Assembly MIPS:

Istruzioni native e Pseudo-istruzioni

Gestione di costanti in MIPS

F. Pedersini
Dipartimento di Informatica
Università degli Studi di Milano

PSEUDO-ISTRUZIONI

Per comodità in ogni Assembly vengono definite alcune pseudoistruzioni

- Significato intuitivo
- Non hanno un corrispondente 1 a 1 con le istruzioni dell'ISA

❖ Vantaggi:

- Parziale standardizzazione del linguaggio Assembly
  - La stessa pseudo-istruzione viene tradotta in modi differenti, per architetture (I.S.A.) differenti
- Rappresentazione più compatta ed intuitiva di istruzioni Assembly comunemente utilizzate
  - La traduzione della pseudo-istruzione nelle istruzioni equivalenti viene attuata automaticamente dall' Assembler

Esempi:

Pseudoistruzione:		Codice MIPS nativo:
`move $t0, $t1` `# t0 ← t1`	➔	`add $t0, $zero, $t1`
`div $s0, $t1, $t2` `# s0 ← t1/t2`	➔	`div $t1, $t2` `mflo $s0`

`muli $s0, $t1, 4`
`# s0 ← t1*4`
	➔	`add $at, $zero, 4`
		`mult $t1, $at`
		`mflo $s0`

`lw $t2, $t3($a0)` `# t2 ← Mem[$a0+$t3]`	➔	`add $at, $a0, $t3` `lw $t2, 0($at)`

`bgti $t2, 5, Label`
`# branch if $t2 > 5`
`# ➔ if not($t2 < 6)`
	➔	`slti $at, $t2, 6`
		`beq $at, $zero, Label`

Utilizzo di costanti in Assembly MIPS

Utilizzo di costanti in Assembly MIPS:

Spesso in un programma si ricorre all'uso di costanti:

- incremento di registri (±1, +4, ...), azzeramento di un registro, ...

In Assembly MIPS sono disponibili 3 opzioni:

- le costanti risiedono in memoria e sono caricate con `lw`
- utilizzo di registri speciali (es: $zero)
- utilizzare istruzioni di tipo I, in cui un operando è una costante: utilizzo di modalità di indirizzamento immediato

Esempi:

```
add $s0, $zero, $zero   # $s0 ← 0 (azzeramento registro)
addi $s0, $s0, 4        # $s0 ← $s0 + 4 (sign-extended)
addi $s0, $s0, -4       # $s0 ← $s0 – 4 (sign-extended)
slti $t0, $s2, 10       # $t0 = 1 if $s2 < 10
li $t0, 10              # $t0 ← 10  (pseudo-istruzione)
```

Gestione di costanti in MIPS

- Le istruzioni di tipo I consentono di rappresentare costanti espresse **su 16 bit:**

	Unsigned:	Signed:
range di rappresentazione:	**$0 \div 65535_{10}$**	**$-32768 \div 32767$**
in esadecimale:	**0x0000 ÷ 0xFFFF**	

- Se 16 bit non sono sufficienti per rappresentare la costante, l'assemblatore (o il compilatore) deve fare due passi:
  1. si utilizza l'istruzione **`lui`** (*load upper immediate*):
     - Carica i 16 bit ALTI della costante nei **16-bit ALTI** di un **registro**.
     - I **16-bit** meno significativi (**BASSI**) del registro sono posti a **zero**.
  2. una successiva istruzione (ad esempio **`ori`** o **`addi`**) specifica i rimanenti 16 bit meno significativi della costante.

- Il registro **`$at (=$1)`** è riservato all'assemblatore per creare costanti su 32-bit.

Istruzione: `lui` (tipo I)

Istruzione **load upper immediate**: **`lui rt, immval`**

- carica i 16-bit del campo immediato nei 16-bit più significativi del registro **`rt`**.
- I rimanenti 16-bit meno significativi del registro **`rt`** sono posti a 0.

Nome campo	op	rs	rt	indirizzo
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	16-bit
`lui $at, 61`	001111	00000	00001	0000 0000 0011 1101

Usata per la pseudo-istruzione: load immediate:

`li rdest, immval`

- carica il valore imm nel registro **`rdest`**.

Assegnamento di costanti a 32 bit

ESEMPIO: *si vuole assegnare la costante 4.000.000$_{10}$ a* ***$s0***:

```
li $s0, 4000000          # carica 4000000 in $s0
```

In binario, su 32 bit:

$4.000.000_{10}$ = 0000 0000 0011 1101 0000 1001 0000 000

In esadecimale:

$4.000.000_{10}$ = 0x 003D 0900 = 61 * 2^{16} + 2304

Quindi:

```
lui $s0, 61              # 61   = 0000 0000 0011 1101
```

valore di **$s0**: 0000 0000 0011 1101 0000 0000 0000 0000

```
addiu $s0, $s0, 2304     # 2304 = 0000 1001 0000 0000
```

valore di **$s0**: 0000 0000 0011 1101 0000 1001 0000 0000 (400,000$_{10}$)

in esadecimale:

```
lui $s0, 0x3D            # 0x3D  = 0000 0000 0011 1101
addiu $s0, $s0, 0x900    # 0x900 = 0000 1001 0000 0000
```


Caricamento costante 32 bit - Esempio 2

ESEMPIO: si consideri la costante: 118345

- decimale: **118345_{10}**
- esadecimale: **0x1CE49**
- binario: **0000 0000 0000 0001** (16-bit più significativi) **1100 1110 0100 1001** (16-bit meno significativi)

HI: 0000 0000 0000 0001 corrispondenti al valore 1_{10}

LO: 1100 1110 0100 1001 corrispondenti al valore 52809_{10}

$$118345 = 1 \times 2^{16} + 52809$$

Si consideri la pseudo-istruzione: **li $t1, 118345**

- L'assemblatore la sostituisce con le seguenti istruzioni-macchina:

```
lui $at, 1              # $at: 0000 0000 0000 0001 0000 0000 0000 0000
ori $t1, $at, 0xCE49    # $t1: 0000 0000 0000 0001 1100 1110 0100 1001
```

Tradurre il seguente frammento di codice: a) in Assembly MIPS nativo e b) in linguaggio macchina (specificando ampiezza in bit e valore dei campi delle istruzioni).

```
bgei $t1, 10, -16    # branch if greater than or equal to 10
divi $s2, $s0, 88    # divide by immediate
```

Si traduca il seguente frammento di codice Assembly MIPS in linguaggio macchina, in formato esadecimale, calcolando prima i valori esadecimali ***N1*** e ***N2*** che permettono di saltare esattamente all'indirizzo indicato in ciascun commento.

```
0x12345678:  beq $s0, $s4, N1    # salta a: 0x12345660
             j N2                # salta a: 0x10203040
```

Assembly MIPS:

Gestione degli array

Strutture di controllo

Memorizzazione di arrays

Gestione di array di parole (di 32 bit / 4 byte):

- L'elemento **i-esimo A[i]** si trova all'indirizzo: `br + 4*i`
  - `br` è il registro base; `i` è l'indice ad alto livello
  - Il registro base punta all'inizio dell'array: primo byte del primo elemento
  - Spiazzamento *4i* per selezionare l'elemento *i* dell'array

Elem. array	parola (word)			
A[0] :	0	1	2	3
A[1] :	4	5	6	7
A[2] :	8	9	10	11
	….			
A[k–2] :				
A[k–1] :	2^k-4	2^k-3	2^k-2	2^k-1

Indirizzo	Cella
$s3 →	A[0]
$s3 + 4 →	A[1]
$s3 + 8 →	A[2]
	…..
$s3 + 4i →	A[i]
	…..

Istruzione MIPS: lw (load word)

In **MIPS** le istruzioni `lw/sw` hanno tre argomenti:

- *registro destinazione*, in cui caricare (da cui prelevare) la parola letta da (da scrivere in) memoria.
- una costante o *spiazzamento (offset)*
- 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 come somma della costante e del contenuto del registro base.
- L'indirizzo è espresso in bytes.

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

Al registro destinazione `$s1` è assegnato il valore contenuto all'indirizzo: `$s2 + 100` della memoria dati.

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

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

Array: accesso con indice costante

Esempio: accesso ad array con indice costante

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
```


Array: accesso con indice variabile

Esempio: accesso ad array con indice variabile

Codice 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`

Array: esempio indirizzamento

L'elemento **i-esimo** dell'array, `A[i]` 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]
```


Uso dei registri: convenzioni

Registri "general purpose" di MIPS32

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

Le strutture di controllo

Strutture di controllo

- Alterano l'ordine di esecuzione delle istruzioni
  - La prossima istruzione da eseguire non è l'istruzione successiva all'istruzione corrente
- Permettono di eseguire **cicli** e valutare **condizioni**
  - In assembly le strutture di controllo sono molto semplici e primitive

Costrutti:

- `if ... then ... else`
- `do ... while, while`
- `for`
- `switch`

Istruzioni di salto condizionato e incondizionato

- Istruzioni di ***salto condizionato (branch)***: il salto viene eseguito solo se una certa condizione risulta soddisfatta.
  - **beq** (*branch on equal*)
  - **bne** (*branch on not equal*)

```
beq r1, r2, L1          # go to L1 if (r1 == r2)
bne r1, r2, L1          # go to L1 if (r1 != r2)
```

- Istruzioni di ***salto incondizionato (jump):*** il salto va sempre eseguito.
  - **j** (jump)
  - **jr** (jump register)
  - **jal** (jump and link)

```
j   L1      # go to L1
jr  r31     # go to add. contained in r31
jal L1      # go to L1, save address of next
            # instruction in ra
```

Struttura: *if ... then*

- Codice C:

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

- Si suppone che le variabili `f, g, h, i e j` siano associate rispettivamente ai registri: `$s0,$s1,$s2,$s3 e $s4`

- La condizione viene trasformata in codice C in:

```
if (i != j) goto Label;
      f=g+h;
Label:
```

- Codice MIPS:

```
       bne $s3, $s4, Label        # go to Label if i≠j
       add $s0, $s1, $s2          # f=g+h (skipped if i ≠ j)
Label: ...
```


Struttura: *if... then ... else*

Codice C:

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

- Si suppone che le variabili `f, g, h, i e j` siano associate rispettivamente ai registri `$s0, $s1, $s2, $s3 e $s4`

Codice MIPS:

```
      bne $s3, $s4, Else       # go to Else if i≠j
      add $s0, $s1, $s2        # f=g+h (skipped if i≠j)
      j   End                  # go to End
Else:
      sub $s0, $s1, $s2        # f=g-h
End:                           # (skipped if i = j)
      ...
```

Struttura: do … while (repeat)

Costrutto do … while()

Codice C:

```
do
   g = g + A[i];
   i = i + j;
while (i != h)
```

- g e h siano associate a $s1 e $s2,
  i e j associate a $s3 e $s4,
  $s5 contenga il *base address* di A

- A[i]: array con indice variabile
  ⇒ devo moltiplicare i per 4 ad ogni iterazione del ciclo per indirizzare il vettore A.

Struttura: do … while (repeat)

Codice C modificato (sfruttando goto):

```
Ciclo:   g = g + A[i];               // g e h → $s1 e $s2
         i = i + j;                  // i e j → $s3 e $s4
         if (i != h) goto Ciclo;     // A[0]  → $s5
```

Codice MIPS:

```
Loop:  muli $t1, $s3, 4      # $t1 ← 4 * i
       add $t1, $t1, $s5     # $t1 ← add. of A[i]
       lw $t0, 0($t1)        # $t0 ← A[i]
       add $s1, $s1, $t0     # g ← g + A[i]
       add $s3, $s3, $s4     # i ← i + j
       bne $s3, $s2, Loop    # goto Loop if i≠h
```

Esempio: *while*

Costrutto: WHILE()

Codice C:

```
while (A[i] == k)
      i = i + j;
```

Codice C modificato:

```
Ciclo:   if (A[i] != k) goto Fine;
         i = i + j;
         goto Ciclo;
Fine:
```

- `i, j e k` siano associate a: `$s3, $s4, $s5`
- `$s6` contenga il *base address* di `A[]`

Esempio: *while*

Codice C modificato:

```
Ciclo:  if (A[i] != k) goto Fine;
        i = i + j;
        goto Ciclo;
Fine:
```

Associazioni variabili → registri:

```
i,j,k  → $s3,$s4,$s5
A[0]   → $s6
```

Codice MIPS:

```
Loop: muli $t1, $s3, 4        # $t1 ← 4 * i
      add  $t1, $t1, $s6      # $t1 ← addr. A[i]
      lw   $t0, 0($t1)        # $t0 ← A[i]
      bne $t0, $s5, Exit      # if A[i]≠k goto Exit
      add $s3, $s3, $s4       # i ← i + j
      j Loop                  # go to Loop
Exit:
```

Condizione: minore/maggiore: slt

Condizioni di disuguaglianza

- MIPS mette a disposizione **branch** solo nel caso uguale o diverso, non maggiore o minore.
  - Spesso è utile condizionare l'esecuzione di una istruzione al fatto che una variabile sia minore di una altra

- Istruzione `slt`:

```
slt $s1, $s2, $s3        # set if less than
```

  - Assegna il valore `$s1 = 1` se `$s2 < $s3`; altrimenti assegna il valore `$s1=0`

- Con `slt`, `beq` e `bne` si possono implementare tutti i test sui valori di due variabili: (=, ≠, <, ≤, >, ≥)

Esempio

Codice C:

```
if (i < j) then
      k = i + j;
else
      k = i - j;
```

Codice C modificato:

```
      if (i < j)    t = 1;
      else          t = 0;

      If (t == 0)
            goto Else;
      k = i + j;
      goto Exit;
Else:
      k = i - j;
Exit:
```

Codice Assembly:

```
#$s0 ed $s1 contengono i e j
#$s2 contiene k

      slt $t0, $s0, $s1
      beq $t0, $zero, Else
      add $s2, $s0, $s1
      j Exit
Else: sub $s2, $s0, $s1
Exit:
```

Ciclo FOR

Ciclo FOR:

Codice C:

```
int i;
int sum = 0;
for(i=0; i<10; i++) {
    sum = sum + A[i];
}
```

- `sum` associata a `$s1`,
  `i` associata a `$t0`,
  `$s5` contenga il *base address* di `A`
- `A[i]`: array con indice variabile
  ⇒ devo moltiplicare `i` per `4` ad ogni iterazione del ciclo per indirizzare il vettore `A`.

Struttura: do … while (repeat)

Codice C modificato (sfruttando `if/goto`):

```
        sum = 0;
        i = 0;
FOR:    if !(i < 10) goto END;
        sum = sum + A[i];
        i = i+1;
        goto FOR;
END;    ...
```

Codice MIPS:

```
        add $s1, $zero, $zero    # sum ← 0
        add $t0, $zero, $zero    # i ← 0
FOR:    slti $at, $t0, 10        # if i<10 → $at←1
        beq $at, $zero, END      # if $at=0 → goto END
        add $s1, $s1, $t0        # sum ← sum + A[i]
        addi $t0, $t0, 1         # i ← i + 1
        j FOR
END:    ...
```

Struttura *switch/case*

Codice C:

```
switch(k)
{
        case 0:     f = i + j; break;
        case 1:     f = g + h; break
        case 2:     f = g - h; break;
        case 3:     f = i - j; break;
        default:    break;
}
```

Implementabile in due modi:

1. Mediante una serie di:

   `if-then-else`

2. Mediante una *jump address table*

   ➢ Tabella che contiene una serie di indirizzi a istruzioni alternative

Struttura switch/case

❖ **Codice C alternativo:**

```
if (k < 0)
        t = 1;
else
        t = 0;
if (t == 1)             // k<0
        goto Exit;
if (k == 0)             // k>=0
        goto L0;
k--; if (k == 0)        // k=1
        goto L1;
k--; if (k == 0)        // k=2
        goto L2;
k--; if (k == 0)        // k=3
        goto L3;
goto Exit;              // k>3
...
```

```
...
L0:     f = i + j;
        goto Exit;
L1:     f = g + h;
        goto Exit;
L2:     f = g - h;
        goto Exit;
L3:     f = i - j;
        goto Exit;

Exit:
```

Struttura switch/case

```
# $s0, .., $s5 contengono f,g,h,i,j,k
        slt $t3, $s5, $zero
        bne $t3, $zero, Exit        # if k<0
# case vero e proprio
        beq $s5, $zero, L0
        subi $s5, $s5, 1
        beq $s5, $zero, L1
        subi $s5, $s5, 1
        beq $s5, $zero, L2
        subi $s5, $s5, 1
        beq $s5, $zero, L3
        j Exit;                     # if k>3
L0:     add $s0, $s3, $s4
        j Exit
L1:     add $s0, $s1, $s2
        j Exit
L2:     sub $s0, $s1, $s2
        j Exit
L3:     sub $s0, $s3, $s4
Exit:   ...
```


Jump address table

Metodo alternativo:

Jump address table

utilizzo il valore della variabile-switch (**k**) per calcolare l'indirizzo di salto:

k	Byte address: **$t4 + 4k**	A[k]
0	**$t4** →	indirizzo di **L0:**
1	**$t4 + 4** →	indirizzo di **L1:**
2	**$t4 + 8** →	indirizzo di **L2:**
3	**$t4 + 12** →	indirizzo di **L3:**

Struttura switch/case

```
        # $s0, .., $s5 contengono f,g,h,i,j,k
        # $t4 contiene lo start address della
        # jump address table (che si suppone parta da k=0)

        # verifica prima i limiti (default)
        slt  $t3, $s5, $zero
        bne  $t3, $zero, Exit
        slti $t3, $s5, 4
        beq  $t3, $zero, Exit
        # case vero e proprio
        muli    $t1, $s5, 4
        add     $t1, $t4, $t1
        lw      $t0, 0($t1)
        jr      $t0        # jump to A[k]
L0:     add $s0, $s3, $s4
        j Exit
L1:     add $s0, $s1, $s2
        j Exit
L2:     sub $s0, $s1, $s2
        j Exit
L3:     sub $s0, $s3, $s4
Exit:   ...
```

Assembly MIPS:

l’ambiente SPIM

Il simulatore SPIM

SPIM: A MIPS R2000/R3000 Simulator

`http://www.cs.wisc.edu/~larus/spim.html`

`http://sourceforge.net/projects/spimsimulator/files/`

version 9.1

- Unix or Linux system / Mac OS/X
- Microsoft Windows (Windows 95, 98, NT, 2000)
- Microsoft DOS

Riferimento:

- Patterson, Hennessy:
  Appendix A (Assemblers, Linkers, and the SPIM Simulator)

SPIM: a MIPS simulator

Cosa simula SPIM?

- CPU MIPS 32
- Memoria
- I/O (terminale alfanumerico)
- Sistema Operativo minimale (gestione I/O e memoria)

Abbiamo bisogno di strumenti per:

- Interfaccia di programmazione (load/save, debugging, monitoring)
- Accesso alle risorse (MEM, I/O) attraverso il sistema operativo

Strumenti:

- Console di controllo
- Direttive
- System calls

SPIM / XSPIM

Comandi principali:

load | read "FILE"
carica un programma in memoria

run
lancia il programma caricato

step <N>
esegue N istruzioni di programma

clear
reset registri o memoria

set value
inserisce valori in registri o memoria

print
stampa valore di registri o memoria

breakpoint, delete
inserisce/toglie breakpoints

help

quit, exit

Register display

```
xspim
PC     - 00000000  EPC - 00000000  Cause - 00000000  BadVaddr - 00000000
Status - 00000000  HI  - 00000000  LO    - 00000000
                         General registers
R0 (r0) - 00000000  R8  (t0) - 00000000  R16 (s0) - 00000000  R24 (t8) - 00000000
R1 (at) - 00000000  R9  (t1) - 00000000  R17 (s1) - 00000000  R25 (s9) - 00000000
R2 (v0) - 00000000  R10 (t2) - 00000000  R18 (s2) - 00000000  R26 (k0) - 00000000
R3 (v1) - 00000000  R11 (t3) - 00000000  R19 (s3) - 00000000  R27 (k1) - 00000000
R4 (a0) - 00000000  R12 (t4) - 00000000  R20 (s4) - 00000000  R28 (gp) - 00000000
R5 (a1) - 00000000  R13 (t5) - 00000000  R21 (s5) - 00000000  R29 (sp) - 00000000
R6 (a2) - 00000000  R14 (t6) - 00000000  R22 (s6) - 00000000  R30 (s8) - 00000000
R7 (a3) - 00000000  R15 (t7) - 00000000  R23 (s7) - 00000000  R31 (ra) - 00000000
                   Double floating-point registers
FP0  - 0.000000  FP8  - 0.000000  FP16 - 0.000000  FP24 - 0.000000
FP2  - 0.000000  FP10 - 0.000000  FP18 - 0.000000  FP26 - 0.000000
FP4  - 0.000000  FP12 - 0.000000  FP20 - 0.000000  FP28 - 0.000000
FP6  - 0.000000  FP14 - 0.000000  FP22 - 0.000000  FP30 - 0.000000
                   Single floating-point registers
```

