

# Lezione R3

## Schedulazione clock-driven



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

Sistemi operativi open-source, embedded e real-time

11 ottobre 2017

Marco Cesati

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

# Di cosa parliamo in questa lezione?



In questa lezione esaminiamo una classe di algoritmi di schedulazione dal comportamento deterministico e facili da validare

- 1 Algoritmi clock-driven
- 2 Cyclic executive
- 3 Suddivisione del tempo in frame
- 4 Gestione dei job aperiodici

## Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



Esistono e vengono utilizzati un gran numero di differenti algoritmi per la schedulazione nei sistemi real-time

La maggior parte di essi possono essere ricondotti a tre grandi famiglie:

- 1 Algoritmi **clock-driven**
- 2 Algoritmi **weighted round-robin**
- 3 Algoritmi **priority-driven**

In questa lezione parliamo di algoritmi **clock-driven**

Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

Un algoritmo di schedulazione è detto essere *clock-driven* se le decisioni riguardanti i job da eseguire e gli intervalli di tempo in cui questi devono rimanere in esecuzione sono determinate in anticipo (off-line) e adottate in istanti di tempo predefiniti



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

Tipicamente, in un sistema schedulato con un algoritmo *clock-driven*:

- Gli istanti in cui lo scheduler interviene sono fissati una volta per tutti
- L'insieme dei task periodici, con tutti i loro parametri funzionali ed i vincoli temporali, sono conosciuti e costanti
- Una schedulazione opportuna può essere calcolata “off-line” dal progettista del sistema ed è seguita fedelmente dallo scheduler a “run-time”

Spesso i sistemi che adottano una schedulazione *clock-driven* utilizzano un componente hardware chiamato *clock* o *timer* in grado di generare interruzioni ad intervalli di tempo regolari

## Perché sono utilizzati?

*Quali sono i vantaggi più evidenti degli scheduler clock-driven?*

L'algoritmo implementato dallo scheduler è molto semplice, quindi:

- lo scheduler è efficiente (ha un piccolo overhead)
- è facile validare il sistema nel caso di hard real-time

*Qual è lo svantaggio più evidente degli scheduler clock-driven?*

Lo scheduler è poco flessibile; ad esempio, è difficile gestire insieme di task non periodici, oppure la creazione di nuovi task a run-time

In passato, la maggior parte dei sistemi embedded hard real-time erano basati su uno scheduler di tipo **clock-driven**

La tendenza generale oggi è quella di adottare quando possibile scheduler **priority-driven**



## Perché sono utilizzati? (2)

- Gli scheduler di tipo **clock-driven** sono caratterizzati dal prendere le decisioni ad intervalli di tempo prefissati e costanti
- Sono adatti per sistemi con alto grado di determinismo in cui i parametri di (quasi) tutti i job sono conosciuti a priori
- È possibile calcolare la migliore schedulazione possibile una volta per tutte (*off-line*): **schedulazione statica**
- Se applicata a task periodici, viene anche chiamata schedulazione **ciclica**

Per contrasto, gli algoritmi priority-driven:

- determinano la schedulazione ad ogni occorrenza di eventi dinamici come il completamento di un job o la creazione di un nuovo task
- sono quindi algoritmi **on-line** che effettuano una schedulazione **dinamica**



## Modello a Task Periodici Ristretto

Per ragionare sugli algoritmi di **\_schedulazione ciclica\_** è utile fare riferimento ad una restrizione del **modello a task periodici**:

- Il numero  $n$  di task nel sistema è fissato
- I parametri di tutti i task periodici sono conosciuti a priori
- Ogni job può essere eseguito dal suo istante di rilascio (niente vincoli di precedenza o conflitti sulle risorse)
- Possono esistere job aperiodici con vincoli temporali soft e hard real-time

Notazioni per indicare i parametri di un task periodico  $T_i$ :

- $(\phi_i, p_i, e_i, D_i)$ : fase  $\phi_i$ , periodo  $p_i$ , tempo d'esecuzione  $e_i$ , scadenza relativa  $D_i$
- $(p_i, e_i, D_i)$ : fase uguale a 0
- $(p_i, e_i)$ : fase 0, scadenza relativa uguale al periodo  $p_i$



