

Lezione R11

Real-time su multiprocessore

Sistemi embedded e real-time

18 dicembre 2012

Marco Cesati

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.1

Di cosa parliamo in questa lezione?

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.2

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 multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.3

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.4

Sistemi statici

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)

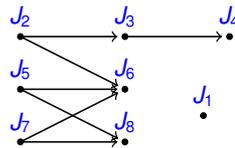
Esempio di schedulazione in sistema statico

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

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



Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.5

Sistemi dinamici

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**:

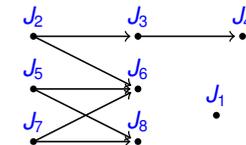
- Con job **non interrompibili**
- Con job **interrompibili** e **non migrabili**: anche se interrotto, il job deve riprendere l'esecuzione sullo stesso processore in cui era in esecuzione precedentemente
- Con job **interrompibili** e **migrabili**: una volta interrotto, il job può riprendere l'esecuzione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

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

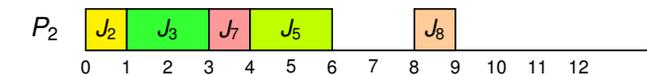
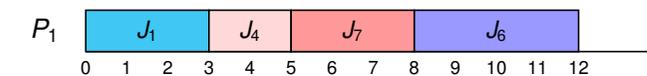
Esempio di schedulazione in sistema dinamico

Lista: J_1, J_2, \dots, J_8

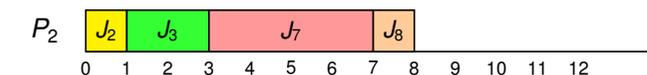
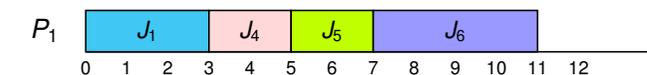
i	1	2	3	4	5	6	7	8
r_i	0	0	0	0	4	0	0	0
e_i	3	1	2	2	2	4	4	1



Job interrompibili e migrabili:



Job non interrompibili:



Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.7

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.6

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.8

Vantaggi dei sistemi statici

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.9

Vantaggi dei sistemi dinamici

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**
- In confronto ai sistemi statici, sono in grado di schedulare meglio i task con fattore di utilizzazione "grande"

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.10

Algoritmi di schedulazione multiprocessore

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)

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.11

Effetto Dhall

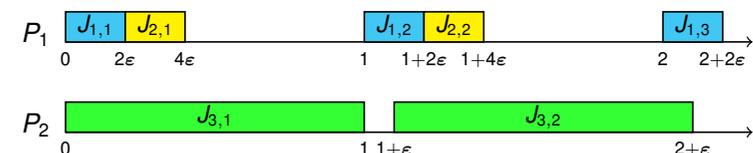
Teorema (Dhall & Liu, 1978)

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 $\varepsilon \rightarrow 0$

Schedulazione fattibile, $m = 2$:



Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione

Sistemi multiprocessori

Effetto Dhall

Anomalie di schedulazione

Schedulabilità

Schedulazione partizionata

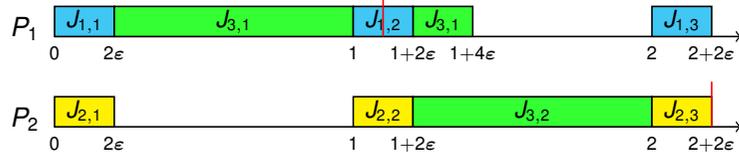
SERT'13 R11.12

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)

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.13

Anomalie 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)

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.14

Anomalie di schedulazione in sistemi multiprocessore

Assumiamo che tutti i job siano indipendenti:

Tipo di sistema Anomalie ?

- | | | |
|---|---|--------|
| Statico, job non interrompibili | ● | Sì (1) |
| Statico, job interrompibili | ● | No |
| Dinamico, job non interrompibili | ● | Sì (2) |
| Dinamico, job interrompibili ma non migrabili | ● | Sì (3) |
| Dinamico, job interrompibili e migrabili | ● | Sì (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

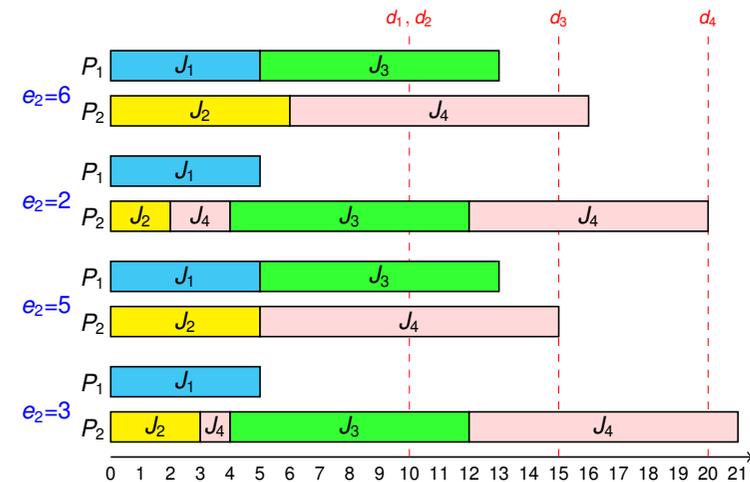
Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.15

Anomalie di schedulazione con job non migrabili

Job interrompibili ma non migrabili	i	1	2	3	4
Indice minore \equiv priorità maggiore	r_i	0	0	4	0
	d_i	10	10	15	20
e_2 varia da 2 a 6	e_i	5	[2, 6]	8	10



Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

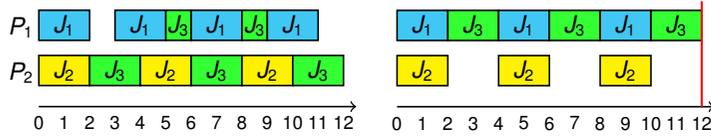
Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.16

Anomalie di schedulazione con job migrabili

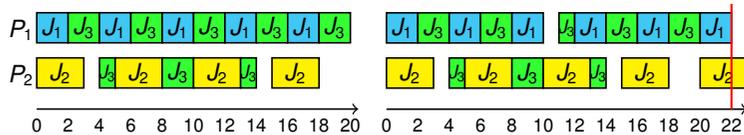
Aumento del periodo di un task di priorità alta:

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



Aumento del periodo di un task di priorità bassa:

$$T_1 = (4, 2), T_2 = (5, 3), T_3 = (10, 7) \quad T_1 = (4, 2), T_2 = (5, 3), T_3 = (11, 7)$$



Fattore di utilizzazione per multiprocessore

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:

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

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: $U_X \leq \frac{m+1}{2}$

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

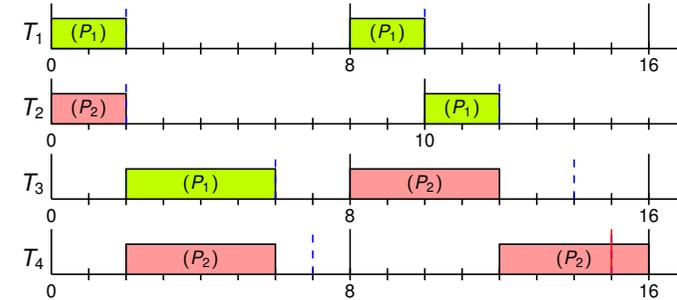
SERT13 R11.17

Istanti critici in schedulazioni globali

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!

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

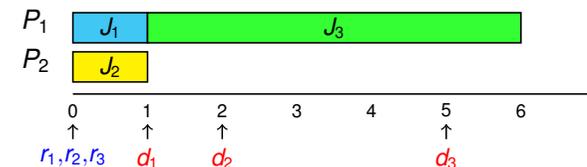
SERT13 R11.18

Schedulazione a priorità fissa su multiprocessore

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:



Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.19

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati

Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.20

Algoritmi ottimali per multiprocessore

Possano esistere algoritmi ottimali per multiprocessore? **Si!**

- 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 sono derivati 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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.21

Schedulazione partizionata

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.22

Allocazione dei task

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.23

Allocazione dei task (2)

Come misurare la “bontà” di un algoritmo di allocazione?

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT'13 R11.24

Algoritmo RMFF

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**

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

RMFF può essere usato come un algoritmo on-line?

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

Algoritmo RM-FF

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

- 1 ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- 2 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**

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

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.25

Algoritmo FFDU

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**

- $U_{FFDU} = m \cdot (\sqrt{2} - 1)$ (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

Algoritmo EDF-FF

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

- 1 ordina arbitrariamente i processori: P_1, P_2, \dots
- 2 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**

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

EDF-FF è ottimale tra tutti gli algoritmi partizionati:

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

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.27

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.26

Real-time su multiprocessore
Marco Cesati



Schema della lezione
Sistemi multiprocessori
Effetto Dhall
Anomalie di schedulazione
Schedulabilità
Schedulazione partizionata

SERT13 R11.28