Lezione R4

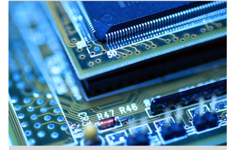
Algoritmi priority-driven

Sistemi operativi open-source, embedded e real-time

17 ottobre 2017

Marco Cesati

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

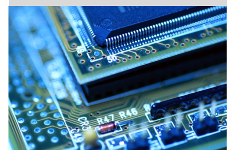


Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Di cosa parliamo in questa lezione?

In questa lezione descriviamo i tipi di algoritmi più utilizzati per realizzare gli schedulatori dei sistemi real-time che fanno uso di priorità dei job

1. Algoritmi di tipo round-robin
2. Algoritmi di tipo priority-driven
3. Gli algoritmi EDF, LRT, LST
4. Gli algoritmi RM e DM

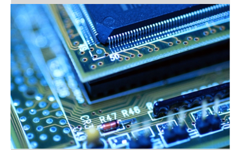


Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmi round-robin

Un algoritmo di schedulazione è detto essere *round-robin* quando i job sono gestiti tramite code FIFO (First-In, First-Out)

- Un job è inserito in fondo ad una coda d'esecuzione quando esso diviene pronto per l'esecuzione (istante di rilascio)
- Dovendo scegliere un job tra quelli in attesa in una coda FIFO, lo scheduler seleziona quello in testa, ossia il primo inserito in ordine di tempo, e lo rimuove dalla coda
- Ogni job esegue al massimo per un intervallo di tempo predefinito chiamato *time slice* o *quantum*, poi se necessario viene interrotto ed inserito nuovamente in fondo alla coda
- Se nella coda vi sono n job, un gruppo di n time slice è chiamato *round*: ciascun job ottiene un time slice ogni round



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmi round-robin (2)

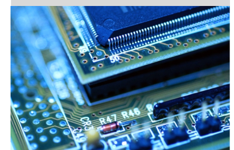
Un algoritmo di schedulazione round-robin è detto essere *pesato* (o *weighted*) se a job differenti possono essere assegnati pesi differenti che influiscono sulle quote di tempo di processore

- Un *round* è definito come il numero di time slice pari alla somma dei pesi di tutti i job in una coda
- Un job con peso w ottiene w time slice in ogni round
- I job con peso maggiore ottengono più tempo di processore di quelli con peso minore

Quali sono i vantaggi degli scheduler round-robin?

- Il sistema assegna il processore in maniera "equa" (ad es.: time sharing dei SO general-purpose)
- Lo scheduler utilizza semplici code FIFO, quindi è molto veloce (ha basso overhead)

Algoritmi priority-driven
Marco Cesati



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

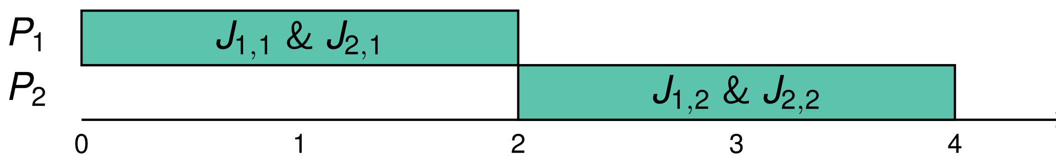
Svantaggi degli algoritmi round-robin

Quali sono i più evidenti svantaggi degli scheduler round-robin?

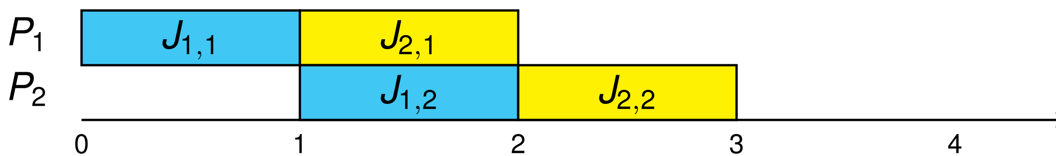
1) Non considerano eventuali scadenze dei job
2) Non gestiscono bene job con vincoli di precedenza