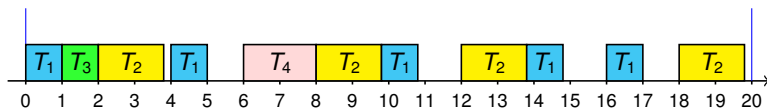
## Esempio di schedulazione ciclica

Consideriamo un sistema con un processore e quattro task  
 $T_1 = (4, 1)$ ,  $T_2 = (5, 1.8)$ ,  $T_3 = (20, 1)$  e  $T_4 = (20, 2)$

*Come derivare una schedulazione fattibile?*

- Lunghezza dell'**iperperiodo**:  $\text{mcm}(4, 5, 20, 20) = 20$
- Troviamo una schedulazione fattibile in un **iperperiodo**
- Ripetiamo la schedulazione all'infinito

Una possibile soluzione:



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



## Scheduler a tabella

Implementazione di uno scheduler clock-driven tramite tabella di voci  $(t_k, T(t_k))$ :

- $t_k$  indica l'istante in cui una "decisione" è presa
- $T(t_k)$  indica il nome del job o task da eseguire oppure  $\mathcal{I}$  se il processore è inutilizzato (*idle*)

La schedulazione precedente è rappresentata dalla tabella:

$t_k$	0	1	2	3.8	4	5	6	8	9.8
$T(t_k)$	$T_1$	$T_3$	$T_2$	$\mathcal{I}$	$T_1$	$\mathcal{I}$	$T_4$	$T_2$	$T_1$

10.8	12	13.8	14.8	16	17	18	19.8
$\mathcal{I}$	$T_2$	$T_1$	$\mathcal{I}$	$T_1$	$\mathcal{I}$	$T_2$	$\mathcal{I}$

- Job aperiodici soft real-time: schedulati negli intervalli " $\mathcal{I}$ ", ma interrotti se non completati entro il  $t_k$  successivo
- Job aperiodici hard real-time: non previsti (in questa versione)



Procedura SCHEDULER:

Input: Tabella di schedulazione  $(t_0, T(t_0)), \dots, (t_{N-1}, T(t_{N-1}))$

$i = 0, k = 0$

imposta il timer a  $t_k$  (tempo assoluto)

ripeti:

    accetta interruzioni di timer

    interrompi un eventuale job aperiodico

    job corrente  $J = T(t_k)$

$i = i + 1, k = i \bmod N$

    imposta il timer a  $\lfloor i/N \rfloor H + t_k$  (tempo assoluto)

    se  $J = \mathcal{I}$

        attiva il primo job nella coda aperiodica

    altrimenti

        attiva il job  $J$

    sospendi l'esecuzione dello scheduler

Fine SCHEDULER



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Schedulazioni cicliche strutturate

In generale è preferibile lavorare con schedulazioni che soddisfano certe proprietà strutturali, ad esempio:

- Attivazione dello scheduler ad intervalli regolari
- Distribuzione regolare degli intervalli “ $T$ ” (processore **idle**) nell’iperperiodo

*Che vantaggi portano queste proprietà?*

- Lo scheduler può essere attivato da un dispositivo hardware che genera interruzioni periodiche (ad es. il **PIT**, Programmable Interval Timer)
- I job aperiodici possono essere eseguiti **in modo regolare** in corrispondenza degli intervalli “ $T$ ”
- Possibilità di monitorare e/o forzare il rispetto dei vincoli temporali in caso di job che allungano la loro esecuzione

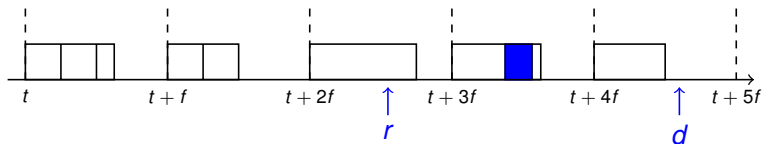
Una procedura che implementa un algoritmo di schedulazione ciclica “strutturata” è chiamata *cyclic executive*



