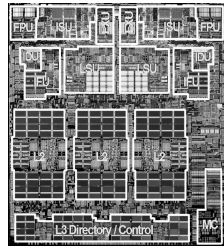




Università degli Studi  
di Cassino



Corso di  
Calcolatori Elettronici II

*Pipeline*

Anno Accademico 2006/2007

Francesco Tortorella

[adattati dalle slides di D.Patterson  
[www.cs.berkeley.edu/~patterson](http://www.cs.berkeley.edu/~patterson)]

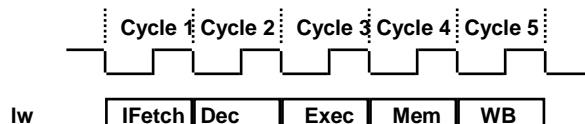
## Progettazione del datapath

- Prima soluzione: d.p. a ciclo singolo
  - Semplice da realizzare
  - Condizionato dal worst case (istruzione più lenta)
  - Ogni unità funzionale è usata una volta sola per ciclo
- Seconda soluzione: d.p. multiciclo
  - Più complesso
  - Elimina le ridondanze HW
- Si può dare di più ?
- Pipeline

*Calcolatori Elettronici II*  
*Pipeline - 1*

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## I 5 passi dell'istruzione Load



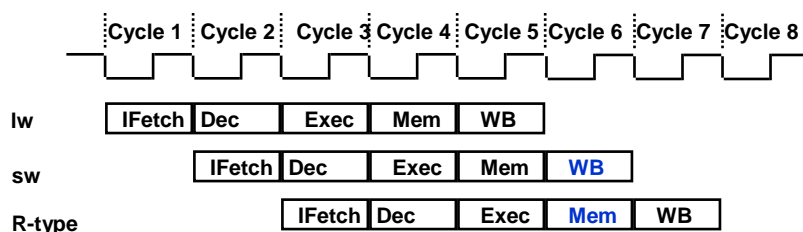
- **IFetch**: Instruction Fetch e aggiornamento PC
- **Dec**: Registers Fetch e decodifica istruzione
- **Exec**: Esecuzione(R-type) ; calcolo dell'indirizzo di memoria
- **Mem**: Read/write dei dati da/verso la memoria dati
- **WB**: Scrittura del risultato nel register file

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 2

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Processore MIPS Pipelined

- Avvia l'istruzione successiva mentre la corrente è ancora in esecuzione
  - Migliora il **throughput** - totale di lavoro eseguito per unità di tempo (numero medio di istruzioni per secondo o per ciclo di clock)
  - Non riduce la **latenza** (tempo trascorso dall'inizio di un'istruzione fino al completamento)



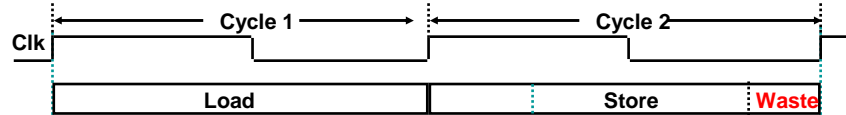
- Il ciclo di clock del pipeline è limitato dal passo più lento
- Per alcune istruzioni, alcuni passi sono cicli sprecati

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 3

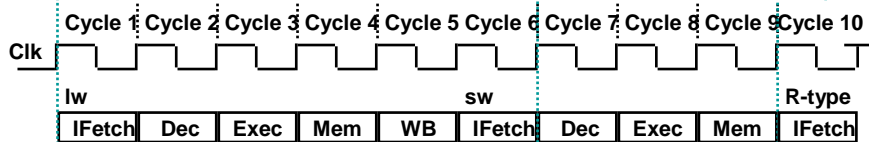
F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Confronto tra le implementazioni

Ciclo singolo:



Multiciclo:



Pipeline:

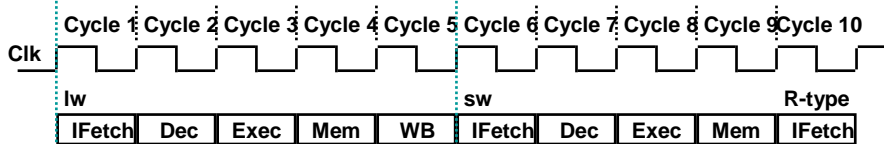


Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 4

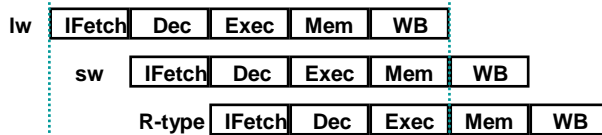
F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Throughput e Latenza

Multiciclo:



Pipeline:



- **Latenza** 5 cicli di clock per entrambi
- **Throughput** 1 per ciclo di clock (IPC) per la pipeline  
1/5 IPC per il multiciclo