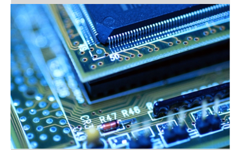
Esempio: quattro job con istante di rilascio 0 e tempo d'esecuzione 1: $J_{1,1} \prec J_{1,2}$, $J_{2,1} \prec J_{2,2}$ $J_{1,1}$ e $J_{2,1}$ eseguono sul processore P_1, $J_{1,2}$ e $J_{2,2}$ eseguono sul processore P_2

Con round-robin:



Senza round-robin:





Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

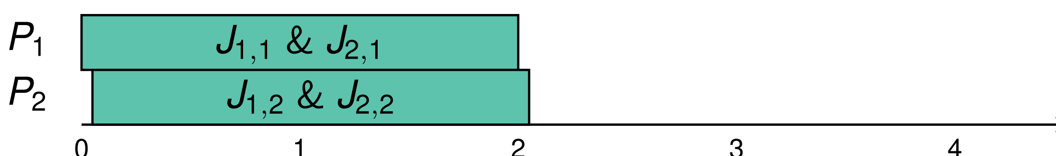
Svantaggi degli algoritmi round-robin (2)

Se i vincoli di precedenza sono un problema, perché gli algoritmi di tipo round-robin sono utilizzati soprattutto nei sistemi Unix in cui i processi sono spesso collegati tramite "pipe"?

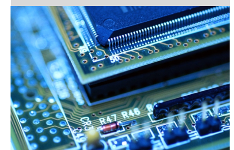
La dipendenza tra job di una "pipe" non è un vincolo di precedenza!

- In un vincolo di precedenza $J_a \rightarrow J_b$, J_b non può iniziare prima del completamento di J_a
- In una pipe $J_a \mid J_b$, J_b consuma i dati via via prodotti da J_a

Nell'esempio precedente, se al posto dei vincoli di precedenza si introducono due pipe $J_{1,1} \mid J_{1,2}$ e $J_{2,1} \mid J_{2,2}$:



Algoritmi priority-driven
Marco Cesati



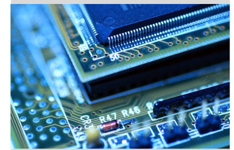
Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmi priority-driven

Un algoritmo di schedulazione è detto *priority-driven* se ha la caratteristica di non lasciare mai intenzionalmente inutilizzato un processore o un'altra risorsa

Alcune caratterizzazione equivalenti degli algoritmi priority-driven:

- Una risorsa attiva (processore) o passiva è inutilizzata solo quando non esistono job che richiedono la risorsa pronti per l'esecuzione (⟶ algoritmi *work conserving*)
- Le decisioni dello scheduler vengono effettuate all'occorrenza di specifici eventi, ad es. un job diviene pronto per l'esecuzione (⟶ algoritmi *event driven*)
- Gli algoritmi di schedulazione prendono decisioni ottimali a livello locale, ossia del singolo processore o risorsa (⟶ algoritmi *greedy scheduling*)



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Modello di riferimento

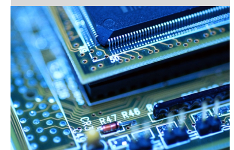
Studieremo alcuni algoritmi priority-driven utilizzando:

- Modello a task periodici (o sporadici)
- Numero di task prefissato
- Un singolo processore (od un sistema statico)
- Task indipendenti: nessun vincolo di precedenza e
- nessuna risorsa condivisa
- Nessun job aperiodico

Nel modello a task sporadici ciascun task è caratterizzato da un periodo corrispondente al minimo intervallo tra gli istanti di rilascio dei job

Più avanti alcuni di questi vincoli saranno rimossi

Algoritmi priority-driven
Marco Cesati



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Priorità

Ogni algoritmo priority-driven può essere realizzato assegnando dinamicamente valori numerici detti *priorità* ai job