Gli istanti di tempo in cui uno scheduler ciclico strutturato prende decisioni partizionano la linea temporale in intervalli regolari chiamati *frame*

- La lunghezza  $f$  dei *frame* è prefissata
- In ogni *frame* è definita una lista di job da eseguire in sequenza (*blocco di schedulazione*)
- All'interno dei *frame* non si possono interrompere i job
- La fase di ogni task periodico è un multiplo intero non negativo della lunghezza del *frame*:

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, \exists k \in \mathbb{N} : \phi_i = k \times f$$



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Vincoli sulla dimensione dei frame

- (1) Poiché non è possibile interrompere un job all'interno di un frame, il frame deve essere abbastanza lungo da garantire la completa esecuzione di ciascun job:

$$f \geq \max\{e_1, \dots, e_n\}$$

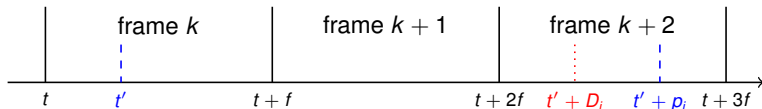
- (2) La dimensione del frame deve dividere la lunghezza dell'iperperiodo  $H$ :

$$H/f - \lfloor H/f \rfloor = 0$$

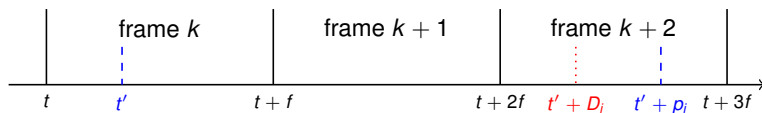
Condizione sufficiente è che  $f$  divida il periodo  $p_i$  di almeno uno dei task.

- (3) Il frame deve essere abbastanza piccolo così che tra l'istante di rilascio e la scadenza di ogni job ci sia sempre un frame; condizione sufficiente:

$$2 \cdot f - \gcd(p_i, f) \leq D_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$



## Vincoli sulla dimensione del frame (2)



- Frame inizianti a  $t, t + f, t + 2f, t + 3f$
- Rilasci a  $t' \geq t$  e  $t' + p_i$ , scadenza  $t' + D_i$
- $t' = \Phi_i + h' \cdot p_i = h \cdot f + h' \cdot p_i$ ,  $t = h'' \cdot f$  ( $h, h', h'' \in \mathbb{N}$ )
- Se  $g = \gcd(p_i, f)$ :  $t' - t = g \cdot \left( \frac{h \cdot f}{g} + \frac{h' \cdot p_i}{g} - \frac{h'' \cdot f}{g} \right) = g \cdot h'''$

Caso 1:  $t' > t$

- $h''' \in \mathbb{N}, t' - t > 0 \Rightarrow t' - t \geq g$
- $2f - g \leq D_i \Rightarrow 2f - (t' - t) \leq D_i \Rightarrow t + 2f \leq t' + D_i$

Caso 2:  $t' = t$

- $2f - \gcd(p_i, f) \leq D_i \Rightarrow f \leq D_i \Rightarrow t + f \leq t' + D_i$



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Esempio di scelta della dimensione del frame

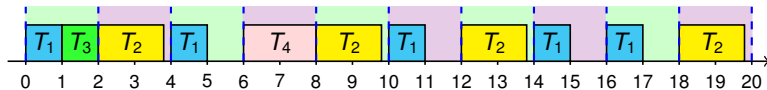
Consideriamo un sistema con quattro task

$$T_1 = (4, 1), T_2 = (5, 1.8), T_3 = (20, 1) \text{ e } T_4 = (20, 2)$$

*Come scegliere la dimensione del frame?*

- (1)  $f \geq \max\{1, 1.8, 1, 2\} = 2$
- (2)  $H = 20$ , quindi  $f \in \{1, 2, 4, 5, 10, 20\}$
- (3)  $2f - \gcd(4, f) \leq 4$ ,  $2f - \gcd(5, f) \leq 5$ ,  
 $2f - \gcd(20, f) \leq 20$ , quindi  $f \leq 2$

