


Hazard sul controllo

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Informatica
alberto.borghese@unimi.it

Università degli Studi di Milano

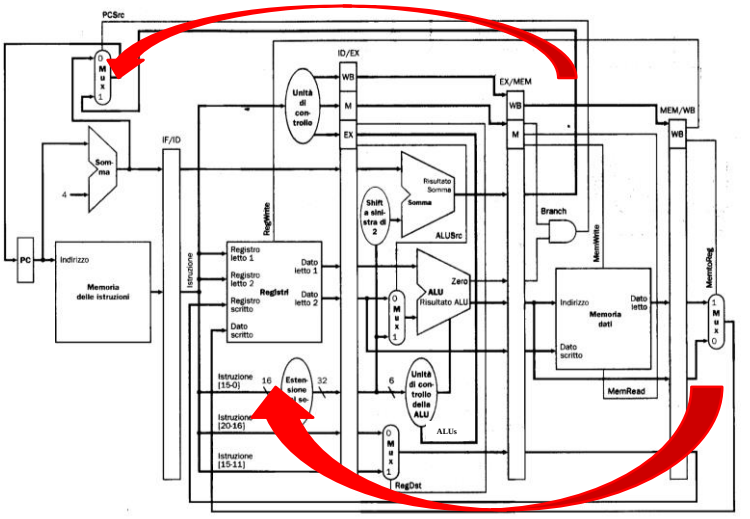
Riferimento al Patterson: 4.8


Sommario

Hazard sul controllo

Predizione dei salti

Pipeline – criticità o hazard



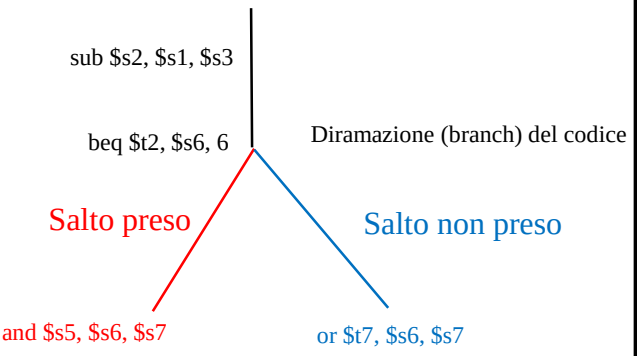
La fase di WB genera un cammino da dx (WB) a sx (DEC) sul data path
La beq genera un cammino da dx (MEM) a sx (FF) sul control path

Come affrontare gli *hazard su controllo*

- Si può risolvere l'hazard…
  - ***…aspettare***
    - si mette lo stage opportuno dell'istruzione dipendente dalla precedente in pausa
    - il controllo della pipeline deve individuare il problema prima che avvenga! **Stallo.**
  - ***…prevenire***
    - Il compilatore o la CPU, come ottimizzazione, può riordinare le operazioni in modo che il risultato sia lo stesso ma non ci siano hazard **(branch delay slot)**
  - ***…modificare la CPU***
  - ***…scartare istruzioni***
    - si butta via l'attuale lavoro della pipeline e si ricomincia ("flushing" della pipeline)
    - è sufficiente individuare il problema DOPO che è avvenuto
    - Es: l'istruzione successiva (a sx) ha usato in lettura un registro che è stato appena modificato dall'istruzione precedente (dx)? **flush.** Oppure: l'istruzione precedente (a dx) ha effettuato un salto e quindi successive (a sx) sta lavorando con un PC e IR sbagliato? **flush.**
  - ***…prevedere***
    - attraverso alcuni meccanismi di **predizione** preposti, l'architettura stessa tenta di predirre su base statistica i risultati rilevanti dell'istruzione in corso (es il PC – "branch prediction", o il valori prodotti – "value prediction"). Se la predizione si rivela giusta: tutto ok. Se si rivela sbagliata: **roll-back**

Hazard sul controllo

0x400 sub $s2, $s1, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
0x414 add $t0, $t1, $t2
0x418 sw $s3, 24($t1)
0x41C addi $t7, $s6, 10
0x420 add $t8, $s2, $s2
0x424 and $s5, $s6, $s7
0x418 add $t0, $t1, $t2



Esempio di Hazard sul controllo

0x400 sub $s2, $s1, $s3	IF	ID	EX $1-$3	MEM	WB s->$2			
0x404 beq $t2, $s6, 7		IF	ID	EX Zero if ($s2 == $s5)	MEM	WB		
0x408 or $t7, $s6, $s7			IF	ID	EX	MEM	WB	
0x40C add $t4, $s8, $s8				IF	ID	EX	MEM	WB
0x410 and $s5, $s6, $s7					IF	ID	EX	MEM
0x414 add $t0, $t1, $t2						IF	ID	EX

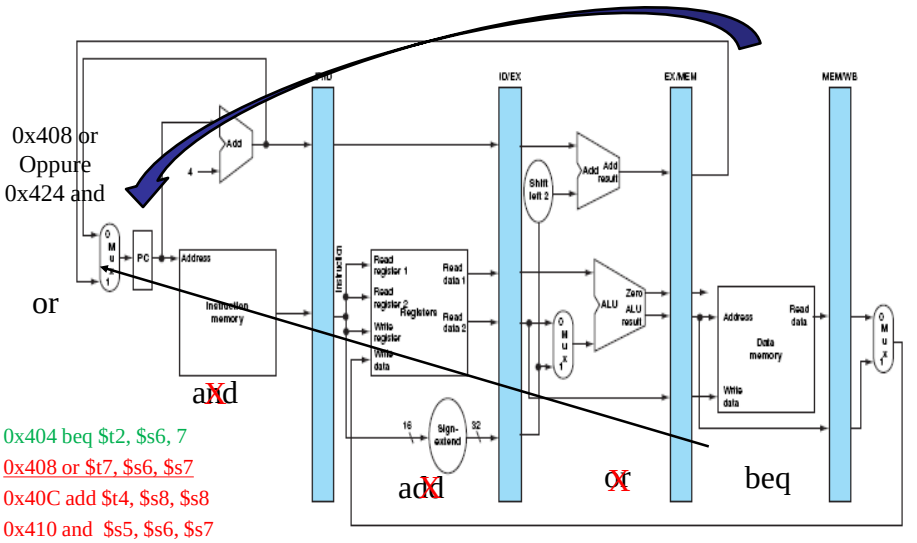
Quando sono in fase di fetch dovrei avere a disposizione l'indirizzo corretto. In caso di salto questo potrebbe esserre disponibile nella PIPELINE solo all'inizio della fase di WB della beq.

Non c'è nulla di veramente efficace contro gli hazard sul controllo (non si può propagare nulla).

In caso di salto: Ho 3 istruzioni sbagliate in pipeline: `or`, la `add` e la `and`. E' una scommessa!

NB Il PC è master/slave per cui occorre che l'indirizzo sia pronto prima dell'inizio della fase di fetch.

