



Le interruzioni

Prof. Alberto Borghese
Dipartimento di Scienze dell'Informazione
borgnese@dsi.unimi.it

Università degli Studi di Milano

Riferimento al Patterson: 5.6 ed Appendice B.10



Sommario

Interrupt ed eccezioni

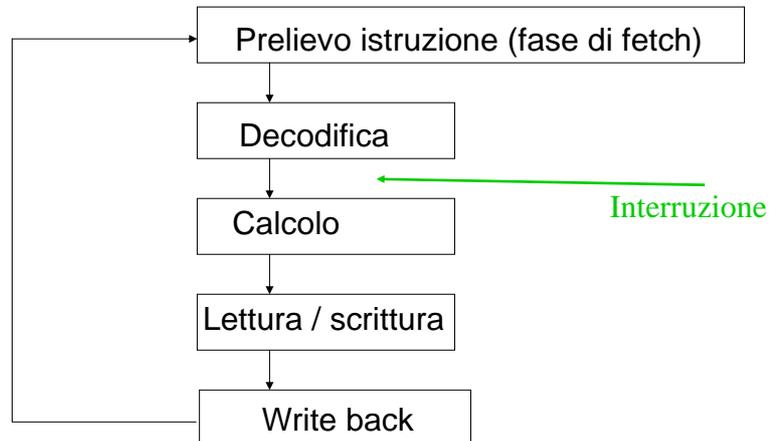
La gestione degli interrupt mediante registro

Modifica della CPU multi-ciclo per la gestione delle eccezioni

Esempio di SW di risposta ad un'eccezione / interrupt.



Ciclo di esecuzione di un'istruzione



Eccezioni ed Interrut

Alterano il funzionamento di un programma (funzionalmente equivalenti ad una jump).

Eccezioni. Generamente internamente al processore (e.g. overflow), modificano 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 (SO)

Vettorializzata: ciascuna eccezione rimanda ad un indirizzo diverso del SO. Gli indirizzi sono spaziati equamente (8 parole). Dall'indirizzo si può ricavare la causa dell'eccezione.

Tramite registro: detto registro **causa**. Il SO ha un unico entry point per la gestione delle eccezioni (in MIPS $0x80000180 > 2\text{Gbyte}$). La prima istruzione è di decodifica della causa dell'eccezione andando a leggere il registro causa.



I registri del coprocessore 0



Nome del registro	Numero del registro in coprocessore 0	Utilizzo
Bad/Addr	8	Registro contenente l'indirizzo di memoria a cui si è fatto riferimento
Count	9	Timer
Compare	11	Valore da comparare con un timer. Genera un interrupt.
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.

Insieme di registri a 32 bit denominato coprocessore 0.
Molti gestiscono la paginazione della memoria.



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 le code di interruzioni? Il problema sono gli interrupt annidati.

La soluzione è quella di fermare l'esecuzione di interrupt accodati quando occorre servire interrupt che richiedono annidamento.

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. E' legata al **programma**.

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



Sommario



Interrupt ed eccezioni

La gestione degli interrupt mediante registro

Modifica della CPU multi-ciclo per la gestione delle eccezioni

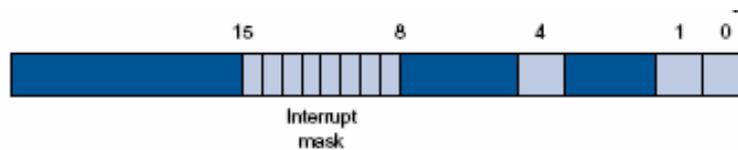
Esempio di SW di risposta ad un'eccezione / interrupt.



