La gestione dell'I/O

Interrupt initiated I/O

Sandro Savino (sandro.savino@dei.unipd.it)
Department of Information Engineering, University of Padova

Argomenti:

- La gestione dell'I/O tramite interrupt
- Gestione di concorrenza e priorità
- Gestione efficiente dell'interrupt

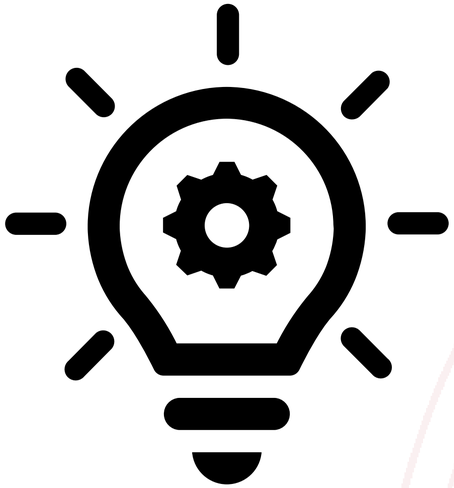
Materiale:

- Capitolo 11

DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Una nuova idea!

- Nella gestione a I/O programmato, il processore perde un sacco di cicli aspettando che il dispositivo sia pronto



- Nella gestione a interrupt (o interruzioni) il processore NON sta in attesa che il dispositivo di I/O sia pronto ma è il dispositivo che avverte il processore quando è pronto

I/O Programmato vs. Interruzioni

I/O PROGRAMMATO
BUSY WAITING

Il cane in attesa di cibo non fa altro
che restare in attesa

- Questo è un processore in busy waiting:
- Il processore è occupato nell'attesa che il dispositivo sia pronto per l'I/O
- Durante l'attesa il processore non può fare altro

I/O Programmato vs. Interruzioni

- Questo è un processore durante un evento di I/O gestito ad interruzioni
- Il processore deve sempre attendere che il dispositivo di I/O sia pronto
- Durante l'attesa però il processore può continuare a eseguire operazioni

Segnale dispositivo pronto

GESTIONE
AD INTERRUZIONI

Il gatto in attesa di cibo può fare quello che gli riesce meglio: dormire

I/O ad Interruzioni: il concetto di base

- Il processore avverte il dispositivo di I/O che vuole effettuare una operazione di I/O
- Il processore torna a svolgere operazioni
- Il dispositivo, quando è pronto, avverte il processore
- Il processore quando riceve questo segnale:
  - smette di svolgere operazioni
  - esegue l'operazione di I/O
- Terminato l'I/O, il processore torna al programma che stava eseguendo

Diagramma

I/O PROGRAMMATO

Esecuzione Programma	I/O	Dispositivo I/O
lavoro		
lavoro		
vorrei dati		sto
	wait	preparando
	wait	il
	wait	dato
	wait	richiesto
	wait	dato pronto
	ora	
	elaboro	
	il dato	
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		

Il processore deve aspettare che il dato arrivi per proseguire a lavorare

I/O a INTERRUZIONI

Il processore non deve stare in attesa, può continuare a lavorare

Esecuzione Programma	I/O	Dispositivo I/O
lavoro		
lavoro		
vorrei dati		sto
lavoro		preparando
lavoro		il
lavoro		dato
lavoro		richiesto
lavoro		dato pronto
	ora	
	elaboro	
	il dato	
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		
lavoro		

Il processore non sa quando dovrà smettere di eseguire il programma e dovrà elaborare il dato in I/O

interruzione

La gestione a interruzioni richiede alcuni nuovi accorgimenti

Il processore riesce ad eseguire più operazioni

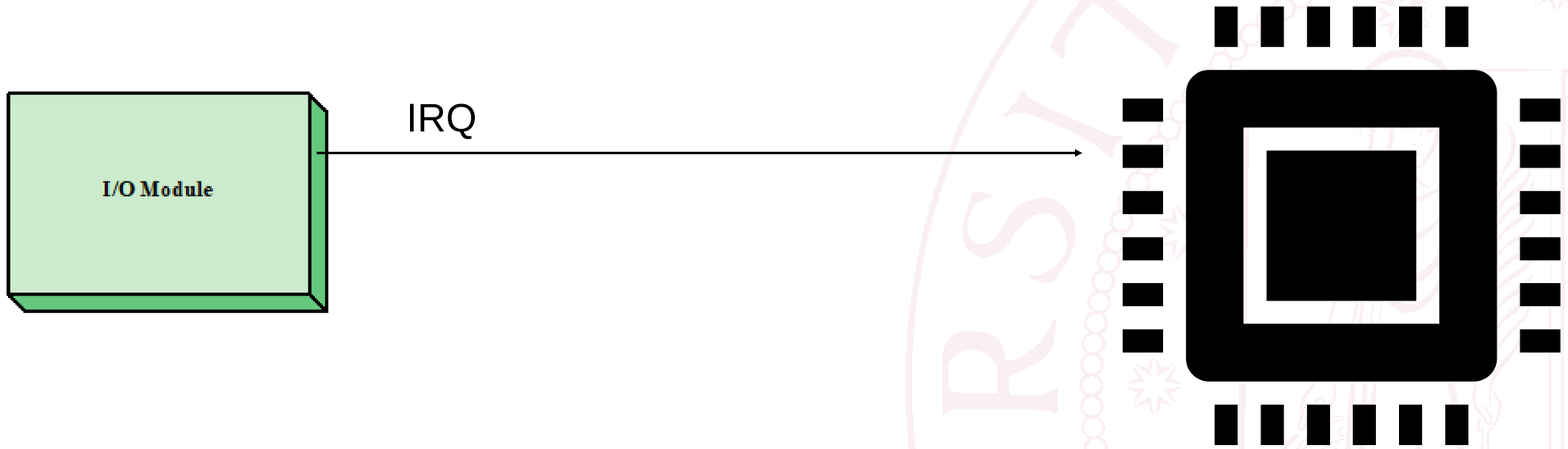
Gestione dell’I/O a Interruzioni

Cosa ci serve:

- Il modulo di I/O deve essere in grado di generare il segnale che avverte il processore che il dato è pronto (IRQ)
- Il processore deve
  1. interrompere quello che sta facendo (Salvataggio Contesto)
  2. passare velocemente a leggere il dato pronto (RSI)
  3. ritornare a quelle che stava facendo (Ripristino Contesto)

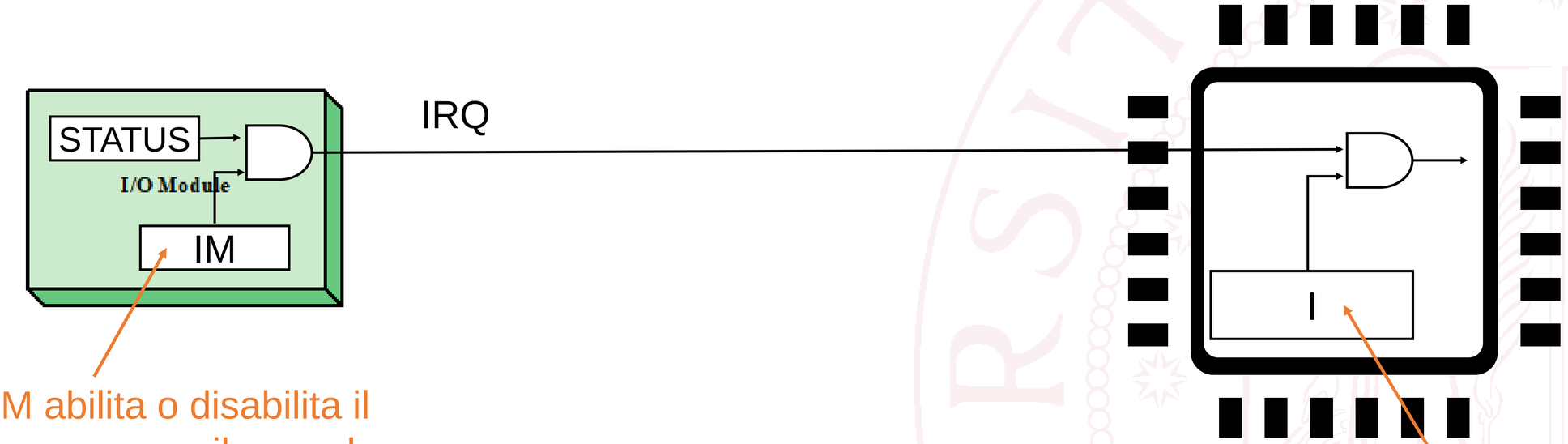
IRQ: Interrupt ReQuest

- Per la gestione dell'IRQ dobbiamo aggiungere una nuova linea al nostro elaboratore: questa linea parte dal modulo di I/O e arriva ad un PIN del processore



IRQ: Interrupt ReQuest

- Per la gestione dell'IRQ dobbiamo aggiungere una nuova linea al nostro elaboratore: questa linea parte dal modulo di I/O e arriva ad un PIN del processore

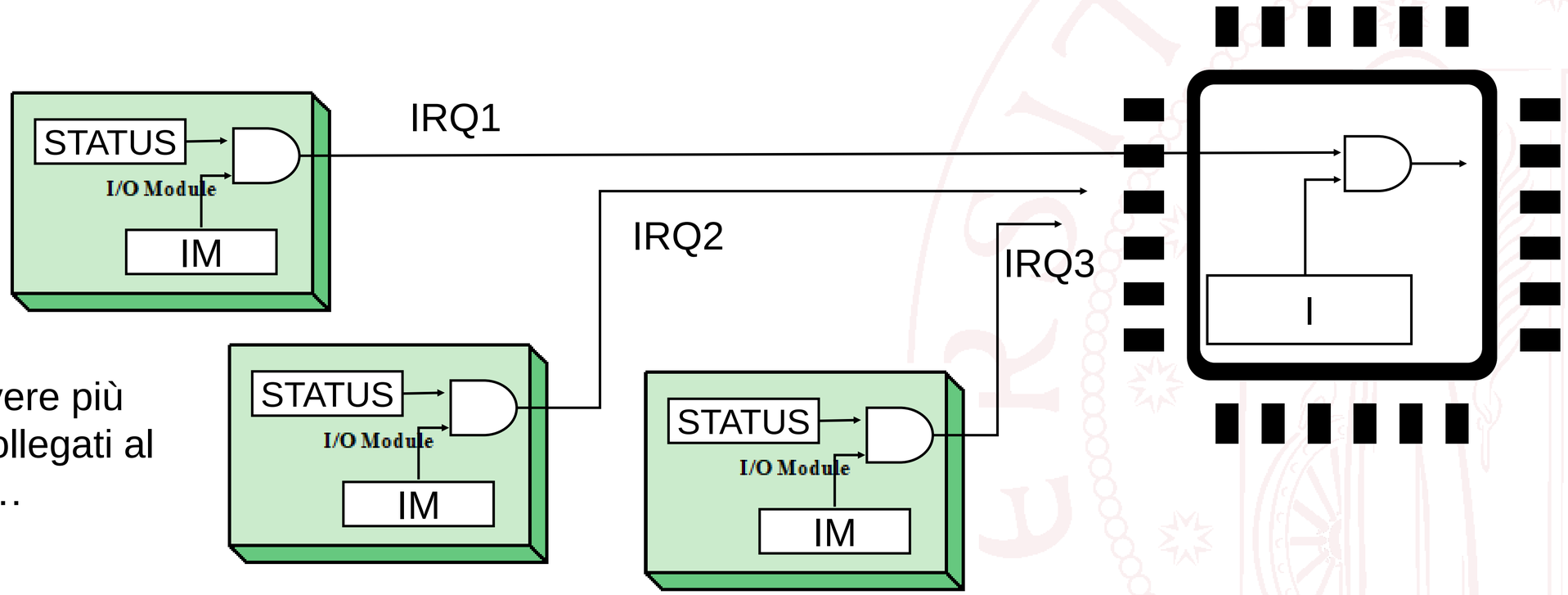


Il registro IM abilita o disabilita il modulo I/O a generare il segnale IRQ

Il registro I abilita o disabilita il PIN IRQ del processore

IRQ: Interrupt ReQuest

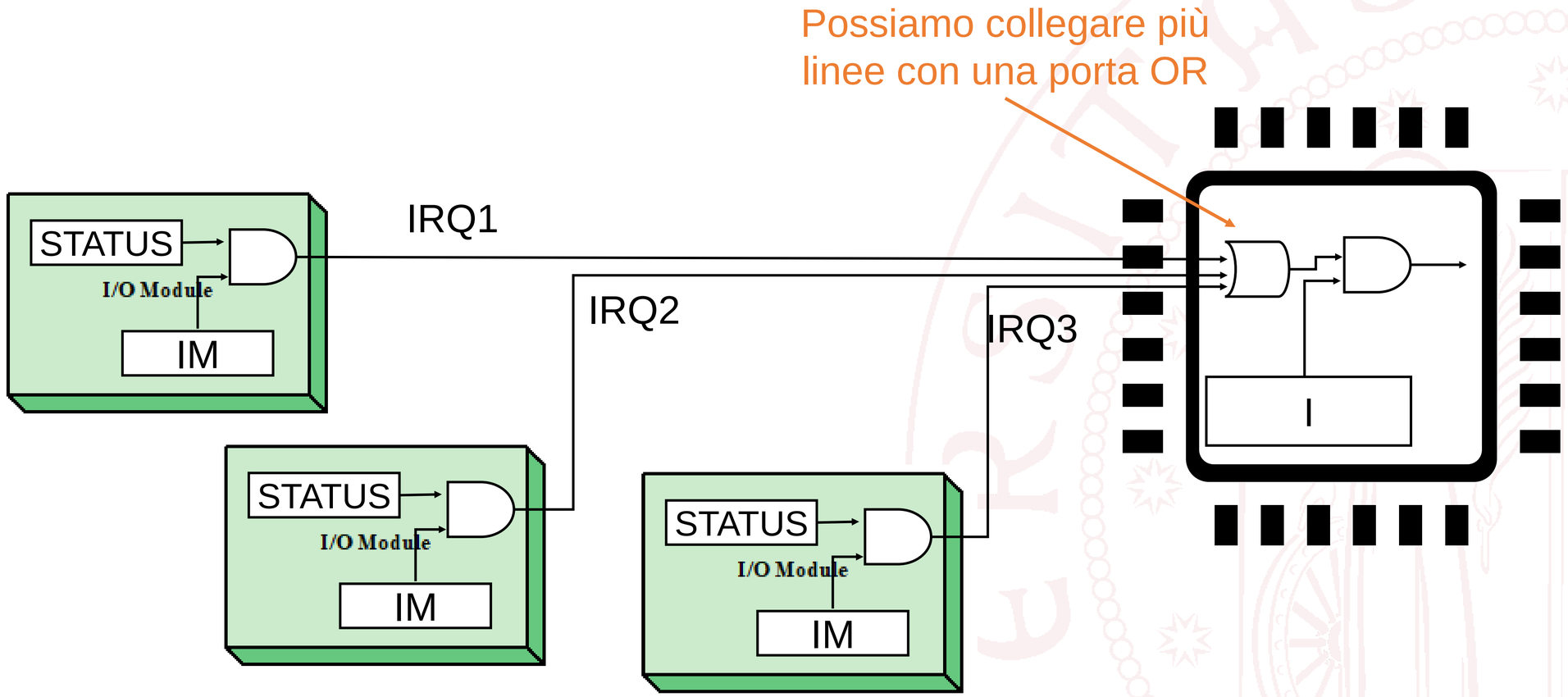
- Per la gestione dell'IRQ dobbiamo aggiungere una nuova linea al nostro elaboratore: questa linea parte dal modulo di I/O e arriva ad un PIN del processore



Possiamo avere più moduli I/O collegati al processore …

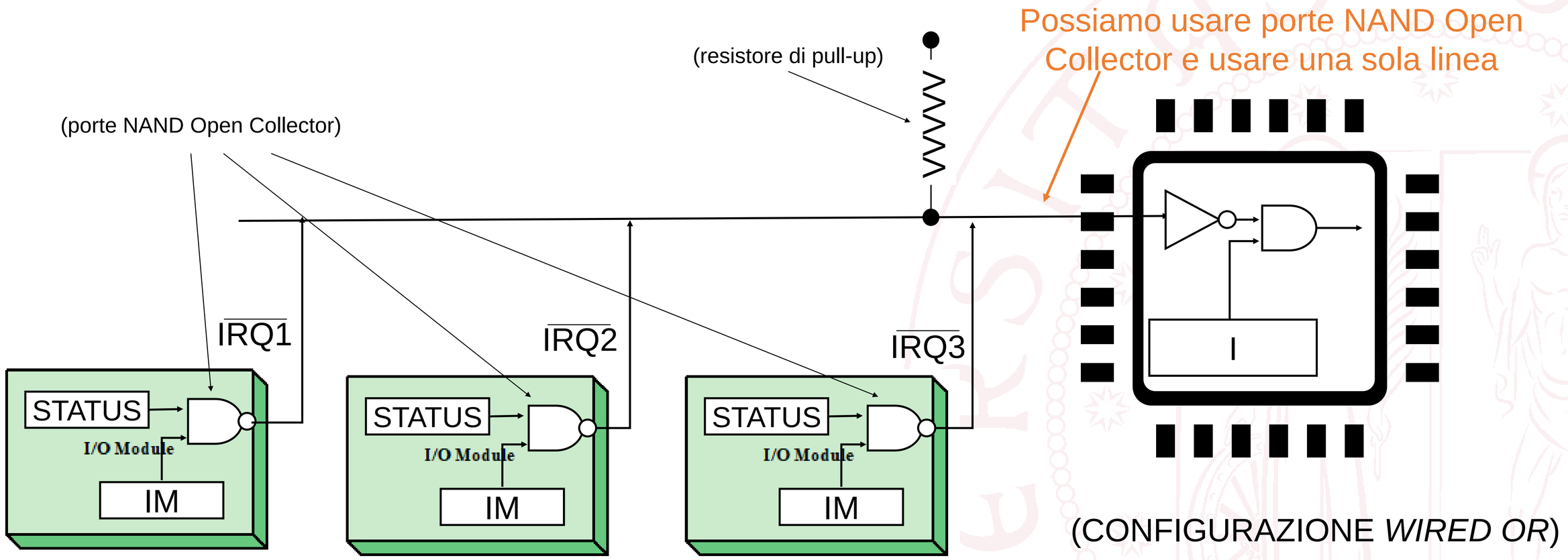
IRQ: Interrupt ReQuest

- Per la gestione dell'IRQ dobbiamo aggiungere una nuova linea al nostro elaboratore: questa linea parte dal modulo di I/O e arriva ad un PIN del processore



IRQ: Interrupt ReQuest

- Per la gestione dell'IRQ dobbiamo aggiungere una nuova linea al nostro elaboratore: questa linea parte dal modulo di I/O e arriva ad un PIN del processore



Salvataggio del contesto

- Quando il processore «sente» sul suo PIN collegato alla linea IRQ che c'è una richiesta di interruzione deve interrompere quello che sta facendo e gestire l'I/O
- È necessario interrompersi «presto» perché i dati in I/O potrebbero altrimenti andare persi!
- Il programma in esecuzione viene interrotto «bruscamente», per eseguire le operazioni di I/O: la cosa è simile ad una chiamata a sub-routine, ed è quindi necessario salvare i dati in uso e il PC, per poter tornare al programma una volta terminato l'I/O

Salvataggio del contesto

- C'è però un problema: NON SAPPIAMO quando avverrà questa chiamata a sub-routine!
- Tocca al processore salvare in automatico il contesto!
- Il processore salva:
  - Il registro PROGRAM COUNTER (PC)
  - Il registro con i dati della ALU e lo STATO del processore (Status Register)
  - …e poi inizia la RSI

…e i dati del nostro programma??