“Aspettare” 3 cicli di clock non è una buona idea



0x408 or
Oppure
0x424 and

or

add

add

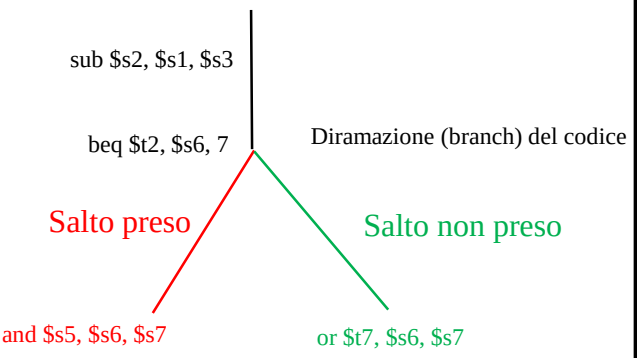
or

beq

0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
…
0x424 and $s5, $s6, $s7

«predire»

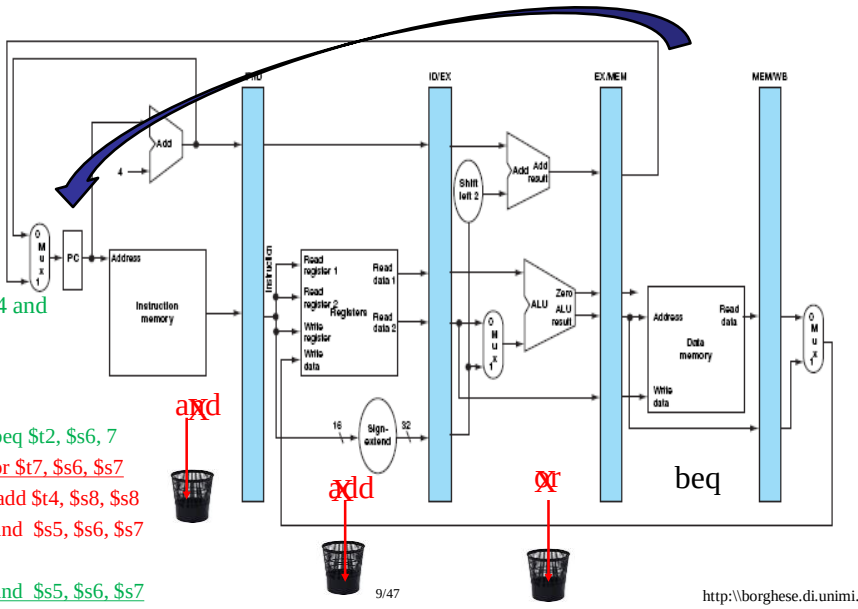
0x400 sub $s2, $s1, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
0x414 add $t0, $t1, $t2
0x418 sw $s3, 24($t1)
0x41C addi $t7, $s6, 10
0x420 add $t8, $s2, $s2
0x424 and $s5, $s6, $s7
0x418 add $t0, $t1, $t2



Supponiamo sia corretto continuare in sequenza (salto non preso). Scommettiamo.

E se la supposizione risultasse **non corretta**?

Flush delle 3 istruzioni



0x424 and

and

0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

0x40C add $t4, $s8, $s8

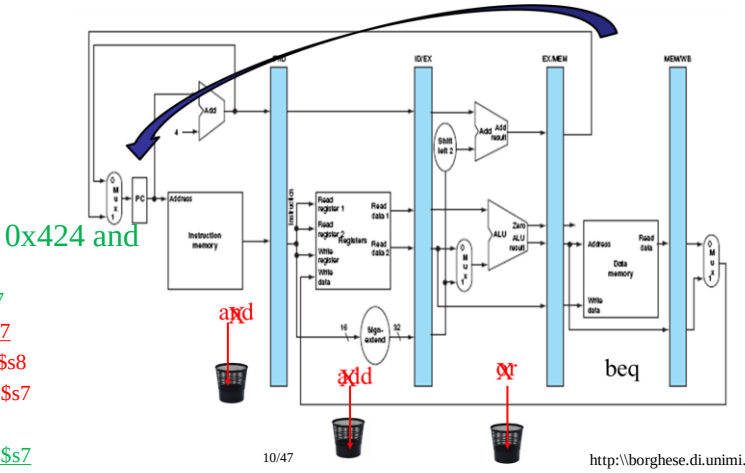
0x410 and $s5, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

Flush della pipeline

- Sostituisco delle nop alle 3 istruzioni.
- 3 istruzioni sono tante. **Cerchiamo di minimizzare l'impatto di una predizione errata.**



0x424 and

and

0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

0x40C add $t4, $s8, $s8

0x410 and $s5, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

Modifica della CPU

Obbiettivi:

1) **Identificare** l'hazard durante la **fase ID** di esecuzione della branch (possibile se condizioni semplici).
2) **Saltare all'istruzione** di destinazione del salto.
3) **Scartare una sola istruzione** nel caso di predizione errata.

400:	sub $s2, $s1, $s3	IF	ID	EX $s1- $s3	MEM	WB s->$2			
404:	beq $t2, $s6, 7		IF	ID	EX Zero if ($s2 == $s5)	MEM	WB		
~~408:~~	~~or $t7, $s6, $s7~~			~~IF~~	~~ID~~	~~EX~~	~~MEM~~	~~WB~~	
424:	and $s5, $s6, $s7				IF	ID	EX	MEM	WB

or ->  e poi proseguo con la add regolarmente.

1) Identificare l'Hazard nella fase ID

La fase di ID è la prima fase in cui la CPU (la UC) sa che l'istruzione è una beq.

Supponiamo a-priori che il salto **non debba essere preso** -> continuo in sequenza.
Scopro a-posteriori che il salto **deve essere preso**, ho creato un hazard che devo risolvere.

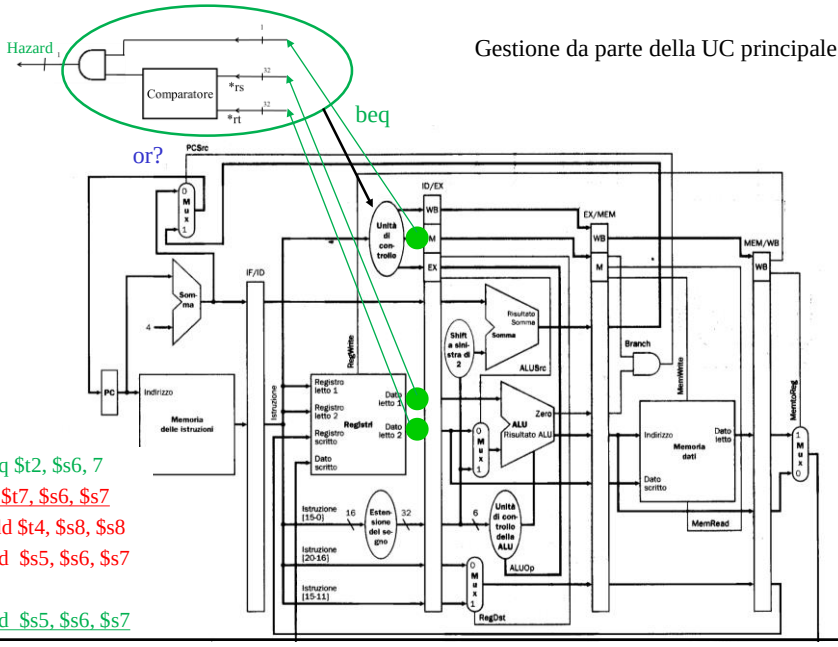
Come identifico che il salto deve essere preso?

Nella fase di DECODE: se "(il contenuto del registro source = contenuto del registro destinazione) e l'istruzione è una branch il salto doveva essere preso".

```
If (*rs == *rt) & (branch) then
        hazard_controllo
```

Qui tutti i dati che determinano l'hazard sono associate alla beq.