Status register - I



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



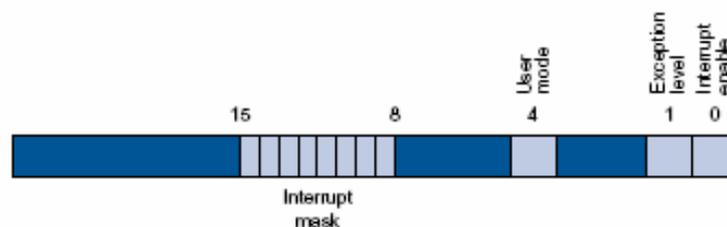
Status register - II



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

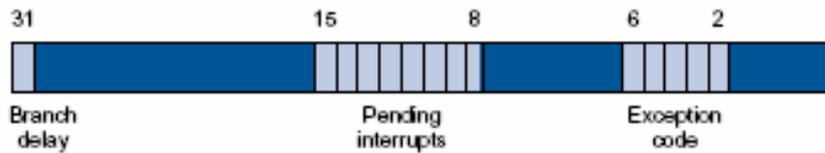
Exception level bit. Quando si verifica un'eccezione viene impostato ad uno, disabilitando così gli interrupt veri e propri.

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





Cause register



Branch delay bit: è 1 se l'ultima eccezione si è verificata un "delay branch slot".

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

Exception code. Descrive la causa di un'eccezione mediante i seguenti codici (vale 0 nel caso di interrupt esterno, altrimenti codifica l'eccezione).

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



Sommario

Interrupt ed eccezioni

La gestione degli interrupt mediante registro

Modifica della CPU multi-ciclo per la gestione delle eccezioni

Esempio di SW di risposta ad un'eccezione / interrupt.



Hardware addizionale



Registro EPC: è un registro a 32 bit utilizzato per memorizzare l'indirizzo dell'istruzione coinvolta.

Registro causa: è un registro utilizzato per memorizzare la causa dell'eccezione; in MIPS sono 32 bit:

- bit 2 = 0 istruzione indefinita.
- bit 2 = 1 overflow aritmetico.

Segnali di controllo:

EPCWrite – scrittura nel registro EPC.

CausaWrite – scrittura nel registro Causa.

CausaInt – Dato per il registro Causa.

Set degli input della FSM modificato:

Aggiunta di Overflow.



Modifiche alla FSM della CPU



Istruzione indefinita.

Non esiste, al passo 2 (decodifica), uno stato futuro valido.

Si aggiunge un nuovo stato futuro indicato con 'altro', è lo

Stato corrispondente al verificarsi dell'eccezione.

Overflow aritmetico.

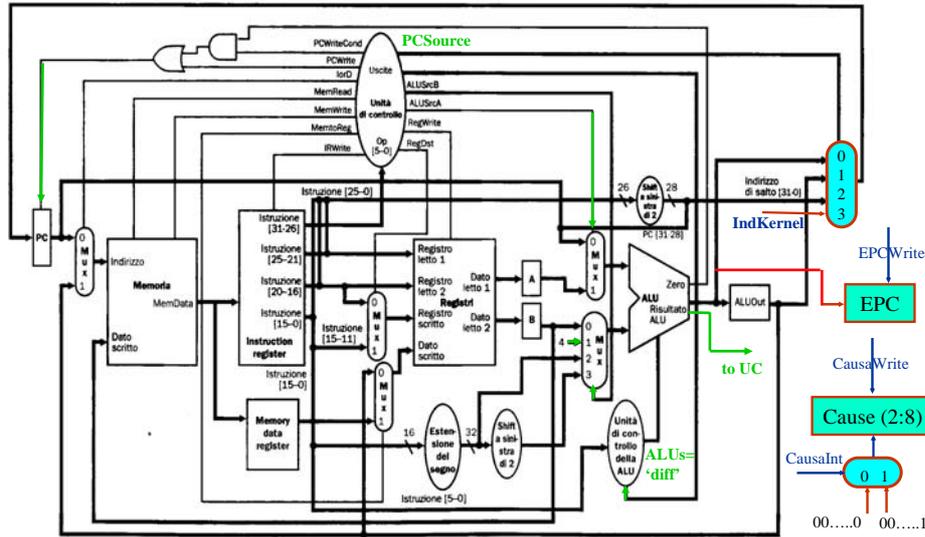
Al passo 4 di esecuzione dell'operazione (stato di WriteBack), lo stato futuro è scelto in funzione del segnale di overflow (**nuovo input** alla FSM). Ho già eseguito la somma e sto scrivendo il risultato nel register file. In particolare, potremmo scegliere di gestire l'eccezione dopo la fase di calcolo; si preferisce completare la fase di WriteBack nell'ipotesi che il risultato dell'operazione di Overflow sia comunque valido.