Risultato: dimensione del frame  $f = 2$



I gruppi di frame consecutivi (a cominciare dal primo frame) di lunghezza pari ad un iperperiodo sono detti *cicli maggiori*; ciascun frame è anche detto *ciclo minore*



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Esempio di scelta della dimensione del frame (2)

Consideriamo un sistema con tre task

$$T_1 = (4, 1), T_2 = (5, 2, 7), T_3 = (20, 5)$$

*Come scegliere la dimensione del frame?*

- (1)  $f \geq \max\{1, 2, 5\} = 5$
- (2)  $H = 20$ , quindi  $f \in \{1, 2, 4, 5, 10, 20\}$
- (3)  $2f - \gcd(4, f) \leq 4$ ,  $2f - \gcd(5, f) \leq 7$ ,  
 $2f - \gcd(20, f) \leq 20$ , quindi  $f \leq 4$

Risultato: non esiste una dimensione adatta!

*Come si può rimediare?*

Il problema è dovuto al vincolo (1): possiamo spezzare uno o più job in modo da ridurre i tempi di esecuzione

Ovviamente, la possibilità di farlo realmente dipende dalla natura dei job troppo lunghi





Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

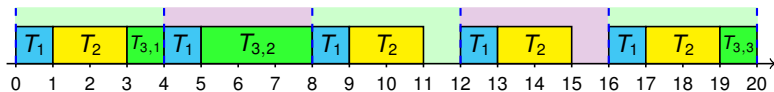
Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Frammentazione dei job

Nell'esempio precedente suddividiamo ogni job di  $T_3 = (20, 5)$  in tre frammenti:  $T_{3,1} = (20, 1)$ ,  $T_{3,2} = (20, 3)$ ,  $T_{3,3} = (20, 1)$

È quindi possibile scegliere come dimensione del frame  $f = 4$



*L'insieme di job frammentati è equivalente ai job di cinque task periodici  $(4, 1)$ ,  $(5, 2, 7)$ ,  $(20, 1)$ ,  $(20, 3)$ ,  $(20, 1)$ ? **No!***

Esistono vincoli di precedenza tra i frammenti!

In generale, per costruire una schedulazione ciclica dobbiamo:

- scegliere una dimensione del frame
- frammentare i job
- piazzare i frammenti nei frame (*blocchi di schedulazione*)

Ma le scelte non sono indipendenti tra loro!



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Come gestire i task non armonici?

Consideriamo i task  $T_1 = (3, 1)$ ,  $T_2 = (7, 3)$  e  $T_3 = (25, 3)$

L'iperperiodo è  $H = 3 \cdot 7 \cdot 25 = 525$ , l'unica dimensione ammissibile per il frame è 3  $\implies$  il ciclo maggiore ha 175 frame

Svantaggio principale: spreco di memoria per la tabella contenente i blocchi di schedulazione

*Come gestire la situazione?*

Abbassando i periodi di alcuni task nei requisiti di progetto!

Ad esempio:  $T_1 = (3, 1)$ ,  $T_2 = (6, 3)$ ,  $T_3 = (24, 3) \implies H = 24$   
ed il ciclo maggiore ha 8 frame

Abbassare il periodo di un task è come alzare uno stipendio: nessuno si lamenterà, ma debbono esserci soldi per tutti. . .

Nell'esempio  $U$  aumenta di  $3/6 - 3/7 + 3/24 - 3/25 = 7.6\%$

## Come gestire periodi non interi?

Se i periodi dei task non sono interi non è possibile applicare direttamente le formule per i vincoli sulla dimensione del frame

Ad esempio:  $T_1 = (1.5, 0.5)$ ,  $T_2 = (2.25, 0.25)$ ,  $T_3 = (3, 0.75)$

*Come si può risolvere il problema?*

Moltiplicando tutti i tempi per un fattore costante in modo da ottenere periodi interi

Ad es. moltiplicando per 4:  $T'_1 = (6, 2)$ ,  $T'_2 = (9, 1)$ ,  $T'_3 = (12, 3)$

Risolvendo si ottiene ad es.  $f' = 6$ , ossia un frame di dimensione  $f = 1.5$  per il sistema originale



## Pseudo-codice per cyclic executive

Procedura CYCLIC\_EXECUTIVE:

Input: Blocchi di schedulazione  $L(0), L(1), \dots, L(F - 1)$ ;  
Code di job aperiodici

$t = 0, k = 0$

ripeti:

accetta interruzione di clock al tempo  $t \cdot f$  (assoluto)

blocco di schedulazione corrente  $B = L(k)$

$t = t + 1, k = t \bmod F$

gestisci il caso di mancata conclusione dell'ultimo job

gestisci il caso di job (o frammento) in  $B$  non eseguibile

sveglia il server dei task periodici per eseguire  $B$

sospendi l'esecuzione fino alla conclusione del server

ripeti finché la coda di job aperiodici è non vuota:

attiva il job in cima alla coda

sospendi l'esecuzione fino alla conclusione del job

rimuovi il job dalla coda

sospendi l'esecuzione (fino alla successiva interr. di clock)

Fine CYCLIC\_EXECUTIVE



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Schedulazione di job aperiodici soft real-time

In un **cyclic executive** riveste molta importanza la gestione dei job **aperiodici soft real-time**:

- Sono eseguiti “in background” quando il processore non è occupato dai task periodici
- La loro esecuzione può essere ritardata
- Sono tipicamente attivati in conseguenza di eventi esterni
- Più rapido è il loro completamento, migliore appare la reattività del sistema rispetto ai segnali esterni

Minimizzare i tempi di risposta dei job aperiodici soft real-time è un obiettivo di progetto degli algoritmi di schedulazione

*Come è possibile ottenere questo risultato se in ogni frame dobbiamo comunque gestire i task periodici?*



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Slack stealing

Una tecnica per migliorare i tempi di risposta dei job aperiodici soft real-time chiamata *slack stealing* è stata proposta da Lehoczky e Ramos-Thuel nel 1992

Per ogni frame  $k$ , sia  $x_k$  l'ammontare di tempo già allocato, e sia  $f - x_k$  lo *slack* (margine di tempo ancora disponibile)

In ogni frame, lo scheduler può eseguire i job **aperiodici prima** di quelli periodici se lo *slack* non è nullo

L'implementazione richiede:

- di calcolare la quantità di *slack* in ogni frame lasciata libera dai job periodici
  - di tenere traccia della quantità di *slack* consumata dai job aperiodici durante la loro esecuzione
- si può utilizzare ad esempio un *interval timer* impostato all'inizio del frame con il valore dello *slack* disponibile

È possibile utilizzare lo *slack stealing* anche con algoritmi priority-driven, ma è molto più complicato



## Esempio di applicazione di slack stealing



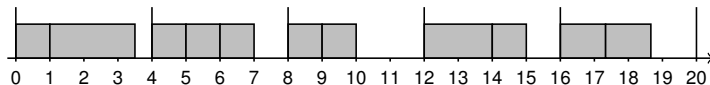
Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



$A_1$

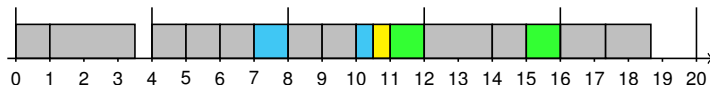
$A_2$

$A_3$

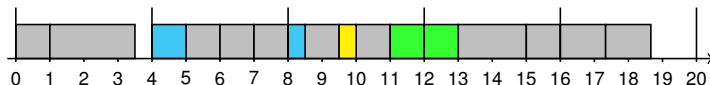
$$A_1 : r = 4, e = 1.5$$

$$A_2 : r = 9.5, e = 0.5$$

$$A_3 : r = 10.5, e = 2$$



Tempi di risposta senza s.s.:  $A_1: 6.5$ ,  $A_2: 1.5$ ,  $A_3: 5.5$



Tempi di risposta con s.s.:  $A_1: 4.5$ ,  $A_2: 0.5$ ,  $A_3: 2.5$

## Schedulazione di job aperiodici hard real-time

I job **aperiodici hard real-time** vengono rilasciati ad istanti di tempo arbitrari, e se ne conoscono i parametri solo dopo il rilascio

A differenza di quelli soft real-time, i job **aperiodici hard real-time** non possono mancare la loro scadenza

Per ogni schedulazione ciclica è sempre possibile trovare un job aperiodico hard real-time che non può essere completato entro la scadenza a meno di ritardare uno o più job periodici

*Anche i task periodici sono hard real-time: come schedulare insieme i job periodici e quelli aperiodici?*

Per ogni nuovo job aperiodico hard real-time che viene rilasciato:

- Il **cyclic executive** invoca un **test di accettazione**
- se il test dimostra che il nuovo job può essere completato entro la scadenza senza danneggiare gli altri job hard real-time, viene **accettato** e schedulato
- altrimenti il job viene **rifiutato**





## Schedulazione EDF per job aperiodici hard real-time

Un modo efficiente di gestire i job aperiodici hard real-time è quello di utilizzare l'algoritmo EDF: ha la precedenza il job con scadenza più vicina

La procedura *cyclic executive* utilizza due code di job aperiodici hard real-time ordinate secondo l'istante di scadenza:

- Una coda EDF per i job rilasciati e non ancora accettati
- Una coda EDF per i job accettati

L'accettazione dei job e la schedulazione della loro esecuzione vengono sempre effettuate all'inizio di un frame

*L'algoritmo EDF è ottimale, ossia sempre in grado di trovare una schedulazione fattibile per i job aperiodici hard real-time se questa esiste?*

È ottimale solo nell'ambito dei vincoli imposti dai frame

Esempio: un job aperiodico potrebbe essere schedulabile solo se fosse eseguito non appena rilasciato in mezzo ad un frame



## Test di accettazione dei job aperiodici hard real-time

*Quali sono i principali limiti del test di accettazione?*

Si deve assumere che tutti i job aperiodici hard real-time:

- possono essere suddivisi in gruppi di cui si conosce in anticipo il tempo d'esecuzione (massimo)
- sono interrompibili, quindi la loro esecuzione può essere suddivisa su più frame

*In cosa consiste il test di accettazione?*

Si basa sul calcolo dello slack disponibile nei frame interamente compresi tra l'istante di rilascio e la scadenza

- Un job aperiodico hard real-time  $S$  viene rilasciato con scadenza  $d$  e tempo d'esecuzione  $e$
- Il frame successivo all'istante di rilascio ha numero  $t$  ( $1 \leq t \leq F$ ) all'interno del ciclo maggiore  $j$
- Il frame precedente a quello in cui cade la scadenza ha numero  $\ell$  ( $1 \leq \ell \leq F$ ) nel ciclo maggiore  $j'$
- Il **cyclic executive** esegue il test all'inizio del frame  $t$



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

## Test di accettazione dei job aperiodici hard real-time (2)

- La quantità di slack  $\sigma(i, h)$  lasciata libera dai job periodici è precalcolata per ogni ciclo maggiore ( $1 \leq i, h \leq F$ )
- Su più cicli maggiori la quantità di slack totale è:

$$\sigma(i + jF, h + j'F) = \sigma(i, F) + (j' - j - 1) \cdot \sigma(1, F) + \sigma(1, h)$$

- Per ogni job aperiodico hard real-time  $S_k$  già accettato all'inizio del frame  $t$  si conosce la scadenza  $d_k$ , il lavoro ancora da svolgere  $e_k - \xi_k$ , lo slack rimanente  $\sigma_k$
- La quantità totale di slack disponibile tra i frame  $t$  e  $\ell$ :

$$\sigma_c(t, \ell) = \sigma(t, \ell) - \sum_{d_k \leq d} (e_k - \xi_k)$$

deve essere  $\geq e$ , altrimenti  $S$  viene rifiutato

- In caso di accettazione, per ogni job aperiodico hard real-time con scadenza oltre  $d$  lo slack rimanente deve essere diminuito di  $e$ :  $S$  viene rifiutato anche se  $\sigma_k - e < 0$  per qualche  $k$
- Se  $S$  è accettato, il suo slack è inizialmente

$$\sigma = \sigma_c(t, \ell) - e$$

## Gestione dei job aperiodici hard r.-t. nel cyclic executive

Procedura CYCLIC\_EXECUTIVE:

Input: ... code di job ap. hard r.-t. non accettati e accettati

⋮

gestisci il caso di job (o frammento) in  $B$  non eseguibile

ripeti finché coda di job ap. hard r.-t. non accettati è non vuota:

preleva il job in cima alla coda

esegui il test di accettazione sul job

se il job è eseguibile, inserisci in coda job accettati

altrimenti segnala "job rifiutato"

sveglia il server dei task periodici per eseguire  $B$

sospendi l'esecuzione fino alla conclusione del server

ripeti finché la coda di job ap. hard r.-t. accettati è non vuota:

sveglia il job in cima alla coda

sospendi l'esecuzione fino alla conclusione del job

rimuovi il job dalla coda

ripeti finché la coda di job ap. soft r.-t. è non vuota:

⋮



Schema della lezione

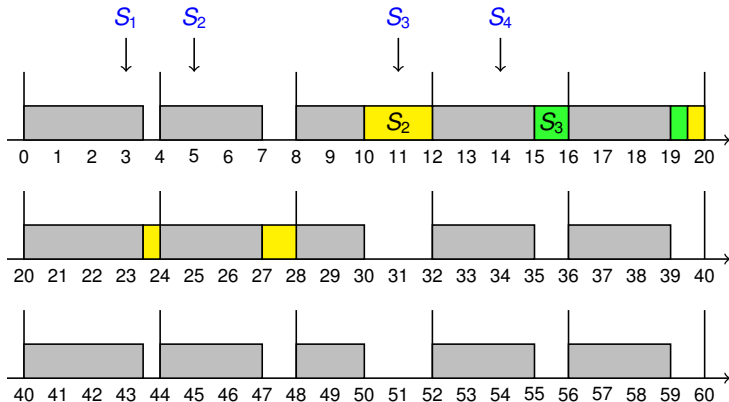
Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

# Esempio di schedulazione EDF di job aperiodico hard r.-t.



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

$S_1$	$r_1=3$	$d_1=17$	$e_1=4.5$	$\sigma_c(2, 4)=4$	RIF
$S_2$	$r_2=5$	$d_2=29$	$e_2=4.0$	$\sigma_c(3, 7)=5.5$	ACC $\sigma_2=1.5$
$S_3$	$r_3=11$	$d_3=22$	$e_3=1.5$	$\sigma_c(4, 5)=2$	$\sigma_2 \geq e_3$ ACC $\sigma_2=0, \sigma_3=0.5$
$S_4$	$r_4=14$	$d_4=44$	$e_4=5.0$	$\sigma_c(5, 11)=4.5$	RIF

## Gestione delle violazioni delle scadenze

Un job hard real-time completa sempre entro la sua scadenza a meno di malfunzionamenti dell'hardware, bug nel software, o difetti di progettazione del sistema real-time

Uno scheduler progettato in modo robusto all'inizio del frame successivo alla scadenza controlla che il job sia effettivamente terminato

In caso contrario lo scheduler cerca di porre rimedio:

- Elimina completamente il job non terminato
- Interrompe il job ed alloca la parte di esecuzione restante come job aperiodico
- Continua l'esecuzione del job, allungando il frame contenente la scadenza e ritardando così tutti i frame successivi

L'azione di recupero più appropriata dipende ovviamente dalla natura del job e degli altri task del sistema



## Vantaggi e svantaggi degli scheduler clock-driven



Schema della lezione

Algoritmi clock-driven

Cyclic executive

Job aperiodici soft r.-t.

Job aperiodici hard r.-t.

- Sono concettualmente semplici e facili da validare
- Non è necessario controllare l'accesso alle risorse condivise
- Non è necessario sincronizzare tra loro i job
- Scegliendo opportunamente la durata dei frame è possibile minimizzare l'overhead dei context switch
- Possono essere ancora semplificati assumendo che gli eventi esterni si verificano in sincronia con i frame
- Gli istanti di rilascio dei job devono essere prefissati
- Tutte le possibili configurazioni del carico devono essere previste in anticipo
- Non efficienti per sistemi con molti job aperiodici