UC che identifica hazard sul controllo in ID



0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

0x40C add $t4, $s8, $s8

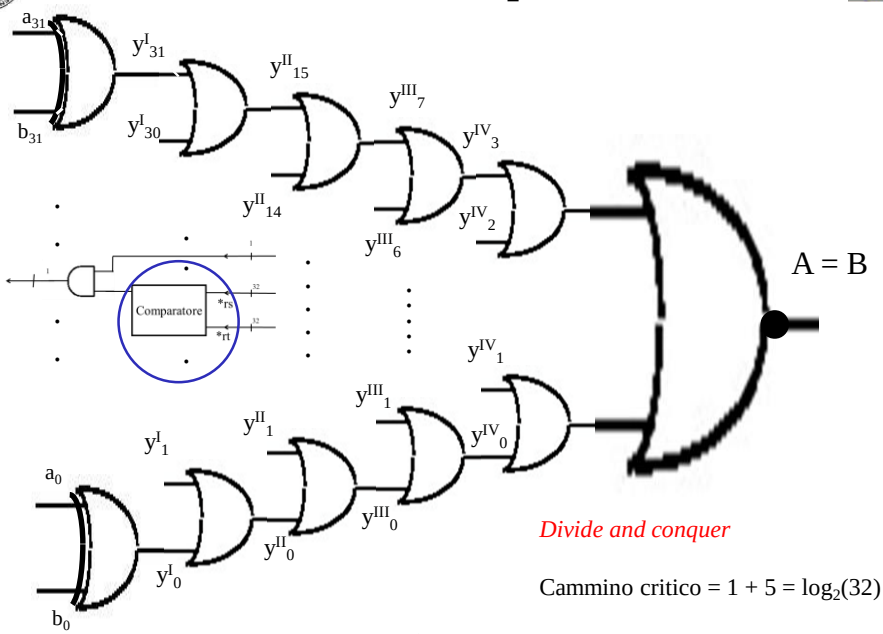
0x410 and $s5, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

Gestione da parte della UC principale

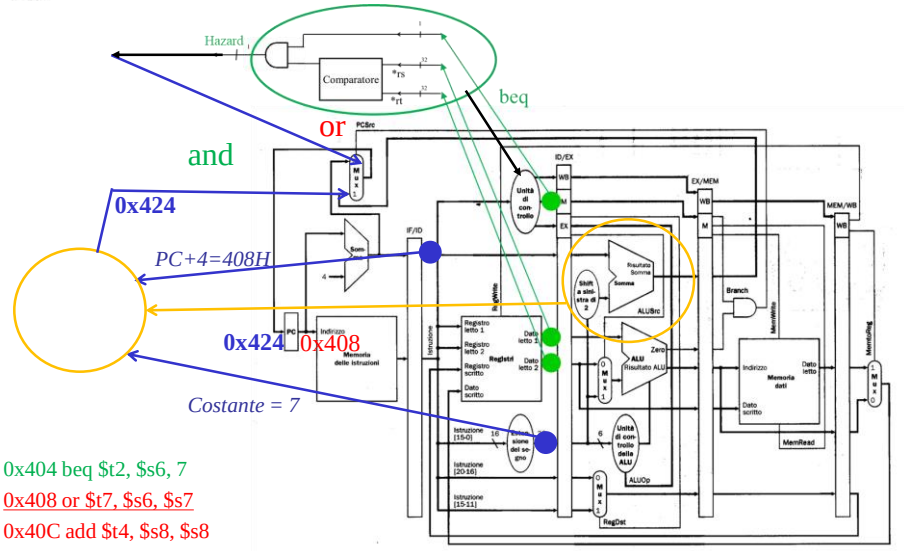
Cammino critico di un comparatore a 32 bit



Divide and conquer

Cammino critico = $1 + 5 = \log_2(32)$

2. Saltare all'istruzione destinazione



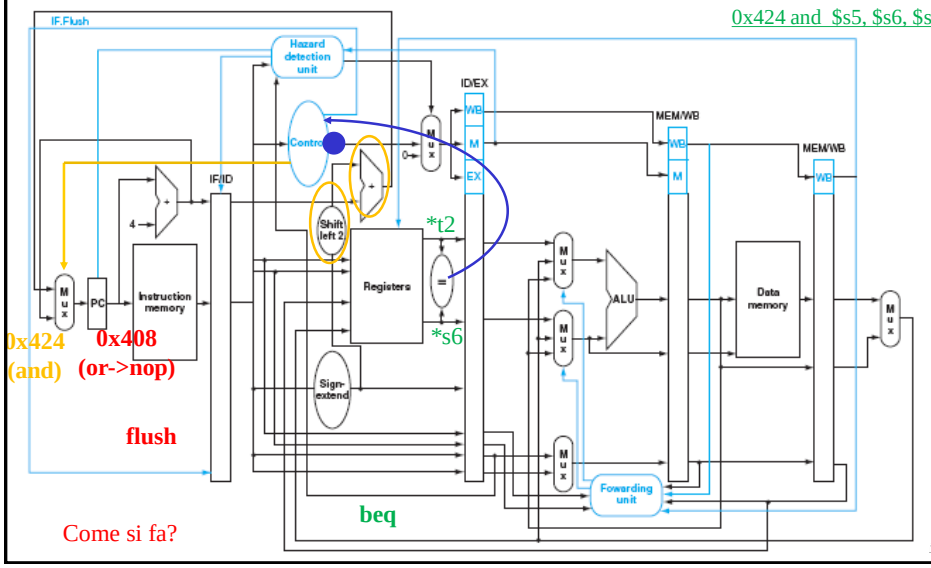
0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
…
0x424 and $s5, $s6, $s7

Hazard: Indirizzo successivo dovrà essere PC + 4 + Offset * 4 (0x24).
Dove lo recupero? Come lo inserisco? **Anticipazione del calcolo.**

CPU modificata

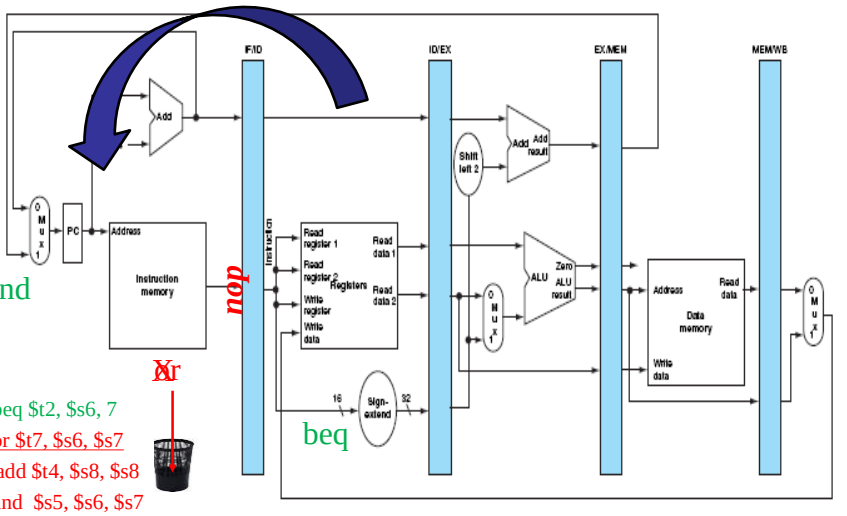
Anticipazione della valutazione della branch.
Anticipazione del calcolo dell'indirizzo di salto.

0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
…
0x424 and $s5, $s6, $s7



Come si fa?

Flush dell'istruzione OR



and

nop

Xor

beq

0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

0x40C add $t4, $s8, $s8

0x410 and $s5, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

Occorre trasformare la or in una nop durante la fase di fetch

Istruzione nop

Si sostituisce nella parte master di IF/ID un'istruzione nulla. Un'istruzione che non farà nulla.

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`sll $s1, $s2, 7`	000000	X	10010	10001	00111 (7)	000000

$s1 = $s2 = $zero, shmt = 0

Nome campo	op	rs	rt	rd	shamt	funct
Dimensione	6-bit	5-bit	5-bit	5-bit	5-bit	6-bit
`sll $zero, $zero, 0`	000000	00000	00000	00000	00000 (0)	000000

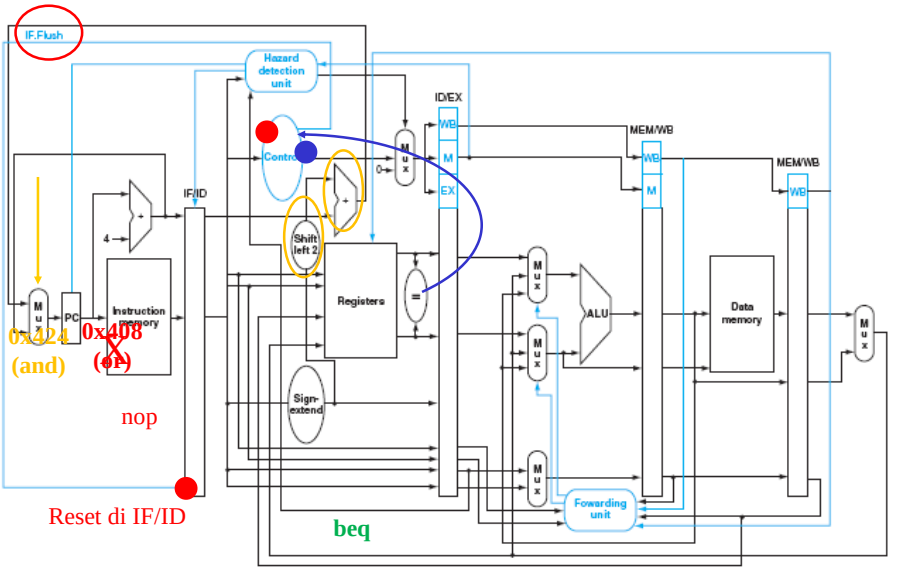
L'istruzione sll con tutti «0» non fa «nulla»! Ma è un'istruzione regolare, che verrà eseguita regolarmente.

CPU modificata

Anticipazione della valutazione della branch.

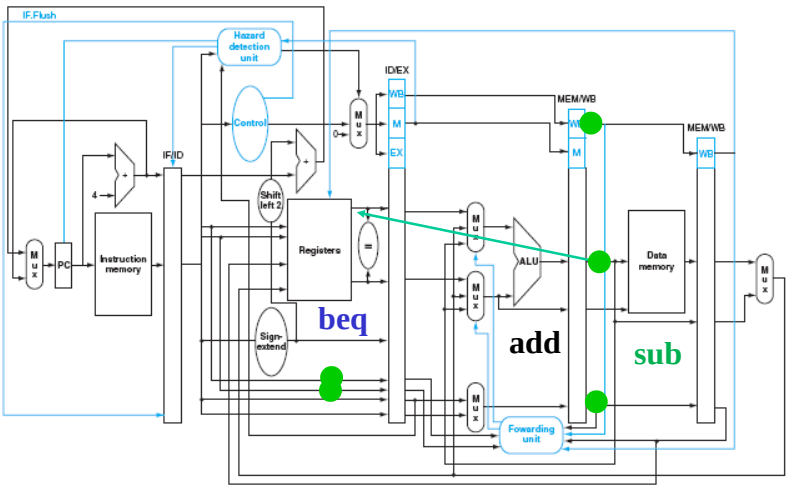
Anticipazione del calcolo dell'indirizzo di salto (bypass verso l'UC).

Flush dell'istruzione or



i.it\

Criticità sui dati aggiuntive - I

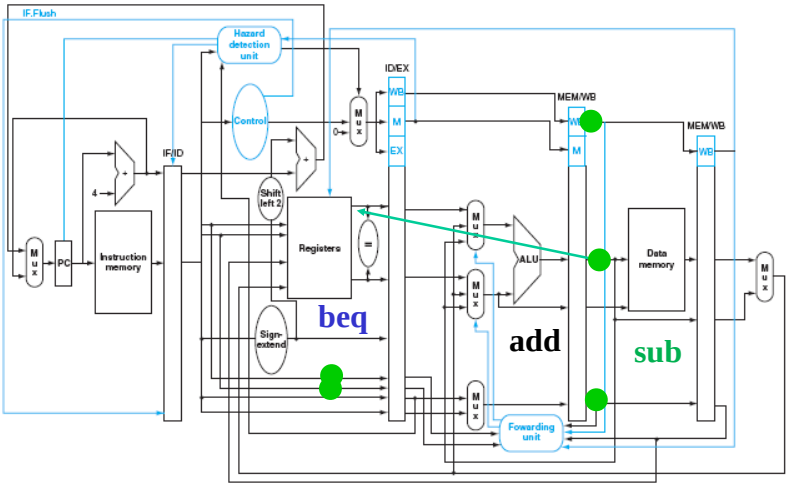


0x39C sub $t2, $s4, $s3
0x400 add $t2, $s4, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7

Forwarding unit revised:

- Come risolvo la dipendenza tra la add e la beq?

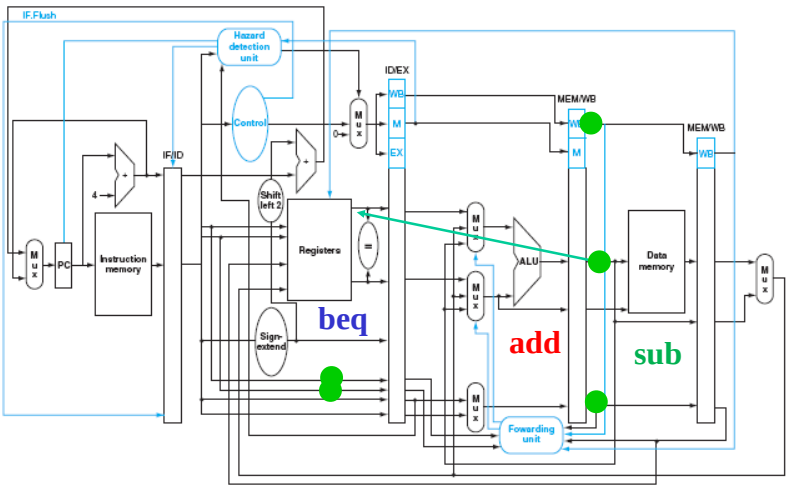
Criticità sui dati aggiuntive - II



0x39C sub $t2, $s4, $s3
0x400 add $t2, $s4, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7

Forwarding unit revised:
- Bypass fino al comparatore del risultato della sub

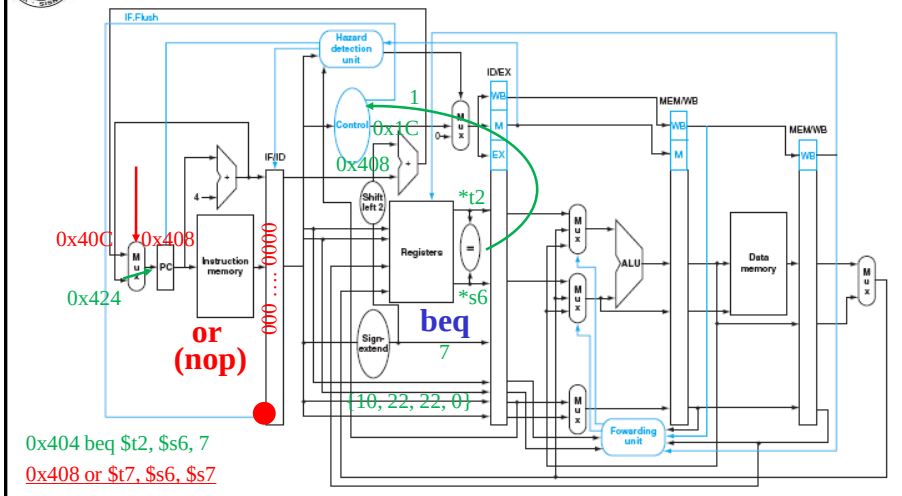
Criticità sui dati aggiuntive - III



0x39C sub $t2, $s4, $s3
0x400 add $t2, $s4, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7

Forwarding unit revised:
- Bypass fino al comparatore del risultato della sub
- Cosa fare per la add?