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 5

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

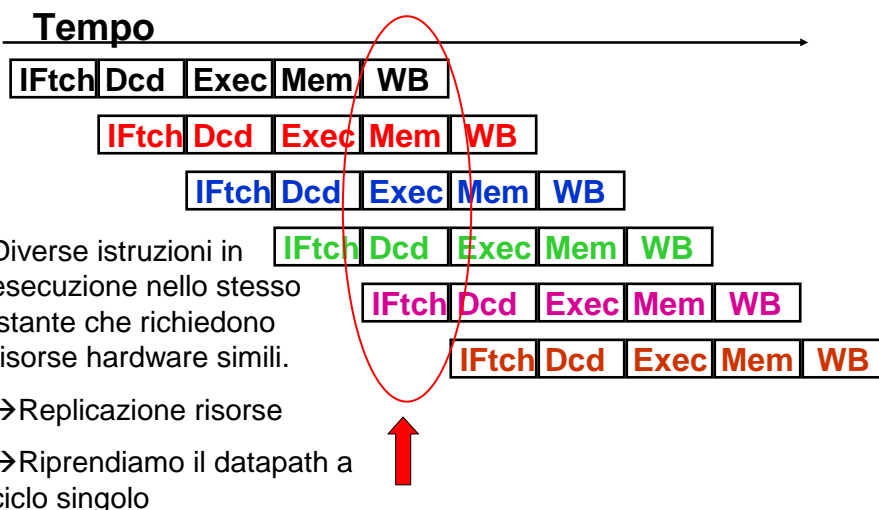
## Realizzazione in Pipelining del MIPS

- **Aspetti dell'ISA MIPS che favoriscono il pipelining:**
  - Tutte le istruzioni hanno la stessa lunghezza (32 bit)
    - Più semplice il fetch nel 1° passo e il decode nel 2° passo
  - Pochi formati di istruzione (3) con **simmetria** tra i formati
    - Possibile cominciare la lettura del register file nel 2° passo
  - Le operazioni in memoria limitate alle istruzioni di load/store
    - Possibile usare il passo di execute per calcolare gli indirizzi
  - Ogni istruzione MIPS scrive al più un risultato e lo fa verso la fine del pipeline
- **Possibili problemi**
  - **Allee strutturali:** che cosa succede se è presente un'unica memoria ?
  - **Allee di controllo:** che cosa succede in corrispondenza di salti ?
  - **Allee sui dati:** che cosa succede se gli operandi sorgente di un'istruzione dipendono dal risultato di un'istruzione precedente ?

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 6

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

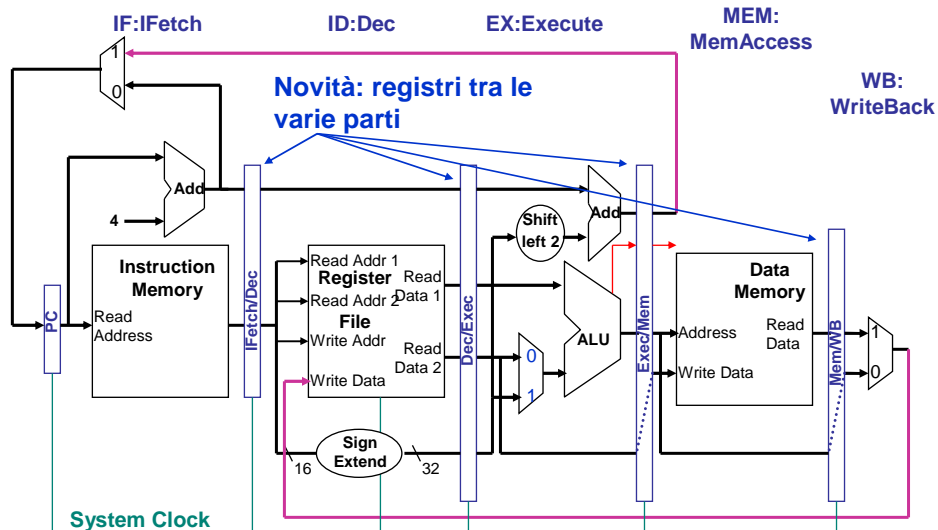
## Quale datapath ?



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 7

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Modifiche al datapath per il Pipeline



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 8

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

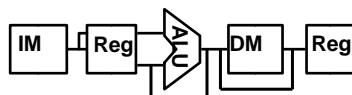
## Datapath per il pipeline

- I registri sono presenti tra le varie parti del datapath, ognuna delle quali realizza una particolare fase. I registri separano una sezione dall'altra, evitando così che le diverse istruzioni in esecuzione interferiscano tra loro.
- Il flusso dei dati è da sinistra verso destra con due eccezioni significative:
  - WB scrive il risultato nel file register, nel mezzo del data path
  - Uno dei possibili valori per l'aggiornamento del PC proviene dalla sezione MEM
- Solo le istruzioni successive possono essere influenzate da questi movimenti dati in "direzione opposta" al flusso consueto:
  - WB → ID provoca data hazards (alea sui dati)
  - MEM → IF provoca control hazards (alea sul controllo)

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 9

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Rappresentazione grafica del pipeline MIPS



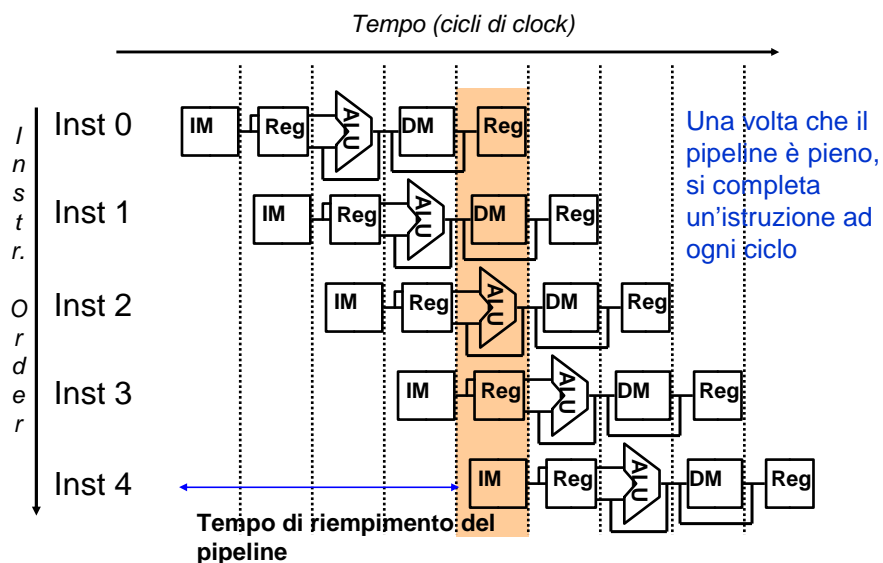
E' di aiuto per rispondere a domande quali:

- Quanti cicli sono necessari per eseguire un certo codice ?
- Che cosa sta facendo l'ALU durante il ciclo 4?
- C'è un'alea ? Come può essere risolta ?

*Calcolatori Elettronici II*  
Pipeline - 10

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Il pipeline ottimizza il throughput

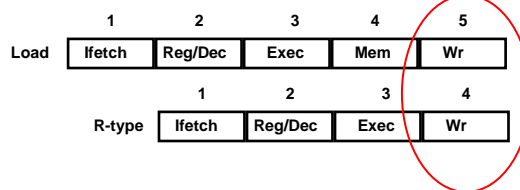


*Calcolatori Elettronici II*  
Pipeline - 11

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Osservazione importante

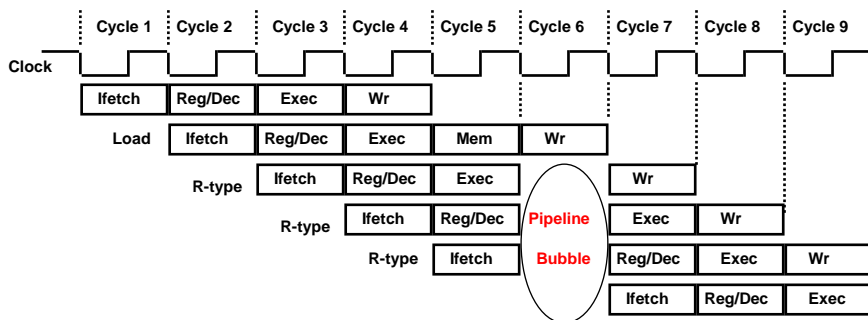
- Ogni unità funzionale può essere usata solo una volta da ciascuna istruzione (ci sono 5 istruzioni in esecuzione contemporanea)
- Condizione necessaria, ma non sufficiente
- L'uso di unità funzionali in passi diversi da parte di istruzioni diverse potrebbe generare alee. Esempio:
  - Load usa il Write Port del Register File durante il 5° passo
  - Le istruzioni R-type usano il Write Port del Register File durante il 4° passo
- Due modi possibili per risolvere l'alea



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 12

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Soluzione 1: “Bolla” nel Pipeline



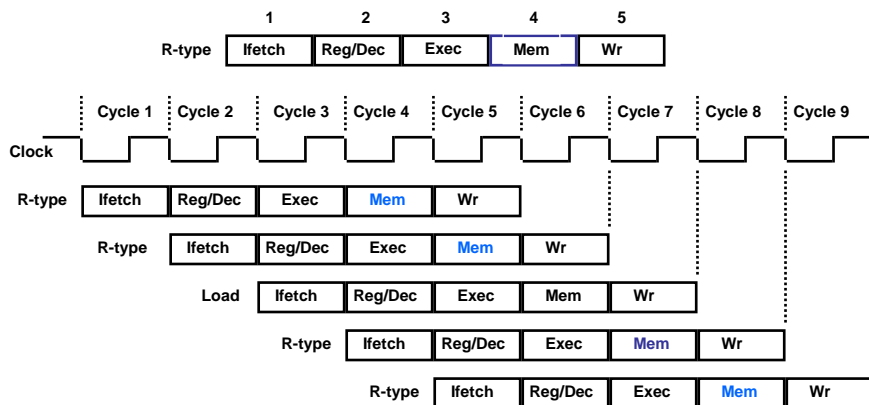
- Si inserisce una “bolla” nel pipeline per evitare due write nello stesso ciclo (nel ciclo procede solo la prima istruzione impegnata nel write) :
  - Logica di controllo complessa
  - Si perde la possibilità di avviare altre istruzioni

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 13

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Soluzione 2: Ritardo del Write

- Si ritarda di un ciclo il write delle istruzioni R-type
  - Tutte le istruzioni accedono al Write Port del R.F. nel 5° passo  
→nessun conflitto
  - Il 4° passo (Mem) per le istr. R-type è in effetti un passo NOP



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 14

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Altri problemi dal pipelining ?