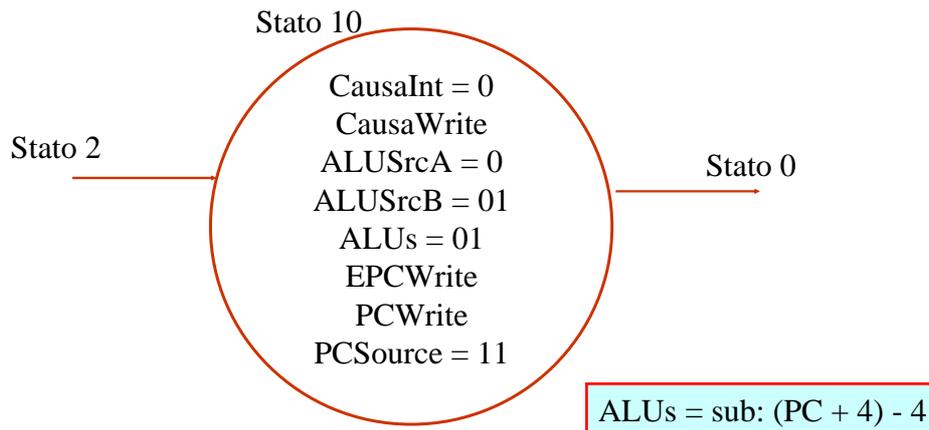
Collegamenti HW per la risposta ad un'eccezione