Control buttons

```
[quit] [load] [run] [step] [clear] [set value]
[print] [breakpt] [help] [terminal] [mode]
```

Text segments

```
                         Text segments
[0x00400000]  0x8fa40000  lw $4, 0($29)             ; 89: lw $a0, 0($sp)
[0x00400004]  0x27a50004  addiu $5, $29, 4          ; 90: addiu $a1, $sp, 4
[0x00400008]  0x24a60004  addiu $6, $5, 4           ; 91: addiu $a2, $a1, 4
[0x0040000c]  0x00041080  sll $2, $4, 2             ; 92: sll $v0, $a0, 2
[0x00400010]  0x00c23021  addu $6, $6, $2           ; 93: addu $a2, $a2, $v0
[0x00400014]  0x0c000000  jal 0x00000000 [main]     ; 94: jal main
[0x00400018]  0x3402000a  ori $2, $0, 10            ; 95: li $v0 10
[0x0040001c]  0x0000000c  syscall                   ; 96: syscall
```

Data and stack segments

```
                         Data segments
[0x10000000] ... [0x10010000]  0x00000000
[0x10010004]  0x74706563  0x206e6f69  0x636f2000
[0x10010010]  0x72727563  0x61206465  0x6920646e  0x726f6e67
[0x10010020]  0x000a6465  0x495b2020  0x7265746e  0x74707572
[0x10010030]  0x0000205d  0x20200000  0x616e555b  0x6e67696c
[0x10010040]  0x61206465  0x65726464  0x69207373  0x6e69206e
[0x10010050]  0x642f7473  0x20617461  0x63746566  0x00205d68
[0x10010060]  0x555b2020  0x696c616e  0x64656e67  0x64646120
[0x10010070]  0x73736572  0x206e6920  0x726f7473  0x00205d65
```

SPIM messages

```
SPIM Version 5.9 of January 17, 1997
Copyright (c) 1990-1997 by James R. Larus (larus@cs.wisc.edu)
All Rights Reserved.
See the file README for a full copyright notice.
```


SPIM / XSPIM – comandi

Da "help" di SPIM:

reinitialize	*-- Clear the memory and registers*
load / read "FILE"	*-- Read FILE of assembly code into memory*
run <ADDR>	*-- Start the program at optional ADDRESS*
step <N>	*-- Step the program for N instructions*
continue	*-- continue program execution without stepping*
print	*-- print value of a register or a memory location*
print $N | $fN	*-- Print register N | floating point register N*
print ADDR	*-- Print contents of memory at ADDRESS*
print_symbols	*-- Print all global symbols*
print_all_regs	*-- Print all MIPS registers*
print_all_regs hex	*-- Print all MIPS registers in hex*
breakpoint <ADDR>	-- Set a breakpoint at address
delete <ADDR>	-- Delete all breakpoints at address
list	-- List all breakpoints
exit, quit	-- Exit the simulator

Abbreviazioni: basta il prefisso unico. **ex(it), re(ad), l(oad), ru(n), s(tep), p(rint)**

Sommario

- Direttive
- Chiamate di sistema (system call)
- Esempi

Rif. bibliografico:

Patterson, Hennessy

Appendix A – Assemblers, Linkers, and the SPIM Simulator

Direttive MIPS

Le direttive danno delle indicazioni all'assemblatore:

- su come/dove memorizzare il programma e i dati in memoria

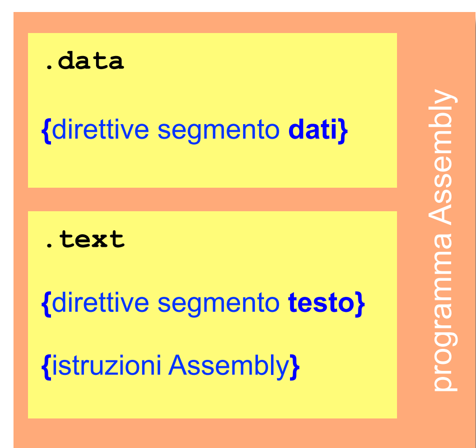
Sintassi: le direttive iniziano con il carattere "."

Classificazione:

- direttive relative al **segmento dati**
- direttive relative al **segmento testo**

Struttura programma Assembly:

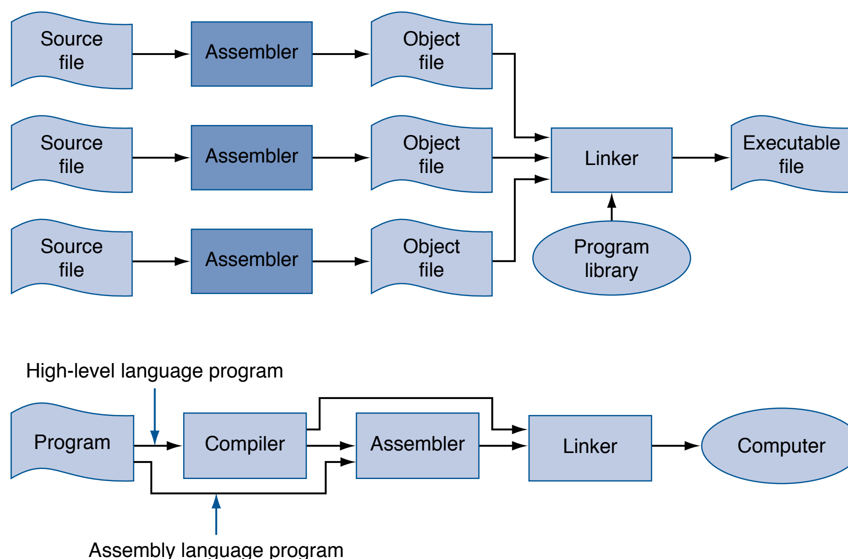
1. **segmento dati:**
   - inizia con la direttiva: `.data`
   - contiene dichiarazioni di variabili e costanti
2. **segmento testo:**
   - inizia con la direttiva: `.text`
   - contiene il programma



Assembler

Assembler: traduttore da Assembly a Object (Assembly nativo)

- Pseudoistruzioni → istruzioni Assembly native
- Simboli (labels) → indirizzi effettivi (eventualmente rilocabili)



Assembler

Assembly: → **ASSEMBLER** → **Assembly nativo:**

```
        .text
        .align    2
        .globl    main
main:
        subu      $sp, $sp, 32
        sw        $ra, 20($sp)
        sd        $a0, 32($sp)
        sw        $0,  24($sp)
        sw        $0,  28($sp)
loop:
        lw        $t6, 28($sp)
        mul       $t7, $t6, $t6
        lw        $t8, 24($sp)
        addu      $t9, $t8, $t7
        sw        $t9, 24($sp)
        addu      $t0, $t6, 1
        sw        $t0, 28($sp)
        ble       $t0, 100, loop
        la        $a0, str
        lw        $a1, 24($sp)
        jal       printf
        move      $v0, $0
        lw        $ra, 20($sp)
        addu      $sp, $sp, 32
        jr        $ra

        .data
        .align    0
str:
        .asciiz   "The sum from 0 .. 100 is %d\n"
```

```
addiu    $29, $29, -32
sw       $31, 20($29)
sw       $4,  32($29)
sw       $5,  36($29)
sw       $0,  24($29)
sw       $0,  28($29)
lw       $14, 28($29)
lw       $24, 24($29)
multu    $14, $14
addiu    $8,  $14, 1
slti     $1,  $8, 101
sw       $8,  28($29)
mflo     $15
addu     $25, $24, $15
bne      $1,  $0, -9
sw       $25, 24($29)
lui      $4,  4096
lw       $5,  24($29)
jal      1048812
addiu    $4,  $4, 1072
lw       $31, 20($29)
addiu    $29, $29, 32
jr       $31
move     $2,  $0
```

Organizzazione logica della memoria

Organizzazione memoria MIPS32
La memoria associata un programma è divisa in tre parti:

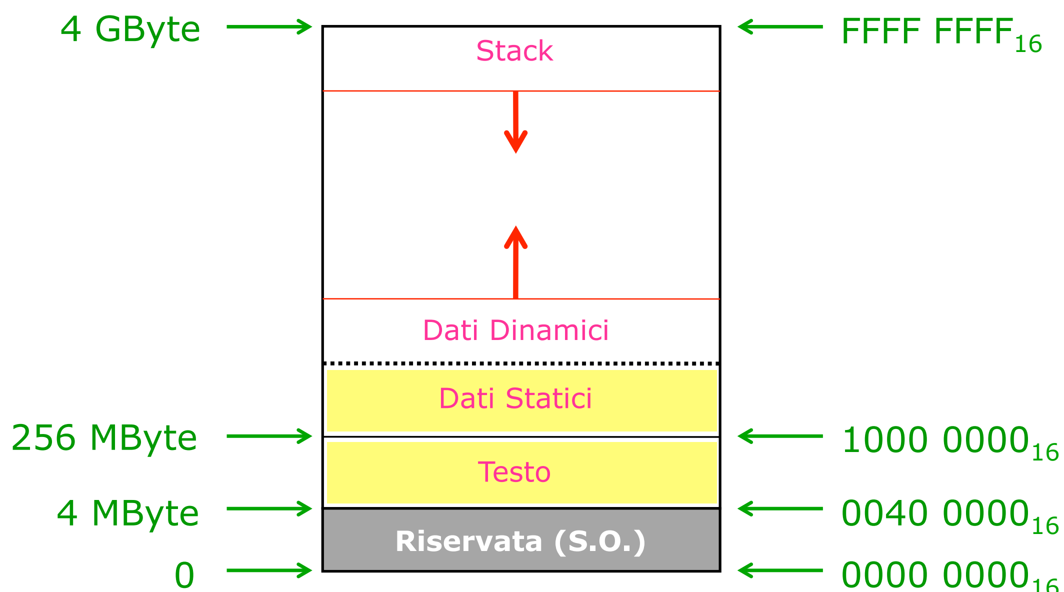
Segmento testo: contiene le **istruzioni del programma**

Segmento dati: contiene i **dati di elaborazione**. Ulteriormente suddiviso in:

- **dati statici:** contiene dati già presenti in memoria (o almeno lo spazio che occupano lo è) al momento della compilazione, e che ci rimangono per tutto il tempo di 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



Direttive

Direttive – segmento dati:

- Definiscono regole di allocazione di dati in memoria

`.data <addr>`

- Gli elementi successivi sono memorizzati nel segmento dati a partire dall'indirizzo **`addr`** (facoltativo)

`.asciiz str`

- Memorizza la stringa **`str`** terminandola con il carattere **`Null (0x00)`**
- `.ascii str` ha lo stesso effetto, ma non aggiunge alla fine il carattere **`Null`**

`.byte b1, ... ,bn`

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

`.word w1, ... ,wn`

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

`.half h1, ... ,hn`

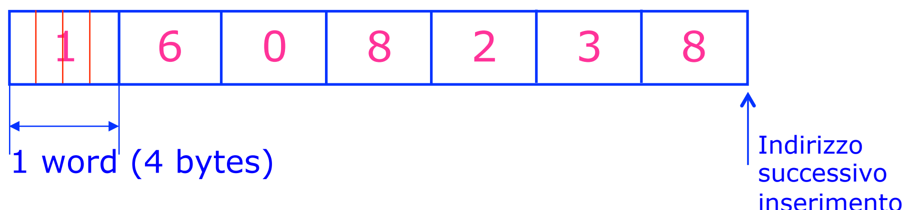
- Memorizza gli **`n`** valori su 16-bit **`h1, .., hn`** in **halfword** (mezze parole) **consecutive** di memoria

`.space n`

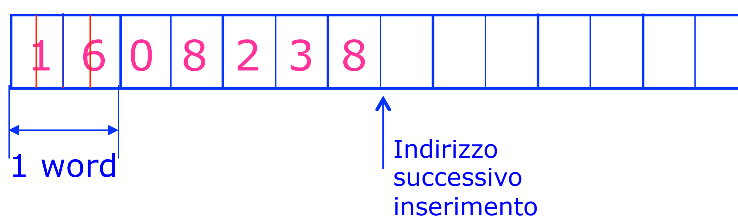
- Alloca uno spazio pari ad **`n`** bytes nel segmento dati

Allineamento: esempio

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

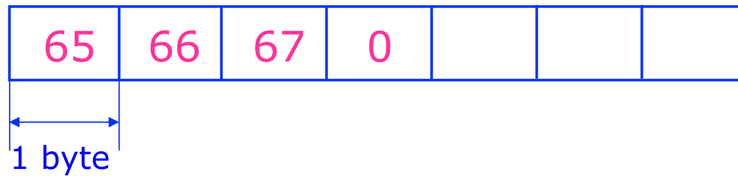


`.half 1, 6, 0, 8, 2, 3, 8`



Allineamento: esempio

.asciiz "ABC"



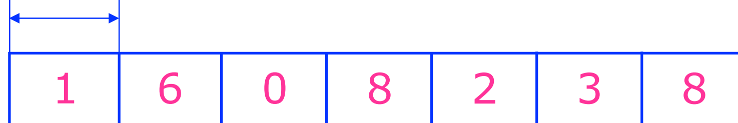
È equivalente a:

```
.byte 65, 66, 67, 0
```


Allineamento: *.word + label*

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

1 word (4 bytes)



Indirizzo successivo inserimento

array – *rappresenta l'indirizzo del primo elemento*

Direttive

(continua) … direttive: segmento **dati**

`.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`, `.double`, fino a quando compare la successiva direttiva `.data`

Direttive – segmento testo:

`.text <addr>`

- Memorizza gli elementi successivi nel segmento testo dell'utente a partire dall'indirizzo `addr`. Questi elementi sono tipicamente istruzioni.

`.globl sym`

- Dichiara `sym` come etichetta globale (ad essa è possibile fare riferimento da altri file)

Sommario

- Direttive
- Chiamate di sistema (system call)
- Esempi

System call

- Sono disponibili delle **chiamate di sistema (`system call`)** predefinite, che implementano i seguenti servizi:
  1. **Accesso** alle periferiche di **I/O** (video (OUT) e tastiera (IN))
  2. **Allocazione dinamica** di memoria dati
  3. **Ritorno al S.O.** a fine programma

- Ogni **`system call`** ha:
  - un codice
  - eventuali argomenti (0, 1 o 2)
  - eventuali valori di ritorno (0 o 1)

System call: *output*

`1: print_int:`

- stampa sulla console il numero intero che le viene passato come argomento;

`2: print_float:`

- stampa sulla console il numero in virgola mobile con singola precisione (IEEE 754) che le viene passato come argomento;

`3: print_double:`

- stampa sulla console il numero in virgola mobile con doppia precisione (IEEE 754) che le viene passato come argomento;

`4: print_string:`

- stampa sulla console la stringa che le è stata passata come argomento terminandola con il carattere **`Null (0)`**;

System call: *input*

`5: read_int:`

- legge una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati) e la interpreta come numero intero (32 bit);

`6: read_float:`

- leggono una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati)
  e la interpreta come numero in virgola mobile – singola precisione (32 bit);

`7: read_double:`

- leggono una linea in ingresso fino al carattere a capo incluso (i caratteri che seguono il numero sono ignorati)
  e la interpreta come numero in virgola mobile – doppia precisione (64 bit);

`8: 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`**);

System call: *controllo*

`9: sbrk`

- alloca in memoria dati un blocco di memoria della dimensione richiesta (**`n`** bytes), restituendo l'indirizzo di inizio blocco;

`10: exit`

- interrompe l'esecuzione del programma;

System calls

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		

System calls

- 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 ÷ $f15`, nel caso di valori in virgola mobile
  - Chiamare la procedura: `syscall`
  - L'eventuale **valore di ritorno** è caricato nel registro `$v0`
    - `$f0`, nel caso di valori in virgola mobile

Sommario

- Direttive
- Chiamate di sistema (system call)
- Esempi

Esempio

```
# Programma che stampa "Dammi un intero: "
# e che legge 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
```

li: *load **immediate***

la: *load **address***

Esempio

```
# 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
```


Esempio

Calcolo somma dei quadrati da 1 a n:

Codice C:

```
int main(int argc, char* argv[])   {
    int i, n=10, t=0;
    for ( i=1; i<=n; i++ )
          t += i*i;
    printf("La somma vale %d\n", t );
    return(0);
}
```

Esempio: codice Assembly

```
# Programma che somma i quadrati dei primi N numeri
# N e' memorizzato in $t1
        .data
str:    .asciiz "La somma vale "
        .text
        .globl main
main:   li      $t1, 10         # N interi di cui calcolare la somma quadrati
        li      $t6, 1          # $t6 e' l'indice di ciclo
        li      $t8, 0          # $t8 conterra` la somma dei quadrati
Loop:   mult    $t6, $t6        #  lo ← $t6 * $t6
        mflo    $t7             # $t7 ← lo
        addu    $t8, $t8, $t7   # $t8 ← $t8 + $t7
        addi    $t6, $t6, 1
        slt     $t0, $t1, $t6           # if NOT ($t6 > N) ...
        beq     $t0, $zero, Loop        # ... then stay in Loop
        la      $a0, str
        li      $v0, 4          # print_string
        syscall
        li      $v0, 1          # print_int
        add     $a0, $t8, $zero
        syscall
        li $v0, 10              # $v0 ← 10 (codice syscall: exit)
        syscall                 # esce dal programma
```


Architettura degli Elaboratori e delle Reti

Assembly MIPS:

Le procedure

Chiamata a procedura: esempio

Procedura chiamante

```
f = f + 1;
if (f == g)
    res = mult(f, g)
else f = f -1;
.........
```

Procedura chiamata

```
int mult (int p1, int p2) {
    int out
    out = p1 * p2;
    return out;
}
```

Cosa succede alla chiamata (ed al ritorno)?

1. **Cambio di flusso**
2. **Passaggio informazioni**

Come si fa in Assembly?

Chiamata a procedura

Due ***attori:*** **chiamante** e **chiamata**

La procedura **chiamante** (**caller**) deve:

1. Predisporre i parametri di ingresso in un posto accessibile alla procedura chiamata
2. Trasferire il controllo alla procedura chiamata

La procedura **chiamata** (**callee**) deve:

1. Allocare lo spazio di memoria necessario all'esecuzione ed alla memorizzazione dei dati: → **record di attivazione**
2. Eseguire il compito richiesto
3. Memorizzare il risultato in un luogo accessibile alla procedura chiamante
4. Restituire il controllo alla procedura chiamante

Chiamata a procedura: `jal`

Necessaria un'istruzione apposita che:

1. **cambia il flusso** di esecuzione (salta alla procedura) e
2. salva **l'indirizzo di ritorno** (istruzione successiva alla chiamata a procedura)

`jal (jump and link)`

Sintassi: `jal Indirizzo_Procedura`

1. Salta all'indirizzo con etichetta `Indirizzo_Procedura`
2. Memorizza il **valore corrente del Program Counter** in `$ra`
   ➔ indirizzo dell'istruzione successiva: **$(Program Counter) + 4**

- **La procedura chiamata**, come **ultima istruzione**, esegue: `jr $ra` per effettuare il salto all'indirizzo di ritorno della procedura

Procedure foglia

Procedure ANNIDATE:
procedure che sono sia **chiamate** che **chiamanti**

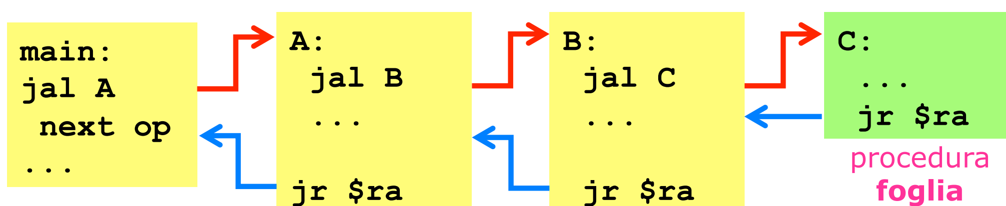
Procedura foglia: è una procedura che non ha annidate al suo interno chiamate ad altre procedure → solo **chiamata**

Non è necessario salvare `$ra`, perché nessun altro lo modifica

NON sono procedure foglia:

- Procedure che chiamano altre sotto-procedure
- Procedure annidate, Procedure recursive

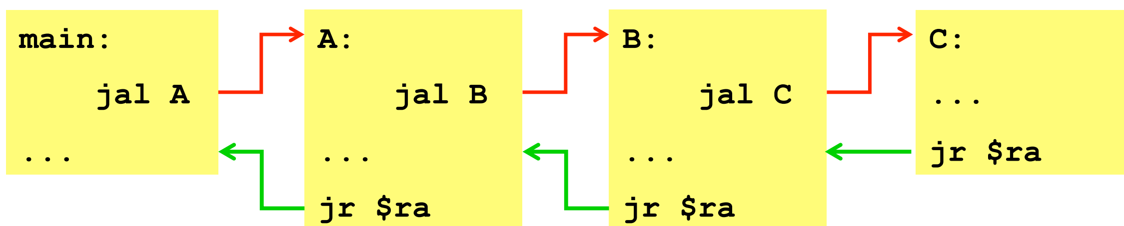
E' necessario salvare `$ra`, perchè la procedura chiamata lo modifica a sua volta!



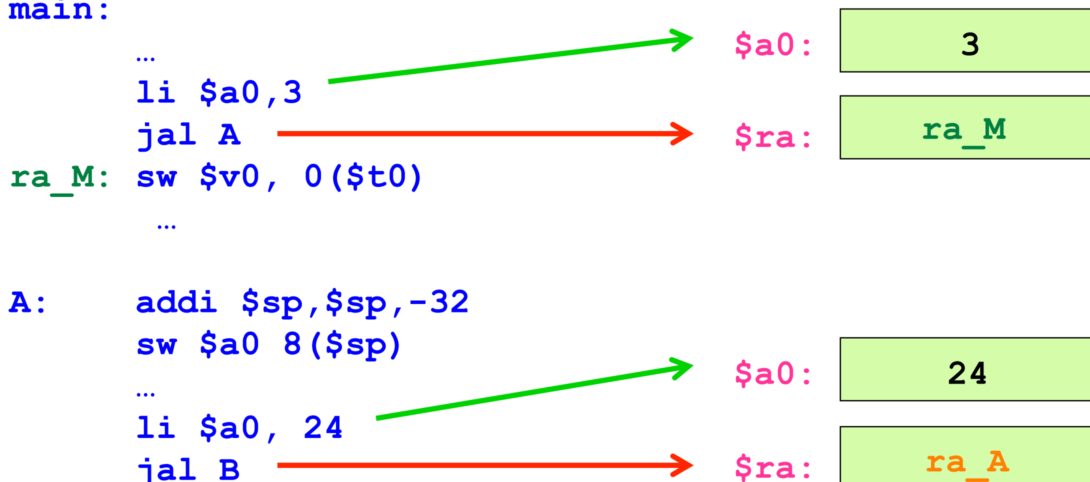
Procedure annidate: esempio

```
main:   ...
        li $a0, 3
        jal A
ra_M:   sw $v0, 0($t0)

A:      addi $sp,$sp,-32
        sw $a0 8($sp)
        ...
        li $a0, 24
        jal B
ra_A:   sw $v0,4($t2)
        add $a0, $s0, $a0
        ...
        addi
        $sp,$sp,32
        jr $ra
```

```
B:      addi $sp,$sp,-24
        ...
        li $a0, 68
        jal C
ra_B:   sw $v0,0($t3)
        ...
        jr $ra

C:      addi $sp,$sp,-12
        ...
        move $a0, $s4
        sw $v0, 4($t2)
        ...
        jr $ra
```



Procedure annidate



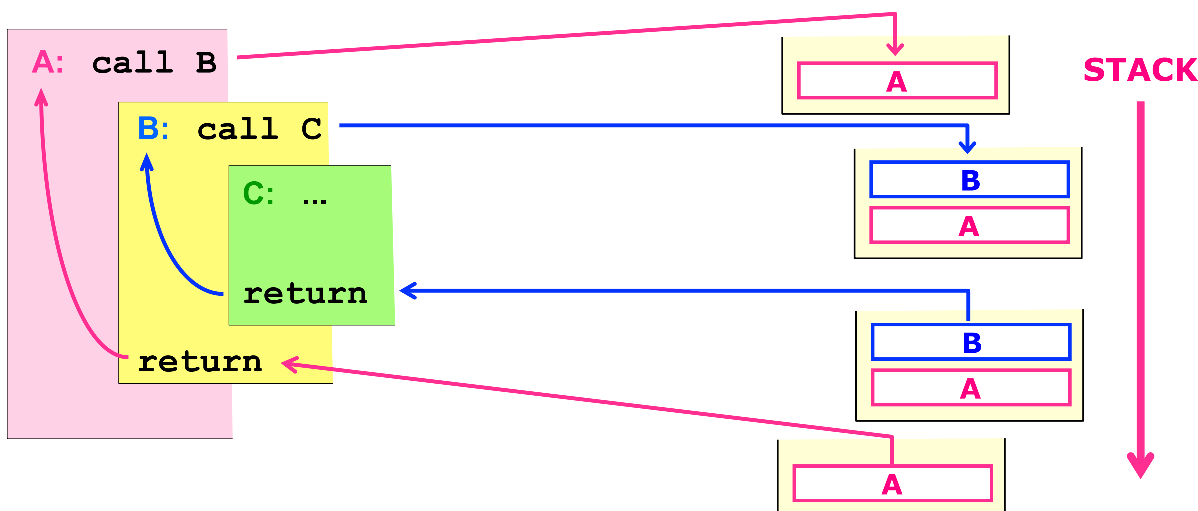
Procedure annidate

```
B:     addi $sp,$sp,-24
       …
       li $a0, 68
       jal C
ra_B:  sw $v0,0($t3)
       …
       jr $ra

C:     addi $sp,$sp,-12
       …
       add $a0, $s4, $zero
       sw $v0, 4($t2)
       …
       jr $ra
```

$a0:	68
$ra:	ra_B

$a0:	$s4
$ra:	ra_B

Gestione dello stack per ritorno da procedure

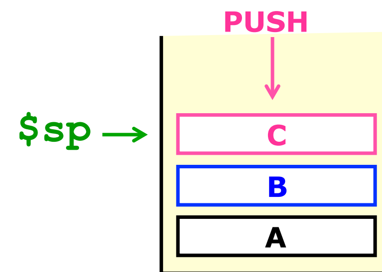


- Gestione automatica dello STACK:
  - Stack gestito automaticamente dall'architettura, mediante circuiti dedicati nella CPU (es. DEC VAX)
- MIPS: gestione manuale dello STACK:
  - Implementata secondo convenzioni software

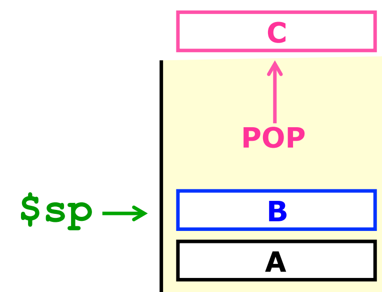
Lo stack

Lo stack:

- Struttura dati: **coda LIFO** (*last-in-first-out*)
- Inserimento dati nello stack: ***PUSH***
- Prelievo dati dallo stack: ***POP***



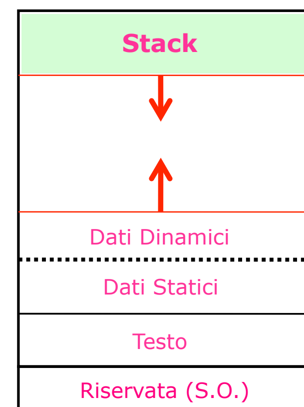
- Necessario un puntatore alla cima dello stack per salvare i dati
  - Il registro **$sp** (**stack pointer** – puntatore allo stack) contiene l'indirizzo della cima dello stack (Top of Stack, TOS)
  - **$sp** deve essere aggiornato ogni volta che viene inserito o estratto un dato dallo stack



Gestione dello *stack* in *MIPS*

Lo stack in MIPS:

- Ospitato nella zona più alta della memoria
- Lo stack cresce da indirizzi di memoria alti verso indirizzi bassi
- Il registro **$sp** contiene l'indirizzo della prima locazione libera in **cima allo stack**



- Inserimento di un dato nello stack – **PUSH:**
  - Si decrementa **$sp** per allocare lo spazio per una parola e
  - Si esegue **sw** per inserire il dato nello stack
- Prelevamento di un dato dallo stack – **POP:**
  - Si esegue **lw** per recuperare la parola dallo stack
  - Si incrementa **$sp** (per eliminare il dato), riducendo la dimensione dello stack.

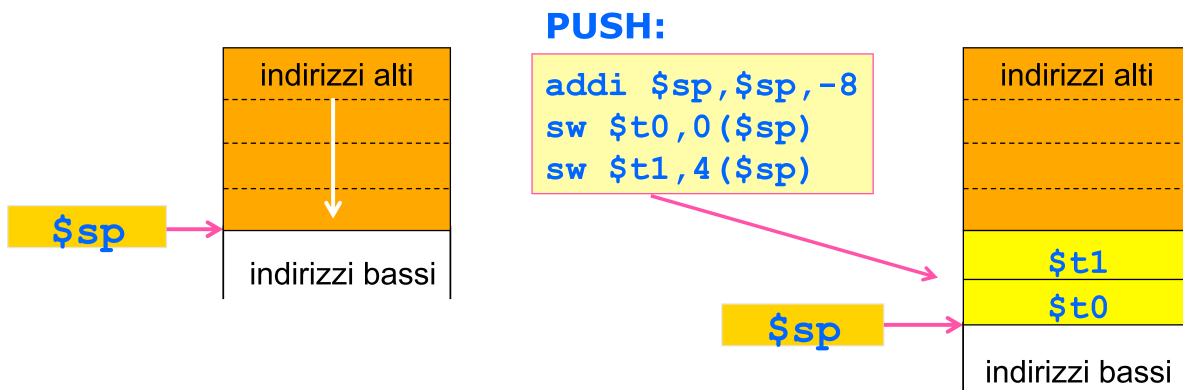
Gestione dello stack MIPS

PUSH: per inserire elementi nello stack

```
sw $t0, offset($sp)  # Salvataggio di $t0
```

POP: per recuperare elementi dallo stack

```
lw $t0, offset($sp)  # Ripristino di $t0
```



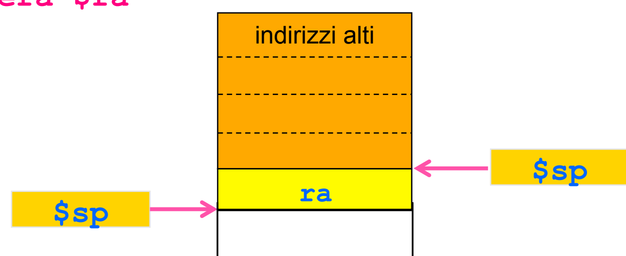
Gestione procedure NON foglia

- **All'inizio della procedura**, il record di attivazione viene **allocato** decrementando **$sp (PUSH)**

```
addi $sp, $sp, -4     # alloca 4 byte nello stack
sw $ra, 0($sp)        # salva $ra
```

- **Al termine dalla procedura**, il record di attivazione viene **rimosso** incrementando **$sp** della stessa quantità **(POP)**

```
addi $sp, $sp, +12    # dealloca 4 byte
lw $ra, 0($sp)        # recupera $ra
```



Allocazione dei registri

Convenzioni per l'allocazione dei registri:

- **`$ra`** **return address**
  - registro per memorizzare l'indirizzo della prima istruzione del chiamante, da eseguire al termine della procedura
- **`$a0÷$a3 ($f12÷$f15)`** registri **argomento**
  - usati dal chiamante per il passaggio dei parametri
  - Se i parametri sono più di 4, si usa la memoria (stack)
- **`$v0,$v1 ($f0÷$f3)`** registri **valore**
  - usati dalla procedura per memorizzare i valori di ritorno

Record di attivazione

La procedura chiamata usa gli stessi registri usati dal chiamante.
Al ritorno, la chiamante trova registri modificati!!