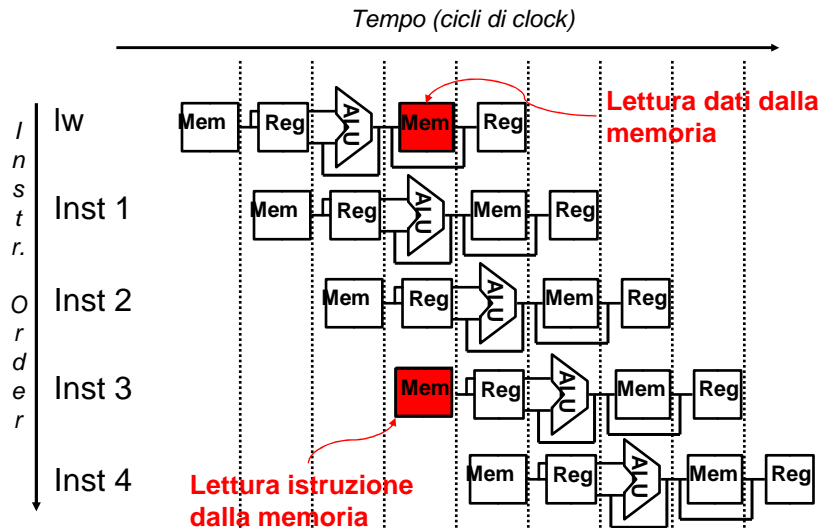
- **Alee**
  - **Alee strutturali**: tentativo di usare contemporaneamente la stessa risorsa da parte di due istruzioni differenti
  - **Alee sui dati** : tentativo di usare i dati prima che siano disponibili
    - Gli operandi sorgente di un'istruzione sono prodotti da un'istruzione precedente che è ancora nel pipeline
    - Istruzione di Load seguita immediatamente da un'istruzione che richiede l'operando del load come sorgente per un'operazione sull'ALU
  - **Alee sul controllo**: tentativo di prendere una decisione prima che la condizione sia stata valutata
    - Istruzioni di salto
- È sempre possibile eliminare le alee inserendo dei tempi morti ("bolle"), ma si abbassa l'efficienza

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 15

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino



## Alea strutturale 1: memoria unica



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 16

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

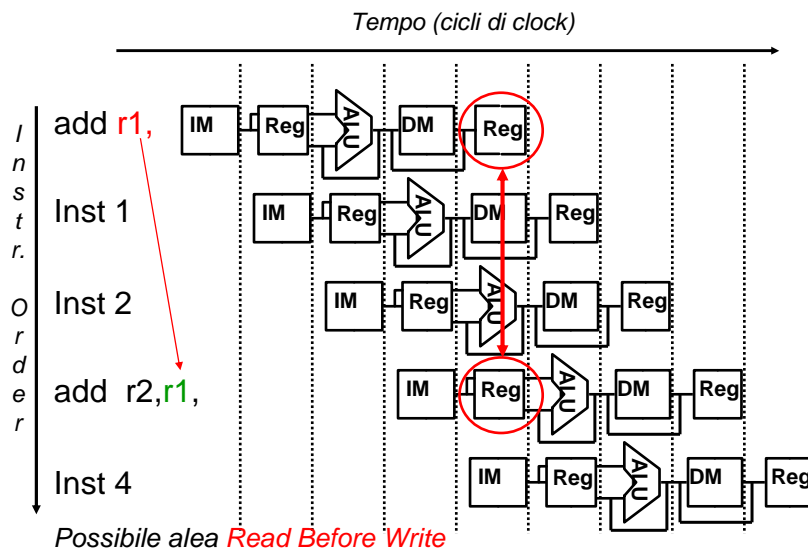
## Alea strutturale 1: memoria unica

- Soluzione:
  - Creazione di una seconda memoria irrealizzabile e inefficiente
  - Ne simuliamo la presenza tramite una memoria cache separata in cache istruzioni e cache dati.

