



Interrupt ed Eccezioni

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

Università degli Studi di Milano

Riferimento al Patterson, versione 5: 4.9 e A.7

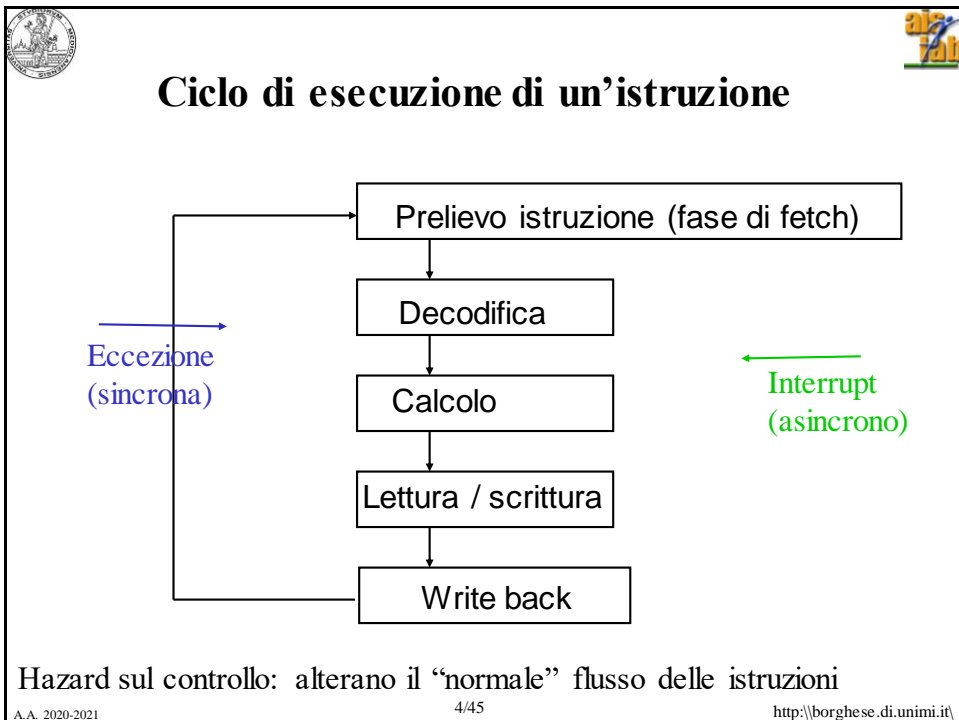
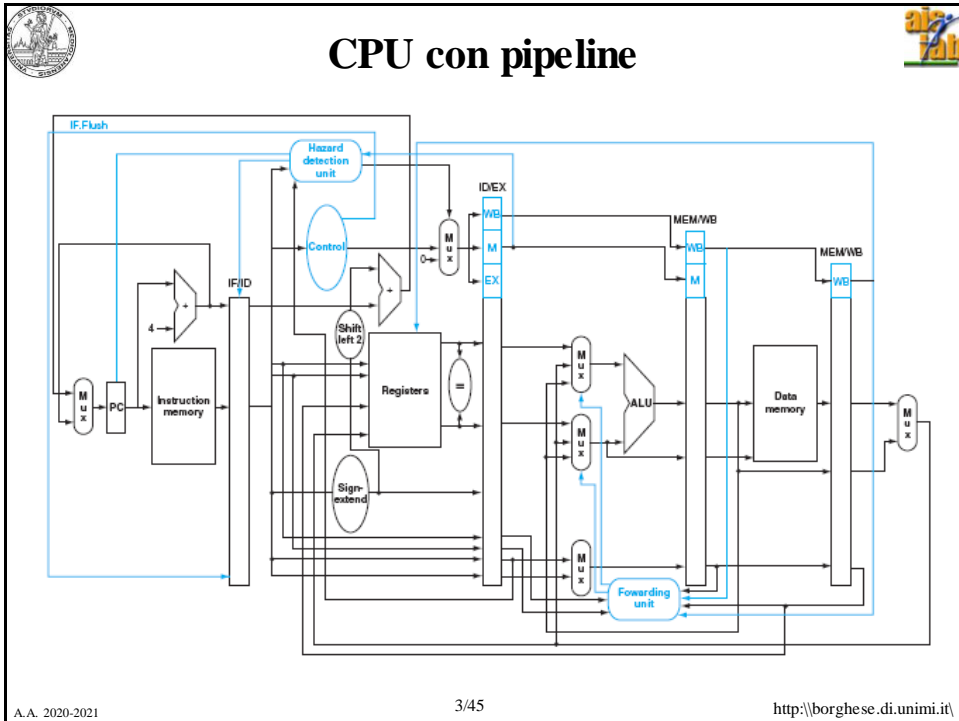


Sommario

Interrupt ed eccezioni

HW per la gestione delle interruzioni: modifica della CPU

SW per la gestione delle interruzioni: esempio di procedura di risposta





Eccezioni ed Interrupt



Eccezioni. Generamente internamente al processore (e.g. overflow), **modificano immediatamente** il flusso di esecuzione di un'istruzione.

Interrupt. Generate esternamente al processore, asincrono (e.g. **richiesta di attenzione da parte di una periferica**). Viene **generalmente atteso il termine del ciclo di esecuzione di un'istruzione prima di servirlo**.