- **Record di attivazione (MIPS):**
  tutto lo **spazio nello stack** di cui ha bisogno una procedura.
  - ASSEMBLY: lo spazio per memorizzare il record di attivazione viene *esplicitamente* allocato dal programmatore
- *Quando si chiama una procedura **i registri utilizzati dal chiamato** vanno:*
  - salvati nello stack
  - ripristinati alla fine dell'esecuzione della procedura

Convenzioni chiamate a procedura

Sintesi convenzioni di chiamata a procedura:

- Il programma **chiamante**:
  - Inserisce i parametri da passare alla procedura nei **registri argomento**: `$a0-$a3`
  - Salta alla procedura mediante l'istruzione `jal address` e salvare il valore di `(PC+4)` nel registro `$ra`

- La procedura **chiamata**:
  - Esegue il compito richiesto
  - Memorizza il risultato nei registri `$v0,$v1`
  - Restituisce il controllo al chiamante con l'istruzione `jr $ra`

Procedure annidate

Procedure **annidate** = procedure ***"non foglia":***
procedure che richiamano altre procedure

- Devono salvare nello stack:
  - l'indirizzo di ritorno (MIPS: registro 31: `$ra`)
  - gli argomenti di input alla procedura: `$a0÷$a3`
    - Se la procedura chiamata richiede parametri, i registri `$a0÷$a3` potrebbero venire riscritti.
  - Il record di attivazione:
    (indirizzo di ritorno, variabili locali non temporanee, ecc.)

Procedure annidate (non-foglia)

Da gestire esplicitamente in procedure annidate:

1. Modificare e poi ripristinare i valori-argomento (contenuti nei registri: `a0÷a3`)

❖ Soluzione: salvo `$a0÷$a3` nello **stack**

1. **Prima** della chiamata (`jal`) , salvo `$a0÷$a3` nello stack (**PUSH**)
2. Chiamata/e a procedura: `jal...`
3. **Dopo** tutte le chiamate, recupero `$a0÷$a3` dallo stack (**POP**)

2. Ripristinare l'indirizzo di ritorno dopo le chiamate (contenuto del registro: `ra`)

❖ Soluzione: salvo `$ra` nello **stack:**

1. **Prima** della chiamata (`jal`) , salvo `$ra` nello stack (**PUSH**)
2. Chiamata/e a procedura: `jal...`
3. **Dopo** tutte le chiamate, recupero `$ra` dallo stack (**POP**)

MIPS: gestione Record di Attivazione

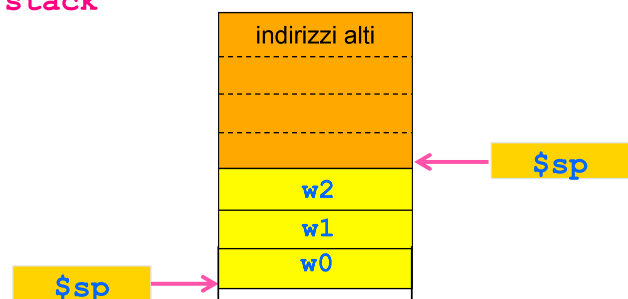
❖ **All'inizio della procedura**, il record di attivazione viene **allocato** decrementando **$sp** **(PUSH)**

```
addi $sp, $sp, -12     # alloca 12 byte
                       # nello stack
```

❖ **Al termine dalla procedura**, il record di attivazione viene **rimosso** incrementando **$sp** della stessa quantità **(POP)**

```
addi $sp, $sp, +12     # dealloca 12 byte
                       # dallo stack
```

❖ Tale spazio esiste soltanto **durante l'esecuzione** della procedura.



Esempio

Codice C:

```
int somma_algebrica (int g, int h, int i, int j)
{
        int f;

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

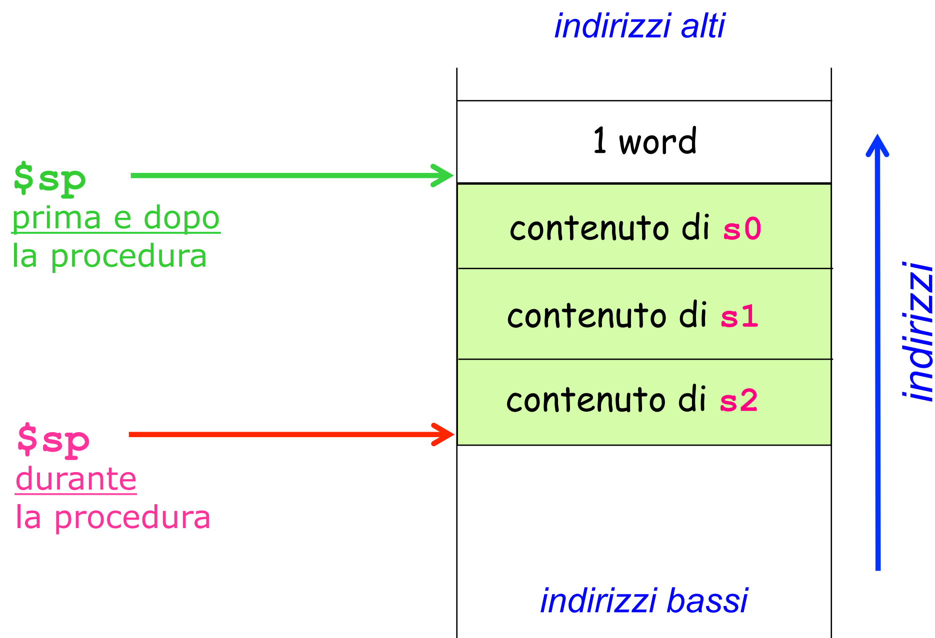
Assembly:

```
# g,h,i,j associati a $a0 … $a3, f associata ad $s0
# Il calcolo di f richiede 3 registri: $s0, $s1, $s2
# E’ necessario salvare i 3 registri nello stack

Somma_algebrica:
        addi $sp,$sp,-12      # alloca nello stack
                              # lo spazio per i 3 registri
        sw $s0, 8($sp)        # salvataggio di $s0
        sw $s1, 4($sp)        # salvataggio di $s1
        sw $s2, 0($sp)        # salvataggio di $s2
```


Esempio (cont.)

```
add $s0, $a0, $a1          # $s0 ← g + h
add $s1, $a2, $a3          # $s1 ← i + j
sub $s2, $s0, $s1          # f ← $s0 - $s1

add $v0, $s2, $zero        # restituisce f copiandolo
                           # nel reg. di ritorno $v0

# ripristino del vecchio contenuto dei registri
# estraendoli dallo stack

lw $s2, 0($sp)             # ripristino di $s2
lw $s1, 4($sp)             # ripristino di $s1
lw $s0, 8($sp)             # ripristino di $s0

addiu $sp, $sp, 12         # deallocazione dello stack
                           # per eliminare 3 registri

jr $ra                     #ritorno al prog. chiamante
```

Esempio (cont.)



MIPS: convenzioni di salvataggio registri

Convenzioni d'uso dei Registri

per evitare di salvare inutilmente i registri, sono divisi in due classi:

Registri <u>temporanei</u>:

`$t0, …, $t9 ($f4...$f11, $f16...$f19)`

- il cui contenuto **non è salvato dal chiamato** nello stack (viene salvato dal chiamante se serve);

Registri <u>non-temporanei</u>:

`$s0, …, $s8 ($f20, …, $f31)`

- il cui contenuto è **salvato dal chiamato** nello stack **se utilizzato**

Si può eliminare il salvataggio dei registri `$s0` e `$s1`, utilizzando al loro posto i registri `$t`, ed eliminare l'utilizzo del registro `$s2`:

```
sub $s2, $s0, $s1    # f ← $t0 - $t1
```

può diventare:

```
sub $v0, $t0, $t1
```

Sintesi

- **Tutte** le procedure → il **chiamante** salva nello stack:
  - I registri temporanei di cui vuole salvare il contenuto di cui ha bisogno dopo la chiamata `($t0-$t9,...)`
  - I registri argomento `($a0-$a3,...)` nel caso in cui il loro contenuto debba essere preservato.
- Procedure **foglia** → il **chiamato** salva nello stack:
  - I registri non temporanei che vuole utilizzare `($s0-$s8)`
  - Strutture dati locali (es: array, matrici) e variabili locali della procedura che non stanno nei registri.
- Procedure **non-foglia** → il **chiamato** salva nello stack anche:
  - I registri argomento della procedura,
  - `$ra ($fp)`

Sintesi

Record di attivazione:
spazio **privato di ogni istanza** di una procedura

- Ospitato nello STACK, utilizzato per memorizzare:
  - Return Address (`$ra`) (tranne le procedure FOGLIA)
  - Valori precedenti dei registri (variabili locali del chiamante)
  - Valori di registri locali, da proteggere (variabili locali)
- Il programmatore Assembly deve provvedere esplicitamente ad allocare/cedere lo spazio nello stack
- Nelle chiamate di procedura annidate, i record di attivazione vengono via via allocati e rimossi dallo stack.

Struttura di una procedura

Ogni procedura è in genere composta dalle 3 SEZIONI consecutive:

1. Prologo

- **Acquisire spazio nello STACK** per memorizzare i dati interni alla procedura ed il salvataggio dei registri
- **Salvataggio** dei registri di interesse (**record di attivazione**)

2. Corpo

- Esecuzione della procedura vera e propria
- Porre il/i risultato/i dove se li aspetta il programma chiamante (**registri valore**)

3. Epilogo

- **Ripristino** dei registri di interesse
- **Liberare lo spazio nello STACK** allocato nel prologo
- Restituzione del controllo alla procedura chiamante (`jr $ra`)

Struttura di una procedura: *prologo*

- Determinazione della dimensione del record di attivazione
  - Stimare lo spazio per: `$ra`, registri da salvare, argomenti, variabili locali
- Allocazione dello spazio in stack: aggiornamento valore di `$sp`:

```
addi $sp, $sp, -dim_record_attivaz
# lo stack pointer viene decrementato
# della dimensione del record di attivazione
```

- Salvataggio dei registri di interesse nello stack:

```
sw reg,[dim_record_attivaz-N]($sp)
```

`N` viene incrementato di 4 ad ogni salvataggio (`N ≥ 4`)

Esempio: record di attivazione: 3 registri → **12 byte**

```
addi $sp,$sp,-12
sw $s0, 8($sp)   # dim_record_attivazione - 4
sw $s1, 4($sp)   # dim_record_attivazione - 8
sw $s2, 0($sp)   # dim_record_attivazione - 12
```

Struttura di una procedura: **epilogo**

Struttura epilogo:

- Restituzione dei parametri della procedura
  - dai registri valore (**$v0,$v1** e/o stack)
- Ripristino dei registri dallo stack
  - registri di interesse e **$ra** per procedure non–foglia

```
lw reg, [dim_record_attivaz-N]($sp)
```

- Liberare lo spazio nello stack in cui sono stati memorizzati i dati locali.

```
addi $sp, $sp, dim_record_attivaz.
```

- Trasferire il controllo al programma chiamante:

```
jr $ra
```


Esempio: estrazione da array

Esempio: programma che, tramite una procedura, copia gli interi positivi contenuti nell'array (`elem`) in un secondo array (`pos_el`)

Convenzioni passaggio informazioni:

Argomenti:

- la procedura si aspetta:
  - posizione inizio array **elem** → **$a0**
  - posizione inizio array **pos_el** → **$a1**
  - dimensione (in byte) array **elem** → **$a2**

Valori di ritorno:

- il chiamante si aspetta:
  - dimensione (in byte) array **pos_el** → **$v0**

- Algoritmo:
  1. Inizializzazione
  2. Leggi gli interi
  3. Individua gli interi positivi
  4. Copia gli interi positivi
  5. Stampa gli interi positivi

Esempio – Versione in linguaggio C

```
main()
{
       int i, k = 0, N=10, elem[10], pos_el[10];

       elem = leggi_interi(N);

       for (i=0; i<N;i++)
              if (elem[i] > 0)
              {
                     pos_el[k] = elem[i];
                     k++;
              }
       printf("Il numero di interi positivi e' %d",k);
       for (i=0; i<k; i++)
              printf(" %d",pos_el[i]);
       exit(0);
}
```


Esempio – estrazione di numeri positivi

```
# Programma che copia tramite una procedura gli interi positivi
# contenuti nell'array (elem) in un secondo array (pos_el)
        .data
elem:   .space 40             # alloca 40 byte per array elem
pos_el: .space 40             # alloca 40 byte per array pos_el
prompt: .asciiz "Inserire il successivo elemento \n"
msg:    .asciiz "Gli elementi positivi sono \n"

        .text
        .globl main

main:   la $s0, elem          # $s0 ← indirizzo di elem.
        la $s1, pos_el        # $s1 ← indirizzo di pos_el
        li $s2, 40            # $s2 ← numero di elementi (in byte)

# Ciclo di lettura dei 10 numeri interi
        add $t0, $s0, $zero   # $t0 ← indice di ciclo
        add $t1, $t0, $s2     # $t1 ← posizione finale di elem

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

Esempio (cont.)

```
# Lettura dell'intero
        li $v0, 5               # $v0 ← codice della read_int
        syscall                 # legge l'intero e lo carica in $v0

        sw $v0, 0($t0)          # memorizza l'intero in elem
        addi $t0, $t0, 4
        bne $t0, $t1, loop

# Fine della lettura, ora prepara gli argomenti per la proc.
        add $a0, $s0, $zero     # $a0 ← ind. array elem.
        add $a1, $s1, $zero     # $a1 ← ind. array pos_el
        add $a2, $s2, $zero     # $a2 ← dim. in byte dell'array

# Chiamata della procedura cp_pos
        jal cp_pos              # restituisce il numero di byte
                                # occupati dagli interi pos in $v0
```


Esempio (cont.)

```
# Stampa num. elementi positivi
        add $t1, $v0, $zero     # $t1 ← n. elementi pos_el x 4
        add $t2, $s1, $v0       # $t2 ← indirizzo fine array pos_el
        add $t0, $s1, $zero     # $t0 ← indirizzo base array pos_el

        li $v0, 4               # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, msg             # $a0 ←  indirizzo della stringa "msg"
        syscall                 # print_string: stringa "msg"

        li $v0, 1
        divi $a0, $t1, 4        # $a0 ← N
        syscall                 # print_int

# Ciclo di stampa degli elementi positivi
loop_w:
        beq $t2, $t0, exit
        li $v0, 1               # $v0 ← codice della print_integer
        lw $a0, 0($t0)          # $a0 ← intero da stampare
        syscall                 # stampa dell'intero
        addi $t0, $t0, 4
        j loop_w

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

Esempio (procedure)

```
# Questa procedura esamina l'array elem ($a0) contenente
# $a2/4 elementi
# Resituisce in $v0, il numero di byte occupati dagli interi
# positivi e in pos_el gli interi positivi

cp_pos: addi $sp, $sp, -16     # allocazione dello stack
        sw $s0, 0($sp)
        sw $s1, 4($sp)
        sw $s2, 8($sp)
        sw $s3, 12($sp)

        add $s0, $a0, $zero    # $s0 ← ind. inizio array elem
        add $s1, $a0, $a2      # $s1 ← ind. fine array elem
        add $s2, $a1, $zero    # $s2 ← ind. inizio array pos_el
```

Spazio privato della funzione **cp_pos**:
registri: $s0, $s1, $s2, $s3
➔ *li salvo nello STACK*

Esempio (procedure)

```
next:   beq $s1, $s0, exit_f   # se esaminato tutti gli elementi di elem
                               # salta alla fine del ciclo (exit).
        lw $s3, 0($s0)         # carica l'elemento da elem
        addi $s0, $s0, 4       # posiziona sull'elemento succ. di elem
        ble $s3, $zero, next   # se $s3 ≤ 0 va all'elemento succ. di elem
        sw $s3, 0($s2)         # Memorizzo il numero in pos_elem
        addi $s2, $s2, 4       # posiziona sull'elemento succ. di pos_el
        j next                 # esamina l'elemento successivo di elem

exit_f: sub $v0, $s2, $a1      # salvo lo spazio in byte dei pos_el

        lw $s0, 0($sp)
        lw $s1, 4($sp)
        lw $s2, 8($sp)
        lw $s3, 12($sp)
        addi $sp, $sp, +16     # deallocazione dello stack

        jr $ra                 # restituisce il controllo al chiamante
```

Assembly MIPS: procedure recursive

Procedure ricorsive

Procedure recursiva:
procedure annidata, che **contiene chiamate a se stessa.**

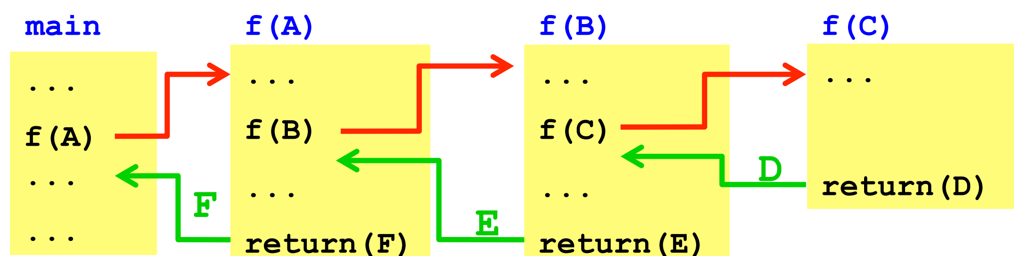
Problema:
tutte le variabili locali (registri) sono condivise tra le istanze di chiamata

Soluzione: salvare nello stack:

- L' indirizzo di ritorno
- I parametri di input della procedura

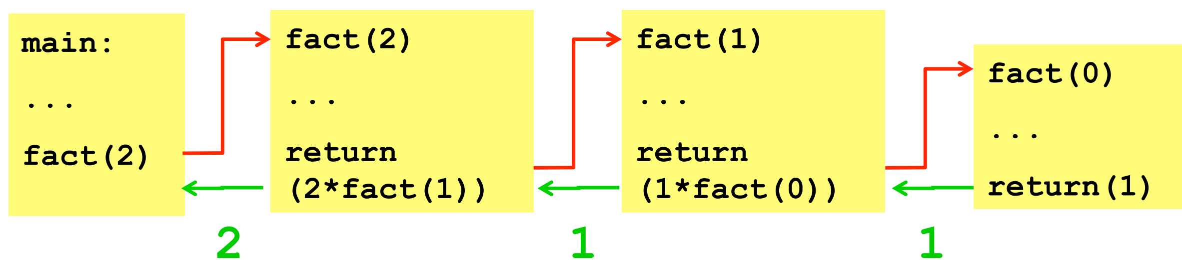
...e in più: le variabili di lavoro del record di attivazione

- **Le variabili** di lavoro (anche i risultati intermedi, se a cavallo della chiamata!)



Fattoriale: esempio di calcolo

- Fattoriale: **n! = 1·2·3· … (n–1)·n**
- in forma recursiva: **n! = n · (n–1)!** (ponendo: 0! = 1)
- La procedura: `fact(n)` viene invocata `n+1` volte
  - n+1 record di attivazione della stessa procedura:



Procedure ricorsive: Fattoriale

codice C:

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

int fact(int m)
{
  if (m > 0)
       return( m * fact(m-1) );
   else
       return(1);
}
```

Fattoriale (implementazione Assembly)

```
# Programma per il calcolo ricorsivo di n!
#
        .data

prompt: .asciiz "Inserire un numero intero:"
output: .asciiz "Fattoriale:"

        .text
        .globl main

main:

# Lettura dell'intero di cui si calcola il fattoriale
#
        li $v0, 4       # $v0 ← codice della print_string
        la $a0, prompt  # $a0 ← indirizzo della stringa
        syscall         # stampa della stringa

        li $v0, 5       # $v0 ← codice della read_int
        syscall         # legge l'intero n e lo carica in $v0
```


Fattoriale (cont.)

```
# Calcolo del fattoriale
   add $a0, $v0, $zero          # $a0 ← n
   jal  fact                    # chiama fact(n)
   add $s0, $v0, $zero          # $s0 ← n!

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

   add $a0, $s0, $zero          # $a0 ← n!
   li $v0, 1                    # $v0 ← codice della print_int
   syscall                      # stampa n!

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

Fattoriale (procedura)

```
# Procedura fact: calcolo del fattoriale di n
#     argomenti:    n (in $a0)    restituisce: n! (in $v0)

fact:
    addi $sp, $sp,-8        # alloca stack
    sw   $ra, 4($sp)        # salvo return address
    sw   $a0, 0($sp)        # salvo l'argomento n

    bgt  $a0, $zero, core   # se n > 0 salta a core
    li   $v0, 1             # $v0 ← 1
    j    end

core:
    addi $a0, $a0, -1       # decremento n → (n-1)
    jal  fact               # chiama fact(n-1) in $v0

    lw   $a0, 0($sp)        # ripristino n in $a0
    mul  $v0, $a0, $v0      # ritorno n * fact (n-1)

end:
    lw   $ra, 4($sp)        # ripristino return address
    addi $sp, $sp, 8        # dealloca stack
    jr   $ra                # ritorno al chiamante
```


Fattoriale (procedura)

```
fact:
    addi $sp, $sp,-8            # alloca stack
    sw   $ra, 4($sp)            # salvo return address
    sw   $a0, 0($sp)            # salvo l'argomento n

    bgt  $a0, $zero, core       # se n > 0 salta a core
    li   $v0, 1                 # $v0 ← 1
    j    end

core:
    addi $a0, $a0, -1           # decremento n → (n-1)
    jal  fact                   # chiama fact(n-1) in $v0
-------------------------------------------------------------
    lw   $a0, 0($sp)            # ripristino n in $a0
    mul  $v0, $a0, $v0          # ritorno n * fact (n-1)

end:
    lw   $ra, 4($sp)            # ripristino return address
    addi $sp, $sp, 8            # dealloca stack
    jr   $ra                    # ritorno al chiamante
```

Osservazioni

- Gli elementi interessati dalla ricorsione sono:
  - i registri `$a0` e `$ra`
- L'esecuzione è suddivisa in:
  - **ciclo superiore**
    da inizio procedura a: `jal fact`
  - **ciclo inferiore**
    da dopo: `jal fact` a fine procedura
- **A "cavallo" di** `jal fact` posso trovare i registri modificati dalle altre chiamate!
  - Se voglio evitare sorprese, li devo salvare nello stack
  - Se utilizzo risorse **solo prima** o **solo dopo** `jal` (**non a cavallo**), non c'è bisogno di salvarle.
- Cosa fa lo stack?
  - lo stack cresce nel ciclo superiore e decresce nel ciclo inferiore.

Calcolo serie di Fibonacci (implem. C)

Serie di Fibonacci: $fib(n) = fib(n-1) + fib(n-2)$

$fib(0) = 0, \quad fib(1) = 1$

Codice C:

```
main(int argc, char *argv[])
{
        int n;
        printf(”Inserire un intero\n");
        scanf("%d", &n);
        printf(”Numero di Fibonacci di %d = %d\n", n, fib(n) );
}

int fib(int m)
{
        if (m == 1)
                return(1);
        else if (m == 0)
                return(0);
        else
                return( fib(m-1) + fib(m-2) );
}
```

Fibonacci (Assembly – main)

```
# Programma per il calcolo ricorsivo del Numero di
# Fibonacci.
                .data

prompt:         .asciiz "Inserire un numero intero: \n"
output:         .asciiz "Numero di Fibonacci: "

                .text
                .globl main
main:
                li $v0, 4
                la $a0, prompt
                syscall         # stampa la stringa

                li $v0, 5
                syscall         # legge l'intero

                ...
```


Fibonacci (cont. main)

```
...

# calcola fibonacci(n)
move $a0, $v0
jal  fib

# salva il valore restituito da fib in t0
move $a1, $v0

# stampa il risultato
li $v0, 4
la $a0, output
syscall

move $a0, $a1
li $v0, 1
syscall

li $v0, 10    # esci
syscall
```

Fibonacci – procedura: *fib( )*

```
# Fibonacci(n): legge in $a0 il numero n; restituisce in $v0 fib(n)
fib:    addi $sp, $sp, -12
        sw   $ra, 8($sp)
        sw   $a0, 4($sp)       # salva i parametri in input
        sw   $a1, 0($sp)       # salva il risultato della precedente fib()

        li   $t0, 1
        bgt  $a0, $t0, core    # se n>1, continua, altrimenti restituisci n
        add $v0, $a0, $zero    # se n=0 o n=1: fib(n)=n.
        j    return

core:   addi $a0, $a0,-1       # n → n-1
        jal  fib               # chiama fib(n-1)
        add $a1, $v0, $zero    # salva fib(n-1) in a1
                               # non recupero $a0 perché preservato!
        addi $a0, $a0,-1       # $a0 diventa: n-2
        jal  fib               # esegue fib(n-2)
                               # non recupero $a0 perché preservato!
        add  $v0, $v0, $a1     # somma  fib(n-1) e fib(n-2)

return: lw $ra, 8($sp)
        lw $a0, 4($sp)
        lw $a1, 0($sp)
        addi $sp, $sp, +12
        jr $ra
```


Esempio - Numeri primi – bozza in C

```
main(int argc, char *argv[])
{
    int primes_test = [1 2 3 5 7 11 13 17 19 23];
    int primes[10], n_primes, n_primes_test = 10, i;

    printf("Inserire un intero\n"); scanf("%d", &n);
    printf("I numeri primi sono: ");

    [n_primes primes] = find_primes( n, n_primes_test, primes_test, primes);

    for (i=0; i< n_primes; i++) printf("%d ",primes[i]);
    exit(0);
}

[int n_primes, int primes[10]] = find_primes(int n,
                                     int n_primes_test,
                                     int primes_test[10],
                                     int primes[10])
{
    int t = n_primes_test, k = 0, l = n;
    while (t > 0)
        [primes[10], t] = find_first_prime( l, n_primes_test,
                                     primes_test[10],
                                     primes[10], t);
    return(…);
}
```

Numeri primi - Codice Assembly

```
        .data
prompt: .asciiz "Inserire un numero intero: "
output: .asciiz "I numeri primi sono: "
primes_test:
        .word 1 2 3 5 7 11 13 17 19 23
primes: .space 40
spazio: .asciiz " "

        .text
        .globl main

# $s0 ($a0) contiene il numero di numeri primi da testare (in byte).
# $s1 ($a1) contiene l'indirizzo del vettore dei numeri primi
# $s2 ($a2) contiene N, il numero primo da scomporre
# $s3 ($a3) contiene l'indirizzo del vettore dei numeri primi di N
# $s4 ($v0) contiene il numero di numeri primi di N (in byte).

main:   li $s0, 40      # Impostato alla lunghezza di primes_test (in byte)
        la $s1, primes_test
        li $v0, 4
        la $a0, prompt
        syscall         # stampa prompt
```


Numeri primi (cont.)

```
        li $v0, 5
        syscall                 # legge l'intero N
        move $s2, $v0

        la $s3, primes

        move $a0, $s0           # prepara la chiamata
        move $a1, $s1           # prepara la chiamata
        move $a2, $s2           # prepara la chiamata
        move $a3, $s3           # prepara la chiamata

        jal find_primes         # chiamata

        move $s4, $v0           # numero di primi di N (in byte)

        # scrivo anche il numero 1 come costituendo di N
        lw $t0, 0($s1)
        add $t1, $s4, $s3
        sw $t0, 0($t1)
        addi $s4, $s4, 4
```

Numeri primi (cont.)

```
# stampa il risultato ed esci
        li $v0, 4
        la $a0, output
        syscall

        move $t0, $s3
        add $t1, $s4, $t0

Loop_w:
        beq $t0, $t1, fine

        li $v0, 4       # Stampa uno spazio
        la $a0, spazio
        syscall

        lw $a0, 0($t0)
        li $v0, 1
        syscall

        addi $t0, $t0, 4
        j Loop_w
fine:
        li $v0, 10
        syscall
```


Numeri primi (cont.)

```
find_primes:
        addi $sp, $sp, -8
        sw $ra, 0($sp)
        sw $a0, 4($sp)

        move $v0, $zero       # memorizza il numero di primi di N
                              # in numero di byte
        addi $a0, $a0, -4     # elemento di prime_test

# in find_first_prime:
#   a2 viene diviso via via per tutti i primi
#   a0 viene decrementato via via che i primi sono esaminati.

        jal find_first_prime

        lw $ra, 0($sp)
        lw $a0, 4($sp)
        addi $sp, $sp, 8
        jr $ra
```

Numeri primi (cont.)

```
 find_first_prime:
        addi $sp, $sp, -4
        sw $ra, 0($sp)

        beq $a0, $zero, fine_1 # il ciclo termina quando ci si posiziona
                               # sul 1. elemento di primes_test (base + 4)
        add $t0, $a1, $a0
        lw $t2, 0($tx0)        # estraggo il numero primo da testare
        addi $a0, $a0, -4      # mi posiziono sul numero primo successivo
        rem $t3, $a2, $t2      # guardo se $t2 e' un divisore di N
        bgtz $t3, oltre        # se non lo e', passo al successivo n. primo
        div $a2, $a2, $t2      # divido N per il numero primo trovato
        add  $t4, $v0, $a3     # $t4 indirizzo su primes in cui scrivere
        sw $t2, 0($t4)         # memorizzo il numero primo trovato
        addi $v0, $v0, 4       # punto al nuovo elemento in primes
oltre:
        jal find_first_prime
fine_1:
        lw $ra, 0($sp)
        addi $sp, $sp, 4
        jr $ra
```