Lezione R2

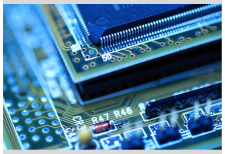
Modello di riferimento per i sistemi real-time

Sistemi embedded e real-time

16 ottobre 2012

Marco Cesati

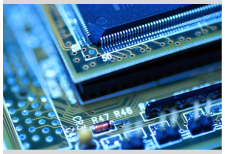
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica
Università degli Studi di Roma Tor Vergata



Di cosa parliamo in questa lezione?

In questa lezione definiamo il modello di riferimento che ci permetterà di descrivere con esattezza i sistemi real-time

1. Il modello di riferimento dei sistemi real-time
2. I vincoli temporali dei job
3. Il modello a task periodici
4. I vincoli di precedenza dei job
5. Il grafo dei task
6. I parametri funzionali dei job
7. La schedulazione dei job



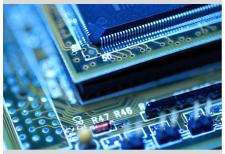
Modello di riferimento per sistemi real-time

Ogni sistema real-time può essere caratterizzato da un modello costituito da tre elementi:

- un *modello di carico*, che descrive le applicazioni supportate dal sistema
- un *modello delle risorse*, che descrive le risorse di sistema a disposizione delle applicazioni
- *algoritmi* che definiscono come il sistema distribuisce le risorse alle applicazioni nel tempo

Un buon modello dovrebbe:

- includere tutti i dettagli essenziali per la comprensione del sistema e per la descrizione del suo comportamento
- omettere tutti i dettagli di basso livello o irrilevanti che rendono la comprensione del livello inutilmente difficile



Le risorse di sistema

Le risorse di sistema rappresentano sostanzialmente l'ambiente d'esecuzione delle applicazioni

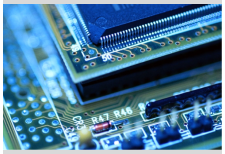
Esistono due tipi di risorse di sistema:

- Le risorse attive, spesso chiamate anche server o *processori*: computer, canali di comunicazione, dischi rigidi, database server, ...
- Le risorse passive, indicate semplicemente come *risorse*: memoria, ogni genere di primitiva di sincronizzazione, numeri di sequenza, ...

A differenza delle risorse (passive), la velocità o capacità intrinseca dei processori influenza il tempo d'esecuzione dei job (e quindi delle applicazioni)

Ma la disponibilità di memoria o di un semaforo non influenza il tempo di esecuzione di un job?

Certamente, ma una volta che la risorsa è assegnata al job le sue caratteristiche non influenzano il tempo d'esecuzione!

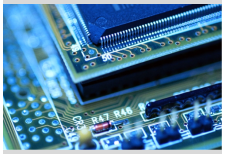


Le risorse di sistema (2)

- Nel modellare un sistema, spesso si omette l'indicazione del tipo specifico di processori, e si elencano semplicemente i processori come $P_1, P_2, \ldots, P_m$
- Analogamente, spesso si omette di specificare il tipo di risorse, e si elencano le risorse come $R_1, R_2, \ldots, R_\rho$
- Se una risorsa è così abbondante da non costituire mai un vincolo od uno ostacolo per l'esecuzione dei job, essa viene omessa e non citata nel modello

Ad esempio, una risorsa che viene spesso omessa è la memoria: si assume che ve ne sia sempre a sufficienza per l'esecuzione di tutti i job

Nei casi in cui questo non è giustificato è necessario complicare il modello per descrivere la quantità di memoria totale del sistema e l'occupazione di memoria dei vari job

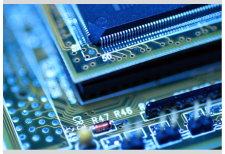


Il modello del carico

Le applicazioni real-time sono descritte in termini di *task*, ciascuno dei quali è costituito da un insieme di entità schedulabili chiamate *job*

Caratteristiche di un job:

- vincoli temporali
- parametri funzionali (proprietà intrinseche del job)
- uso delle risorse
- parametri d'interconnessione (dipendenza da altri job e come altri job dipendono da questo)



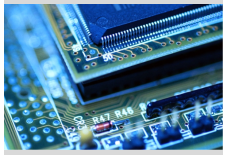
Vincoli temporali di un job

- *Istante di rilascio* (od anche *release time*): istante di tempo r_i in cui il job J_i diventa disponibile per l'esecuzione
- *Scadenza* (od anche *deadline*): istante di tempo d_i in cui il job J_i deve aver completato l'esecuzione
- *Scadenza relativa*: il massimo intervallo di tempo D_i che può intercorrere tra r_i e d_i per il job J_i ($D_i = d_i - r_i$)
- *Intervallo di fattibilità*: l'intervallo di tempo $(r_i, d_i]$

I vincoli temporali di tutti i job sono in genere inclusi nelle specifiche del sistema real-time

Spesso però le specifiche non indicano con esattezza gli istanti di rilascio, ma solo un intervallo in cui si verificherà il rilascio (*jitter*):

$$r_i \in \left[r_i^-, r_i^+\right]$$



Task aperiodici e task sporadici

Molti sistemi real-time devono essere in grado di reagire ad eventi esterni che occorrono ad istanti di tempo casuali

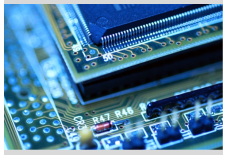
In risposta a tali eventi il sistema esegue un insieme di job particolari, i cui istanti di rilascio non sono conosciuti se non nel momento in cui l'evento esterno si verifica

Si definisce *task aperiodico* un task in cui gli istanti di rilascio dei job sono casuali e non predefiniti

Si definisce *task sporadico* un task in cui gli istanti di rilascio dei job sono casuali e non predefiniti, ma esiste un intervallo di tempo minimo tra il rilascio di due job

Attenzione: il testo di Liu utilizza definizioni differenti: un job con istanti di rilascio casuali è *aperiodico* se è soft real-time, mentre è *sporadico* se è hard real-time

Modello di riferimento per i sistemi real-time
Marco Cesati



Schema della lezione
Modello di riferimento
Vincoli temporali
Modello a task periodici
Vincoli di precedenza
Parametri funzionali
Schedulazione

Tempo d'esecuzione

Il *tempo d'esecuzione* e_i di un job J_i è l'ammontare di tempo richiesto per completare l'esecuzione di J_i eseguendolo da solo ed avendo a disposizione tutte le risorse necessarie

Il tempo d'esecuzione non dipende dallo scheduling, ma esclusivamente dalla funzione realizzata dal job e dalla velocità del processore utilizzato per eseguirlo

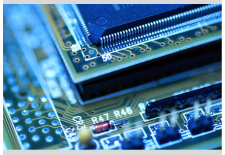
Qual è la principale difficoltà nel definire il tempo d'esecuzione di un job?

Tutti i processori moderni (CPU, reti, ecc.) hanno un comportamento non deterministico:

- la loro complessità è così elevata che è impossibile prevedere a priori il tempo d'esecuzione di un job
- il tempo effettivo varia da esecuzione a esecuzione

Si può determinare a priori solo l'intervallo in cui cade e_i:

$$e_i \in \left[e_i^-, e_i^+\right]$$



WCET

Se il nostro scopo è quello di determinare se un certo job all'interno di un sistema potrà essere completato entro la sua scadenza, possiamo sperare che:

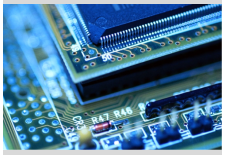
- non si abbia realmente necessità di conoscere il suo tempo d'esecuzione e_i
- sia necessario unicamente conoscere il suo *massimo tempo d'esecuzione* e_i^+

In letteratura il massimo tempo d'esecuzione è spesso indicato con l'acronimo WCET (Worst Case Execution Time)

In molti casi con il termine tempo d'esecuzione e_i si indica in realtà il WCET e_i^+, e si tralascia di indicare che in realtà il tempo d'esecuzione reale del job potrebbe essere inferiore

Anche derivare il **WCET** di un job potrebbe essere difficile od impossibile!

Si consideri ad esempio il tempo d'esecuzione di un processo su una CPU con diversi livelli di memoria cache



Sistemi predicibili e deterministici

In un sistema hard real-time è necessario validare che tutti i job "hard" rispettano i loro vincoli temporali

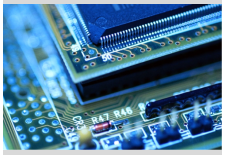
Per ottenere ciò è necessario conoscere i WCET dei job "hard"

Di conseguenza, la proprietà più importante di un sistema hard real-time è la predicibilità del suo comportamento

Spesso tale predicibilità è ottenuta a scapito delle prestazioni:

- Si utilizzano processori meno sofisticati
- Si scrivono programmi senza strutture di dati dinamiche
- Si evitano interazioni troppo complesse tra i job
- Si minimizza il numero di primitive di sincronizzazione delle risorse condivise

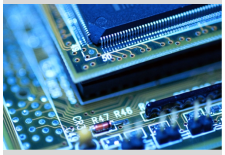
Un sistema hard real-time così concepito è, auspicabilmente, quasi deterministico: le esecuzioni di ogni job hanno durata pressoché costante



Modello a task periodici

Il *modello a task periodici* è un modello di carico deterministico molto conosciuto introdotto da Liu e Layland nel 1973

- È in grado di rappresentare adeguatamente la maggior parte delle applicazioni real-time
- Molti algoritmi di scheduling basati su questo modello sono facili da implementare, efficienti, ed hanno un comportamento facile da prevedere
- Esistono metodi e strumenti per progettare, analizzare e validare sistemi real-time basati su questo modello.
- Non rappresenta bene sistemi i cui job sono caratterizzati da elevati valori di jitter per gli istanti di rilascio oppure alta varianza nei tempi d'esecuzione



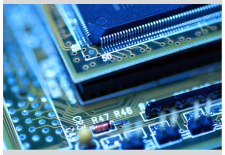
Modello a task periodici (2)

Principio di base: ogni computazione, trasmissione di dati od altra attività che è eseguita ripetutamente ad intervalli di tempo regolari è modellata come un task periodico:

- Un *task periodico* T_i è una sequenza di job
- Il *periodo* p_i di T_i è l'esatto intervallo temporale tra gli istanti di rilascio dei job di T_i
- Il *tempo d'esecuzione* e_i di T_i è il massimo tra tutti i tempi d'esecuzione dei job di T_i

Attenzione: Nel testo di Liu il termine *task periodico* indica in genere un *task sporadico*, ossia il periodo del task corrisponde all'intervallo minimo tra gli istanti di rilascio dei job

Il testo di Liu tende a confondere i task sporadici con i task periodici in quanto la maggior parte dei risultati teorici relativi ai task periodici continuano ad essere validi per i task sporadici

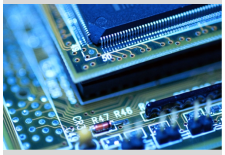


Modello a task periodici (3)

Alcune notazioni e definizioni:

- I task sono $T_1, T_2, \ldots, T_n$
- Gli job del task T_i sono $J_{i,1}, J_{i,2}, \ldots$
- Cumulativamente, tutti i job del sistema sono $J_1, J_2, \ldots$
- L'istante di rilascio $r_{i,1}$ del primo job $J_{i,1}$ di T_i è chiamato *fase* di T_i ($\Phi_i = r_{i,1}$)
- Task con la stessa fase sono detti *in fase*
- H indica il minimo comune multiplo di tutti i periodi p_i dei task del sistema
- Un intervallo temporale di lunghezza H è chiamato *iperperiodo* dei task periodici
- Il (massimo) numero N di job in ogni iperperiodo è

$$N = \sum_{i=1}^{n} H/p_i$$



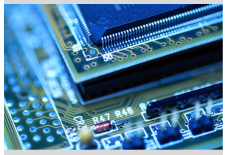
Modello a task periodici (4)

- Il rapporto $u_i = e_i/p_i$ è l'*utilizzazione* del task T_i
- L'*utilizzazione totale* U del sistema è la somma delle utilizzazioni di tutti i task:

$$U = \sum_{i=1}^{n} u_i$$

- Tutti i job di uno stesso task T_i hanno la stessa *scadenza relativa* D_i: se un job è rilasciato all'istante t, deve essere completato entro $t + D_i$

In molti casi (ma non tutti!) un sistema real-time può essere modellato assumendo che tutti i job hanno istante di rilascio all'inizio di ciascun periodo e *scadenze implicite*, ossia scadenze relative pari alla lunghezza del periodo ($D_i = p_i$)



Esempio di modello a task periodici

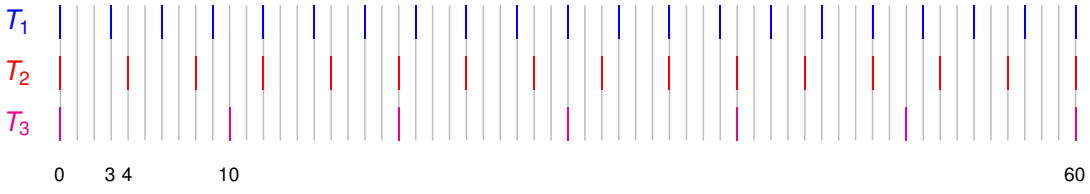
Consideriamo tre task periodici in fase con periodi $p_1 = 3$, $p_2 = 4$ e $p_3 = 10$, e tempi d'esecuzione $e_1 = 1$, $e_2 = 1$ e $e_3 = 3$

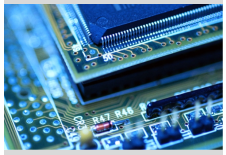
Quanti sono i differenti job nel sistema?

Non possiamo saperlo, ma non è importante!

Quanti sono i job eseguiti in un iperperiodo?

- $H = \text{mcm}\{3, 4, 10\} = 60$
- $N = \sum_{i=1}^{3} H/p_i = 60/3 + 60/4 + 60/10 = 41$





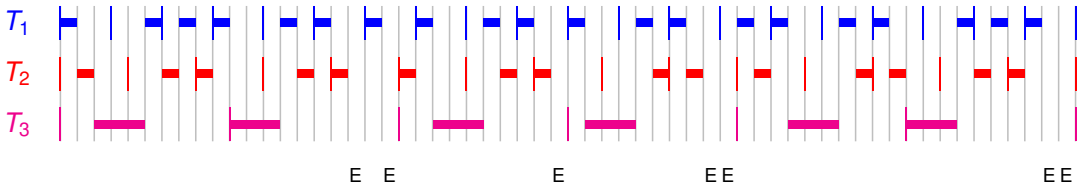
Esempio di modello a task periodici (2)

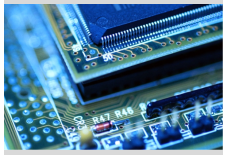
Qual è l'utilizzazione totale del sistema?

- Le utilizzazioni dei tre task periodici sono $e_1/p_1 = 1/3$, $e_2/p_2 = 1/4$ e $e_3/p_3 = 3/10$
- L'utilizzazione totale è

$$U = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{3}{10} = \frac{53}{60} \approx 88.3\%$$

È possibile schedulare questi task con un solo processore se hanno scadenze implicite, ossia $D_j = p_j$ con $j \in \{1, 2, 3\}$? ***Sì!***





Vincoli di precedenza tra job

Un *vincolo di precedenza* tra due job J e J' è una condizione che impone al sistema di schedulare l'esecuzione dei due job in un preciso ordine

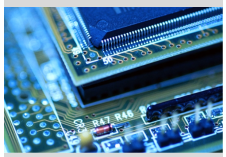
Ad esempio, in un database un job autentica l'utente, mentre un altro job esegue l'interrogazione della base di dati; un vincolo di precedenza impedisce al secondo job di iniziare l'esecuzione finché il primo non ha terminato l'autenticazione

I vincoli di precedenza possono essere modellati tramite una relazione d'ordine parziale tra i job del sistema

$J \prec J'$ significa che J' non può iniziare l'esecuzione prima che J sia stato completato

I vincoli di precedenza semplificano in generale il compito di trovare uno scheduling per i job? ***No!***

La semplificazione si avrebbe solo con un ordinamento totale!

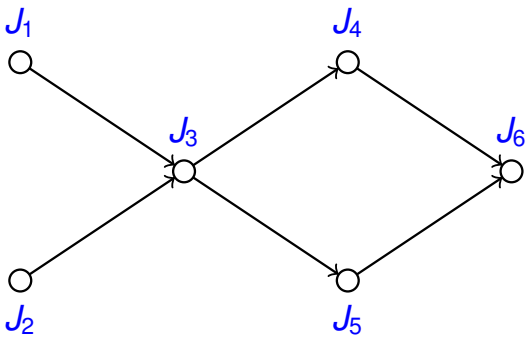


Grafo di precedenza

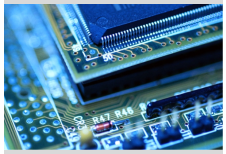
In generale i vincoli di precedenza tra i job possono essere espressi in forma compatta tramite un grafo diretto aciclico (DAG), in cui:

- I nodi rappresentano job
- Un arco diretto dal job J al job J' indica che $J \prec J'$ e che non esiste alcun job J'' tale che $J \prec J'' \prec J'$
- Indicheremo la precedenza immediata con $J \rightarrow J'$

$J_1 \rightarrow J_3, \quad J_2 \rightarrow J_3,$
$J_3 \rightarrow J_4, \quad J_3 \rightarrow J_5,$
$J_4 \rightarrow J_6, \quad J_5 \rightarrow J_6$



*$J_3 \prec J_6$? **Sì**, per la proprietà transitiva dell'ordinamento*



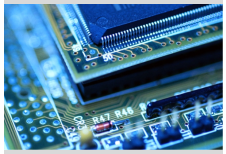
Parametri funzionali dei job

I parametri funzionali dei job contribuiscono a caratterizzare il modello di carico del sistema real-time

In generale ogni job può essere caratterizzato da un grande numero di attributi, ma come parametri funzionali consideriamo solo quelli che incidono sullo schedulazione dei job

I parametri funzionali più importanti sono:

- Interrompibilità (o "preemptivity")
- Criticalità (o importanza)
- Funzione d'utilità (o "laxity function")



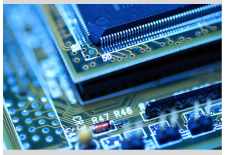
Interrompibilità dei job

Un job si definisce *interrompibile* (o *preemptable*) se la sua esecuzione può essere sospesa in qualunque istante per permettere l'esecuzione di altri job e, più tardi, ripresa dal punto di sospensione

Un job non interrompibile, viceversa, deve essere eseguito dall'inizio alla fine senza interruzioni

Esempi:

- I processi in Linux sono job interrompibili: lo scheduler del kernel può interrompere la loro esecuzione nel caso in cui un processo a priorità maggiore diventi eseguibile
- La spedizione di un frame Ethernet è un job non interrompibile: non è possibile interrompere la trasmissione per spedire un altro frame e poi riprendere la trasmissione dei dati non ancora inviati



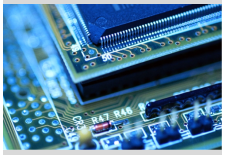
Interrompibilità dei job (2)

Anche per i job in generale interrompibili possono esistere condizioni che impediscono di fatto la loro sospensione

Quali sono tipici casi in cui non è possibile interrompere un job?

- Il job sta eseguendo una operazione che deve essere conclusa in tempi rapidi (ad esempio, la programmazione di un dispositivo hardware)
- Il job sta modificando una struttura di dati condivisa con altri job: se esso fosse interrotto in mezzo alla procedura di aggiornamento, ed un altro job cominciasse a propria volta a modificare la struttura di dati, alla fine questa avrebbe uno stato non consistente
- Il job sta effettuando il salvataggio delle informazioni che consentiranno il recupero dell'esecuzione

Modello di riferimento per i sistemi real-time
Marco Cesati



Schema della lezione
Modello di riferimento
Vincoli temporali
Modello a task periodici
Vincoli di precedenza
Parametri funzionali
Schedulazione

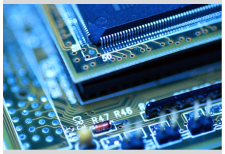
Contesto di un job interrompibile

Si definisce *contesto* l'insieme delle informazioni necessarie per riprendere l'esecuzione di un job interrotto

Ad esempio, nel caso di processi eseguiti da una CPU il contesto include il valore dei registri della CPU, lo stack del processo, le tabelle di paginazione, ...

Si definisce *cambio di contesto* (o *context switch*) la procedura di salvataggio del contesto del job interrotto e di recupero del contesto del job che andrà in esecuzione

Si definisce *context-switch time* il tempo necessario per operare un cambio di contesto



Criticalità dei job

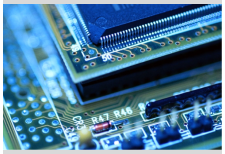
In qualunque sistema esistono job di diversa importanza

La *criticalità* di un job è un parametro numerico che indica l'importanza relativa del job rispetto agli altri job nel sistema

Consideriamo ad esempio un sistema avionico; in ordine decrescente di criticalità potremmo avere i job che controllano:

- l'assetto di volo
- la posizione attuale del velivolo
- la velocità e direzione per ottimizzare i consumi di carburante
- la temperatura, umidità e pressione nelle cabine
- il video proiettato sui televisori dei passeggeri

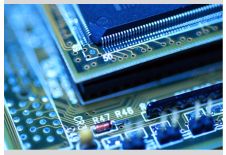
La **criticalità** di un job non coincide con la sua **priorità** od il suo **peso**: questi ultimi sono attributi che, pur incidendo sulla modalità di schedulazione del job, non sono necessariamente correlati alla **criticalità**



Funzione d'utilità dei job

Un parametro funzionale essenziale per i job di un sistema real-time è quello che indica se i suoi vincoli temporali sono hard oppure soft

A volte, a tale indicazione viene aggiunto un altro parametro funzionale: la *funzione d'utilità*, che lega la tardività del job con l'utilità del risultato prodotto



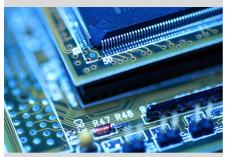
Schedulazione dei job

Lo *scheduler* (o *schedulatore*) è il modulo del sistema operativo che implementa gli algoritmi utilizzati per ordinare l'esecuzione dei job e controllare l'accesso alle risorse

Si definisce *schedule* (o *schedulazione*) una assegnazione dei job del sistema ai processori disponibili

Una schedulazione è *valida* se:

1. In ogni istante un processore è assegnato ad al più un job
2. In ogni istante un job è assegnato ad al più un processore
3. Nessun job è schedulato prima del suo istante di rilascio
4. L'ammontare totale di tempo del processore assegnato a ciascun job è pari al suo tempo d'esecuzione (massimo o attuale a seconda dell'algoritmo di scheduling)
5. Tutti i vincoli di precedenza e uso delle risorse tra i job sono soddisfatti



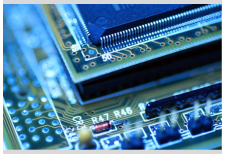
Schedulazione dei job (2)

Una schedulazione valida non garantisce di per se che le scadenze dei job siano rispettate!

Una schedulazione valida è *fattibile* (*feasible*) se ogni job è completato entro la sua scadenza

Un insieme di job è *schedulabile* con un certo algoritmo se tale algoritmo è in grado di produrre sempre una schedulazione fattibile

Un algoritmo di schedulazione per applicazioni hard real-time è detto *ottimale* se l'algoritmo produce sempre una schedulazione fattibile quando l'insieme di job è di per se schedulabile



Misure di prestazioni

I principali parametri per misurare le prestazioni dei sistemi real-time sono i valori massimi e/o medi dei seguenti attributi:

- Tardività: zero se la scadenza è rispettata, oppure la differenza tra l'istante di completamento e la scadenza
- Lateness: la differenza tra l'istante di completamento e la scadenza (può essere negativa se la scadenza è rispettata)
- Tempo di risposta: differenza tra l'istante di completamento e l'istante di rilascio
- Miss rate: percentuale di job (soft) che terminano oltre la loro scadenza
- Loss rate: percentuale di job (soft) non eseguiti o comunque non terminati
- Invalid rate: è la somma del miss rate e del loss rate, ossia la percentuale di job che non producono un risultato utile