Tipo di evento	Provenienza	Terminologia MIPS
Richiesta di un dispositivo di I/O	Esterna	Interrupt
Chiamata al SO da parte di un programma	Interna	Eccezione
Overflow aritmetico	Interna	Eccezione
Uso di un'istruzione non definita	Interna	Eccezione
Malfunzionamento dell'hardware	Entrambe	Eccezione o Interruzione



Tipo di risposta ad un'eccezione



E' software (Sistema Operativo)

Occorre il supporto dell'hardware

Occorre un coordinamento tra
SW (Sistema Operativo) e
HW (struttura della CPU)

- Riconoscere che si è verificata un'eccezione / interrupt
- Garantire la corretta esecuzione del codice
- Gestire l'eccezione / interrupt



2 tipi di risposte



Risposta vettorizzata: Ciascuna eccezione rimanda ad un indirizzo diverso del SO. Gli indirizzi sono spaziati equamente. Dall'eccezione si ricava l'indirizzo della prima istruzione di risposta e quindi implicitamente la causa (cf. Jump Address Table).
Interrupt # -> indirizzo nel PC (prima istruzione del SO di gestione di quell'eccezione)

Tramite registro: detto registro **causa**. Il SO ha un unico entry point per la gestione delle eccezioni (in MIPS $0x80000180 > 2\text{Gbyte} + 384\text{ Byte}$).
La causa dell'eccezione viene memorizzata in MIPS nel registro **causa**.
Interrupt -> indirizzo nel PC (prima istruzione del SO di gestione di tutte le eccezioni)
Il SO decodifica la causa dell'eccezione analizzando il registro causa (le eccezioni sulla memoria rimandano all'indirizzo $0x800000 = 2\text{ Gbyte}$)



Interrupt vettorizzati



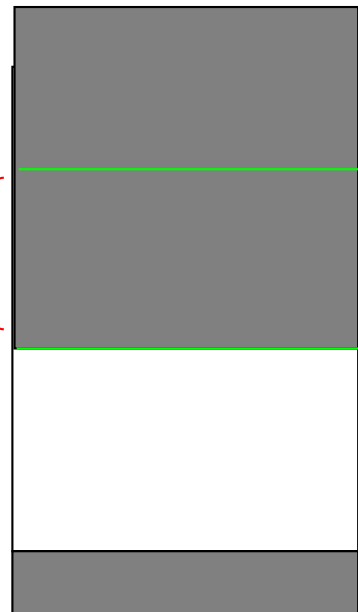
$$\text{Offset} = \#_interrupt * \text{space}$$



Jump address table

Offset

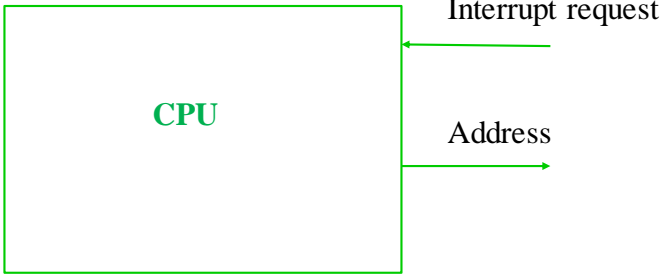
Base_address

$$\text{Address_final} = \text{Base_address} + \text{offset}$$




Intel: real mode (8088)



- IVT – Interrupt Vector Table (1KByte – 0x0000 a 0x0400, base address = 0)
- 256 interrupt diversi (primi 32 riservati a eccezioni del processore)
- A ciascuna eccezione viene associate un gruppo di **4 Byte** (CS:IP)

Salto a CS:IP (equivalente al PC nel MIPS) comandato dall'hardware.

A.A. 2020-2021
9/45
<http://borghe.se.di.unimi.it/>



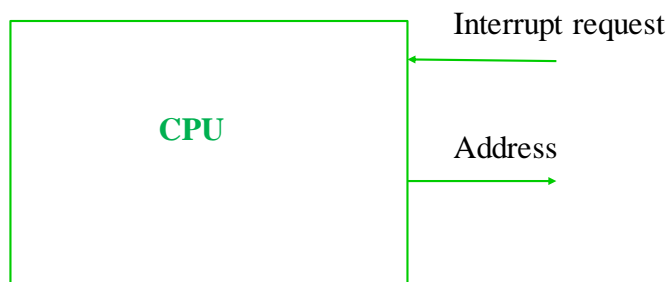
Interrupt in Protected Mode

INT_NUM	Short Description
0x00	Division by zero
0x01	Single-step interrupt (see iump flag)
0x02	NMI
0x03	Breakpoint (callable by the special 1-byte instruction 0xCC, used by debuggers)
0x04	Overflow
0x05	Bounds
0x06	Invalid Opcode
0x07	Coprocessor not available
0x08	Double fault
0x09	Coprocessor Segment Overrun (<i>386 or earlier only</i>)
0x0A	Invalid Task State Segment
0x0B	Segment not present
0x0C	Stack Fault
0x0D	General protection fault
0x0E	Page fault (Virtual Memory)
0x0F	<i>reserved</i>
0x10	Math Fault
0x11	Alignment Check
0x12	Machine Check
0x13	SIMD Floating-Point Exception
0x14	Virtualization Exception
0x15	Control Protection Exception

A.A. 2020-2021



Intel: protected mode



- IVT – Interrupt Vector Table (2KByte – 0x0000 a 0x800, base address contained in IDTR register)
- 256 interrupt diversi.
- A ciascun interrupt viene associate un blocco di **8 Byte** che rappresenta l'indirizzo di un segmento (LDT, GDT – Local, Global Description Table) + un offset di segmento.



Sommario



Interrupt ed eccezioni

HW per la gestione delle interruzioni: modifica della CPU

SW per la gestione delle interruzioni: esempio di procedura di risposta



I registri coinvolti



Nel MIPS un register file secondario, il coprocessore 0, salva le informazioni richieste

Nome del registro	Numero del registro in coprocessore 0	Utilizzo
BadVAddr	8	Registro contenente l'indirizzo di memoria a cui si è fatto riferimento (cf. "page fault").
Count	9	Timer (MIPS: 10ms).
Compare	11	Valore da comparare con un timer.
Status	12	Maschera delle interruzioni e bit di abilitazione. Stato dei diversi livelli di priorità (6 HW e 2 SW).
Cause	13	Tipo dell'interruzione e bit delle interruzioni pendenti
EPC	14	Registro contenente l'indirizzo dell'istruzione che ha causato l'interruzione.
Config	16	Configurazione della macchina

Insieme di registri a 32 bit denominato coprocessore 0.



Alcuni interrupt ed eccezioni



Counter. Quando viene raggiunto il valore 0 di conteggio viene lanciato un interrupt HW.

Memory access error (lettura/scrittura memoria, trasferimento dati - Miss). L'indirizzo incriminato viene salvato nel registro **BadVAddr** e viene lanciata un'eccezione.

Nome del registro	Numero del registro in coprocessore 0	Utilizzo
BadVAddr	8	Registro contenente l'indirizzo di memoria a cui si è fatto riferimento (cf. "page fault").
Count	9	Timer (MIPS: 10ms).
Compare	11	Valore da comparare con un timer.
Status	12	Maschera delle interruzioni e bit di abilitazione. Stato dei diversi livelli di priorità (6 HW e 2 SW).
Cause	13	Tipo dell'interruzione e bit delle interruzioni pendenti
EPC	14	Registro contenente l'indirizzo dell'istruzione che ha causato l'interruzione.
Config	16	Configurazione della macchina



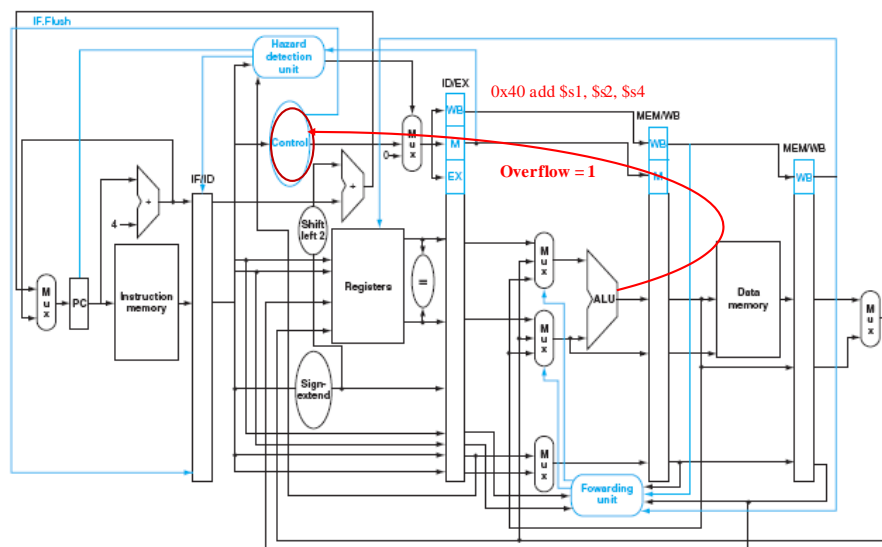
Gestione HW di un'eccezione (mediante registro)

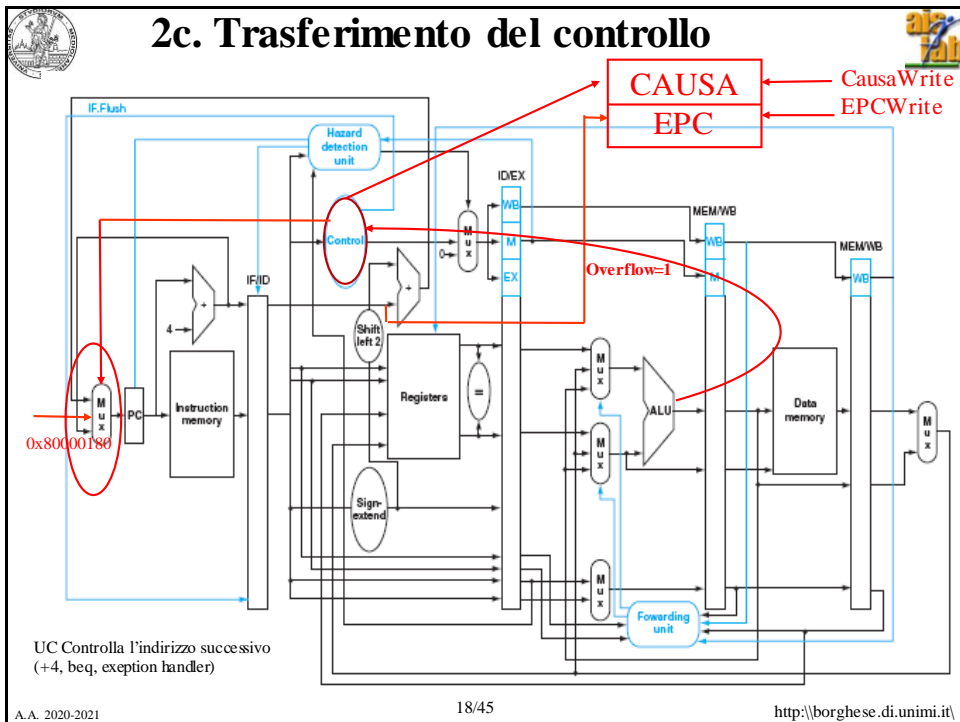
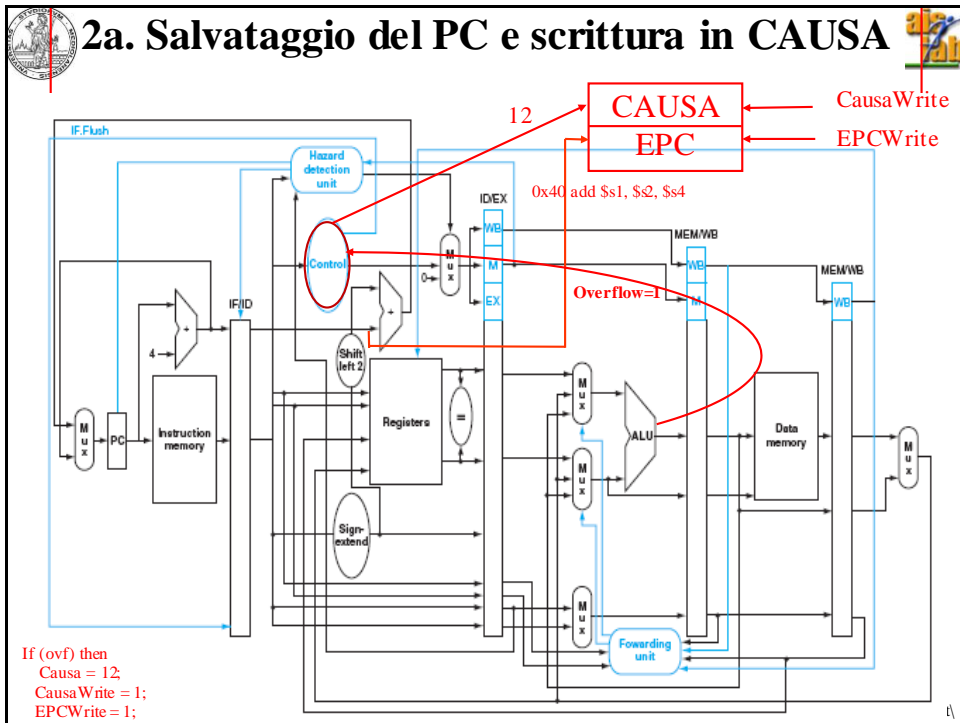