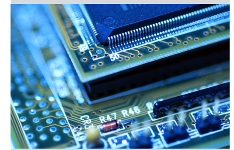
La schedulazione dipende, oltre che dal modello del carico e del sistema, dalla lista dei job ordinata per priorità; quindi gli algoritmi sono anche chiamati *list scheduling*

Molti scheduler non real-time sono priority-driven:

- algoritmi FIFO (First In First Out): priorità inversamente proporzionale all'istante di rilascio
- algoritmi LIFO (Last In First Out): priorità direttamente proporzionale all'istante di rilascio
- algoritmi SETF (Shortest Execution Time First): priorità inversamente proporzionale al tempo d'esecuzione
- algoritmi LETF (Longest Execution Time First): priorità direttamente proporzionale al tempo d'esecuzione

Gli algoritmi round-robin sono priority-driven? ***Sì!***

Possiamo pensare che la priorità di ogni job varia dinamicamente in funzione della sua posizione nella coda FIFO



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Tipi di priorità degli algoritmi

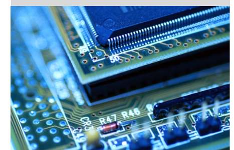
Gli algoritmi priority-driven possono essere:

- a *priorità fissa* (*fixed-priority*): la priorità di tutti i job di un task è identica; di conseguenza, la priorità è in effetti assegnata a ciascun task e non cambia
- a *priorità dinamica* (*dynamic-priority*): la priorità dei job di uno stesso task può cambiare

A propria volta, gli algoritmi a priorità dinamica possono essere di due sottotipi:

- dinamici a livello di task e statici a livello di job (*task-level dynamic-priority*): la priorità di un job già rilasciato e pronto per l'esecuzione non cambia
- dinamici a livello di job (*job-level dynamic-priority*): la priorità di un job può cambiare dopo il suo rilascio

Algoritmi priority-driven
Marco Cesati



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

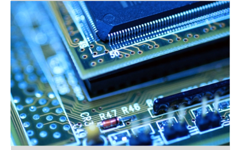
Algoritmi priority-driven fondamentali

I tipi fondamentali di algoritmi priority-driven:

- FIFO: priorità invers. proporzionale all'istante di rilascio
- LIFO: priorità proporzionale all'istante di rilascio
- EDF: priorità invers. proporzionale alla scadenza assoluta
- LST: priorità invers. proporzionale allo slack dei job
- RM: priorità invers. proporzionale al periodo
- DM: priorità invers. proporzionale alla scadenza relativa

Di che tipo sono questi algoritmi?

- FIFO, LIFO: priorità dinamica a livello di task
- EDF: priorità dinamica a livello di task
- LST: priorità dinamica a livello di job
- RM, DM: priorità statica



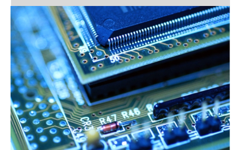
Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmi ottimali su singolo processore

- EDF (Earliest Deadline First): la priorità dei job è direttamente proporzionale alla vicinanza della scadenza
- LRT (Latest Release Time): è l'inverso di EDF, poiché inverte i ruoli degli istanti di rilascio e delle scadenze e schedula i job iniziando dall'ultima scadenza fino al presente
- LST (Least Slack Time First) o MLF (Minimum Laxity First): la priorità è inversamente proporzionale alla *slack* dei job, ossia il valore ottenuto sottraendo dalla scadenza del job il tempo presente ed il tempo richiesto per completare il job

Teorema (Dertouzos 1974, Mok 1983)

Avendo un solo processore, job interrompibili (con preemption), e nessuna contesa sulle risorse condivise, gli algoritmi EDF, LRT e LST producono una schedulazione fattibile di un insieme di job con vincoli temporali arbitrari se e solo se tale insieme di job è schedulabile