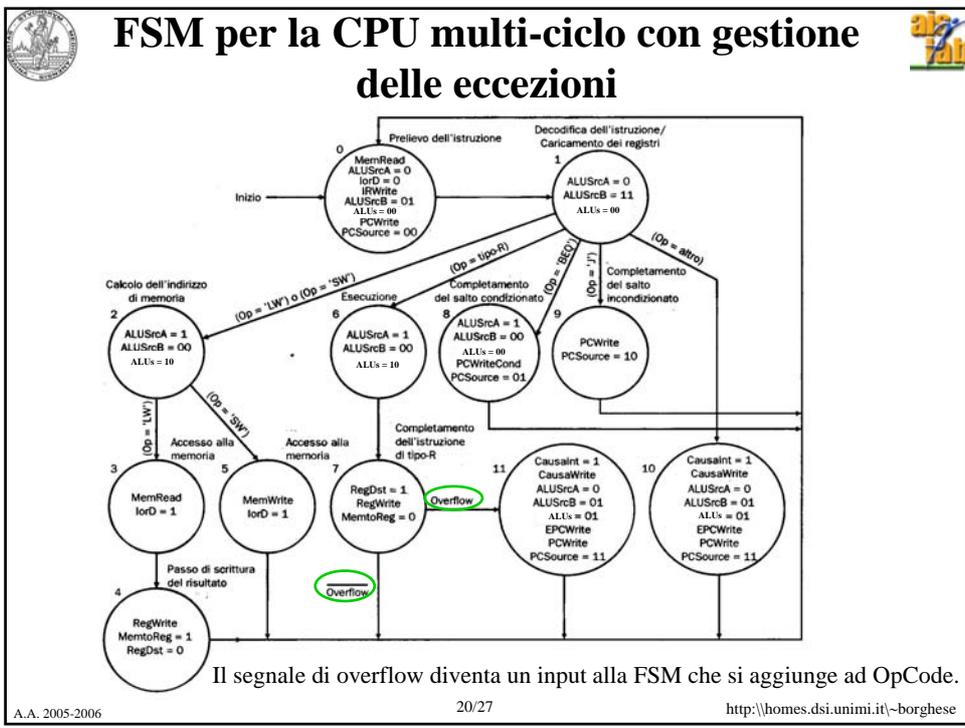
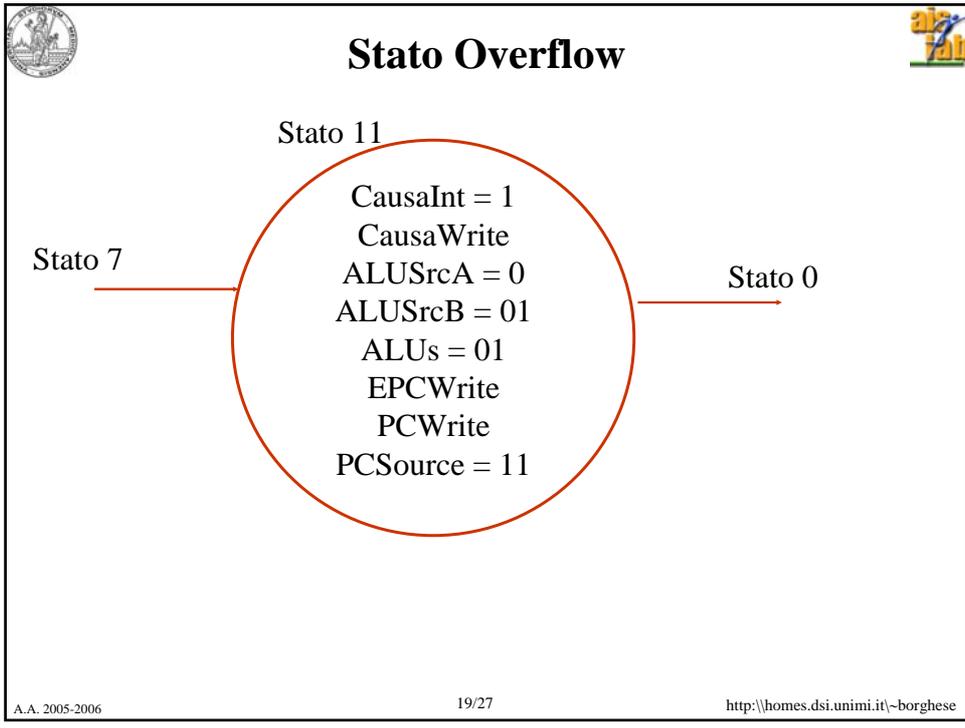


Salvataggio del PC: PC → EPC; Selezione della causa; Segnali di controllo in verde.



Stato OpCode not valid







Sommario



Interrupt ed eccezioni

La gestione degli interrupt mediante registro

Modifica della CPU multi-ciclo per la gestione delle eccezioni

Esempio di SW di risposta ad un'eccezione / interrupt.



Il coprocessore 0 - Istruzioni



Set di istruzioni che lavora sul coprocessore 0:

- lw (to coprocessor 0), sw (from coprocessor 0).
- move from coprocessor0, move to processor0:

lwc0 \$<reg_c0> <offset>(\$reg) (e.g. lwc0 \$13, 40(\$t0) # registro_cause <- mem)
swc0 \$<reg_c0> <offset>(\$reg) (e.g. swc0 \$13, 40(\$t0)) # registro_cause -> mem)

mfc0 \$<reg>, \$<reg_c0> pseudo-istruzione mfc0 \$t0, \$13
mtc0 \$<reg_c0>, \$<reg> pseudo-istruzione mtc0 \$13, \$t0

Il SO quando c'è un interrupt può interrogare l'architettura che gestisce gli interrupt andando ad analizzare i registri di coprocessore 0.

La prima istruzione di risposta ad un interrupt si trova all'indirizzo: 0x80000180:
exception handler.



Risposta ad un interrupt



Le eccezioni vengono gestite dal SO.

- 1) Salvataggio dell'indirizzo dell'istruzione incriminata (PC-4) nell'EPC.
- 2) Trasferimento del controllo al SO (questo potrà eventualmente terminare il programma segnalando errore) jump all'indirizzo 0x80000180.

Cosa deve fare il SO?

- 1) Copia in registri del coprocessore 0, I registri status e cause.
- 2) AND dei campi: pending interrupts (cause register) ed interrupt mask (status register) per individuare quali interrupt sono richiesti e quali possono essere serviti.
- 3) Selezione dell'interrupt a priorità più elevata (per convenzione l'1 più a sx).
- 4) Modifica della maschera di interrupt per disabilitare gli interrupt più a dx (metto a 0 i bit più a dx di questo campo).
- 5) Salvare lo stato del processore.
- 6) Per lasciare interrupt di livello superiore, set Interrupt enable a 1 nel cause register.
- 7) Chiamare la routine appropriata di gestione dell'interrupt.

Al termine:

- 1) Ripristinare lo stato del processore.
- 2) Ritornare all'istruzione memorizzata in EPC.



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)



Esempio

Controllo se è un'eccezione. Se è un'eccezione stampo un messaggio.

```

.text 0x80000180
mov $k1, $at           # Save $at register in register file
sw $a0, save0         # Handler is not re-entrant and can't use
sw $a1, save1         # stack to save $a0, $a1 (data required in
                     # data segment)
                     # Don't need to save $k0/$k1

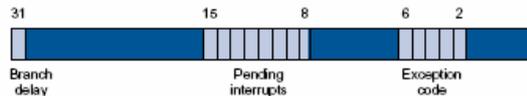
mfc0 $k0, $13         # Move Cause into $k0 in register file
srl $a0, $k0, 2       # Extract ExcCode field
andi $a0, $a0, 0xf
bgtz $a0, done        # Branch if ExcCode=HW Interrupt (ExcCode=0)
mov $a0, $k0          # Move Cause into $a0
mfc0 $a1, $14         # Move EPC into $a1
jal print_excp       # Print exception error message

```

.kdata

save0: .wo: 4

save1: .wo: 4



Cause register

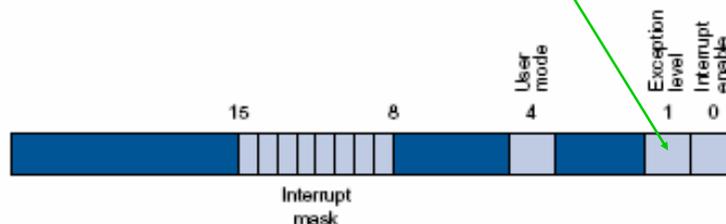


Termine della procedura

```

done: mfc0 $k0, $14     # Bump EPC
addiu $k0, $k0, 4      # Do not reexecute
                     # faulting instruction
mfc0 $k0, $14         # Write EPC + 4 in EPC
mfc0 $0, $13          # Clear Cause register
mfc0 $k0, $12         # Fix Status register (bring status in k0)
andi $k0, 0xffffd    # Clear EXL bit (Exception level, mask bit)
ori $k0, 0x1         # Enable interrupts in status register
mfc0 $k0, $12         # Restore status register
lw $a0, save0        # Restore registers
lw $a1, save1

```





Sommario



Interrupt ed eccezioni

La gestione degli interrupt mediante registro

Modifica della CPU multi-ciclo per la gestione delle eccezioni

Esempio di SW di risposta ad un'eccezione / interrupt.