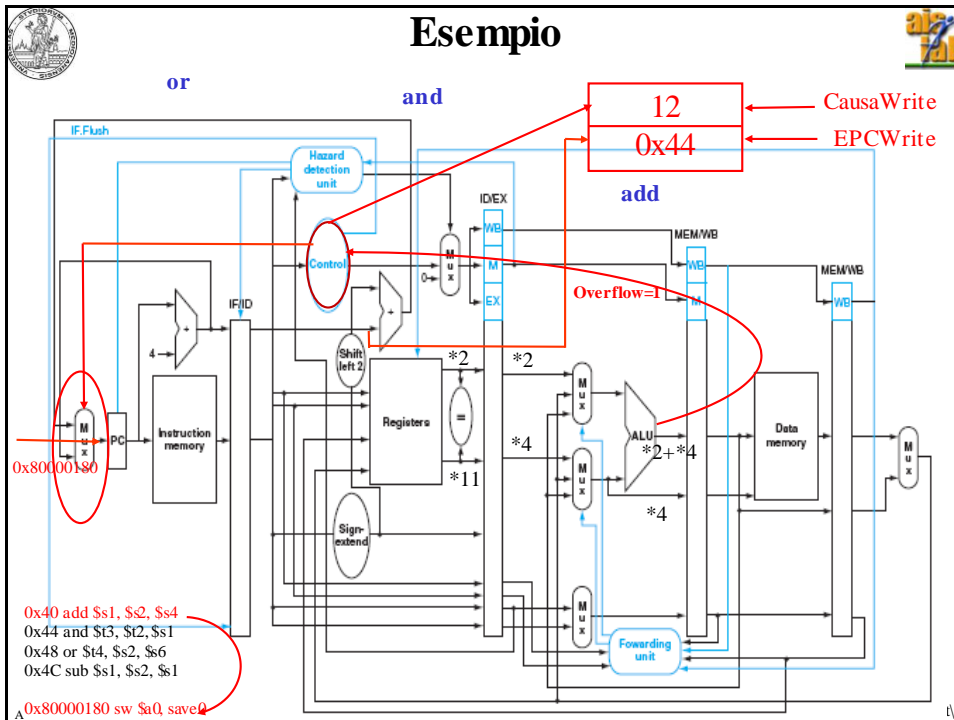
- 1) **Identificazione** (e.g. overflow, istruzione non valida)
- 2a) **Salvataggio dell'indirizzo dell'istruzione incriminata (registro EPC) e scrittura della causa dell'eccezione nel registro causa.**
- 2b) **Eliminazione delle istruzioni successive a quella che ha causato l'eccezione.**
- 2c) **Trasferimento del controllo (valore del PC) alla prima istruzione del programma di risposta alle eccezioni (*exception handler*): offerta di servizi, modifica operandi, terminazione del programma...).**
-
- 3) **Ritorno all'istruzione che ha causato l'eccezione o all'istruzione successiva.**



1. Identificazione eccezione Ovf







Strategie di gestione dell'eccezione Ovf

Le eccezioni vengono trattate come una forma di hazard sul controllo.

Nel caso si verifichi un'eccezione nella fase di calcolo (overflow ad esempio di `add $s1, $s2, $s4`) occorre:

- fare il **flush** delle istruzioni già nella pipeline (compresa la `add`, occorre che queste istruzioni non modifichino lo stato della CPU).
- caricare l'indirizzo dell'entry point del programma di gestione delle eccezioni.

Flush delle istruzioni in:

- Fase di fetch
- Fase di decodifica
- Fase di calcolo della `add` (non deve scrivere il risultato = overflow)

Sì, impostiamo i segnali (RegWrite) a ZERO



Hardware aggiuntionale

Gestione delle eccezioni di:

- Istruzione non valida (causa = 13; trap)
- Overflow (causa = 12)

Registro EPC (\$14): è un registro a 32 bit utilizzato per memorizzare l'indirizzo dell'istruzione coinvolta (in coprocessore 0)

Registro causa (\$13): è un registro utilizzato per memorizzare la causa dell'eccezione; in MIPS sono 32 bit. 5 bit servono per definire la causa dell'eccezione (in coprocessore 0):

- Registro causa = 12 -> istruzione indefinita. ↻
- Registro causa = 13 -> 1 overflow aritmetico. ↻

Segnali di controllo (dalla UC):

CausaWrite – scrittura nel registro Causa.

CausaInt – Dato per il registro Causa.

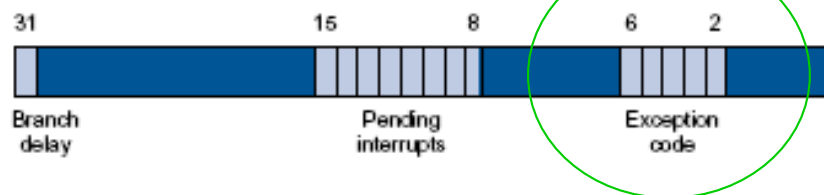
EPCWrite – scrittura nel registro EPC.

PCSrc – Aggiunta di un terzo input al PC per la scelta dell'indirizzo istruzione risposta alle eccezioni.

Modifiche ai registri di pipeline e aggiunta di bus interni alla CPU



Cause register



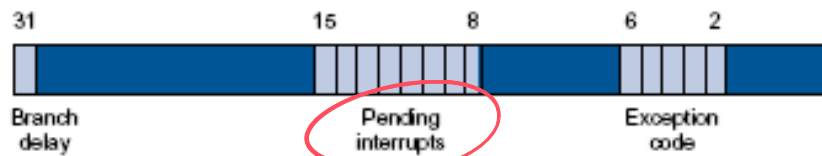
int



Number	Name	Cause of exception
0	Int	interrupt (hardware)
4	AdEL	address error exception (load or instruction fetch)
5	AdES	address error exception (store)
6	IBE	bus error on instruction fetch
7	DBE	bus error on data load or store
8	Sys	syscall exception
9	Bp	breakpoint exception
10	RI	reserved instruction exception
11	CpU	coprocessor unimplemented
12	Ov	arithmetic overflow exception
13	Tr	trap
15	FPE	floating point



Cause register



Branch delay bit: è 1 se l'ultima eccezione si è verificata in fase di fetch di un'istruzione inserita in un "branch delay slot"

L'istruzione successiva potrà essere o l'istruzione successiva alla beq o l'istruzione di destinazione del salto.

non ancora eseguiti



Interrupt multipli

Interrupt accodati (gestiti come FIFO).

Interrupt annidati (gestiti come LIFO).

Cosa suggerite di utilizzare per interrupt esterni?

Cosa suggerite di utilizzare per interrupt interni?

Come gestire la coda delle interruzioni?

La soluzione è quella di fermare l'esecuzione di interrupt quando occorre servire un interrupt più importante (a priorità più elevata).

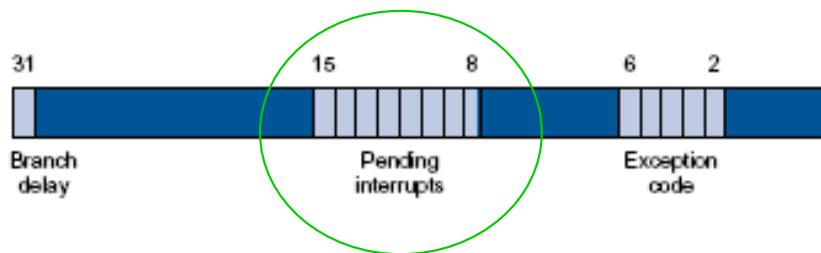
Meccanismi di gestione di interrupt multipli:

Maschere di interrupt. La maschera di interrupt è una sequenza di bit in cui ogni bit corrisponde ad un livello di interrupt. Gli interrupt di un certo livello possono essere serviti solo se il corrispondente bit della maschera vale 1.

Priorità di interrupt. Ad ogni tipo di interrupt viene associata una priorità, una priorità è anche associata ai vari stati del processore.



Registro causa e interrupt multipli



Multiple exceptions. Possono esserci più eccezioni nello stesso ciclo di clock. Nel MIPS la **prima istruzione** in ordine temporale viene interrotta. Il codice dell'eccezione riguarda la prima istruzione.

Pending interrupts. Diventano 1 quando un interrupt HW o SW viene richiesto a quel certo livello.

Gli interrupt vengono registrati tra i pending interrupt e serviti secondo la loro priorità.



Status register – maschera di interrupt



Registra lo stato della CPU nei confronti di interrupt / eccezioni

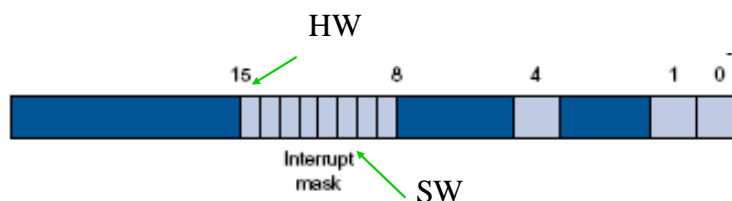
Interrupt mask, memorizzata nei bit 8-15 dello status register. Sono infatti previsti 8 diversi livelli di interrupt (6 interrupt hw e 2 sw).

Il bit 8 della maschera di interrupt è relativo all'interrupt sw di livello 0, il bit 10 a quello hw di livello 2 e così via.

Un bit a 1 nella maschera di interrupt significa che gli interrupt a quel livello sono abilitati.

Quando arriva un interrupt imposta a 1 il bit corrispondente del registro causa. Verrà servito quando l'equivalente bit della maschera di stato è impostato a 1.

Vengono disabilitati ad esempio quando bit a priorità più elevata va in esecuzione (mascheramento).





Status register - II

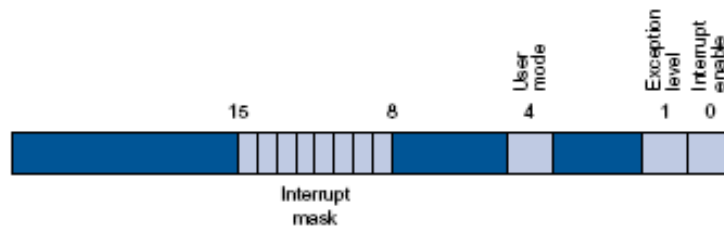


User Mode, abilita il Kernel mode (=0).

Exception level bit. Quando si verifica un'eccezione viene impostato a uno, disabilitando così gli interrupt veri e propri.

Interrupt enable bit. E' set ad 1 quando le interruzioni sono consentite (la CPU "sente" gli interrupt).

I bit 0 e 1 abilitano gli interrupt esterni.



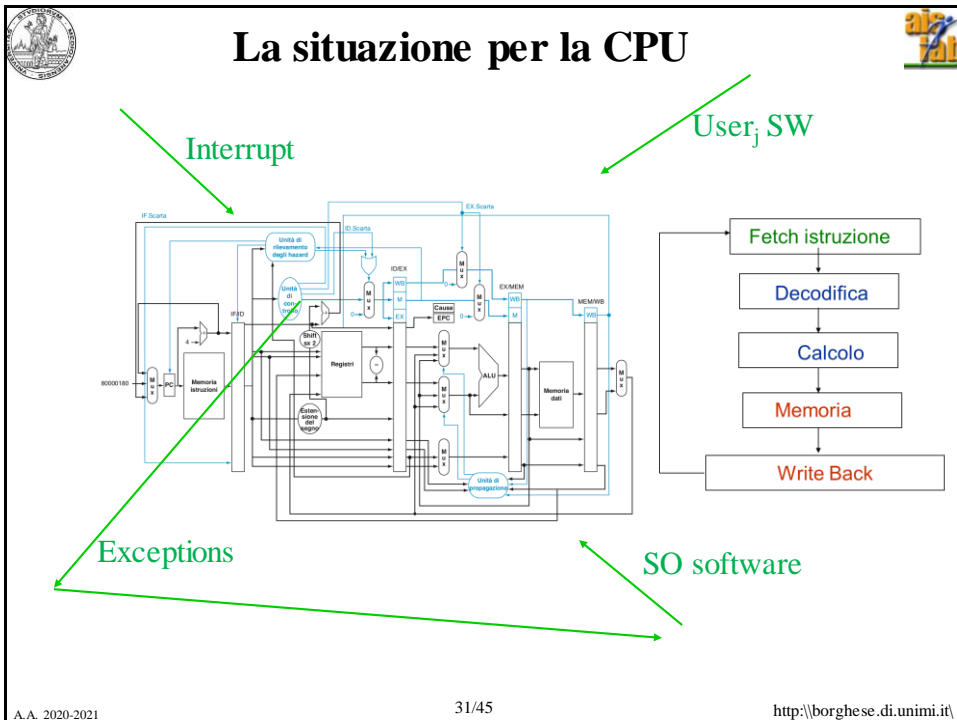
Sommario



Interrupt ed eccezioni

HW per la gestione delle interruzioni: modifica della CPU con pipeline

SW per la gestione delle interruzioni: esempio di procedura di risposta



MIPS: Software conventions for Registers

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

A.A. 2020-2021 32/55 <http://borgnese.di.unimi.it/>



Come accedere ai registri del Coprocessore 0



Nome del registro	Numero del registro in coprocessore 0	Utilizzo
BadVAddr	8	Registro contenente l'indirizzo di memoria a cui si è fatto riferimento (cf. "page fault").
Count	9	Timer (MIPS: 10ms).
Compare	11	Valore da comparare con un timer.
Status	12	Maschera delle interruzioni e bit di abilitazione. Stato dei diversi livelli di priorità (6 HW e 2 SW).
Cause	13	Tipo dell'interruzione e bit delle interruzioni pendenti
EPC	14	Registro contenente l'indirizzo dell'istruzione che ha causato l'interruzione.
Config	16	Configurazione della macchina

mfco \$k0, \$13 # copia il contenuto di "Causa" in \$s0
mtco \$k1, \$14 # copia il contenuto di \$k1 in "EPC"

La CPU non conosce nessuna semantica sui registri del coprocessore 0 come non la conosce sui registri del register file.



Come rispondere a un'eccezione



Ruolo dell'HW. Flush delle istruzioni e salvataggio di alcune informazioni in coprocessore 0

Ruolo del SW. Recuperare queste informazioni e prendere i provvedimenti opportuni.

La gestione degli interrupt e delle eccezioni deve essere coordinata tra SW e HW.

Il SW, a seconda della situazione può eseguire alcune azioni oppure terminare il processo (o il sistema – schermata blu), cioè inserire nel PC la prima istruzione di un altro processo, eventualmente sospeso (e in coda) e non tornare al PC salvato.

La sequenza logica di un "exception handler" (alcune operazioni svolte dall'HW altre devono essere svolte dal SW):

1. Salvare lo "stato": registri importanti + PC
2. Rispondere all'eccezione
3. Ripristinare lo "stato".

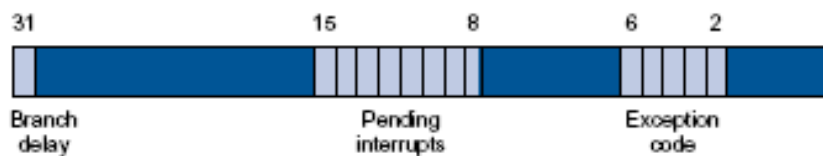


2. Risposta all'eccezione (core)



Supponiamo che venga semplicemente stampata a schermo la causa dell'eccezione e poi il programma possa riprendere.

- Leggo i registri causa ed EPC dal coprocessore 0
- Estraggo la causa dell'eccezione dal registro causa
- Se l'eccezione è un interrupt (causa = 0), termino
- Stampare la causa dell'eccezione e l'indirizzo (schermata blu)



2. Risposta all'eccezione (core) - I

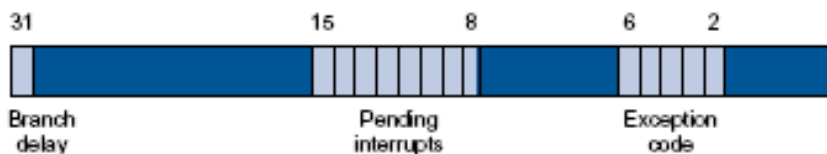


Supponiamo che venga semplicemente stampata a schermo la causa dell'eccezione e poi il programma possa riprendere.