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

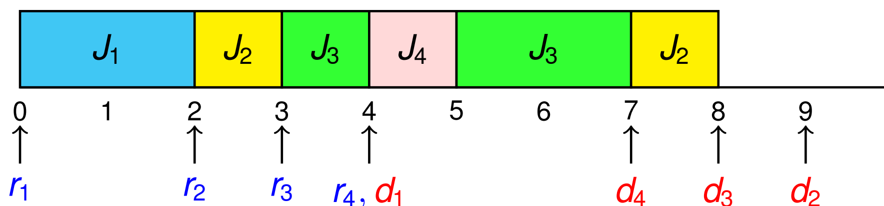
Esempio di schedulazione di EDF

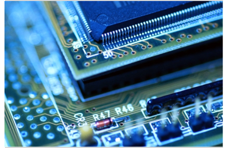
Job interrompibili $J_1, \ldots J_4$:

i	1	2	3	4
r_i	0	2	3	4
d_i	4	9	8	7
e_i	2	2	3	1

Lavoro da compiere:

$\bar{e}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
J_1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
J_2	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0
J_3	3	3	3	3	2	2	1	0	0	0
J_4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0





Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmo LRT

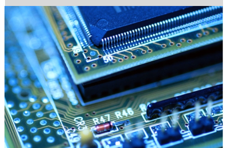
- L'algoritmo di schedulazione LRT (Latest Release Time) inverte il ruolo degli istanti di rilascio e delle scadenze, e schedula i job partendo dall'ultima scadenza fino al presente
- L'algoritmo è anche noto come *EDF inverso*
- La priorità assegnata ad un job è proporzionale al suo istante di rilascio: più avanti è l'istante di rilascio, maggiore è la priorità

Qual è il vantaggio di LRT rispetto a EDF?

LRT cerca di completare i job in corrispondenza della loro scadenza, quindi è meno aggressivo nell'uso del processore e riduce l'incertezza sull'istante di completamento dei job

È un algoritmo di tipo priority-driven? **No!**

L'algoritmo potrebbe lasciare un processore inutilizzato anche in presenza di job pronti per l'esecuzione



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

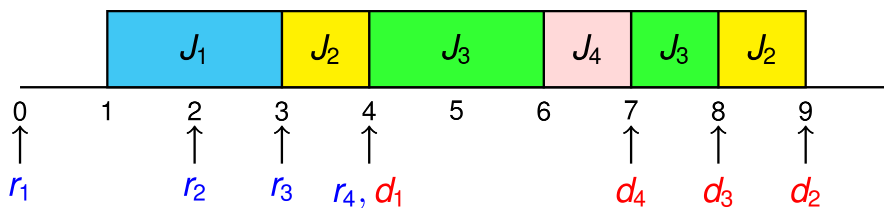
Esempio di schedulazione di LRT

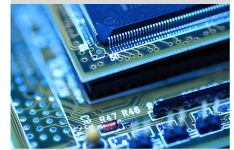
Job interrompibili $J_1, \ldots J_4$:

i	1	2	3	4
r_i	0	2	3	4
d_i	4	9	8	7
e_i	2	2	3	1

Lavoro compiuto:

ξ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
J_1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
J_2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	0
J_3	3	3	3	3	3	2	1	1	0	0
J_4	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0





Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmo LST

- Il valore di slack di un job è la differenza tra l'istante di scadenza e la somma del tempo attuale e del tempo ancora occorrente per completare l'esecuzione
- L'algoritmo LST assegna priorità più alta ai job aventi valore di slack minore

Qual è la logica di questo algoritmo?

Lo slack è una misura di quanto tempo un job può permettersi di non essere eseguito senza mancare la propria scadenza

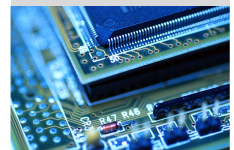
Qual è lo svantaggio di LST rispetto a EDF e LRT?

LST richiede di conoscere in anticipo i tempi di esecuzione (massimi) di tutti i job

Questa condizione è spesso molto difficile da rispettare

Algoritmi priority-driven

Marco Cesati



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

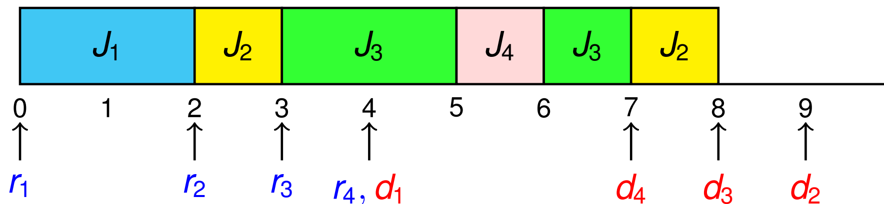
Esempio di schedulazione di LST

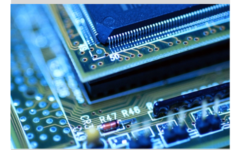
Job interrompibili $J_1, \dots J_4$:

i	1	2	3	4
r_i	0	2	3	4
d_i	4	9	8	7
e_i	2	2	3	1

Lavoro da compiere & slack:

$\overline{e}; s$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
J_1	2;2	1;2	0;2	0;1	0;0	0;-1	0;-2	0;-3	0;-4	0;-5
J_2	2;7	2;6	2;5	1;5	1;4	1;3	1;2	1;1	0;1	0;0
J_3	3;5	3;4	3;3	3;2	2;2	1;2	1;1	0;1	0;0	0;-1
J_4	1;6	1;5	1;4	1;3	1;2	1;1	0;1	0;0	0;-1	0;-2





Varianti della schedulazione LST

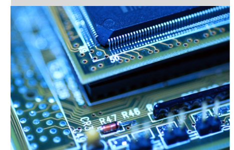
Nell'algoritmo LST (Least Slack Time) la priorità di un job è inversamente proporzionale al valore di slack $d - t - x$ (d = scadenza assoluta, t = tempo corrente, x = tempo d'esecuzione rimanente)

In realtà ne esistono due varianti:

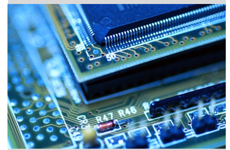
- Nonstrict LST: lo scheduler è invocato e le priorità dei job sono cambiate solo come conseguenza del rilascio o della conclusione di un job, o di un tick periodico
- Strict LST: le priorità sono modificate continuamente, e lo scheduler è invocato ogni volta che un job acquisisce una priorità maggiore di quella del job in esecuzione

L'algoritmo strict LST è utilizzato raramente perché

- è più complesso
- ha un overhead maggiore dovuto all'aggiornamento dei valori di slack e ai context switch

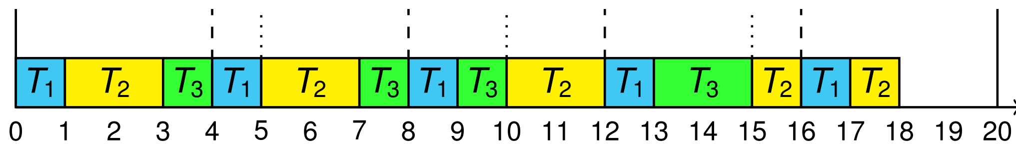


Algoritmo Rate Monotonic (Liu, Layland 1973)

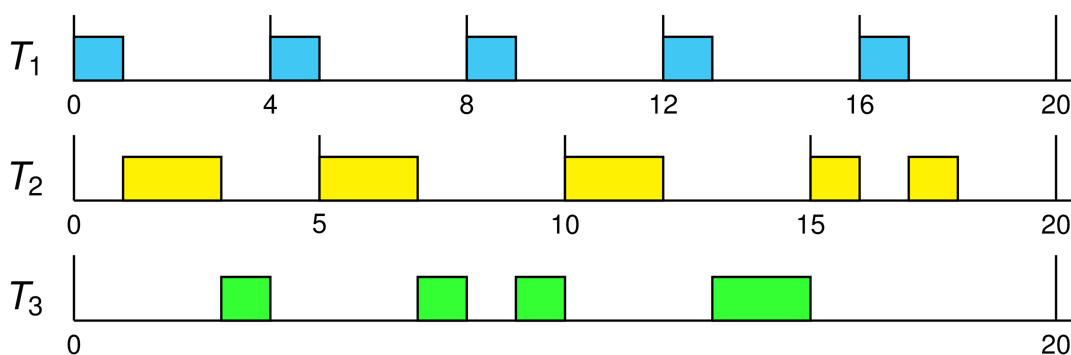


L'algoritmo Rate Monotonic (RM) assegna la priorità di un task in modo proporzionale alla sua frequenza (*rate*), definita come l'inverso del suo periodo

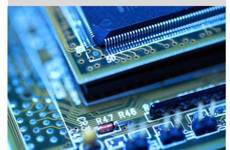
Esempio: $T_1 = (4, 1)$, $T_2 = (5, 2)$, $T_3 = (20, 5)$, interrompibili



Rappresentazione alternativa:

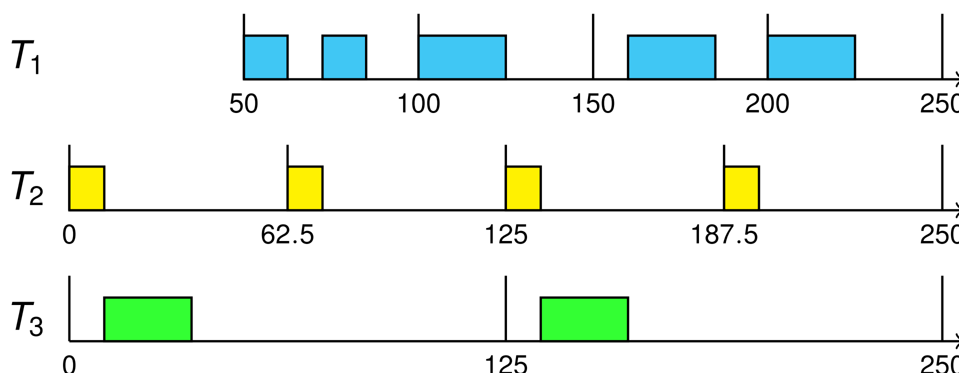


Algoritmo Deadline Monotonic (Leung, Whitehead 1982)



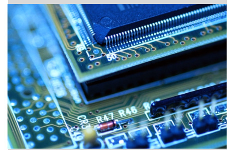
Nell'algoritmo Deadline Monotonic (DM) la priorità di un task è inversamente proporzionale alla sua scadenza relativa

Esempio: $T_1 = (50, 50, 25, 100)$, $T_2 = (0, 62.5, 10, 20)$, $T_3 = (0, 125, 25, 50)$, interrompibili



In quale caso gli algoritmi RM e DM coincidono?

Nel caso: deadline relativa proporzionale al periodo



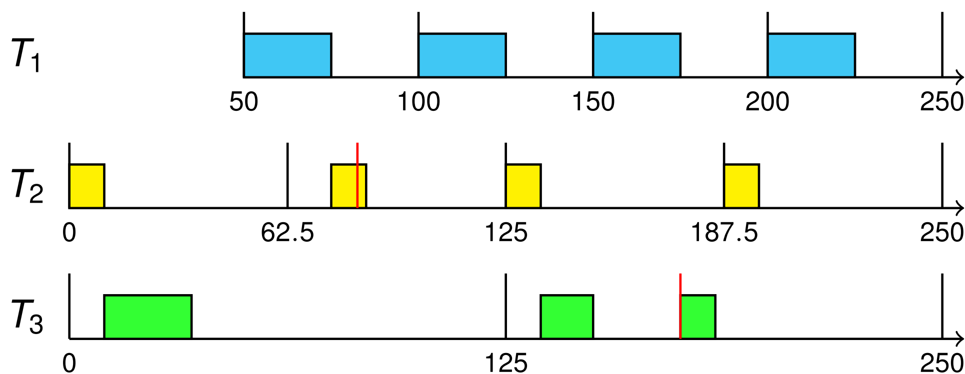
Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

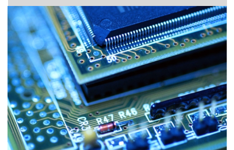
Algoritmo DM migliore di RM

In generale, l'algoritmo DM è migliore di RM:

- Se la schedulazione DM non è fattibile, anche la schedulazione RM non è fattibile
- Esistono esempi in cui la schedulazione DM è fattibile mentre la schedulazione RM non è fattibile

Nell'esempio precedente, la schedulazione RM non è fattibile:

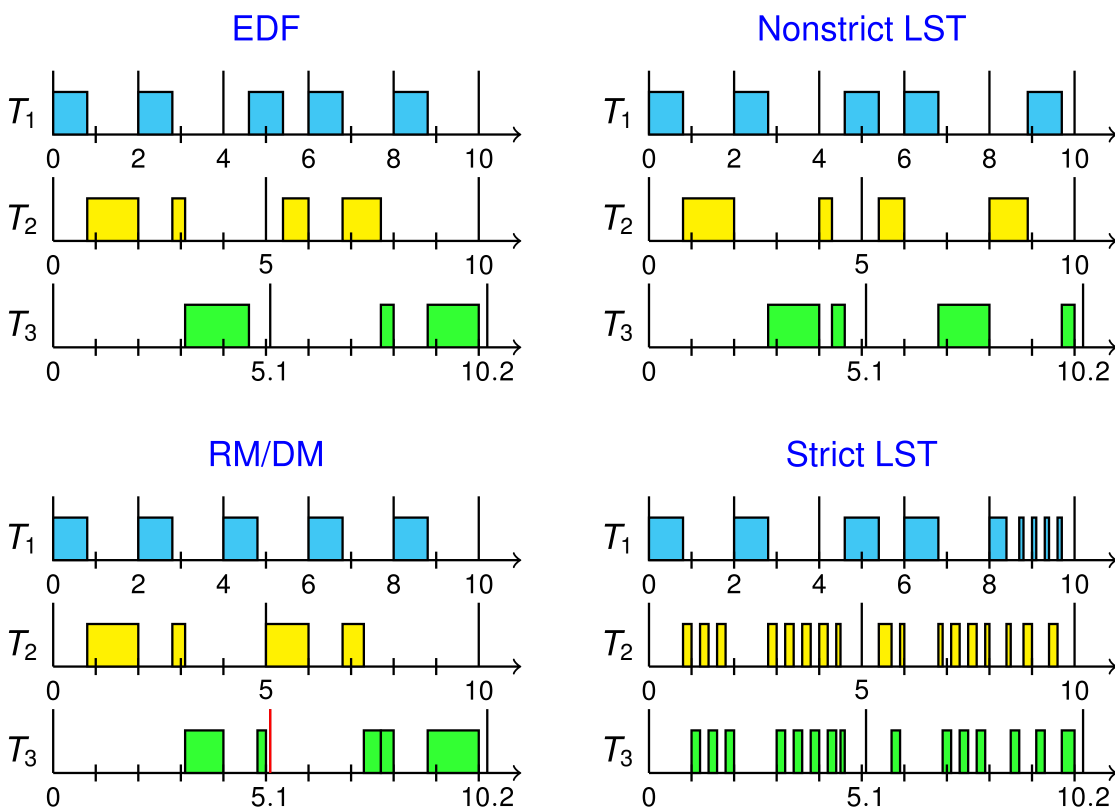




Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Confronto tra algoritmi di schedulazione

Siano $T_1 = (2, 0.8)$, $T_2 = (5, 1.5)$, $T_3 = (5.1, 1.5)$ interrompibili

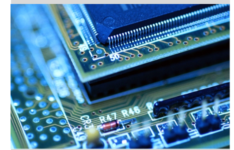


Ottimalità dell'algoritmo EDF

L'algoritmo EDF è ottimale nel senso che riesce sempre a trovare una schedulazione fattibile di un insieme di job interrompibili e indipendenti su un singolo processore, ovviamente a condizione che tale schedulazione esista

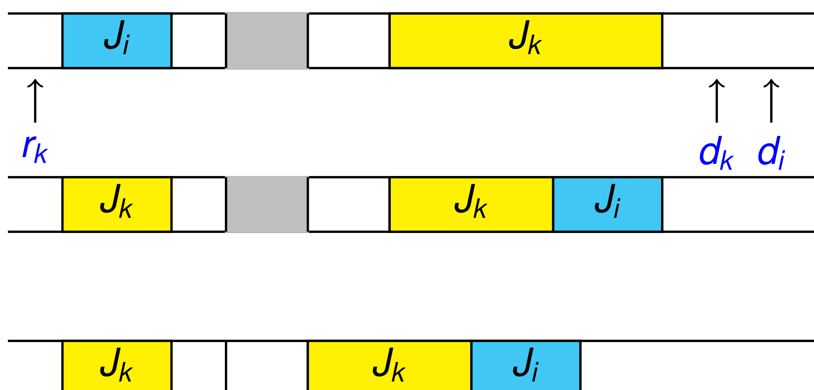
Sketch della dimostrazione (Dertouzos, 1974):

- Ogni schedulazione fattibile di un insieme di job arbitrari può essere trasformata in una schedulazione prodotta dall'algoritmo EDF
- Sia J_i schedulato prima di J_k con $d_i > d_k$
- Se r_k è oltre l'intervallo in cui è schedulato J_i, i due job rispettano l'algoritmo EDF; assumiamo che r_k è prima dell'intervallo in cui è schedulato J_i
- Scambiamo tra loro J_i e J_k (se necessario utilizzando l'interrompibilità dei job per tenere conto di lunghezze diverse degli intervalli di tempo)
- Ora J_i e J_k rispettano le priorità EDF



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Ottimalità dell'algoritmo EDF (2)



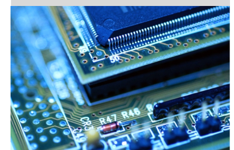
Scambiare sistematicamente di posto tutti i job che non rispettano le priorità EDF è sufficiente a trasformare la schedulazione in quella prodotta dall'algoritmo EDF? ***No!***

Potrebbero rimanere intervalli di tempo in cui il processore è inutilizzato pur essendoci job pronti per l'esecuzione ma schedulati dopo

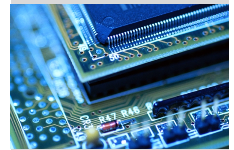
È sempre possibile anticipare l'esecuzione di uno o più job in modo da eliminare questi casi

Algoritmi priority-driven

Marco Cesati



Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF



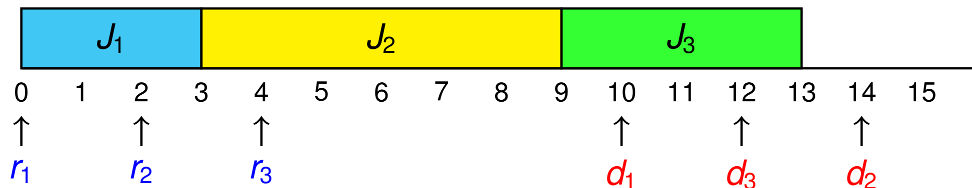
Schema della lezione
Algoritmi round-robin
Algoritmi priority-driven
Alg. EDF, LRT, LST
Algoritmi RM e DM
Ottimalità di EDF

Algoritmi priority-driven e job non interrompibili

Gli algoritmi priority-driven (ossia work-conserving), così come LRT, **non** sono ottimali se i job sono non interrompibili

Scheduliamo J_1, J_2 e J_3 non interromp.:

i	1	2	3
r_i	0	2	4
d_i	10	14	12
e_i	3	6	4



Eppure una schedulazione fattibile non priority-driven esiste: