



Lezione R11

Real-time su multiprocessore I

Sistemi embedded e real-time

30 ottobre 2020

Marco Cesati

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

SERT'20

R11.1

Di cosa parliamo in questa lezione?

Da inizio corso, siamo partiti con un modello molto semplice, andando via via a dettagliarlo. Manca un ultimo aspetto: passare da microprocessore a multiprocessore.

In questa lezione si dà una visione introduttiva del problema della schedulazione real-time in sistemi multiprocessore

- ① Sistemi multiprocessore
- ② Effetto Dhall
- ③ Anomalie di schedulazione
- ④ Test e condizioni di schedulabilità
- ⑤ Schedulazione partizionata



Sistemi multiprocessore

Un sistema real-time è detto **multiprocessore** quando è dotato di due o più processori, ciascuno in grado di **eseguire job autonomamente**

I processori possono essere dello stesso tipo o di tipo diverso

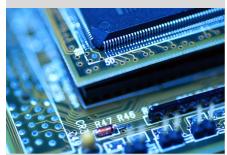
Ad esempio si consideri un sistema costituito da

- Diversi microprocessori multi-core
- Diverse schede di rete
- Diverse schede PCI con controllori DMA

In generale modellando il sistema è necessario specificare:

- il numero μ di **tipi di processore**
- il numero m_i di processori dell' i -esimo tipo ($1 \leq i \leq \mu$)
- su quali tipi di processore può eseguire ciascun job

In questa lezione tutti i **processori sono dello stesso tipo**



Real-time su sistemi multiprocessori

Few of the results obtained for a single processor generalize directly to the multiple processor case; bringing in additional processors adds a new dimension to the scheduling problem.

The simple fact that a task can use only one processor even when several processors are free at the same time adds a surprising amount of difficulty to the scheduling of multiple processors.

C. L. Liu, 1969



Sistemi statici

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Un sistema real-time è detto **statico** quando ciascun job è assegnato ad uno specifico processore

Esistono due varianti di sistemi **statici**:

- L'insieme dei job (o task) nel sistema è predeterminato, e l'assegnazione di ciascun job ad uno specifico processore è effettuata una volta per tutte nella fase di progetto del sistema
- L'insieme dei task nel sistema non è predeterminato, e l'assegnazione del task ad uno specifico processore è effettuata dal sistema operativo durante la fase di creazione del task (*scheduler partizionati*)

In entrambi i casi lo scheduler **non** decide su quale processore sarà eseguito un job appena rilasciato (è già stabilito)

SERT'20

R11.5

Sistemi dinamici

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Un sistema real-time è detto **dinamico** quando lo scheduler può assegnare dinamicamente un job ad un qualunque processore disponibile

Esistono tre varianti di sistemi **dinamici**:

- Con job **non interrompibili**
- Con job **interrompibili e non migrabili**: anche se interrotto, il job deve riprendere l'esecuzione sullo stesso processore in cui era in esecuzione precedentemente
- Con job **interrompibili e migrabili**: una volta interrotto, il job può riprendere l'esecuzione su **qualunque processore** che possa eseguirlo

Un algoritmo di schedulazione per un sistema dinamico è detto **globale** perché stabilisce quale processore eseguirà ciascun job

SERT'20

R11.6



Esempio di schedulazione in sistema statico

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



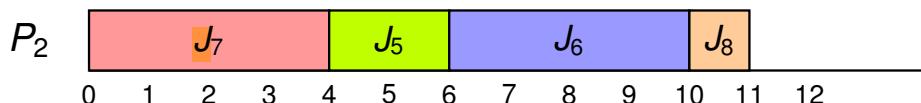
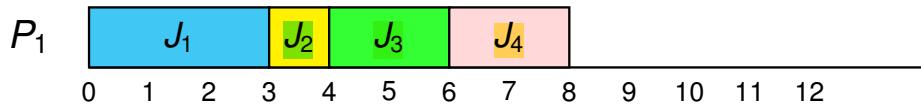
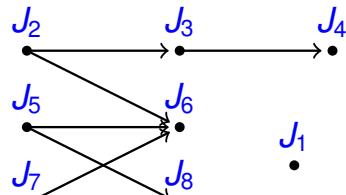
In un sistema **statico** esiste per ogni processore una lista di task o job con le relative priorità

vincoli sull'ordine, solo J_1 indipendente, esistono vincoli anche tra processori diversi