- Leggo i registri causa ed EPC dal coprocessore 0

```
mfc0 $k0, $13 # read from coprocessore 0 cause register
mfc0 $k1, $14 # read from coprocessore 0 EPC
```
- Estraggo la causa dell'eccezione dal registro causa

```
srl $a0, $k0, 2 # allineo l'Exception code di causa a 0
andi $a0, $a0, 0x1f # estraggo i 5 bit 0:4 dai bit di $a0 (maschera = 31)
```





2. Risposta all'eccezione (core) - I



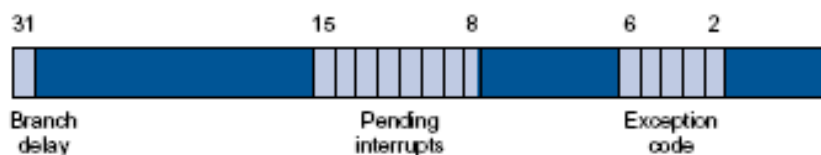
c. Se l'eccezione è un interrupt (causa = 0), termino

Number	Name	Cause of exception
0	Int	interrupt (hardware)
4	AdEL	address error exception (load or instruction fetch)

beq \$a0, \$zero, dopo # se causa = 0, nothing to do

d. Stampare la causa dell'eccezione e l'indirizzo (schermata blu) o qualsiasi azione sia richiesta per risolvere l'eccezione.

```
move $a1, $k1 # move $k1 in $a0 for visualization
jal print_exception # causa in $a0, EPC in $a1 (arguments di jal)
```



A.A. 2020-2021

<http://borghese.di.unimi.it/>



1. Salvare lo stato



- PC viene salvato in EPC
- L'exception handler deve risiedere nella parte riservata al SO (**.ktext**) e non nel segmento testo (**.text**).
- I registri \$k0, \$k1 sono registri temporanei riservati al SO.
- Il register file non viene modificato ad eccezione dei registri \$a0, \$a1
- \$a0, \$a1 devono essere salvati in memoria (**.kdata** e non **.data**) e non in stack perchè l'eccezione può riguardare proprio l'accesso allo stack!

```
.ktext 0x80000180
sw $a0, save0
sw $a1, save1
```

```
.kdata
save0: word 0
save1: word 0
```

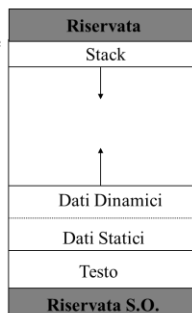
.ktext

2 Gbyte

$2^{28} = 256\text{Mbyte}$

4Mbyte

0



8 Mbyte
7 Mbyte

Segmento dati

Segmento testo

0

A.A. 2020-2021

38/45

<http://borghese.di.unimi.it/>

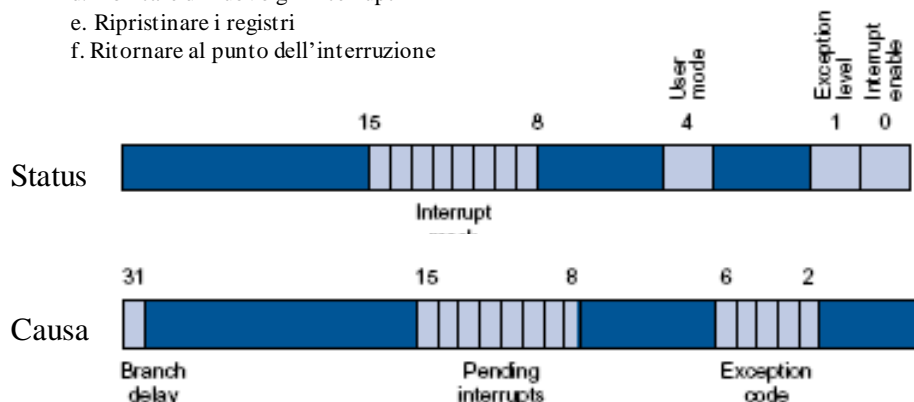


3. Ripristinare lo stato



Operazioni da eseguire in sequenza:

- Caricare l'indirizzo di ritorno (EPC-4) se l'istruzione deve essere rieseguita (e.g. eccezioni dalla memoria)
- Cancellare il registro causa
- Cancellare il flag di eccezione nel registro status
- Abilitare di nuovo gli interrupt
- Ripristinare i registri
- Ritornare al punto dell'interruzione



A.A. 2021



3. Ripristinare lo stato - I



- Caricare l'indirizzo di ritorno (EPC-4) se l'istruzione deve essere rieseguita

```
done:                                # Si arriva a questo punto dopo avere
                                     # risolto il problema sull'eccezione

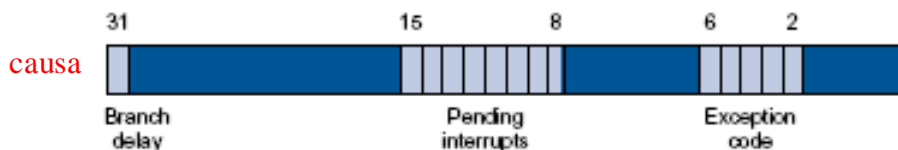
                                     # EPC is trova in $a1
                                     # porta $k1, che contiene PC+4, in EPC
mtc0 $k1, $14
```

- Azzerare il registro causa (ora contenuto in \$k0)

```
addi $a0, $a0, 0xffffffe0          # azzero i primi 5 bit
                                     # (exception code)

sll $k0, $a0, 2                     # Allineo di nuovo i bit di causa
mtco $k0, $13                       # aggiorna CAUSA
```

```
srl $a0, $k0, 2                     # allineo l'Exception code di causa a 0
andi $a0, $a0, 0x1f                 # estraggo i 5 bit 0:4 dai bit di $a0
                                     # (maschera = 31)
```