→ Verranno salvati via software all'inizio della RSI

Ovviamente in tutto questo il processore NON DEVE ESSERE INTERROTTO!

Salvataggio del contesto

Al verificarsi di una interruzione, l'Hardware deve:

1. provvedere a commutare almeno i registri CPSR e PC:
   SR → *push*
   PC → *push*
2. commutare al valore 0 il registro I per impedire che si verifichino altre interruzioni
   0 → I
3. inserire nel PC l'indirizzo della RSI, la routine di servizio (collocata, ad esempio, a partire dall'indirizzo 0)
   0 → PC

in questo modo, tutte le interruzioni attivano la stessa *routine*-preambolo, situata a partire da M[0]

La RSI: Routine di Servizio di Interrupt

- Lo scopo della RSI è quello di effettuare il prima possibile l'operazione di I/O sul dispositivo che si è dichiarato «ready»
- La RSI è un programma software scritto appositamente per la gestione di un tipo di I/O: in un elaboratore con più dispositivi di I/O ci sono più RSI
- È quindi necessario capire QUALE dispositivo di I/O ha generato l'IRQ ed eseguire la RSI corretta!

➡ Come facciamo a identificare il dispositivo I/O?

➡ E se abbiamo più IRQ contemporanei, quale gestiamo per primo?

Preambolo alla RSI

- ***Prima*** di eseguire la RSI che gestisce l'IRQ dobbiamo fare delle operazioni:
  1. Finire di salvare il contesto
  2. Capire chi ha generato l'IRQ
  3. Scegliere chi servire se abbiamo più dispositivi pronti
  4. Caricare nel PC l'indirizzo della RSI specifica che vogliamo eseguire

- A seconda dell'architettura, questi passi possono essere svolti via software o via hardware
  - Farlo via hardware è più veloce
  - Farlo via software non richiede dell'hardware dedicato (e quindi l'architettura del processore è più semplice)

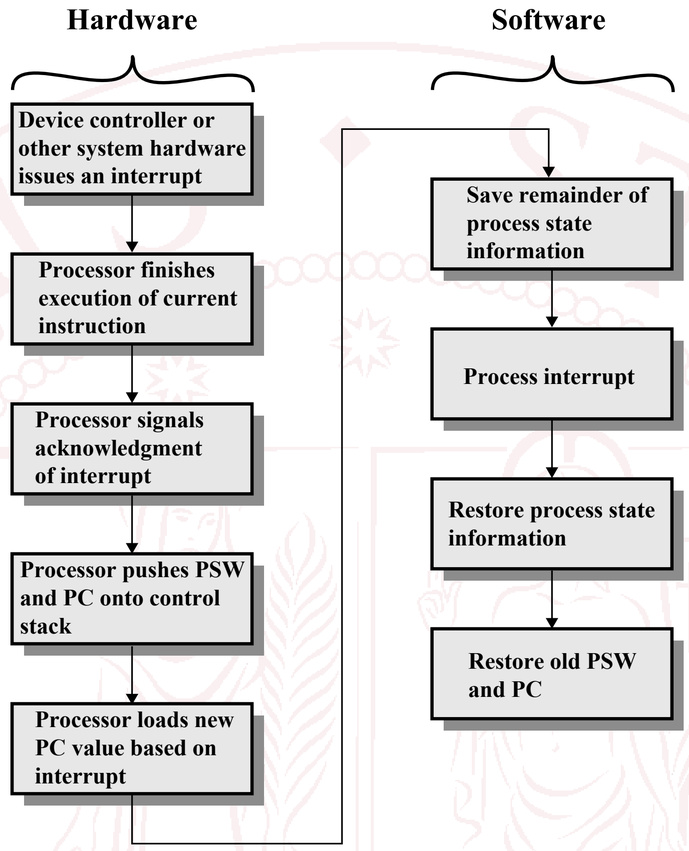


Figure 7.6 Simple Interrupt Processing

Preambolo: salvataggio del contesto

- Via hardware di base viene salvato solo PC e SR
- Ma per poter tornare poi al programma che era in esecuzione quando è arrivata l'interruzione, dobbiamo copiare anche gli altri dati in uso!

Via software

- Copiamo i valori dei registri del processore nello stack

Via hardware

- Una alternativa molto più efficiente è quello di avere più registri: quando arriva una interruzione, la RSI usa un nuovo set di registri (banked registers)

Preambolo: identificazione

Via software

- Andiamo a leggere il registro status di tutti i device per capire chi ha generato il segnale di IRQ **(software polling)**

Via hardware

- Una possibile alternativa è avere più linee di IRQ, una per device (ognuna collegata ad un pin diverso del processore): quando arriva un IRQ su un certo pin sappiamo già quale RSI chiamare
- …ma vedremo altri modi di organizzare l'hardware per avere questo comportamento senza dover aggiungere fisicamente tantissime linee al processore

Preambolo: gestione di IRQ concorrenti

- Il processore è bombardato da eventi di I/O: è possibile che:
  - Quando andiamo a vedere chi ha chiamato l'IRQ scopriamo che ci sono più device da servire
  - Mentre stiamo eseguendo una RSI, arrivi un'altra richiesta di IRQ

- In questi casi dobbiamo anche scegliere chi servire prima: serve gestire una priorità!

Via software

- Il software polling già impone una gerarchia tra gli IRQ: è l'ordine con cui facciamo il polling, il primo device che troviamo con status=ready, viene servito
- Quando serviamo un device con una certa priorità X, possiamo impedire a tutti i dispositivi meno importanti di generare IRQ andando a mettere a 0 il loro registro IM

Via Hardware

- Questo stesso ragionamento si può realizzare in hardware …

Ripristino del contesto

Al termine della interruzione, per ripristinare il contesto il processore deve:

1. provvedere a commutare almeno i registri SR e PC:

   pop $\rightarrow$ *PC*

   pop $\rightarrow$ *SR*

2. commutare al valore 1 il registro I per permettere che vengano rilevate altre interruzioni

   1 $\rightarrow$ I

Queste operazioni permettono di riprendere l'esecuzione del programma che è stato interrotto dall'IRQ

Soluzioni hardware (più efficienti)

Salvataggio / Ripristino contesto	•Banked Registers
Identificazione	•Interrupt Vector Number
Gestione priorità	•Masking •Daisy Chain

Salvataggio del contesto

Via software

- Dobbiamo salvare nello stack tutti i registri che usiamo nella RSI (e poi ripristinarli)

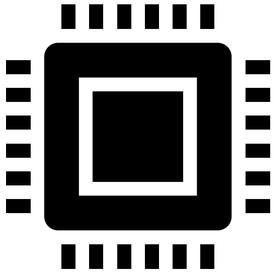
```
push {rX-rY}
stmfd sp! {rX-rY}

str rX, [sp, #-4]!
str r..., [sp, #-4]!
str r..., [sp, #-4]!
str r..., [sp, #-4]!
str rY, [sp, #-4]!
```

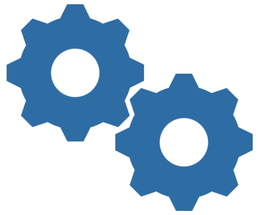
Via hardware

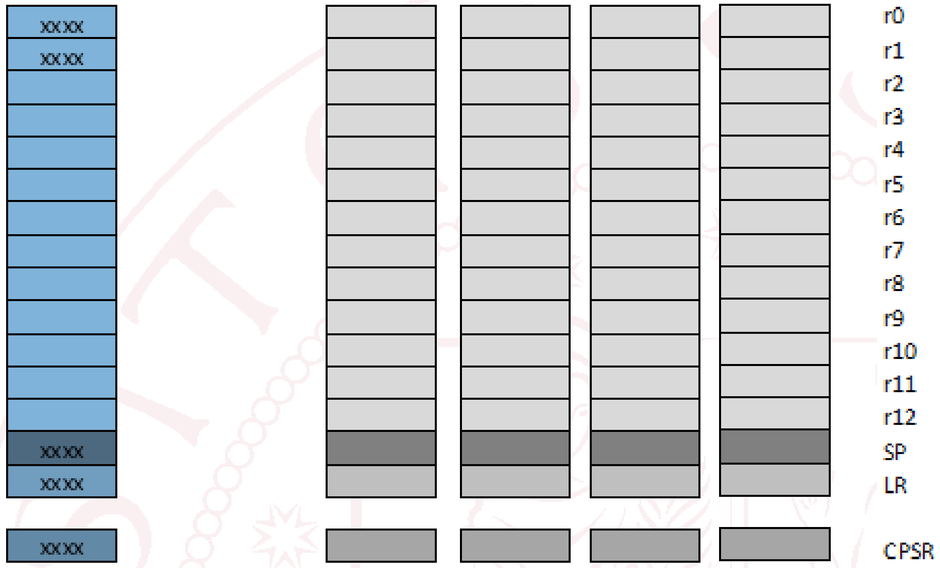
- Potremmo avere più set di registri: quando dobbiamo eseguire la RSI, usiamo un nuovo set dei registri
- La RSI scrive in questi nuovi registri, mentre i dati del programma interrotto restano non modificati nell'altro set
- Al termine della RSI, torniamo al set precedente

Banked Registers



Il processore sta eseguendo le istruzioni di un programma di un utente, che sta usando i registri

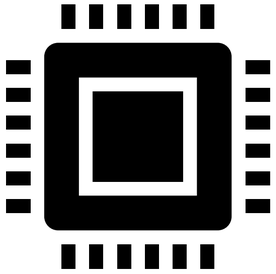




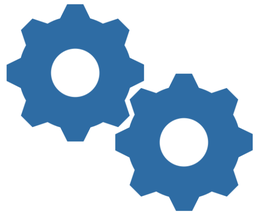
IRQ

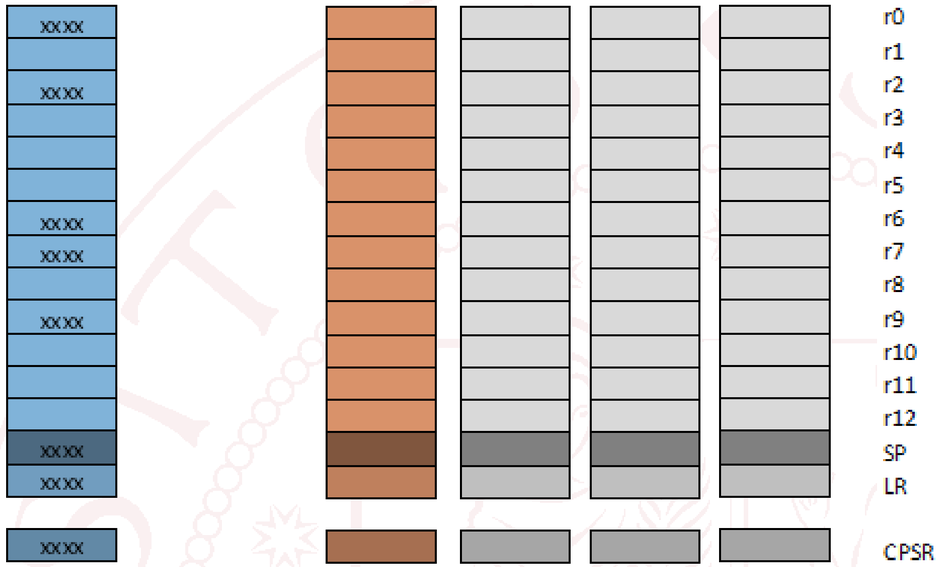
Arriva una richiesta di IRQ

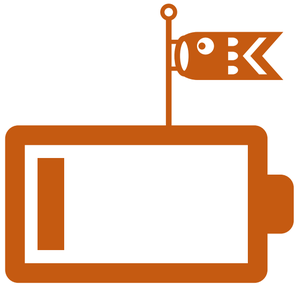
Banked Registers



Il processore interrompe il programma utente e individuata la RSI da chiamare, attiva un nuovo set di registri

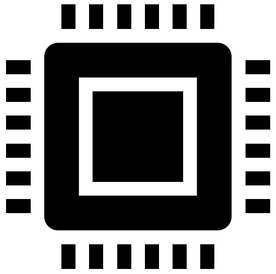




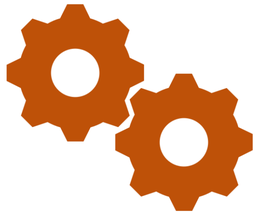


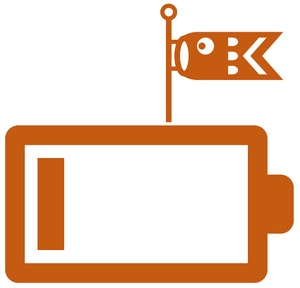
IRQ

Banked Registers

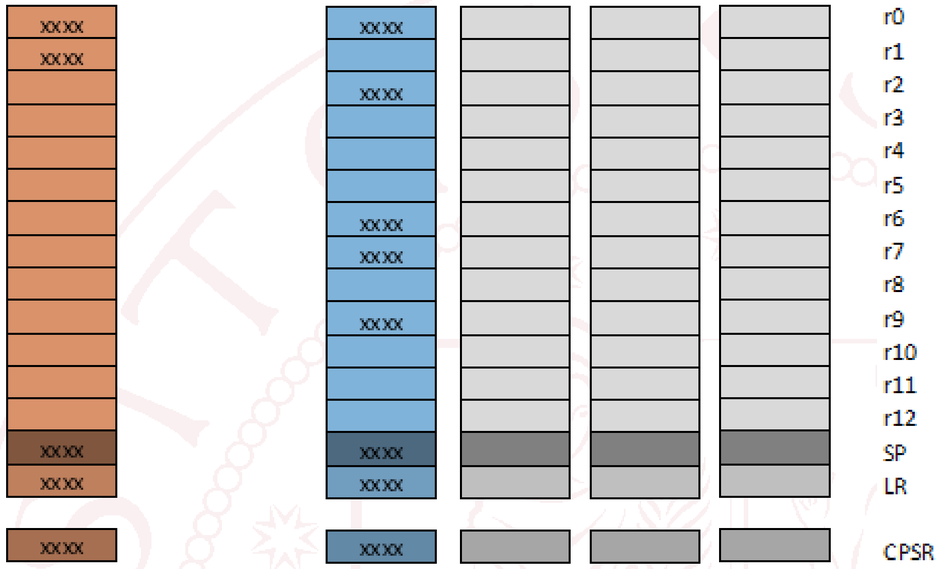


Il processore esegue la RSI, che rimuove la causa di IRQ

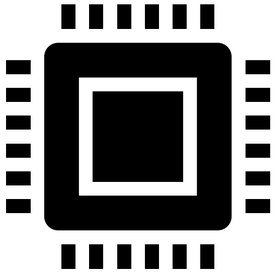




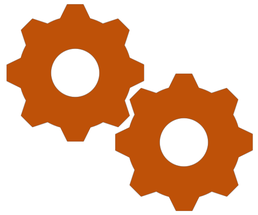
IRQ

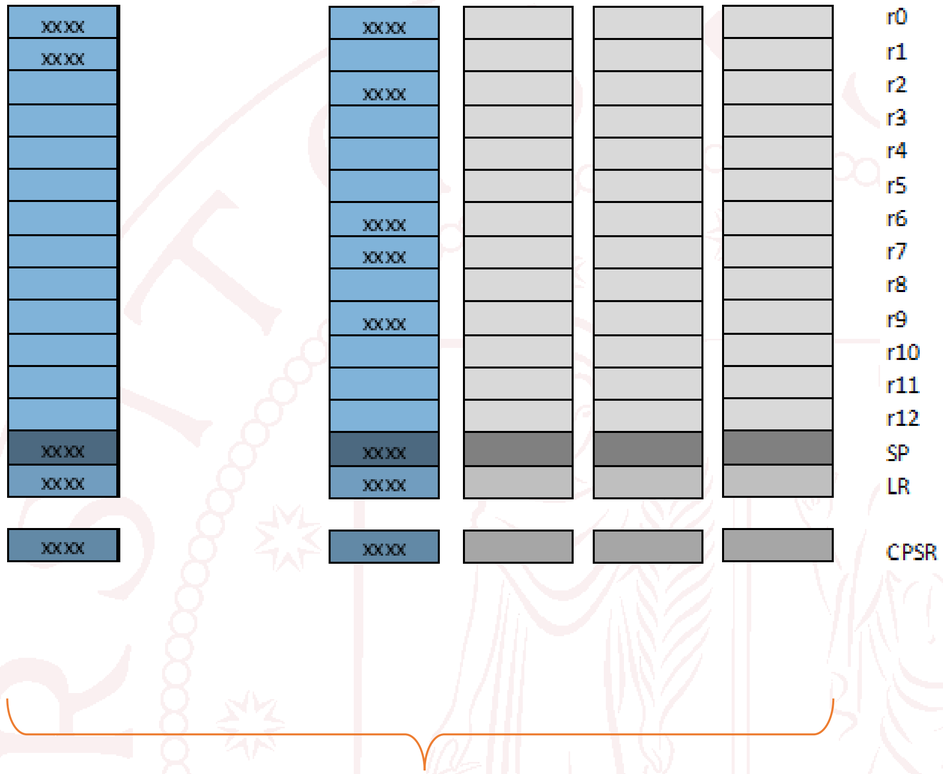


Banked Registers



Terminata la RSI, i registri vengono scambiati di nuovo, e il programma utente può tornare ad essere eseguito



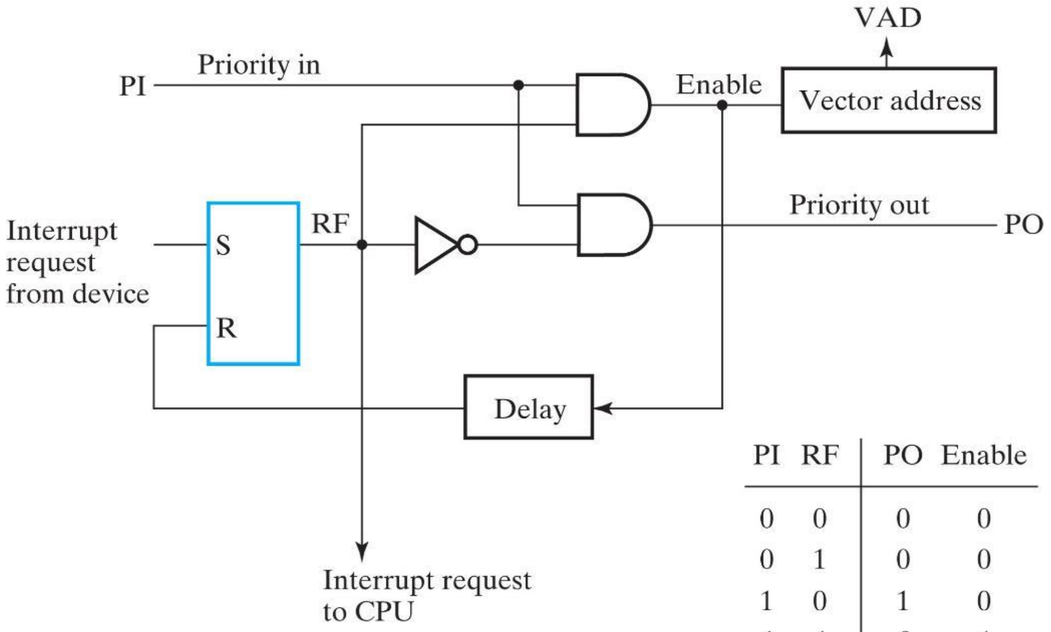


Poiché una RSI può essere interrotta SOLO da IRQ più prioritari, ci basta aver un set di registri pari al numero di priorità

Identificazione

Via software

- Dobbiamo fare un poll software, controllando tutti i registri status dei device di I/O e poi fare un branch alla prima istruzione della RSI

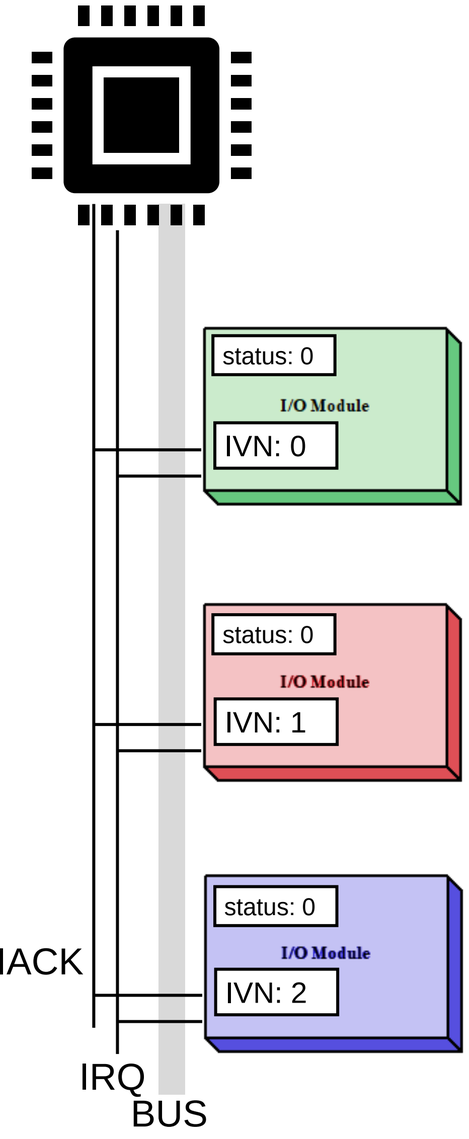


PI	RF	PO	Enable
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Via hardware

- Il processore, in risposta al segnale IRQ, risponde con un segnale IACK (Irq ACKnowledge)
- Il device invia sulla linea dati un suo codice identificativo
- Questo codice indica la riga da guardare in una tabella che contiene l'indirizzo di tutte le RSI

Interrupt Vettorizzati

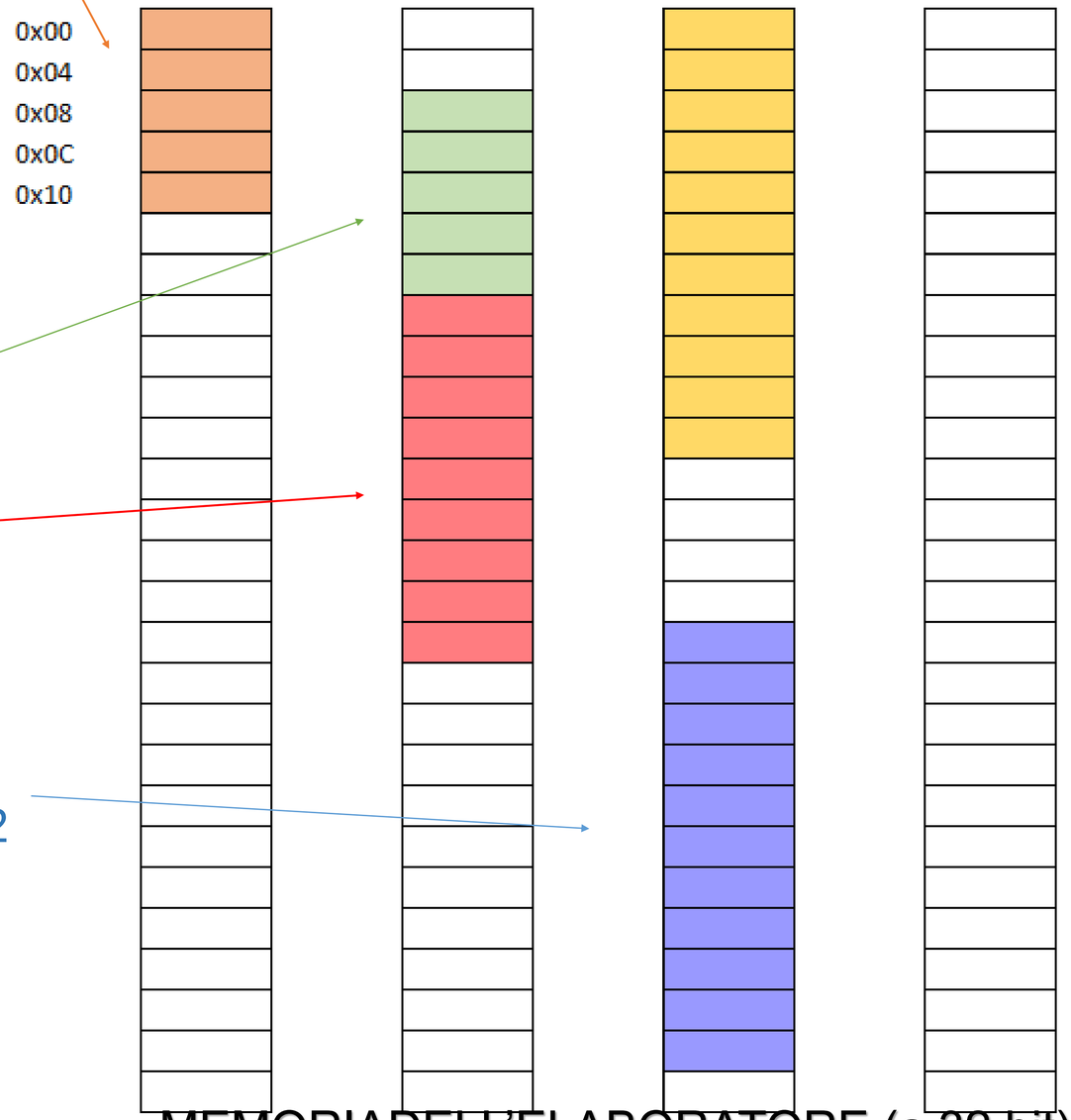


Interrupt VectorTable

Istruzioni della RSI del dispositivo con codice IVN=0

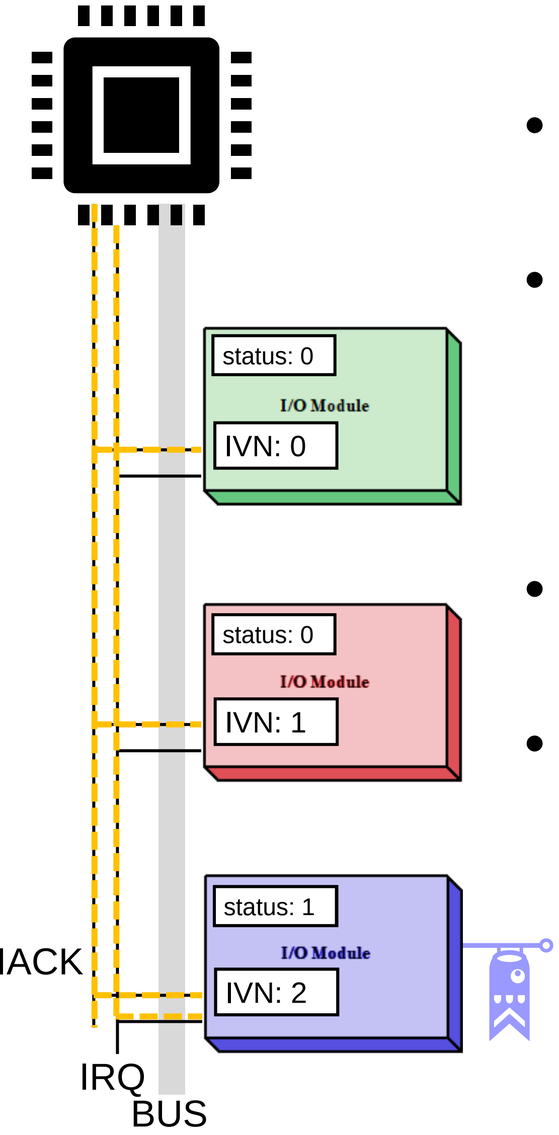
Istruzioni della RSI del dispositivo con codice IVN=1

Istruzioni della RSI del dispositivo con codice IVN=2

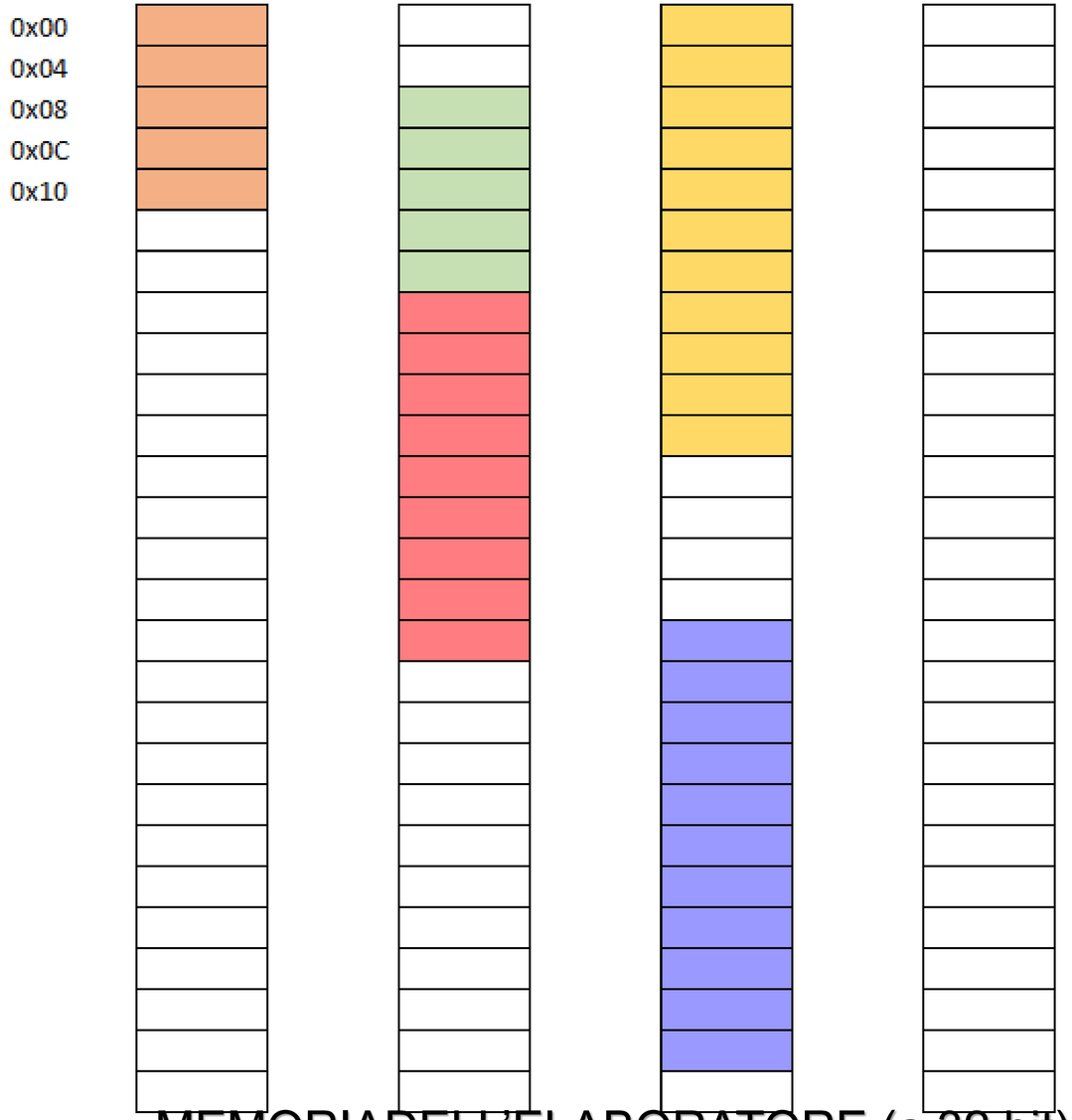


MEMORIADELL'ELABORATORE (a 32 bit)

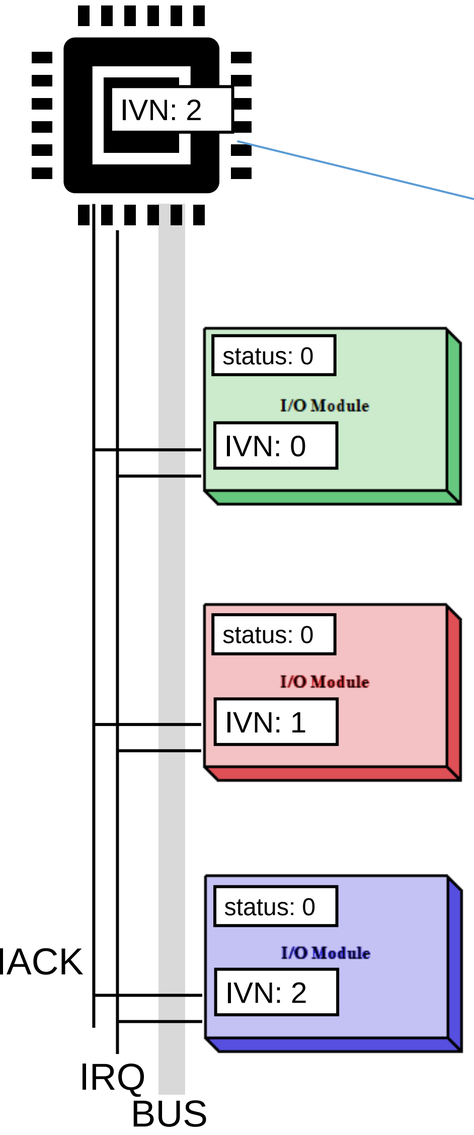
Interrupt Vettorizzati



- Un device è pronto e genera un segnale IRQ
- Il processore quando è pronto a gestire l'interruzione genera un segnale IACQ
- Il segnale è inviato a tutti i dispositivi
- Solo il dispositivo READY risponde, inviando il suo codice sulla linea dati del bus

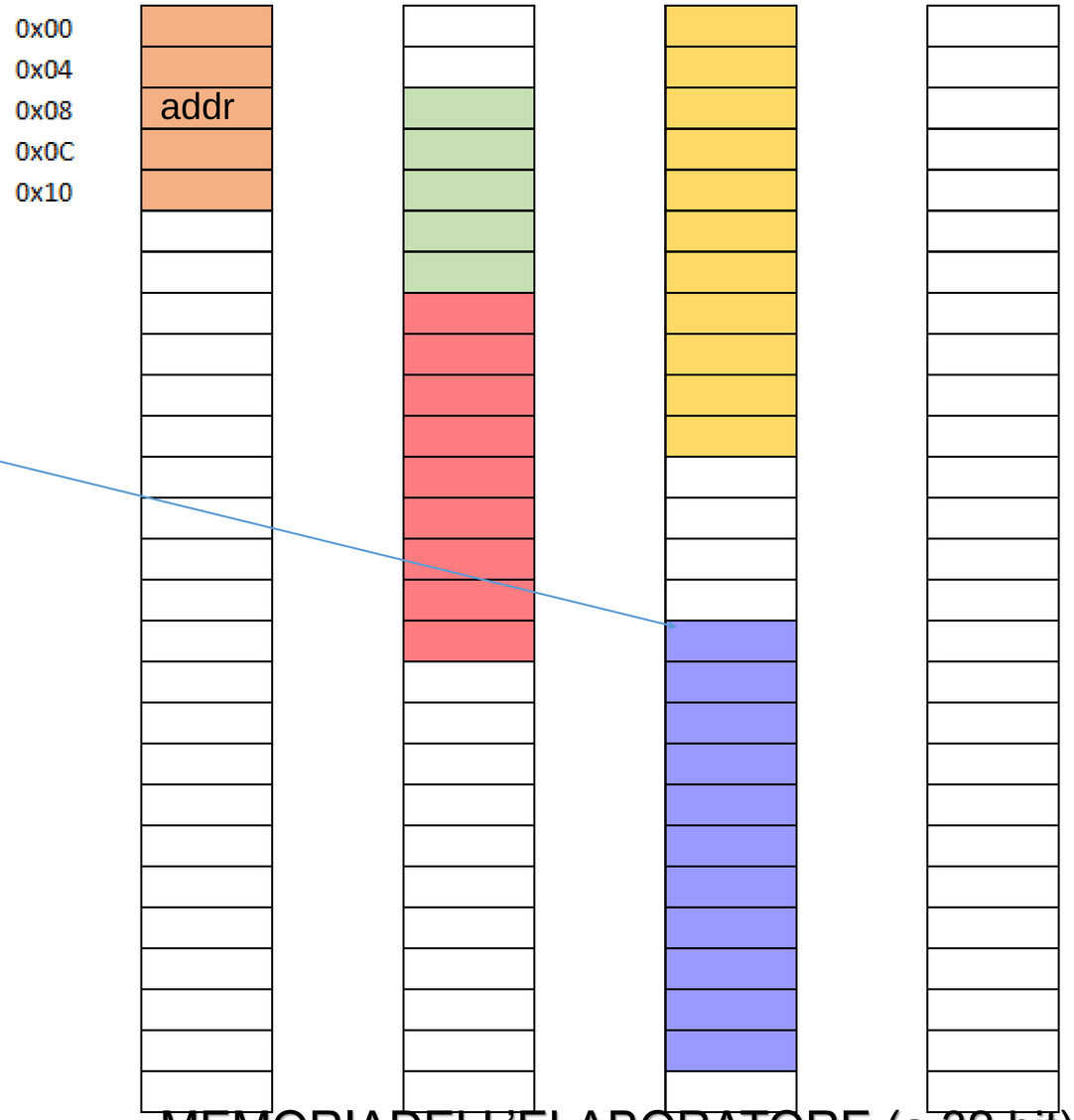


Interrupt Vettorizzati



MEM[IVN×4] → PC

- Il codice IVN è usato come offset per leggere una valore della IVT
- Questo valore è l'indirizzo della prima istruzione della RSI da eseguire
- L'indirizzo è caricato nel PC e la RSI viene eseguita

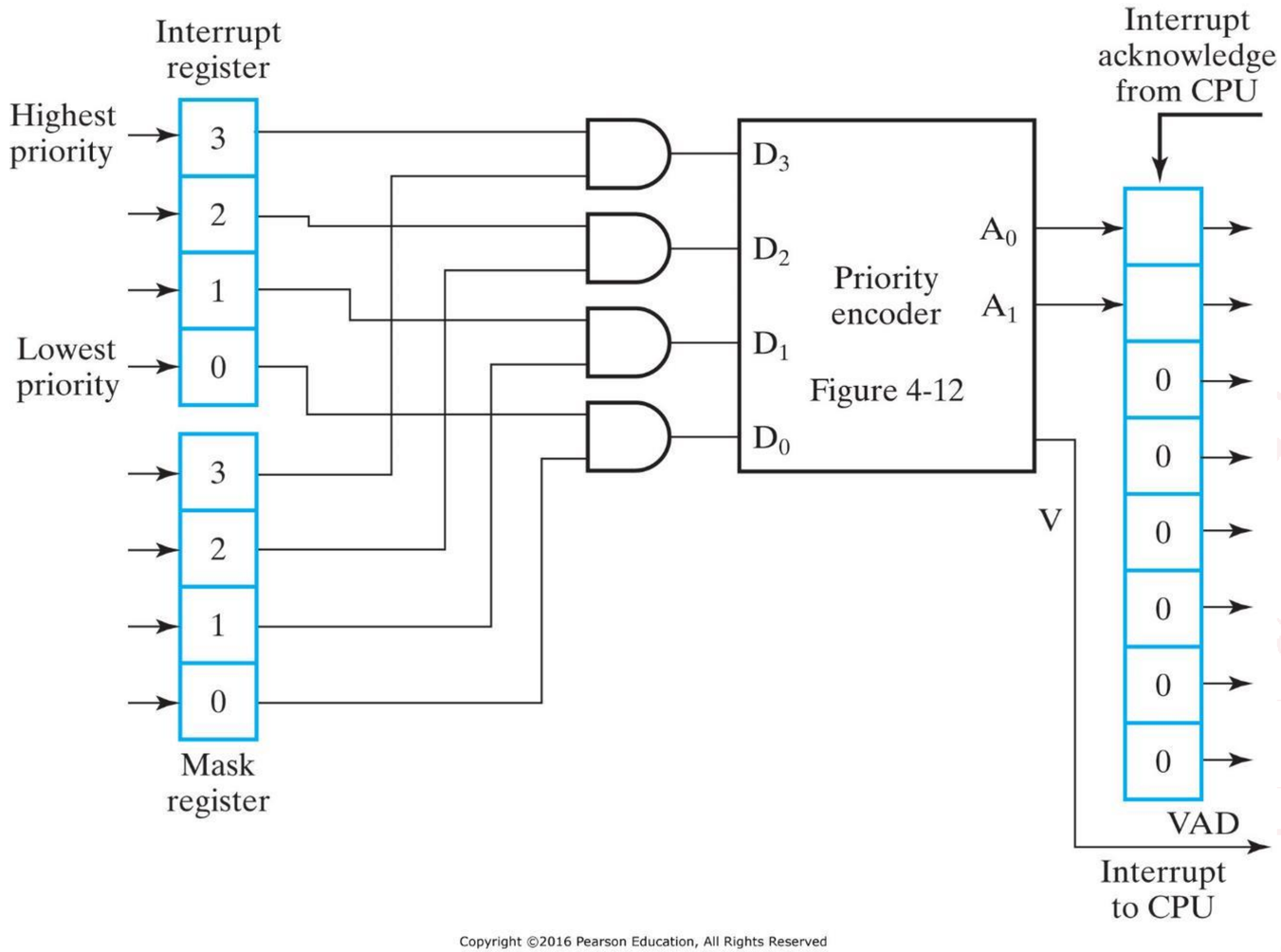


Gestione della priorità

- Un meccanismo di gestione della priorità è in grado, a fronte di più richieste di IRQ, di sceglierne una.
- E’ possibile organizzare l’hardware in modo che in modo autonomo (senza eseguire istruzioni) scelga uno degli IRQ da servire e che mascheri interruzioni di priorità pari o inferiore mentre il processore sta eseguendo una RSI (questi IRQ rimarranno «pending» e verranno serviti dopo che la RSI è terminata)
  - Collegamento seriale (daisy-chain)
  - Collegamento parallelo (masking)
- Solo gli IRQ con priorità maggiore di quella attualmente servita possono interromperla: quanto visto fin’ora permette di gestire senza problemi anche queste interruzioni di interruzioni (nested interrupt)

Mascheramento

- Se abbiamo più linee di IRQ che entrano nel processore, con delle semplici porte logiche possiamo fare in modo che un IRQ a priorità maggiore mascheri i segnali di IRQ di priorità minore

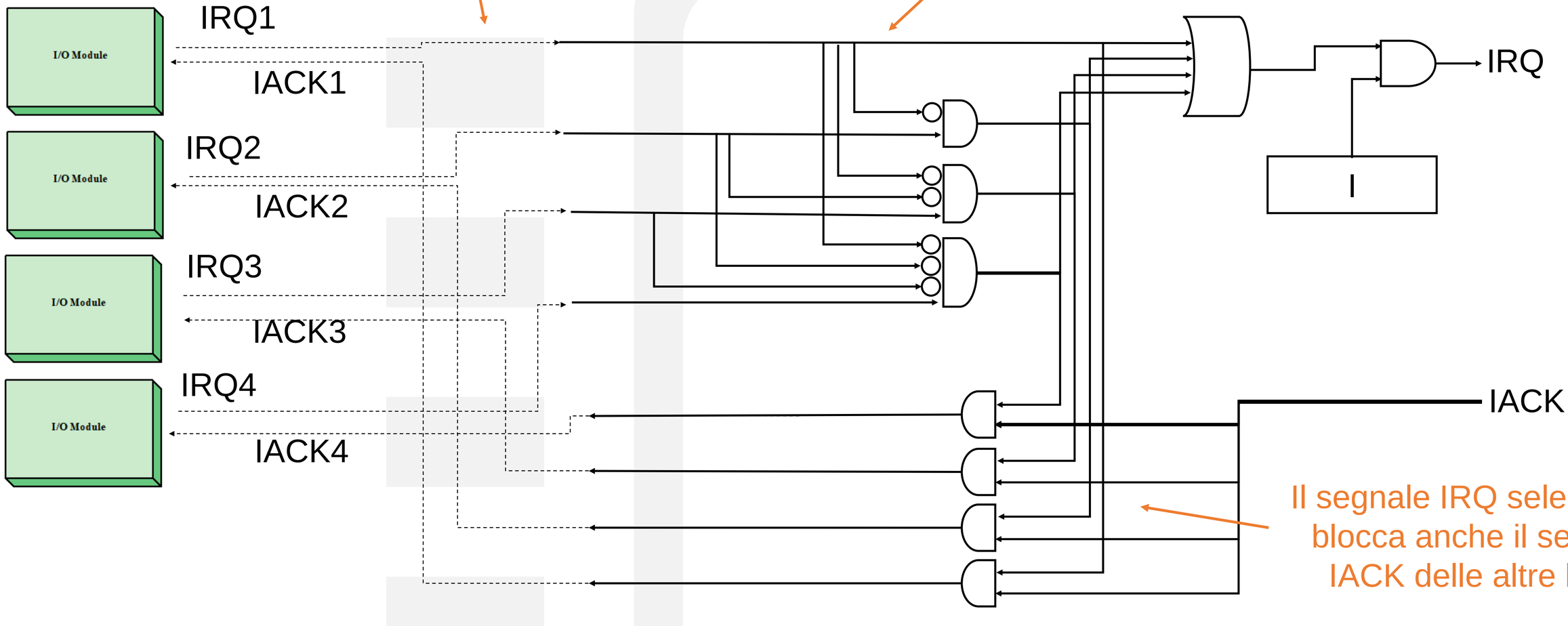


Nota: con un meccanismo analogo, possiamo anche bloccare l'invio del segnale IACK del processore sulle linee a priorità minore di quella attualmente da servire

Mascheramento

Il segnale IRQ di una linea blocca il segnale IRQ delle linee meno prioritarie

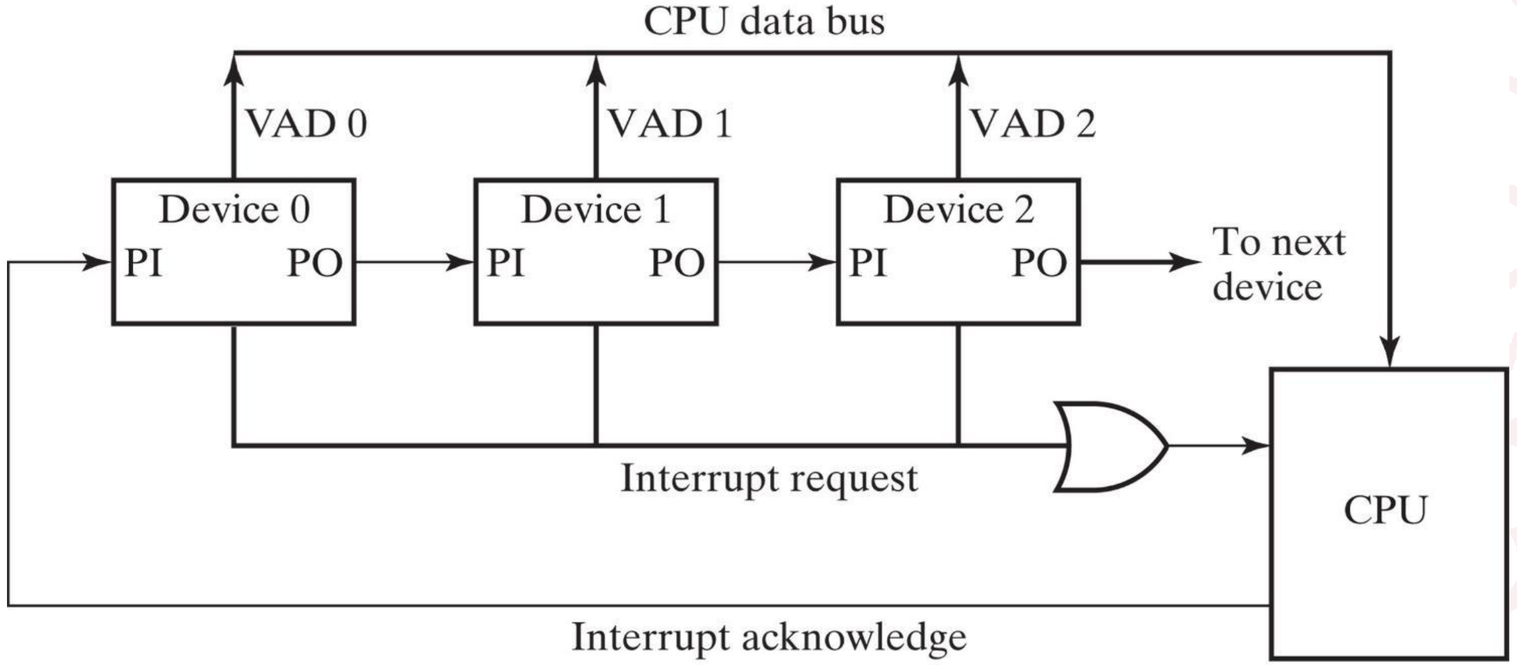
Ogni linea può essere un Wired-OR e gestire quindi più dispositivi



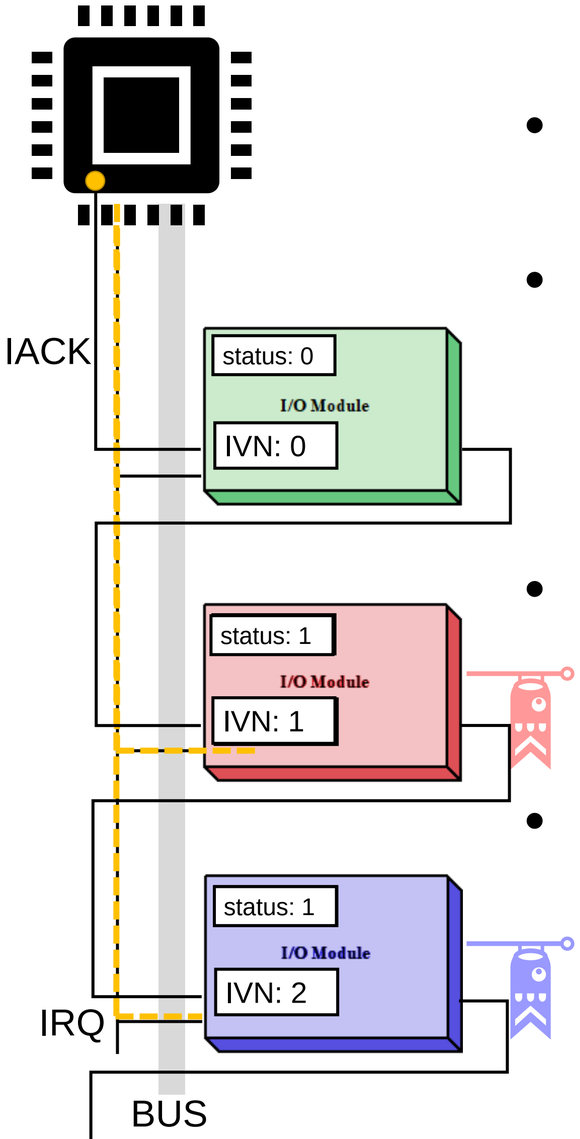
Il segnale IRQ selezionato blocca anche il segnale IACK delle altre linee

Daisy chain dei dispositivi

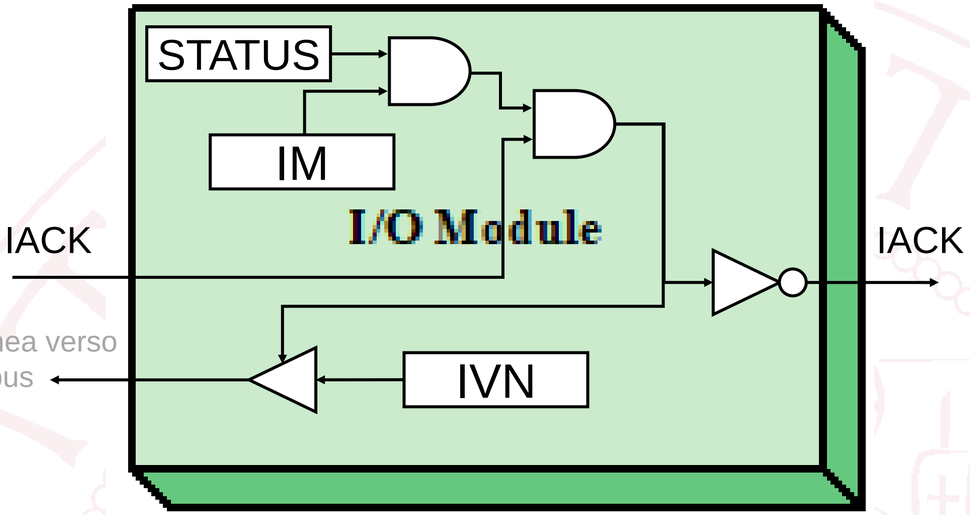
- I dispositivi sono collegati in «daisy chain»
- La linea del segnale IACK entra in ogni dispositivo e da questo prosegue verso quello successivo
- Il segnale di IACK viene generato dal processore e inviato lungo la linea: se il dispositivo non ha generato l'IRQ, passa il segnale; altrimenti ne blocca la propagazione (e invia al processore il suo IVN)
- Gli altri dispositivi restano in attesa (IRQ pending)
- La priorità è data dall'ordine con cui son collegati i dispositivi



Daisy Chain dei dispositivi



- Due device fanno richiesta di IRQ, inviando il segnale
- Quando il processore è pronto ad essere interrotto, invia il segnale di IACK, che passa attraverso un dispositivo alla volta
- Se il dispositivo non ha generato l'IRQ, passa il segnale al dispositivo dopo
- Altrimenti il dispositivo ferma il segnale e risponde inviando l'IVN sulla linea dati



- Funziona così bene che viene usato non solo per gestire l’I/O

Program	Generated by some condition that occurs as a result of an instruction execution, such as arithmetic overflow, division by zero, attempt to execute an illegal machine instruction, or reference outside a user's allowed memory space.
Timer	Generated by a timer within the processor. This allows the operating system to perform certain functions on a regular basis.
I/O	Generated by an I/O controller, to signal normal completion of an operation, request service from the processor, or to signal a variety of error conditions.
Hardware failure	Generated by a failure such as power failure or memory parity error.

Ricapitolando

- Processore chiede dati
- Device invia IRQ quando è pronto
- Processore (quando è interrompibile) sente IRQ e commuta il contesto
- In modalità supervisore vengono eseguite queste operazioni:
  1. Salvataggio del contesto
  2. Individuazione di chi ha generato IRQ
  3. Scelta del device con IRQ che ha maggiore priorità
  4. Recupero dell'indirizzo della sua RSI e sua esecuzione
  5. La RSI rimuove il segnale di IRQ su quel device
  6. Ripristino del contesto
- Ripresa dell'esecuzione del programma
- Nota: i passi da 1 a 4 si possono fare via SW o via HW (che è più veloce); durante l'esecuzione della RSI il processore è interrompibile da IRQ più prioritari

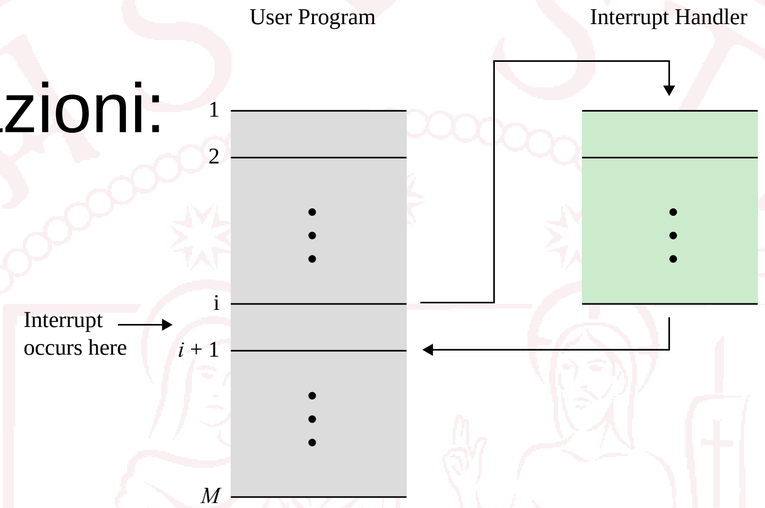


Figure 3.8 Transfer of Control via Interrupts

I/O a Interruzioni: pro e contro

CONTRO

- Sistema più complesso
- È necessario software dedicato
- È necessario hardware dedicato

PRO

- Efficiente: il processore non deve stare in busy waiting
- Usando HW nell’identificazione e gerarchia, abbiamo tempi di risposta rapidissimi
  - Hardware poll
  - Vectored IRQ
  - Banked registers

Ricapitolando

- Rispetto al I/O Programmato, a fronte di un sistema più complesso abbiamo una gestione degli eventi asincroni molto più efficiente
- Il processore non va in busy waiting
- Se usiamo dei componenti hardware, possiamo avere dei tempi di risposta a I/O paragonabili a quelli del busy waiting con dispositivo ready