Lista processore P_1 : J_1, J_2, J_3, J_4

Lista processore P_2 : J_5, J_6, J_7, J_8

i	1	2	3	4	5	6	7	8
r_i	0	0	0	0	4	0	0	0
e_i	3	1	2	2	2	4	4	1



SERT'20

R11.7

Esempio di schedulazione in sistema dinamico

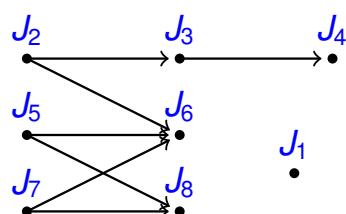
Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati

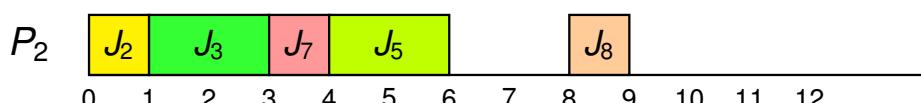
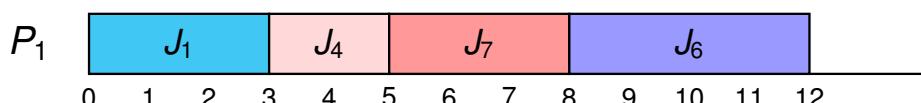


Lista: J_1, J_2, \dots, J_8

i	1	2	3	4	5	6	7	8
r_i	0	0	0	0	4	0	0	0
e_i	3	1	2	2	2	4	4	1

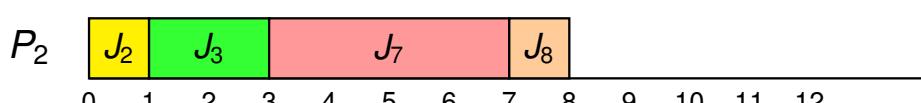
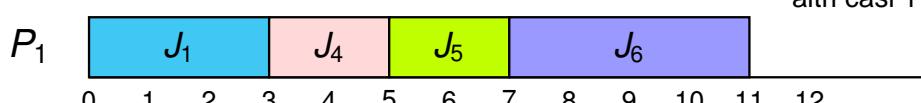


Job interrompibili e migrabili:



Job non interrompibili:

nel caso migrabili ho finito a 12, negli altri casi 11 (dove non erano migrabili)



SERT'20

R11.8

Vantaggi dei sistemi statici

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati

Quali sono i vantaggi dei sistemi statici?

- Si può analizzare la schedulabilità su ciascun processore utilizzando i risultati teorici validi per il caso uniprocessore (fondamentale per i sistemi hard real-time!)
- Un job che impiega più tempo di quanto previsto dal suo WCET (*overrun*) può ritardare l'esecuzione dei soli task associati al suo processore
- Poiché i job interrotti riprendono sempre l'esecuzione sullo stesso processore si evitano i costi dovuti alla migrazione del contesto ad un altro processore
- La coda di esecuzione (in cui i job rilasciati aspettano di essere attivati) è relativa al singolo processore ed è quindi più piccola



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'20

R11.9

Vantaggi dei sistemi dinamici

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati

Quali sono i vantaggi dei sistemi dinamici?

- Hanno tipicamente meno cambi di contesto e interruzioni dei job, poiché un job è interrotto solo quando nessun processore è idle
- Se un job esegue per meno tempo di quanto previsto dal suo WCET, il tempo liberato sul processore può essere utilizzato potenzialmente da tutti i task nel sistema
- Se un job impiega più tempo di quanto previsto dal suo WCET (*overrun*), la probabilità che ciò comporti il mancato rispetto di una o più scadenze è minore
- Per ogni task del sistema che è creato a run-time, assegnazione e bilanciamento del carico sono “automatici” e determinati dall'algoritmo di schedulazione globale



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'20

R11.10



Gli algoritmi di schedulazione **clock-driven** sono in generale utilizzabili senza problemi con i sistemi multiprocessore

Infatti la schedulazione effettiva è generata “off-line” e validata una volta per tutte

Al contrario, non è immediato applicare gli algoritmi **priority-driven** ai sistemi multiprocessore

Diverse problematiche:

- Efficienza degli algoritmi (effetto Dhall)
- Predicibilità del sistema (anomalie di schedulazione)
- Test di schedulabilità (teoremi non più validi)

Effetto Dhall



Teorema (Dhall & Liu, 1978)

Per ogni numero di processori $m \geq 2$, esistono insiemi di task con utilizzazione **bassa** che non sono schedulabili con RM, DM o EDF

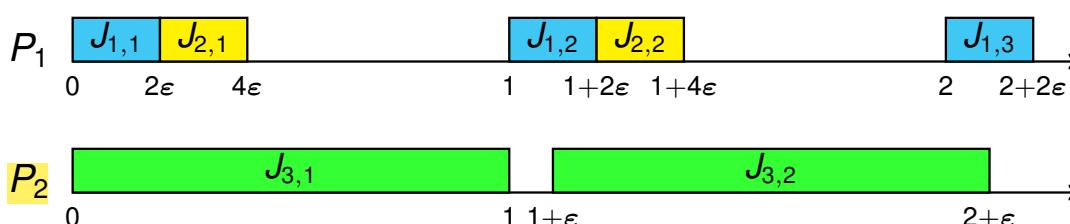
Consideriamo $T_1 = (1, 2\varepsilon)$, $T_2 = (1, 2\varepsilon)$, ..., $T_m = (1, 2\varepsilon)$, $T_{m+1} = (1 + \varepsilon, 1)$

Utilizzazione globale: $U_g = 2\varepsilon \cdot m + 1/(1 + \varepsilon) \rightarrow 1$ se $\varepsilon \rightarrow 0$

m può essere qualsiasi valore (anche un milione di task),

ma l'utilizzo sempre a 1 tende, quindi basta 1 proc (massimo massimo 2)

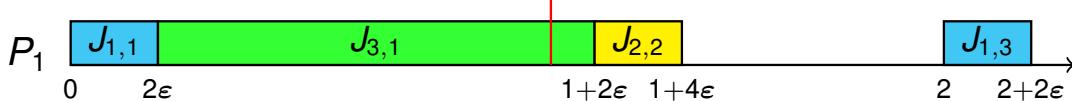
Schedulazione fattibile, $m = 2$:



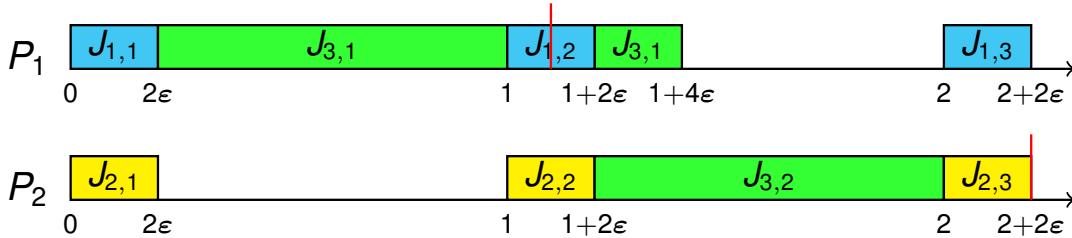
non ho usato
né edf, né rm,
né dm.

Effetto Dhall (2)

Schedulazione con EDF, $m = 2$:



Schedulazione con RM, $m = 2$:



Comportamenti analoghi all'effetto Dhall si verificano solo se almeno uno dei task ha una utilizzazione molto alta (Funk, Goossens & Baruah, 2001)



Anomalia di schedulazione

Si definisce *anomalia di schedulazione* il comportamento di un algoritmo di schedulazione per cui, in presenza di variazioni apparentemente vantaggiose del carico del sistema, si ottiene un peggioramento delle prestazioni

Esempi di variazioni “vantaggiose”:

- Aumento del periodo di un task
- Diminuzione del tempo di esecuzione di un task
- Rimozione di vincoli di precedenza tra i job
- Aumento del numero di processori

Nei sistemi uniprocessore le anomalie di schedulazione possono verificarsi solo nel caso in cui job sono non interrompibili e/o non indipendenti (Mok, 2000)



Anomalie di schedulazione in sistemi multiprocessore

Assumiamo che tutti i job siano indipendenti:

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Tipo di sistema	Anomalia ?
Statico, job non interrompibili	Si (1)
Statico, job interrompibili	No
Dinamico, job non interrompibili	Si (2)
Dinamico, job interrompibili ma non migrabili	Si (3)
Dinamico, job interrompibili e migrabili	Si (4)

- (1) Mok, 2000 (cfr. esempi in Lezione R5)
- (2) Graham, 1969
- (3) Ha & Liu, 1994
- (4) Andersson & Jonsson, 2000

Perché le anomalie complicano il problema della validazione?

Se i parametri dei job possono variare, non si può validare il sistema esaminando solo il “caso peggiore”, ma è necessario esaminare tutte le combinazioni di parametri

SERT'20 R11.15

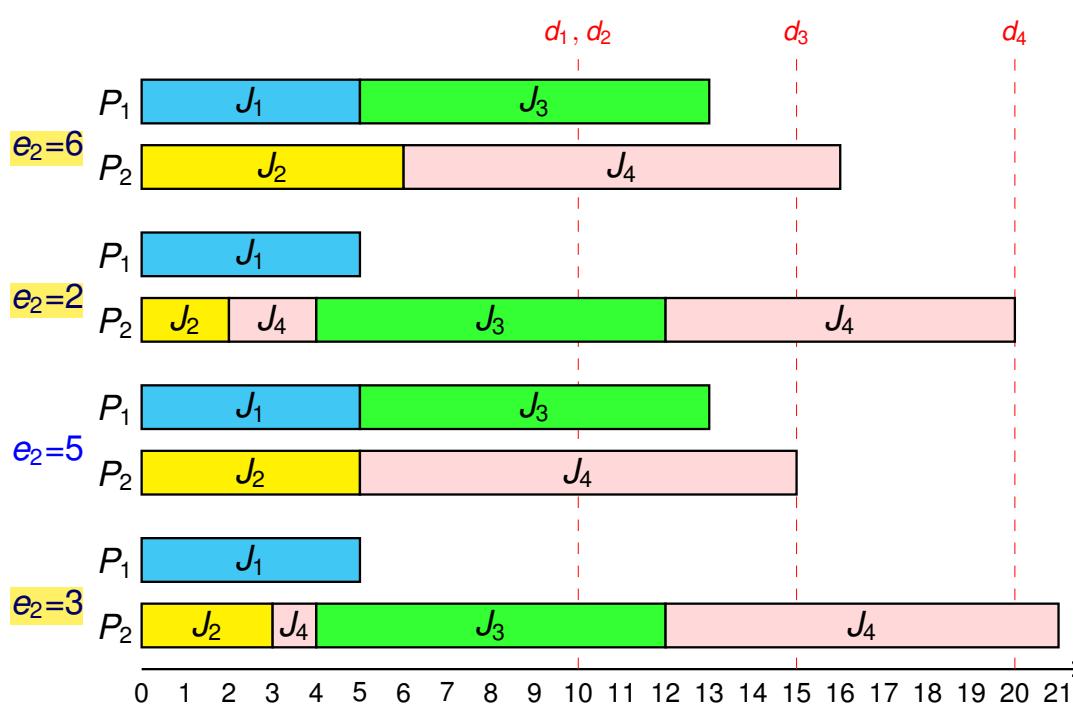
Anomalie di schedulazione con job non migrabili

Job interrompibili ma non migrabili

i	1	2	3	4
r_i	0	0	4	0
d_i	10	10	15	20
e_i	5	[2, 6]	8	10

Indice minore \equiv priorità maggiore

e_2 varia da 2 a 6



Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

Analiticamente,
NON posso
prevedere che:
 $e = 2$ OK
 $e = 3$ MANCA SCAD.
 $e = 5$ OK
 $e = 6$ OK

SERT'20 R11.16

Anomalie di schedulazione con job migrabili

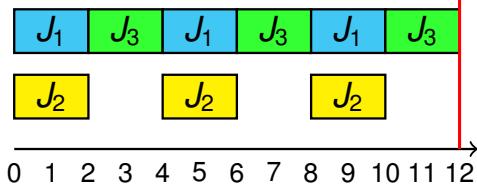
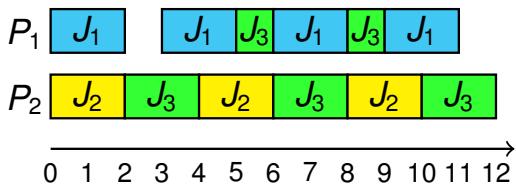
Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati

Aumento del periodo di un task di priorità alta:

$$T_1 = (3, 2), T_2 = (4, 2), \\ T_3 = (12, 8)$$

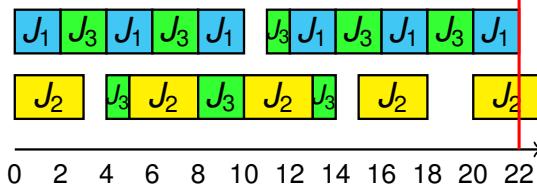
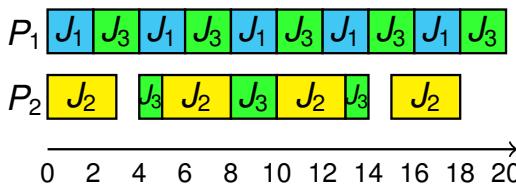
$$T_1 = (4, 2), T_2 = (4, 2), \\ T_3 = (12, 8)$$



Aumento del periodo di un task di priorità bassa:

$$T_1 = (4, 2), T_2 = (5, 3), \\ T_3 = (10, 7)$$

$$T_1 = (4, 2), T_2 = (5, 3), \\ T_3 = (11, 7)$$



SERT'20 R11.17

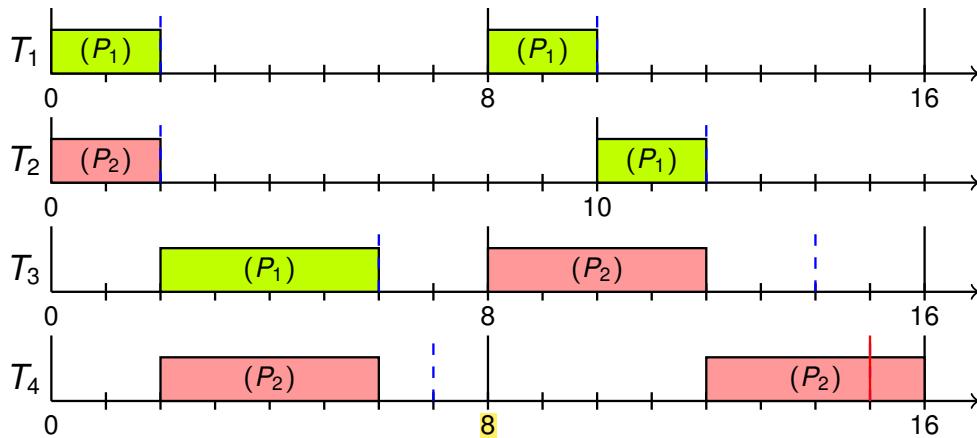
Istanti critici in schedulazioni globali

non posso riadattare le idee monoprocessoressi a multiprocessoressi.

Teorema (Lauzac, Melhem & Mosse, 1998)

Utilizzando uno scheduler globale a priorità fissa a livello di task (es., DM), l'istante in cui un job di un task T_i è rilasciato contemporaneamente ai job di tutti i task di priorità superiore T_1, \dots, T_{i-1} **non** è necessariamente un istante critico di T_i

$$T_1 = (8, 2, 2), T_2 = (10, 2, 2), T_3 = (8, 4, 6), T_4 = (8, 4, 7), m = 2$$

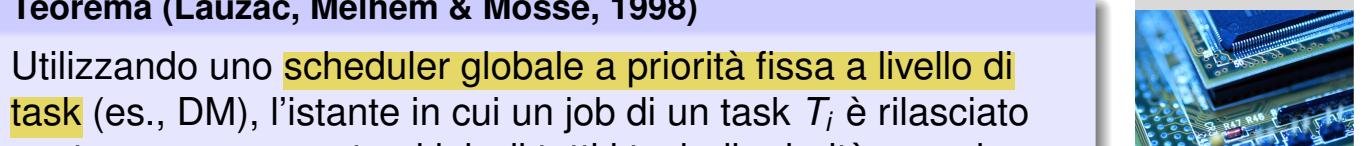


Il test di schedulabilità non funziona!

A PRIORI, NON POSSO SAPERE QUALE SIA IL CASO PEGGIORE.

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



SERT'20 R11.17

Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'20 R11.18

Fattore di utilizzazione per multiprocessore

Se mi basassi su altra classe di risultati? Uso quelli legati alla schedulabilità.

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Teorema (Oh & Baker, 1998)

Dato un sistema di task periodici con scadenze uguali ai periodi e m processori, se X è un qualsiasi algoritmo di schedulazione partizionato con priorità fissa a livello di task:

$$U_X \leq \frac{m+1}{1 + 2^{1/(m+1)}}$$

sotto abbiamo estensione + semplificazione:

Teorema (Andersson, Baruah & Jonsson, 2001)

Dato un sistema di task periodici con scadenze uguali ai periodi e m processori, sia X

- un qualsiasi algoritmo di schedulazione partizionato, o
- un qualsiasi algoritmo di schedulazione globale con priorità fissa a livello di job;

allora per il fattore di utilizzazione di X si ha: $U_X \leq \frac{m+1}{2}$

SERT'20

R11.19

Schedulazione a priorità fissa su multiprocessore

Real-time su multiprocessore I

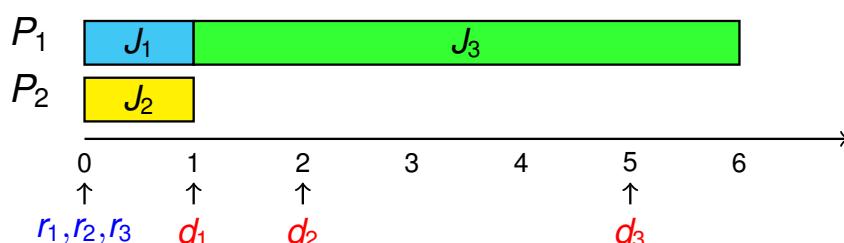
Marco Cesati



Corollario (Andersson, Baruah & Jonsson, 2001)

Nessun algoritmo di schedulazione globale con priorità fissa a livello di job è ottimale su multiprocessore

Schedul. EDF di $T_1 = (1, 1)$, $T_2 = (2, 1)$, $T_3 = (5, 5)$, $m = 2$:



Eppure una schedulazione fattibile non EDF esiste:



SERT'20

R11.20

Algoritmi ottimali per multiprocessore

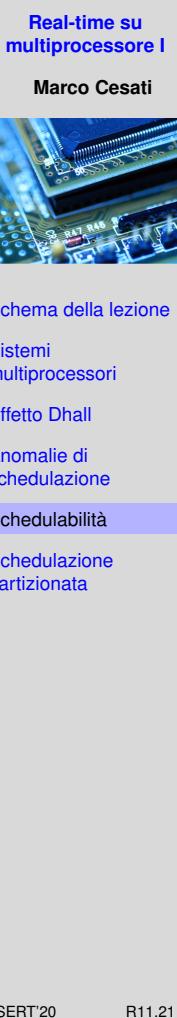
Possono esistere algoritmi ottimali per multiprocessore? **Sì!**

- Alcuni algoritmi di schedulazione dinamica a livello di job hanno fattore di utilizzazione pari a m
- Tuttavia, nessun algoritmo on-line (non “chiaroveggente”) è ottimale se gli istanti di rilascio dei job non sono esattamente prefissati (Fisher, 2007)

Una classe di algoritmi ottimali su multiprocessore è derivata dall'algoritmo **Pfair** (Baruah & al., 1996):

- basato sull'idea di **schedulazione fluida**: ogni task progredisce in modo proporzionale alla sua utilizzazione
- **tempo diviso in quanti**: allo scadere di ogni quanto, lo scheduler assegna i task ai processori in modo che per ogni task T_i il lavoro compiuto sia $\lceil t \cdot e_i/p_i \rceil$ o $\lfloor t \cdot e_i/p_i \rfloor$

Gli algoritmi dinamici a livello di job sono molto costosi in termini di overhead dello scheduler, quindi non sono adottati



SERT'20 R11.21

Schedulazione partizionata



SERT'20 R11.22

Nei sistemi real-time multiprocessore statici l'algoritmo di schedulazione è detto **partizionato**

Consiste di due componenti:

- **Allocazione dei task**: assegnazione di ciascun task ad uno specifico processore
 - questo problema è analogo a *bin packing* ed è **NP hard** (Garey & Johnson, 1979)
- **Problema di priorità**: schedulazione dei task su ciascun processore
 - questo è il problema della schedulazione su sistemi con un singolo processore

Formulazione del problema

Dato un sistema di task periodici, partizionare i task in sottoinsiemi tali che ciascun sottoinsieme può essere schedulato in modo fattibile su un singolo processore utilizzando un determinato algoritmo di schedulazione

Un sistema di n task indipendenti è schedulabile con n processori (purché ciascun task abbia densità inferiore a uno)

Non è noto alcun algoritmo polinomiale che sia in grado di determinare, dato un sistema di n task indipendenti, il minimo numero m_0 di processori che permetta di schedularlo

Gli algoritmi di allocazione dei task utilizzabili in pratica trovano soluzioni non ottimali:

- Non riescono ad associare i task ai processori in modo da sfruttarli nel miglior modo possibile
- Non riescono a determinare schedulazioni fattibili per ogni possibile insieme di task schedulabile



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

Allocazione dei task (2)

Come misurare la "bontà" di un algoritmo di allocazione?



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

Tre metriche principali:

- Rapporto di approssimazione: è il massimo valore m/m_0 , ove m è il numero di processori utilizzato dall'algoritmo di allocazione e m_0 è il minimo numero teoricamente necessario, considerando ogni possibile sistema di task
- Fattore di accelerazione: quanto è necessario aumentare la velocità di esecuzione degli m_0 processori per schedulare fattibilmente ogni possibile sistema di task con le assegnazioni determinate dall'algoritmo di allocazione
- Fattore di utilizzazione: il valore di soglia per cui tutti i sistemi di task con fattore di utilizzazione totale inferiore o uguale sono sempre schedulabili utilizzando l'algoritmo di allocazione dei task

Algoritmo RMFF

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Il più semplice algoritmo per l'allocazione dei task è **RMFF** (Rate Monotonic First Fit, Dhall & Liu, 1978):

- ① ordina i task per periodi non decrescenti: T_1, T_2, \dots
- ② ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- ③ cominciando da T_1 , assegna ciascun task T_i al primo processore P_j tale che l'insieme dei task già assegnati a P_j insieme a T_i risulta ancora schedulabile tramite RM

- $U_{\text{RMFF}} = m \cdot (\sqrt{2} - 1)$ (Oh & Baker, 1998)
- Fattore di approssimazione: 2.23 (Oh & Son, 1993)

RMFF può essere usato come un algoritmo on-line? NO

L'ordinamento dei job richiede la conoscenza di tutti i periodi dei task da schedulare \Rightarrow usare RMFF on-line richiede di riallocare tutti i task quando ne viene creato uno nuovo

SERT'20 R11.25

Algoritmo FFDU

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Un altro algoritmo per l'allocazione dei task è **FFDU** (First Fit Decreasing Utilization, Davari & Dhall, 1986):

- ① ordina i task per fattori di utilizzazione decrescenti: T_1, T_2, \dots
- ② ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- ③ cominciando da T_1 , assegna ciascun task T_i al primo processore P_j tale che l'insieme dei task già assegnati a P_j insieme a T_i risulta ancora schedulabile tramite RM

- $U_{\text{FFDU}} = m \cdot (\sqrt{2} - 1)$ (Lopez & al., 2003)
- Fattore di approssimazione: 1.67 (Oh & Son, 1995)

Poiché richiede l'ordinamento dei task, FFDU è tipicamente utilizzato come algoritmo off-line

SERT'20 R11.26

Algoritmo RM-FF

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



Una variante di RMFF è l'algoritmo **RM-FF** (Oh & Son, 1994) che sostanzialmente non effettua l'ordinamento dei task prima della allocazione:

- ➊ ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- ➋ assegna ciascun task T_i al primo processore P_j tale che l'insieme dei task già assegnati a P_j insieme a T_i risulta ancora schedulabile tramite **RM**

- $U_{\text{RM-FF}} = m \cdot (\sqrt{2} - 1)$ (Oh & Baker, 1998)
- Fattore di approssimazione: 2.33 (Oh & Son, 1994)

A differenza di **RMFF**, **RM-FF** è facilmente utilizzabile come algoritmo on-line

SERT'20

R11.27

Algoritmo EDF-FF

Real-time su multiprocessore I

Marco Cesati



L'euristica "first fit" accoppiata all'algoritmo di schedulazione **EDF** dà luogo all'algoritmo di allocazione "on-line" **EDF-FF**:

- ➊ ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- ➋ assegna ciascun task T_i al primo processore P_j tale che l'insieme dei task già assegnati a P_j insieme a T_i risulta ancora schedulabile tramite **EDF**

- $U_{\text{EDF-FF}} = \frac{\beta \cdot m + 1}{\beta + 1}$, $\beta = \left\lfloor 1 / \max_k \frac{e_k}{p_k} \right\rfloor$ (Lopez & al., 2000)
- Fattore di approssimazione: 1.7 (Garey & Johnson, 1979)

EDF-FF è ottimale tra tutti gli algoritmi partizionati:

$$\beta = 1 \implies U_{\text{EDF-FF}} = (m + 1)/2$$

$$\beta \rightarrow \infty \implies U_{\text{EDF-FF}} \rightarrow m$$

SERT'20

R11.28