A.A. 2021

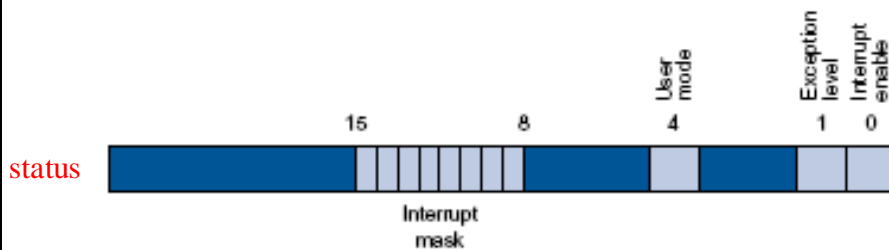


3. Ripristinare lo stato - II



- c. Cancellare il flag di eccezione nel registro status
- d. Abilitare di nuovo gli interrupt

```
mfc0 $k0, $12      # read status register from coprocessor 0
andi $k0, 0xffffd   # clear bit 1 (Exception level), preserve others
ori  $k0, $k0, 1     # set bit 0 (Enable interrupt)
mtc0 $k0, $12       # restore status register
```



3. Ripristinare lo stato - III

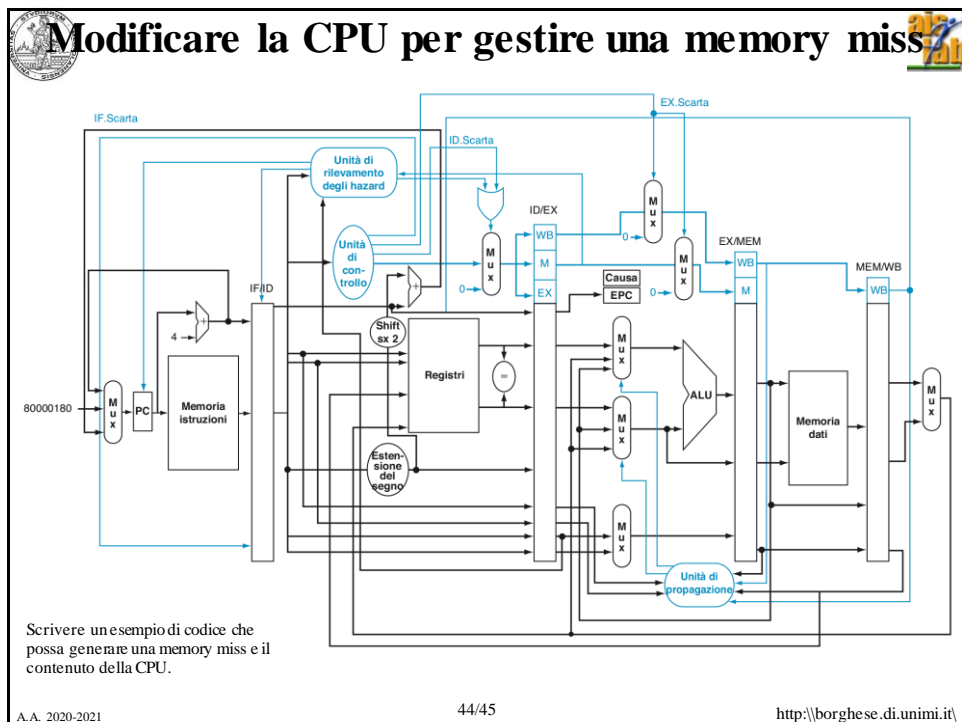
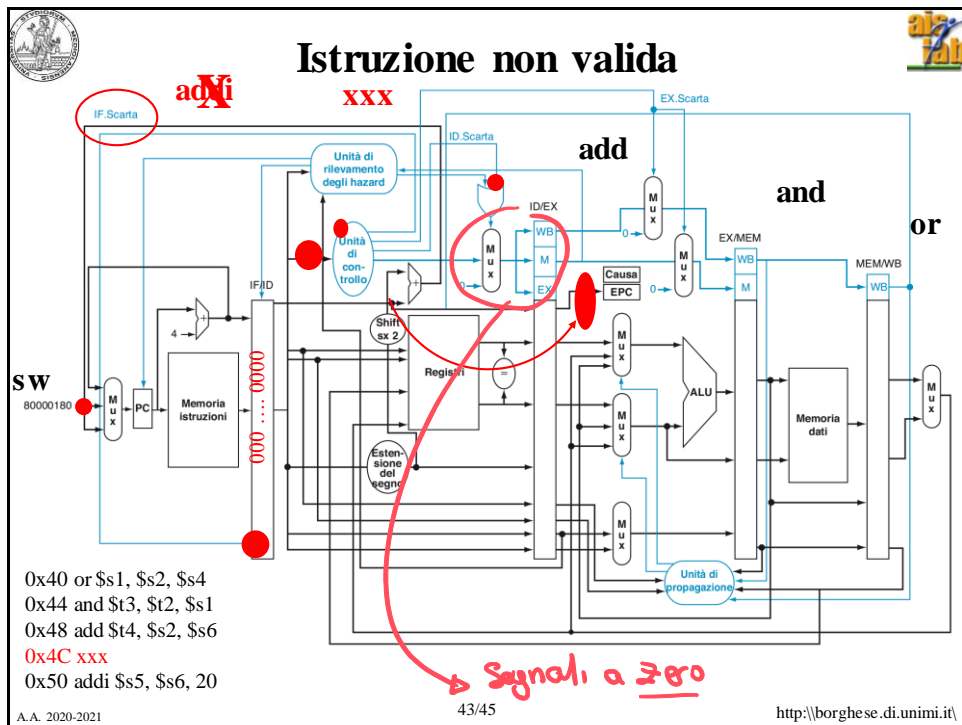


- c. Ripristinare i registry \$a0 e \$a1 che erano stati utilizzati per il display (jal)

```
lw $a0, save0
lw $a1, save1
```

- f. Ritornare al punto dell'interruzione

```
eret    #Exception return (EPC -> PC)
```





Sommario



Interrupt ed eccezioni

HW per la gestione delle interruzioni: modifica della CPU multi-ciclo

SW per la gestione delle interruzioni: esempio di procedura di risposta