Esempio (salto da prendere) - I



0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

0x428 addi $s0, $s1, 100

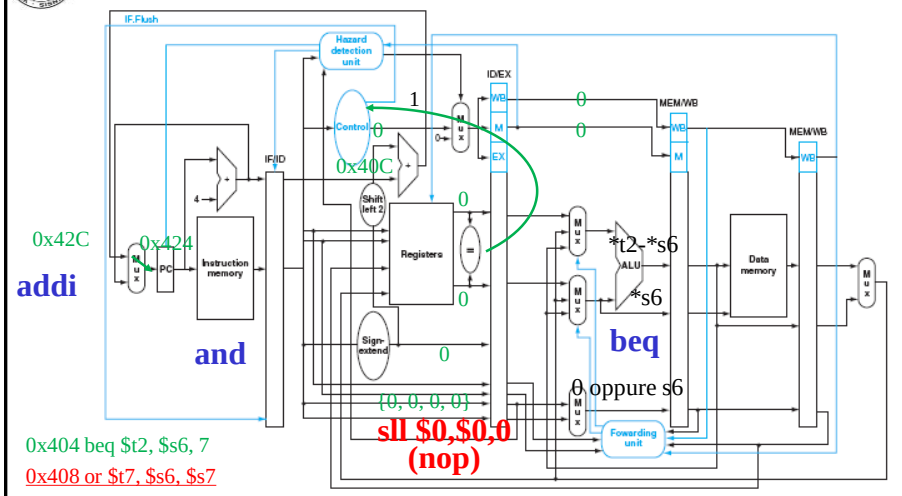
0x42C lw $t2, 24($t1)

0x430 sw $t2, 28($t1)

I segnali di controllo viaggiano “normalmente”. Manca il segnale di branch perchè generato e consumato nella fase di DEC.

No hazard sui dati

Esempio (salto da prendere) - II



0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

0x428 addi $s0, $s1, 100

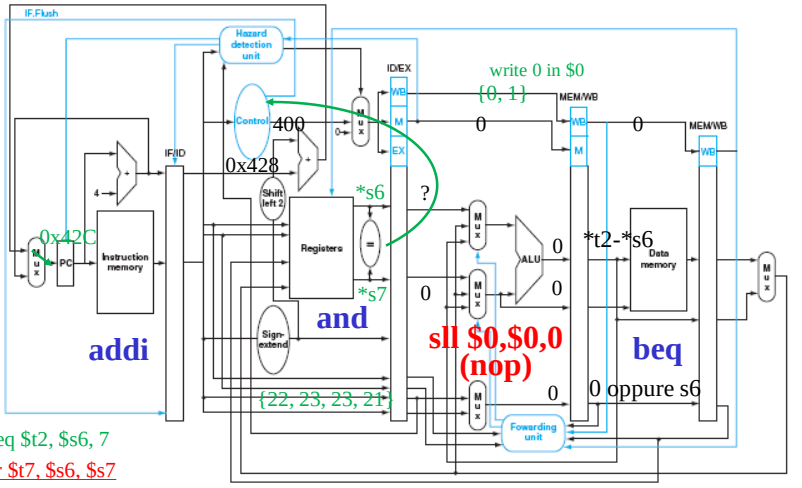
0x42C lw $t2, 24($t1)

0x43C sw $t2, 28($t1)

I segnali di controllo viaggiano “normalmente”. Manca il segnale di branch perchè generato e consumato nella fase di DEC.

No hazard sui dati

Esempio (salto da prendere) - III



0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

0x428 addi $s0, $s1, 100

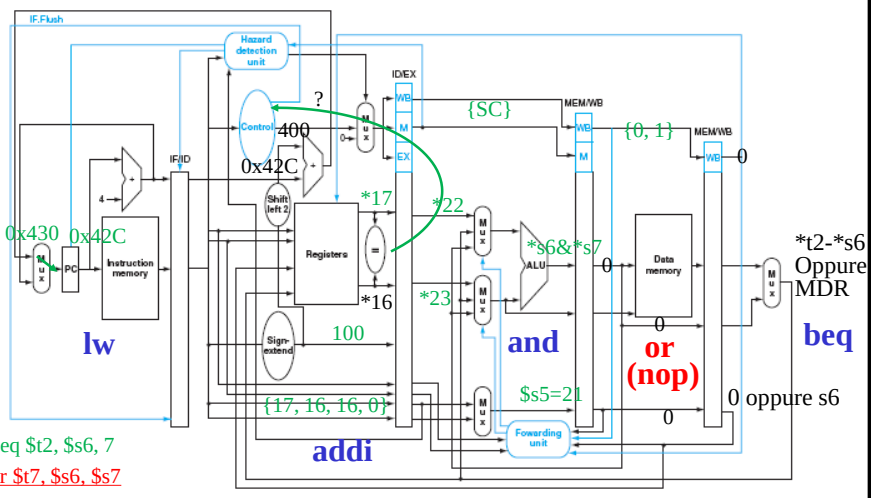
0x42C lw $t2, 24($t1)

0x430 sw $t2, 28($t1)

I segnali di controllo viaggiano "normalmente". Manca il segnale di branch perchè generato e consumato nella fase di DEC.

No hazard sui dati

Esempio (salto da prendere) - IV



0x404 beq $t2, $s6, 7

0x408 or $t7, $s6, $s7

…

0x424 and $s5, $s6, $s7

0x428 addi $s0, $s1, 100

0x42C lw $t2, 24($t1)

0x430 sw $t2, 28($t1)

I segnali di controllo viaggiano "normalmente". Manca il segnale di branch perchè generato e consumato nella fase di DEC.

No hazard sui dati

Gestione della criticità

Decisione ritardata -> posso dovere eliminare un'istruzione (flush).

Soluzione SW:
Aggiunta di un "branch delay slot": l'istruzione successiva a quella di salto viene sempre eseguita indipendentemente dall'esito della branch.

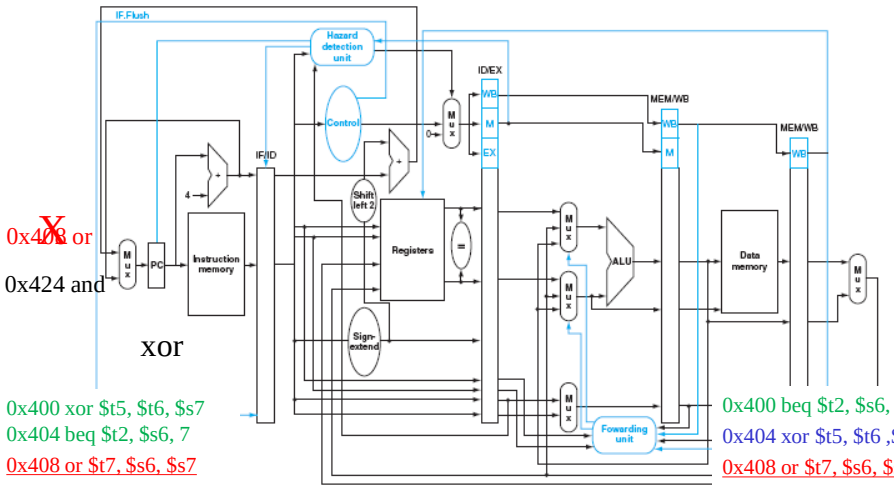
Contiamo sul compilatore/assemblatore per mettere dopo l'istruzione di salto un'istruzione che andrebbe comunque eseguita indipendentemente dal salto (ad esempio posticipo un'istruzione precedente la branch).

Soluzione HW:
Ci si affida all'hardware della CPU per gestire l'eliminazione delle istruzioni (flush).

Flush è costoso su pipeline più profonde e ad esecuzione parallela -> si cerca di evitarlo.

Investimento sui meccanismi di predizione.

Branch delay slot



0x408 or ~~X~~

0x424 and

xor

0x400 xor $t5, $t6, $s7
0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
…
0x424 and $s5, $s6, $s7
0x428 addi $s0, $s1, 100
0x42C lw $t2, 24($t1)
0x430 sw $t2, 28($t1)

beq

Inserisco la xor nel branch delay slot

0x400 beq $t2, $s6, 8
0x404 xor $t5, $t6 ,$s7
0x408 or $t7, $s6, $s7
…
0x424 and $s5, $s6, $s7
0x428 addi $s0, $s1, 100
0x42C lw $t2, 24($t1)
0x430 sw $t2, 28($t1)

Esecuzione condizionata

In questo caso la branch è una “normale” istruzione, il cui risultato viene eliminato se l’istruzione non doveva essere eseguita.

Esempio di un’implementazione MIPS:

- `movn $8, $11, $4`

Questa istruzione sposta il contenuto del registro 11 nel registro 8, se il contenuto del registro 4 non è zero.

- `movz $8, $11, $4`

ARM v7 ha esecuzione condizionata di molte istruzioni.

ARM v8 ha ridotto il numero di istruzioni che vengono eseguite in modo condizionato (true RISC)

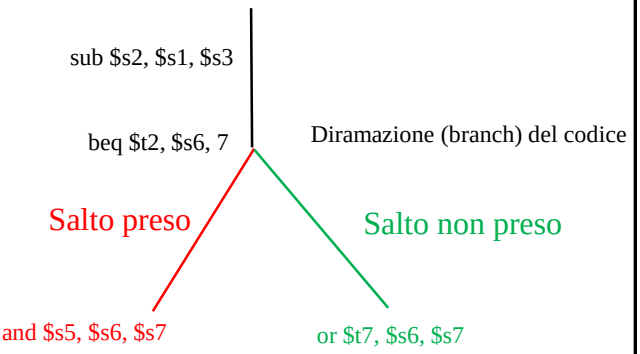
Sommario

Hazard sul controllo

Predizione dei salti

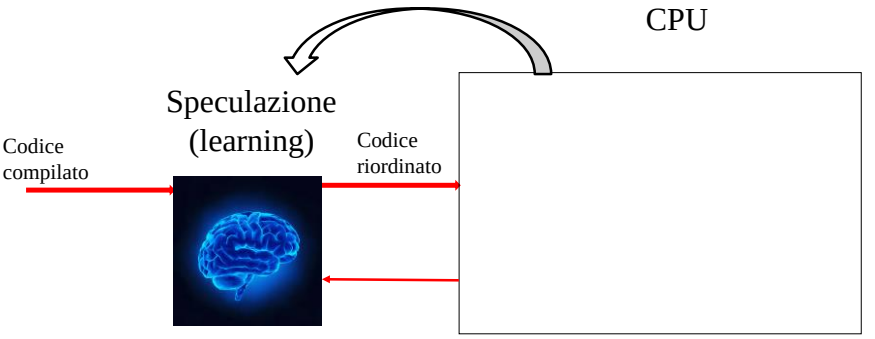
«predire»

0x400 sub $s2, $s1, $s3
0x404 beq $t2, $s6, 7
0x408 or $t7, $s6, $s7
0x40C add $t4, $s8, $s8
0x410 and $s5, $s6, $s7
0x414 add $t0, $t1, $t2
0x418 sw $s3, 24($t1)
0x41C addi $t7, $s6, 10
0x420 add $t8, $s2, $s2
0x424 and $s5, $s6, $s7
0x418 add $t0, $t1, $t2



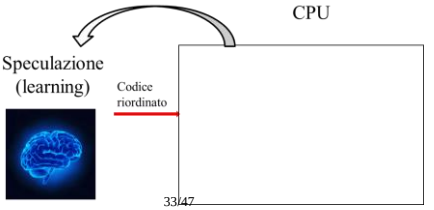
Supponiamo sia corretto continuare in sequenza (salto non preso). **Su cosa basiamo la supposizione a-priori?**

CPU con Predizione



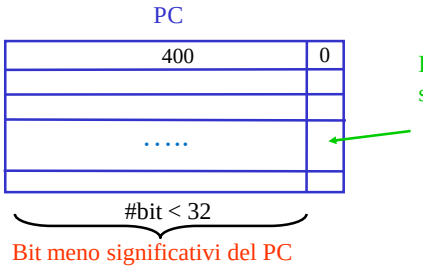
Riorganizzazione del codice a seconda della predizione

```
sub $s2, $s1, $s3
beq $t2, $s6, label:

or $t7, $s6, $s7
add $t4, $s8, $s8
and  $s5, $s6, $s7
add  $t0, $t1, $t2
add $t8, $s2, $s2
….

label: and  $s5, $s6, $s7
add  $t0, $t1, $t2
sw $s3, 24($t1)
addi $t7, $s6, 10
….
….
```




```
sub $s2, $s1, $s3
bne $t2, $s6, label2

and  $s5, $s6, $s7
add  $t0, $t1, $t2
sw $s3, 24($t1)
addi $t7, $s6, 10
….

label2: or $t7, $s6, $s7
add $t4, $s8, $s8
and  $s5, $s6, $s7
add  $t0, $t1, $t2
add $t8, $s2, $s2
….
```


Branch prediction buffer



Bit che indica se l'ultima volta il salto era stato eseguito o meno.

Previsione relativa a una beq con gli stessi bit meno significativi del PC. E' un problema?

```
START:   0x400 beq $t0, $t1, SALTA   for(t0=0;t0=t1;t0++)
         0x404 add $s0, $s1, $s2     {
         0x408 sub $s3, $s4, $s5
         0x40C addi $t0 $t0, 1
         0x410 j START               }
SALTA:   0x414 and $t2, $t3, $t4
```

Predittore = 0 (non salta) finchè dentro il ciclo

Problemi con questo BPB

```
START:   0x400 beq $t0, $t1, SALTA   for(t0=0;t0<=t1;t0++)
         0x404 add $s0, $s1, $s2     {
         0x408 sub $s3, $s4, $s5
         0x40C addi   $t0 $t0, 1
         0x410 j START               }
SALTA:   0x414 and $t2, $t3, $t4
```

0x400	0

Durante il ciclo

Predizione (a-priori) = non salto
Esito (a-posteriori) = non salto (0->0)

0x400	1

All'ultima iterazione

Predizione (a-priori) = non salto
Esito (a-posteriori) = salto (0 -> 1)

0x400	0

Alla prima iterazione successiva

Predizione (a-priori) = salto
Esito (a-posteriori) = non salto (1->0)

2 errori per ogni ciclo

Algoritmi migliori di ottimizzazione dello scheduling per predizione ottima del salto.

1 errore per ogni ciclo

```
START:   0x400 beq $t0, $t1, SALTA   for(t0=0;t0<=t1;t0++)
         0x404 add $s0, $s1, $s2     {
         0x408 sub $s3, $s4, $s5
         0x40C addi   $t0 $t0, 1
         0x410 j START               }
SALTA:   0x414 and $t2, $t3, $t4
```

La prima volta che la predizione non e' allineata con l'esito, non modifico la predizione.

0x400	0

Durante il ciclo

Predizione (a-priori) = non salto
Esito (a-posteriori) = non salto (0->0)

0x400	0

All'ultima iterazione

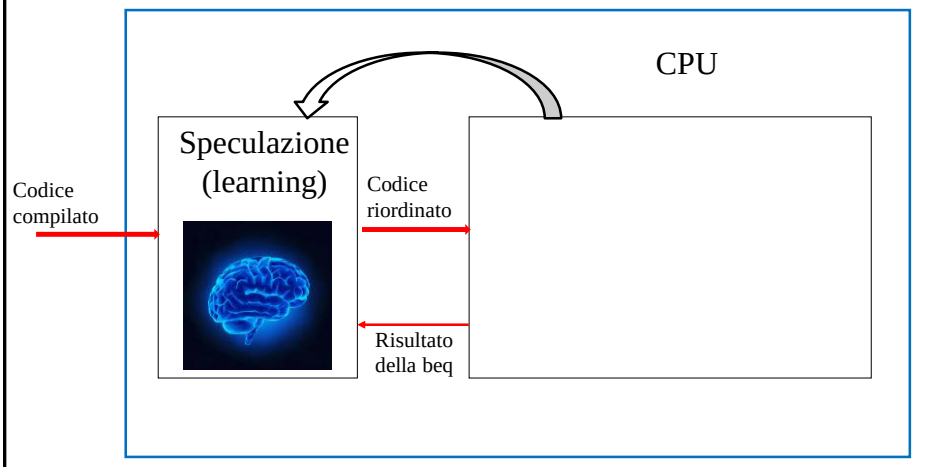
Predizione (a-priori) = non salto
Esito (a-posteriori) = salto (**non correggo la predizione, 1 solo errore**)

0x400	0

Alla prima iterazione successiva

Predizione (a-priori) = salto
Esito (a-posteriori) = non salto (0->0)

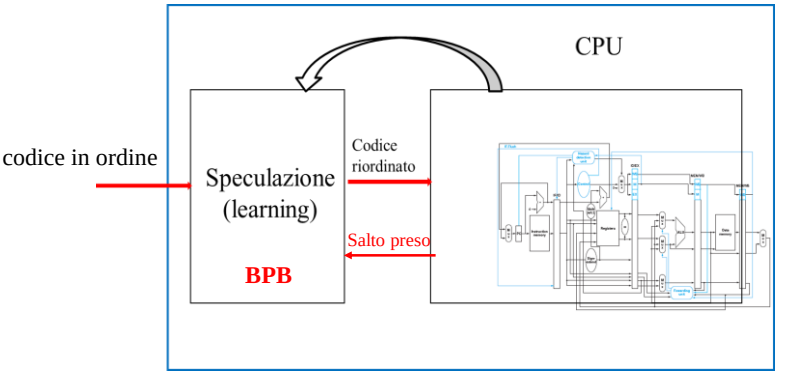
CPU con Predizione



Branch Prediction buffer a 2 bit - FSM

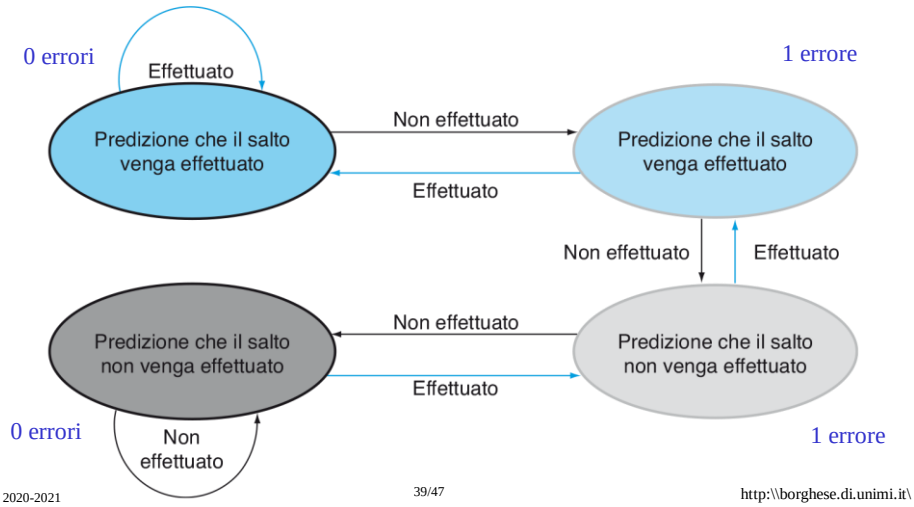
<I, S, Y, f(S,I), Y(S), S_0>

I = {salto_non_preso, salto_preso}
Y = {salto_predetto_non_preso, salto_predetto_preso}



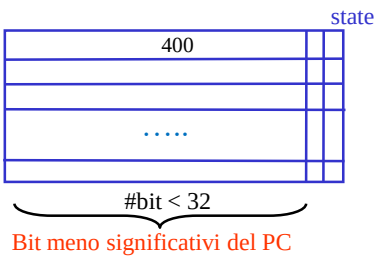
Branch Prediction buffer a 2 bit - STG

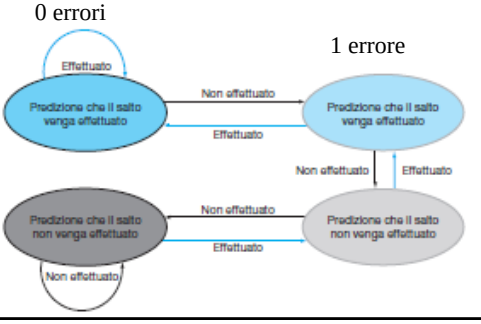
I = {salto_non_preso, salto_preso}
Y = {salto_predetto_non_preso, salto_predetto_preso}
S = {salto_non_preso_0_errori, salto_non_preso_1_errore, salto_preso_0_errori, salto_preso_1_errore}



Branch Prediction buffer a 2 bit - STT

	I=Taken	I=NotTaken	Y
S=Taken 0 errors	Taken 0 errors	Taken 1 error	Predict taken
S = Taken 1 error	Taken 0 errors	Not Taken 1 error	Predict taken
S=Not Taken 0 errors	Not Taken 1 error	Not Taken 0 errors	Predict Not taken
S = Not Taken 1 error	Taken 1 error	Not Taken 0 errors	Predict Not taken





Salto incondizionato

Utilizzato all'interno dei cicli for / while. Non pone problemi. Si risolve con la riorganizzazione del codice.

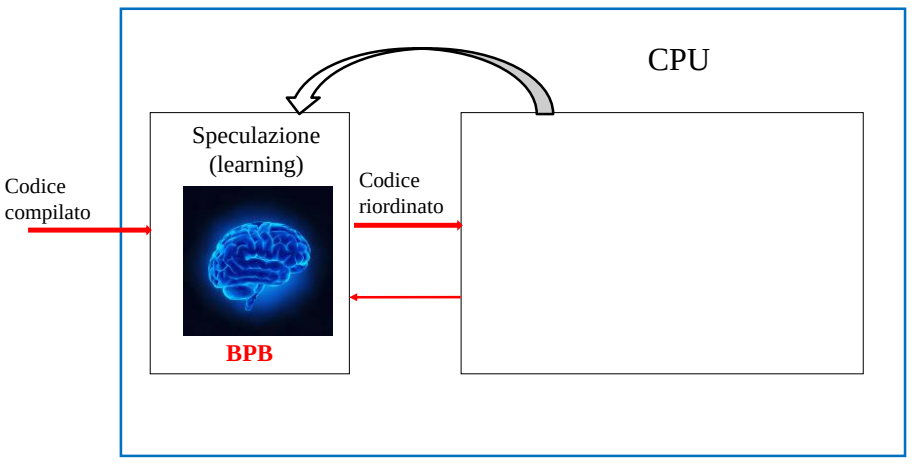
```
        400:    add $s0, $s1, $s2
        404:    j 80000
Label   408:    and $s1, $s2, $s3

        80000:  or $t0, $t1, $t2
        80004:  sub $t3, $t4, $t5
```

```
400:    add $s0, $s1, $s2
80000:  or $t0, $t1, $t2
80004:  sub $t3, $t4, $t5
```

j "lavora" nella fase di decodifica. Viene eseguita un'istruzione prima del salto: delayed jump. **Riempio tutti gli slot di esecuzione**.

L'esecuzione avviene fuori ordine, ma l'utente non vede differenze.

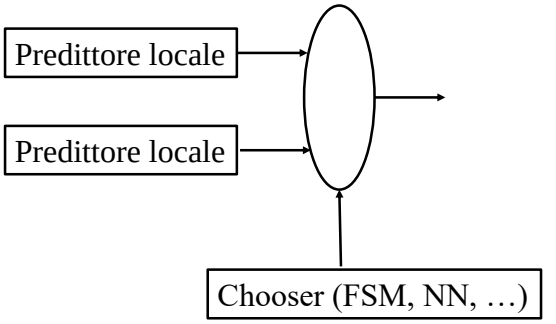
CPU con Predizione



Evoluzioni della branch prediction

1) **Correlating predictors.** Comportamento locale e globale dei salti. Tipicamente 2 predittori a 2 bit (1 locale e 1 globale). Viene scelto il predittore a seconda che l'ultima volta abbia «indovinato» o meno.

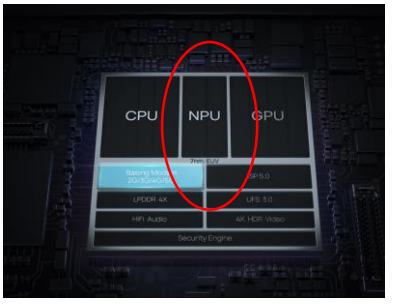
2) **Tournament predictors.** Vengono utilizzati predittori multipli a 1 o 2 bit. Anche qui vengono utilizzati spesso un predittore locale un predottore gloabale. Per ogni branch viene selezionato il predittore migliore in base alla storia di quel particolare salto e anche la scelta può essere effettuata da un predittore a 2 bit.



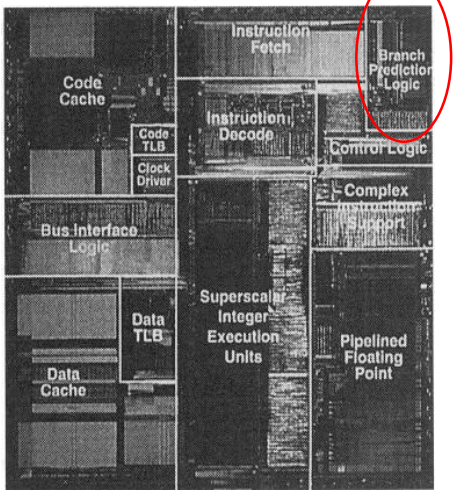
Evoluzione della logica

Branch prediction buffer (4 kbyte nella CPU del Pentium 4). Si trova nel circuito di speculazione.

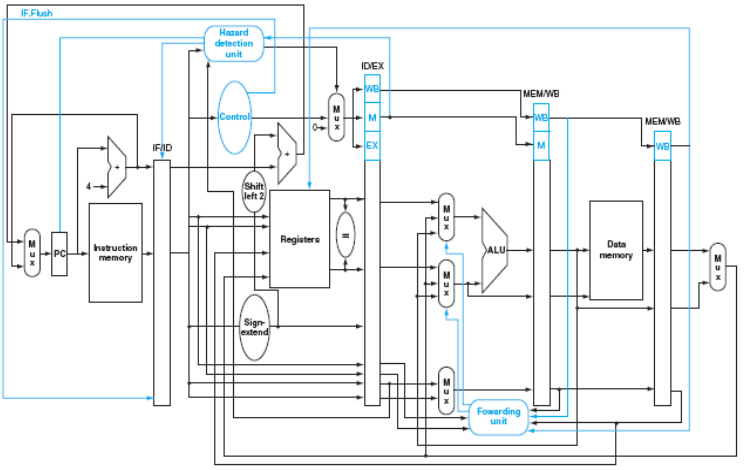
Neural Processing CPU (anche messa a fuoco, riconoscimento facciale…)



Kirin 990, Hawei P40 Serie, 2020

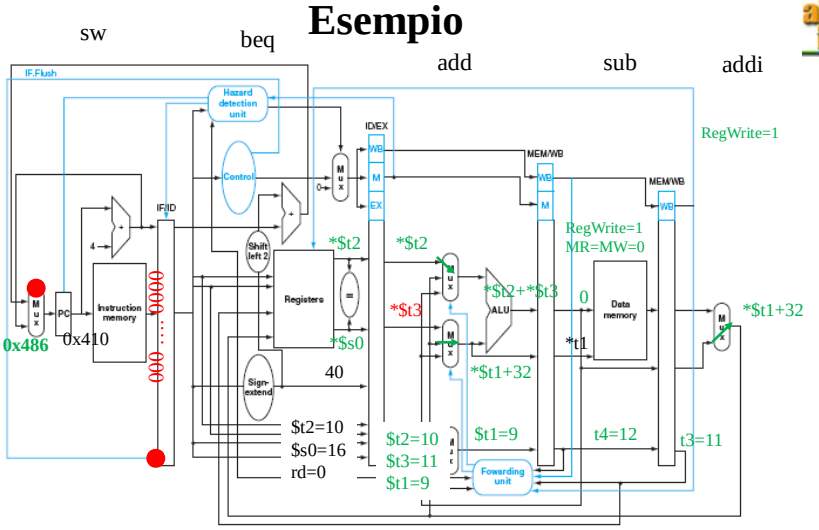


Esempio



Data la CPU sopra, specificare il contenuto di TUTTE le linee (dati e controllo) quando è in esecuzione il seguente segmento di codice:
0x400 addi $t3, $t1, 32
0x404 sub $t4, $t1, $t1
0x408 add $t1, $t2, $t3
0x 40C beq $t2, $s0, 40
0x410 sw $s2, 64($s0)
quando l'istruzione di addi si trova in fase di WB. Specificare sullo schema (con colore o con tratto grosso) quali linee, all'interno dei diversi stadi, trasportino dati e segnali di controllo utili all'esecuzione dell'istruzione, riferendosi alla situazione in cui l'istruzione di addi è in fase di WB. Supporre che il salto sia predetto non preso, ma che il test della branch dia come esito che il contenuto di $t1 e di $s0 sia uguale.

Esempio



Data la CPU sopra, specificare il contenuto di TUTTE le linee (dati e controllo) quando è in esecuzione il seguente segmento di codice:
0x400 addi $t3, $t1, 32
0x404 sub $t4, $t1, $t1
0x408 add $t1, $t2, $t3
0x 40C beq $t2, $s0, 40
0x410 sw $s2, 64($s0)
quando l'istruzione di addi si trova in fase di WB. Specificare sullo schema (con colore o con tratto grosso) quali linee, all'interno dei diversi stadi, trasportino dati e segnali di controllo utili all'esecuzione dell'istruzione, riferendosi alla situazione in cui l'istruzione di addi è in fase di WB. Supporre che il salto sia predetto non preso, ma che il test della branch dia come esito che il contenuto di $t1 e di $s0 sia uguale.

Sommario

Hazard sul controllo

Predizione dei salti