Istruzioni per il controllo di flusso

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
matteo.re@unimi.it
http://homes.di.unimi.it/re/arch2-lab-2015-2016.html

Controllo di flusso

- Istruzioni (branch e jump) che alterano l'ordine sequenziale di esecuzione delle istruzioni di un programma.
- Usate quando il codice di alto livello fa uso di verifica di condizioni, salti non condizionati o cicli.
- Producono un effetto sull'aggiornamento del program counter: la prossima istruzione da eseguire potrà non essere quella all'indirizzo successivo (+4), ma quella ad un indirizzo detto *target address*.
- Il target address si determina applicando una **modalità di indirizzamento** su un operando dell'istruzione.

- Convenzioni di notazione:
  - Identificativo con iniziale maiuscola: deve essere una label (e.g., «Label», «Exit», «Loop»);
  - Identificativo con iniziale minuscola: deve essere un registro o un valore immediato (intero con segno su 16 bit);
  - Identificativo con iniziale «$»: deve essere un registro.

Salti non condizionati

- **Non condizionato** (unconditional)**:** Il salto viene sempre eseguito.
- `j` (jump), `jal` (jump and link), `jr` (jump register)

```
j   Label     # salta a Label
jal Label     # salta a Label, salva PC in $ra
jr  $rx       # salta all'indirizzo contenuto in $rx
```

Salti condizionati

- **Condizionato** (conditional)**:** il salto viene eseguito solo se una certa condizione risulta verificata.
- Esempi: `beq` (*branch on equal*) e `bne` (*branch on not equal*)

```
beq $rs, rt, Label  # if (rs == rt) salta a Label

bne $rs, rt, Label  # if (rs != rt) salta a Label
```

If - Then

Codice C:

```
if (i==j)

   f=g+h;
…
```

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

If - Then

Codice C:

```
if (i==j)
   f=g+h;
…
```

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

- Riscriviamo il codice C in una forma equivalente, ma più «vicina» alla sua traduzione Assembly

↓

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

→

Codice Assembly:

```
bne $s3, $s4, L      # if i ≠ j go to L
add $s0, $s1, $s2
L:
…
```

If - Then - Else

Codice C:

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

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

If - Then - Else

Codice C:

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

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

Codice Assembly:

```
bne $s3, $s4, Else
add $s0, $s1, $s2
j End
Else:
sub $s0, $s1, $s2
End:
…
```

Do - While

Codice C:

```
i=0;
do{
   g = g + A[i];
   i = i + j;
}
while (i!=h);
```

Si supponga che:

`g` e `h` siano in `$s1, $s2`

`i` e `j` siano in `$s3, $s4`

`A` sia in `$s5`

Do - While

Codice C:

```
i=0;
do{
   g = g + A[i];
   i = i + j;
}
while (i!=h);
```

Si supponga che:

`g` e `h` siano in `$s1, $s2`

`i` e `j` siano in `$s3, $s4`

`A` sia in `$s5`

- Riscriviamo il codice C:

```
i = 0;
Loop:
g = g + A[i];
i = i + j;
if (i != h)
  goto Loop
```

Codice Assembly:

```
li $s3, 0
Loop:
mul $t1, $s3, 4
add $t1, $t1, $s5
lw $t0, 0($t1)
add $s1, $s1, $t0
add $s3, $s3, $s4
bne $s3, $s2, Loop
```

While

Codice C:

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

Si supponga che:

`i` e `j` siano in `$s3, $s4`

`k` sia in `$s5`

`A` sia in `$s6`

While

Codice C:

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

Si supponga che:

`i` e `j` siano in `$s3, $s4`

`k` sia in `$s5`

`A` sia in `$s6`

- Riscriviamo il codice C:

```
Loop:
If (A[i]!=k)
  go to End;
i=i+j;
go to Loop;
```

Codice Assembly:

```
Loop:
mul $t1, $s3, 4
add  $t1, $t1, $s6
lw  $t0, 0($t1)
bne $t0, $s5, End
add $s3, $s3, $s4
j Loop
End:
```

Condizioni di disuguaglianza

- Spesso è utile condizionare l'esecuzione di un'istruzione al fatto che una variabile sia minore di un'altra, istruzione **Set Less Than**.

```
slt $s1, $s2, s3
```

- Assegna il valore 1 a `$s1` se `$s2 < s3` altrimenti assegna il valore 0.
- Con `slt, beq` e `bne` si possono implementare tutti i test sui valori di due variabili `(=, !=, <, <=, >,>=)`.

Esempio

Codice C:

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

Si supponga che:

`i` e `j` siano in `$s0, $s1`

`k` sia in `$s2`

- Riscriviamo il codice C:

```
if (i<j)
   flag=1;
if (flag==0)
   goto Else;
k=i+j;
goto Exit;
Else:
k=i-j;
Exit:
…
```

Codice Assembly:

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

Condizioni di disuguaglianza

- `slt` e `beq` come nell'esempio precedente possono essere usate tramite pseudo-istruzioni, ad esempio **Branch on Greater Than**.

```
bgt $s1, s2, Label
```

- Salta a `Label` se `$s1 > s2`

- Altre pseudo-istruzioni simili:

```
bge, blt, ble
```

Il costrutto switch

- Può essere implementato con una serie di `if-then-else`
- *Alternativa: uso di una jump address table (prossime lezioni)*

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;
}
```

→

```
if (k < 0)
   t = 1;
else
   t = 0;
if (t == 1) // k < 0
   goto Exit;
t2 = k;
if (t2 == 0) // k = 0
   goto L0;
t2--; if (t2 == 0) // k = 1
   goto L1;
t2--; if (t2 == 0) // k = 2
   goto L2;
t2--; if (t2 == 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:
```

Il costrutto switch

- Si supponga che `$s0, …, $s5` contengano `f,g,h,i,j,k`,

Codice Assembly:

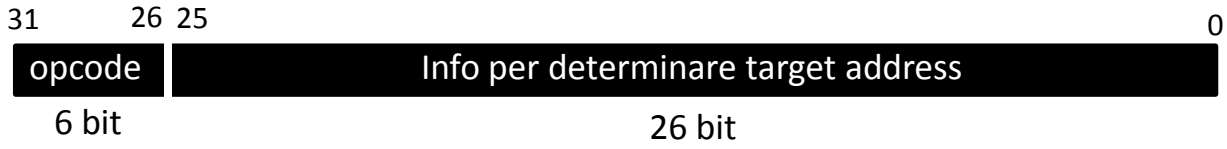
```
slt $t3, $s5, $zero
bne $t3, $zero, Exit

beq $s5, $zero, L0

addi $s5, $s5, -1
beq $s5, $zero, L1

addi $s5, $s5, -1
beq $s5, $zero, L2

addi $s5, $s5, -1
beq $s5, $zero, L3
```

```
j Exit;

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:
```

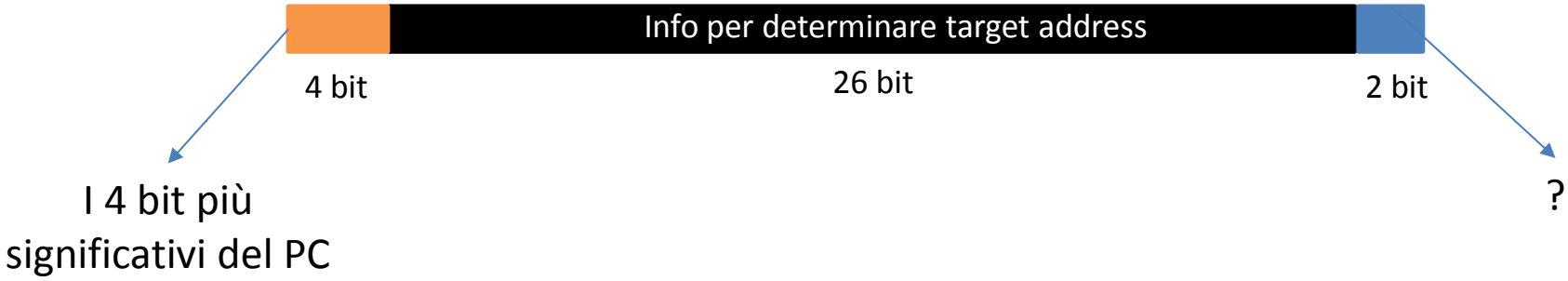
Ampiezza dei salti non condizionati

- I salti non condizionati con `j` e `jal` si mappano su istruzioni che hanno **formato** J-type

```
j   Label     # salta a Label
```



- I 26 bit contengono un valore immediato con cui ottenere il *target address.* Come?
- **Modalità di indirizzamento pseudo-diretta :**

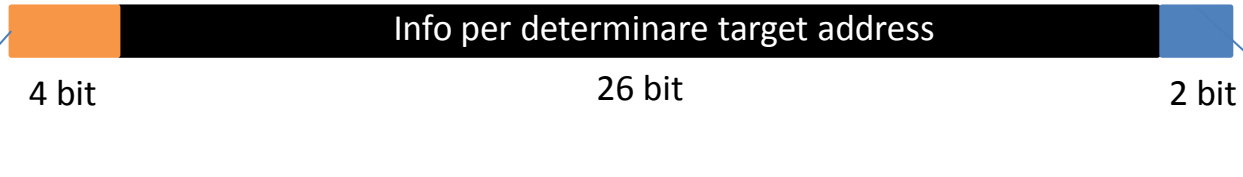


Ampiezza dei salti non condizionati

- I salti non condizionati con `j` e `jal` si mappano su istruzioni che hanno **formato** J-type

```
j   Label     # salta a Label
```

- I 26 bit contengono un valore immediato con cui ottenere il *target address.* Come?
- **Modalità di indirizzamento pseudo-diretta:**



I 4 bit più significativi del PC

Possiamo indirizzare lo 1/x di tutte le istruzioni MIPS, x=?

Due zeri (allineamento, saltiamo sempre a indirizzi divisibili per 4)

Ampiezza dei salti condizionati

- Queste istruzioni, oltre al target address, devono specificare altri due operandi per il test di uguaglianza: hanno un altro formato! **I-type**.

```
beq $rs, rt, Label  # if (rs == rt) salta a Label
```

- Usare i 16 bit come target address (o pseudo direct) sarebbe molto limitante.
- Tuttavia, i salti condizionati (`beq`, `bne`) tipicamente non hanno grandi ampiezze (saltano a istruzioni vicine) perché il loro uso più frequente è nei cicli o nei blocchi con *if*.
- Il concetto di «vicino» è, ovviamente, relativo al valore corrente del PC.
- **Modalità di indirizzamento relativa al PC**: i 16 bit rappresentano un offset.

Ampiezza dei salti condizionati

```
beq $rs, rt, Label  # if (rs == rt) salta a Label
```

- **Modalità di indirizzamento relativa al PC** : come si determina il target address?

- Convenzione: l'offset è rispetto al PC che tipicamente punta già all'istruzione **successiva** alla branch.

- Procedimento:
  1. Si aggiungono due zeri in coda all'offset (allineamento, vogliamo sempre un indirizzo multiplo di 4 e rendiamo quindi i due zeri in coda impliciti; dopo questa operazione l'offset si interpreta come numero di istruzioni e non numero di byte);
  2. Si somma l'offset al PC, il risultato è il target address.

- Indirizzamento: da PC – 2^{17} a PC + 2^{17} – 4 (senza step 1 sarebbe stato da PC – 2^{15} a PC + 2^{15} – 1, si guadagna un fattore 4 nell'ampiezza dei salti)

Ampiezza dei salti condizionati

- Come fare se si necessita di salti **condizionati** molto **ampi**?
- Combiniamo branch e jump. Ad esempio:

```
beq $rs, rt, FarAway
```

Non riusciamo a ottenere questo target address con un offset da 16 bit e l'indirizzamento PC-relative.

- Soluzione:

```
        bneq $rs, rt, VeryClose
        J FarAway
VeryClose:  …
```

Ora abbiamo a disposizione 26 bit e indirizzamento pseudo-direct.

Esercizio 4.1

- Si scriva il codice che dato un intero inserito dall'utente restituisca il numero pari successivo.

Esercizio 4.2

- Si scriva il codice assembly che esegua le seguenti istruzioni:

```
a = <intero inserito dall'utente>
b = <intero inserito dall'utente>
c = <intero inserito dall'utente>

If ( (a>=b) && (c!=0) ){
        z=c(a+b);
        print z
}
else{
        print «errore»
}
```

Esercizio 4.3

- Si scriva il codice che calcola la somma dei primi N-1 numeri elevati al quadrato.
- Nel caso in cui l'i-esimo numero da aggiungere sia multiplo del valore iniziale della somma, si termini il ciclo for.

```
V=<intero inserito dall'utente>;
N=<intero inserito dall'utente>;

Sum = V;
for (i=1; i<N; i++)
{
    If ((i*i)%V==0){
        print «break»;
        break;
    }

    Sum+=i*i;
}
print Sum
```