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 17

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea strutturale 2: accesso ai registri



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 18

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

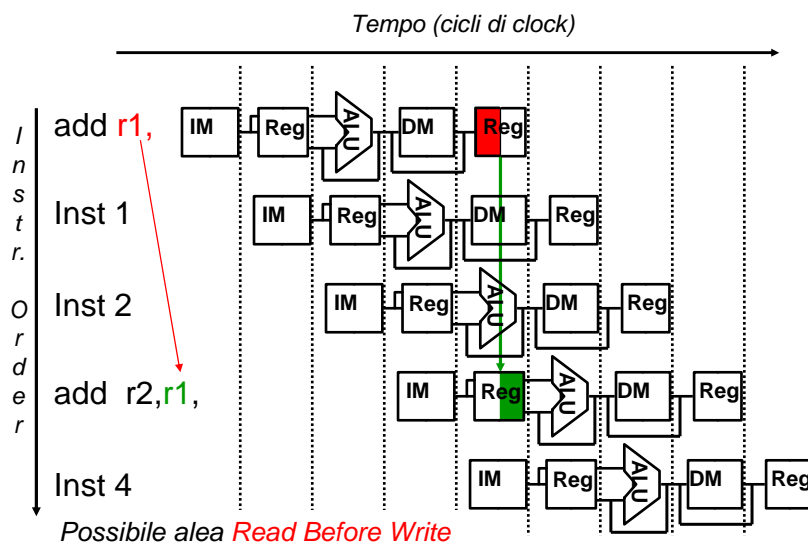
## Alea strutturale 2: accesso ai registri

- L'accesso ai registri è molto veloce: richiede meno di metà del tempo necessario ad un'operazione ALU
- Soluzione: si introduce la convenzione
  - Scrittura sui registri durante la prima metà del ciclo di clock
  - Lettura dai registri durante la seconda metà del ciclo di clock
  - Risultato : possibile realizzare senza problemi un Read ed un Write durante lo stesso ciclo di clock

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 19

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea strutturale 2: accesso ai registri



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 20

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati

- Consideriamo la sequenza di istruzioni

add \$t0, \$t1, \$t2

sub \$t4, \$t0 , \$t3

and \$t5, \$t0 , \$t6

or \$t7, \$t0 , \$t8

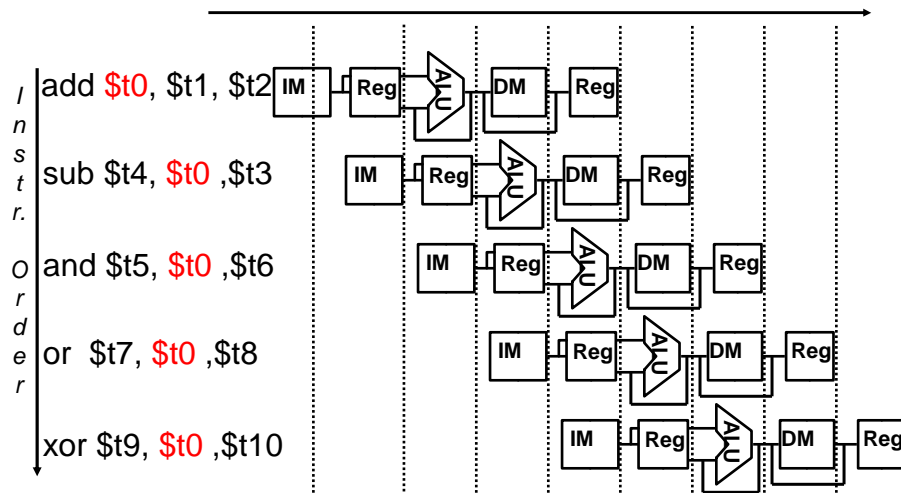
xor \$t9, \$t0 , \$t10

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 21

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati

- L'influenza su fasi precedenti produce alee

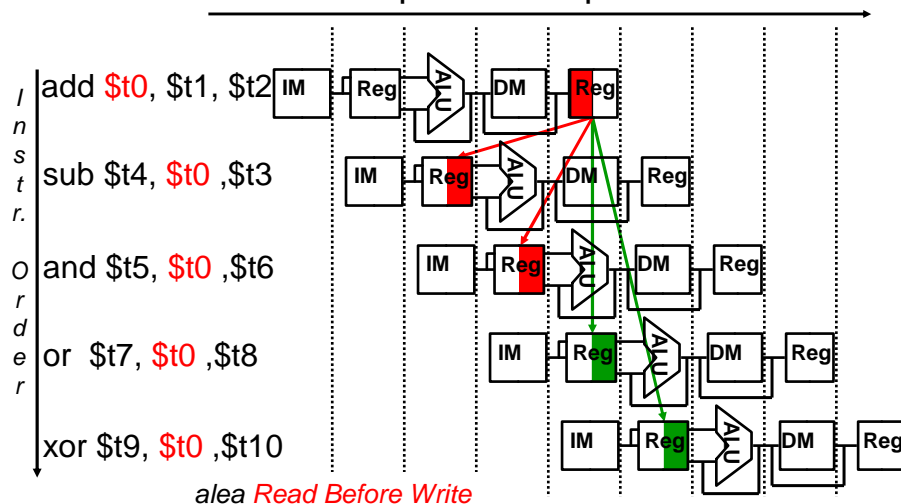


Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 22

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati

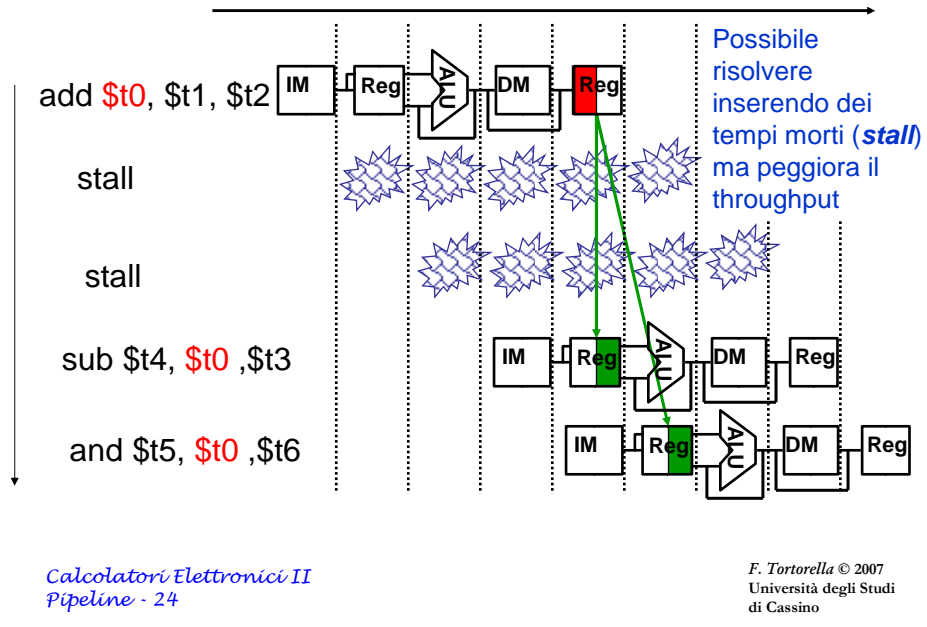
- L'influenza su fasi precedenti produce alee



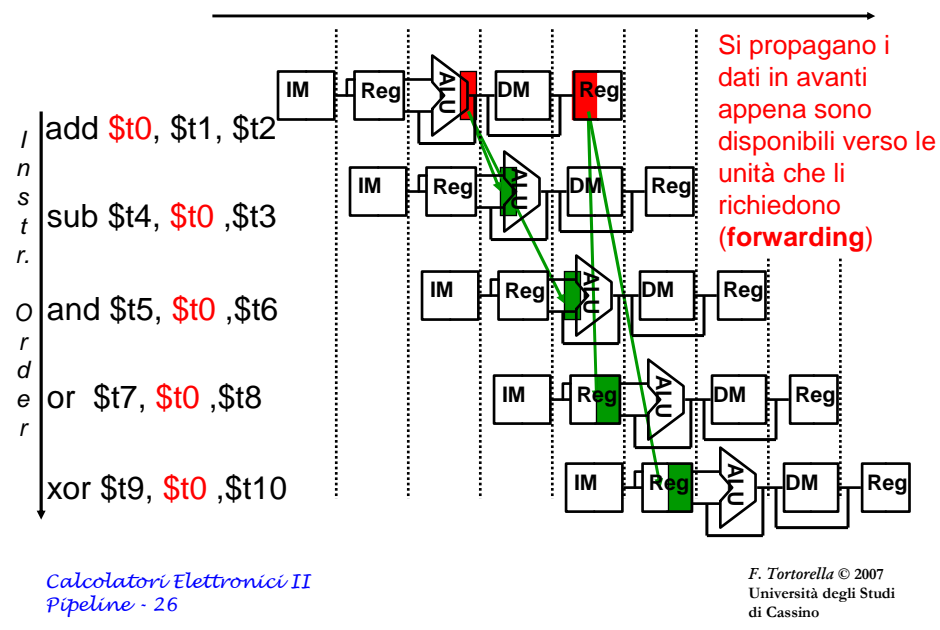
Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 23

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati: soluzione 1

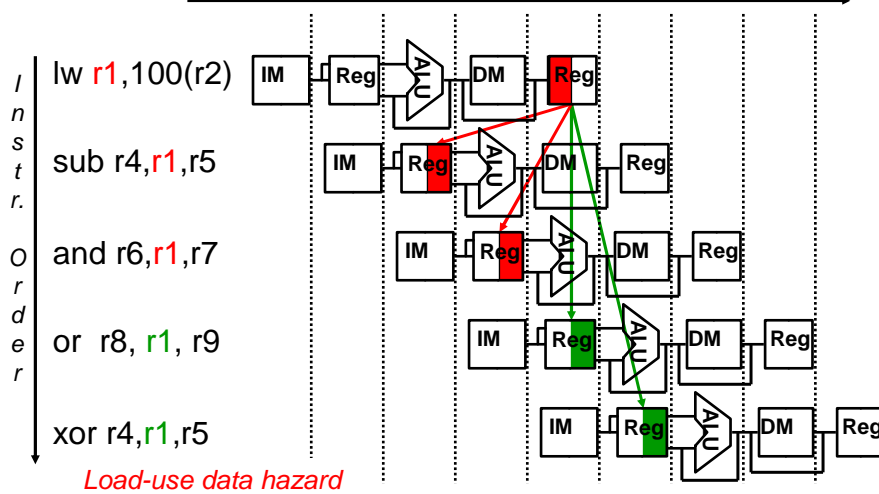


## Alea sui dati: soluzione 2



## Alea sui dati da Load

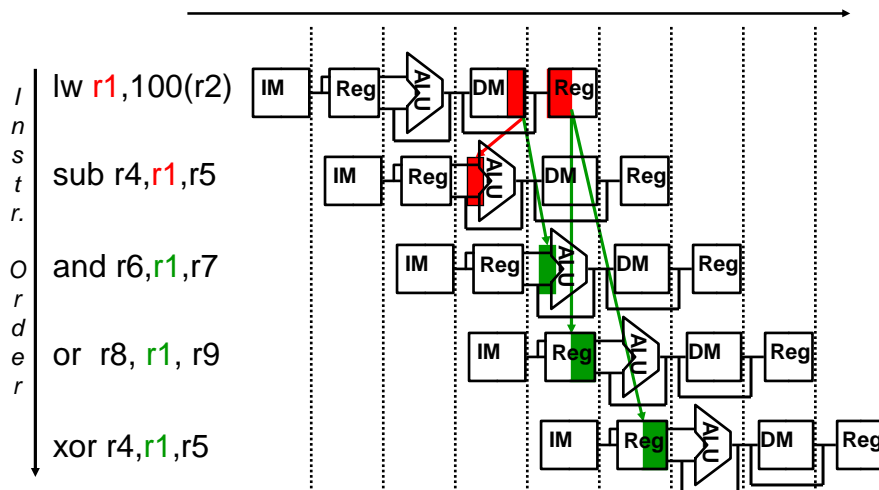
Simile al precedente, ma con una difficoltà in più



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 27

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati da Load: forwarding



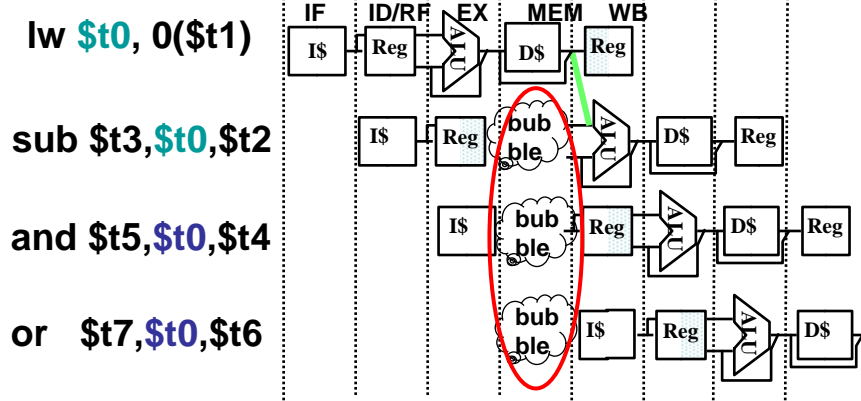
- Forwarding insufficiente. Necessario uno stall ?

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 28

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati da Load

- Il controllo deve bloccare il pipeline
- **interlock**



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 29

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati da Load

- Lo spazio per l'istruzione dopo un load è chiamato "**load delay slot**"
- Se l'istruzione usa il risultato del load, allora il controllo dovrà forzare uno stall per un ciclo.
- Non necessario se il traduttore inserisce nello slot un'istruzione non dipendente dal load (reordering) → traduttore cosciente del pipelining
- Anche se questo non fosse possibile, si può risolvere ugualmente il problema inserendo un NOP nello slot
  - Chi inserisce il NOP ?

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 30

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea sui dati da Load

- Lo stall è equivalente ad un NOP

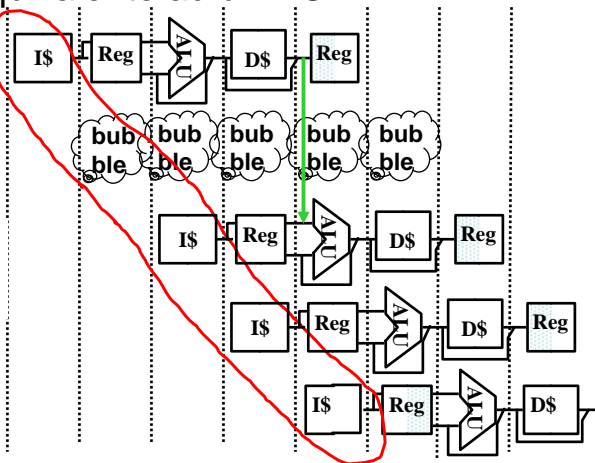
lw \$t0, 0(\$t1)

nop

sub \$t3, \$t0, \$t2

and \$t5, \$t0, \$t4

or \$t7, \$t0, \$t6



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 31

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Nota storica

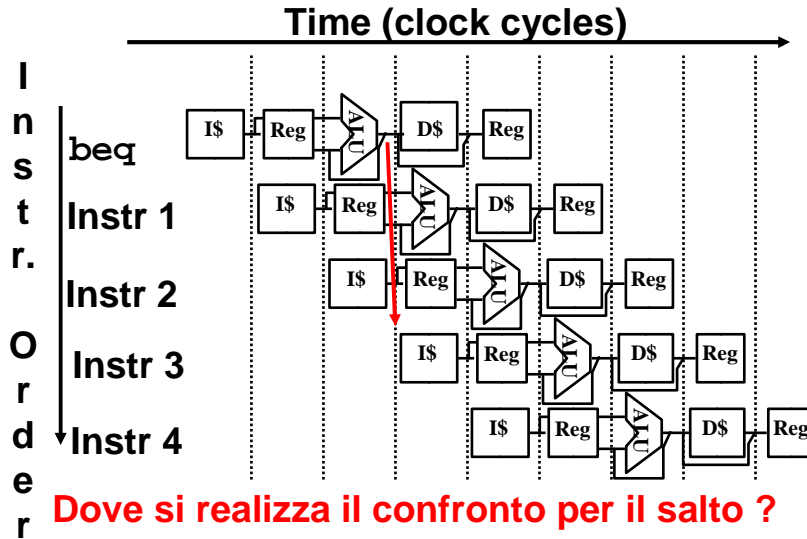
- Il MIPS è stato il primo progetto di processore a non risolvere il load-use data hazard con interlock e stall
- Acronimo reale per il MIPS:  
Microprocessor without  
Interlocked  
Pipeline  
Stages

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 32

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino



## Alea di controllo: salto



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 33

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea di controllo: salto

- L'unità per il confronto e la decisione è nel terzo stage (ALU stage)
  - Quindi altre due istruzioni dopo il beq entreranno nel pipeline, quale che sia il risultato del confronto
- Comportamento (desiderato) del salto
  - Se il confronto fallisce continua la normale esecuzione
  - Se il confronto è verificato, non eseguire altre istruzioni successive al salto e vai all'indirizzo specificato

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 34

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea di controllo: salto. Soluzione 1

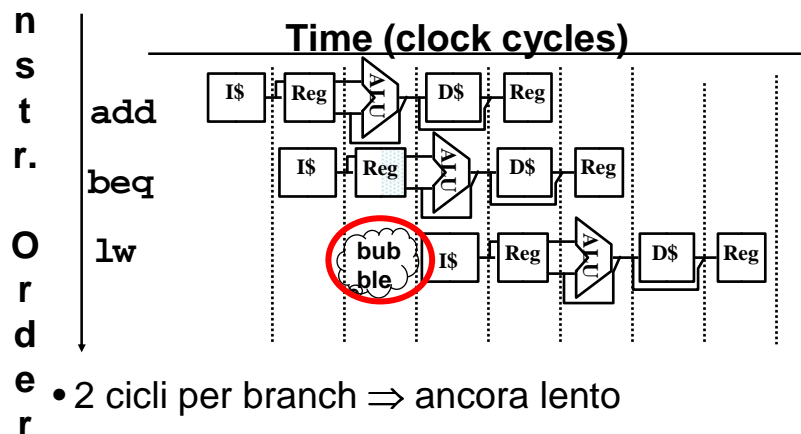
- Blocco del pipeline finchè il confronto non sia stato realizzato
  - Inserimento di NOP
  - Conseguenza: i salti richiedono 3 cicli di clock (assumendo che il confronto si faccia nel 3° stage)

## Alea di controllo: salto. Soluzione 2.1

- Soluzione 2.1:
  - Anticipazione del confronto al passo 2
  - Appena l'istruzione è decodificata, si può decidere immediatamente e modificare il PC (se necessario)
  - In questo modo entra solo un'istruzione nel pipeline
    - necessario solo un NOP

## Alea di controllo: salto. Soluzione 2.1

- Inserimento di una bolla



Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 37

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Alea di controllo: salto. Soluzione 2.2

- Soluzione 2.2 (ridefinizione del salto)
  - Vecchia definizione: in caso di salto, nessuna istruzione successiva al branch deve essere eseguita
  - Nuova definizione: in ogni caso, viene eseguita l'istruzione che segue immediatamente il branch (definita **branch-delay slot**)
- Questo approccio viene definito **"Delayed Branch"**

Calcolatori Elettronici II  
Pipeline - 38

F. Tortorella © 2007  
Università degli Studi  
di Cassino

## Note sul Branch-Delay Slot

- Caso peggiore
  - Inserimento di un NOP nello slot
- Caso migliore
  - È possibile trovare un'istruzione precedente al branch che possa essere posticipata al branch senza alterare il flusso di controllo (e dei dati)
  - Dipende dalle capacità del traduttore
- Anche i jump hanno un delay slot

## Esempio: Nondelayed vs. Delayed Branch

### Nondelayed Branch

```
or $8, $9, $10
```

```
add $1, $2, $3
```

```
sub $4, $5, $6
```

```
beq $1, $4, Exit
```

```
xor $10, $1, $11
```

Exit:

### Delayed Branch

```
add $1, $2, $3
```

```
sub $4, $5, $6
```

```
beq $1, $4, Exit
```

```
or $8, $9, $10
```

```
xor $10, $1, $11
```

Exit: