SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Sistemi dinamici a eventi discreti – DEDS

Automazione

25/11/2015

Alessandro De Luca

Sistemi e modelli matematici

Sistema: un insieme di componenti cooperanti e interagenti che realizzano una funzionalità complessiva, impossibile da realizzare da ciascuna parte separatamente (IEEE)

- definizione applicabile a sistemi fisici e non (comportamento umano, economia)

Si utilizzano modelli matematici per

- formalizzare il comportamento del sistema (descrizione e valutazione)
- riprodurre tale comportamento (simulazione al calcolatore)
- studiare proprietà di interesse (anche per il progetto del sistema di controllo)

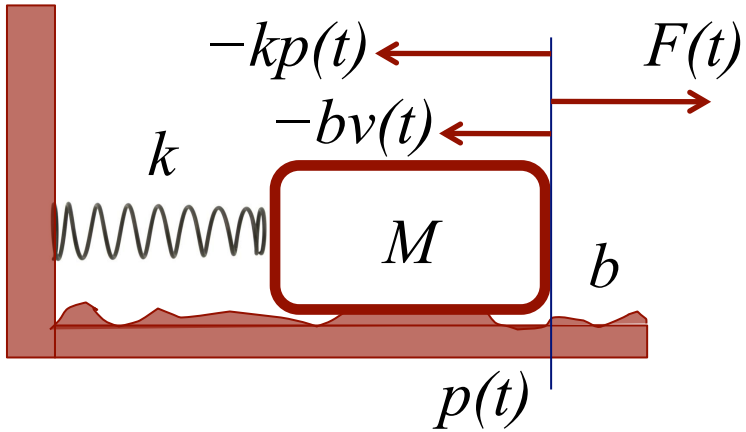
Si possono distinguere due tipi di modelli

- guidati dal tempo
  - evolvono come soluzioni nel tempo di equazioni differenziali o alle differenze
- guidati da eventi
  - evolvono in corrispondenza all'accadere di eventi (in modo asincrono)

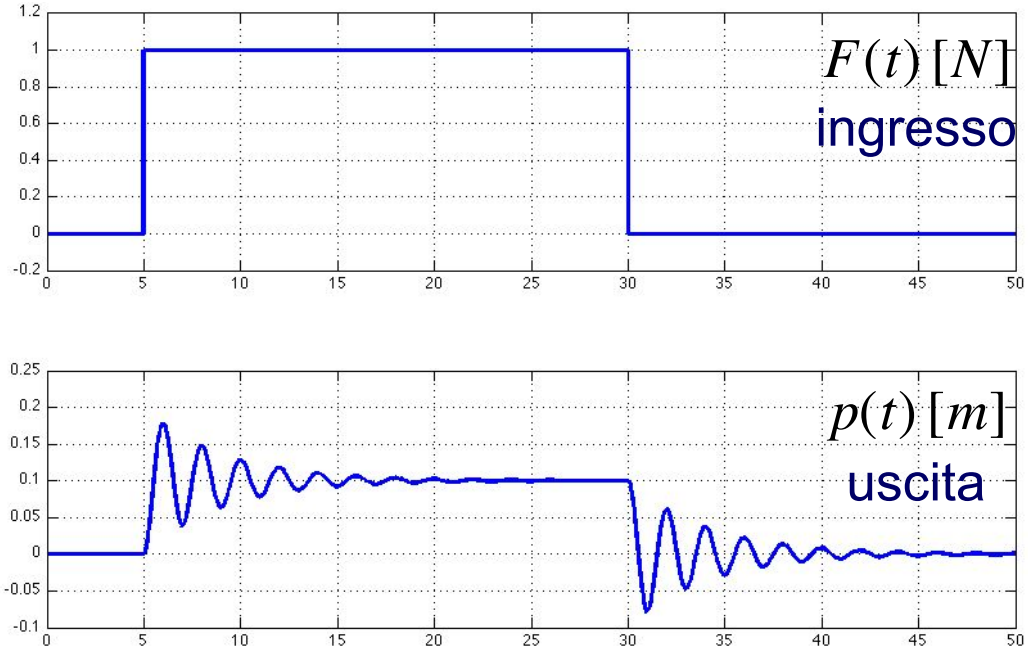
Modelli guidati dal tempo

evoluzioni temporali ($t \in R$, $k \in Z$) con relazioni dinamiche/algebriche tra variabili di ingresso, stato, uscita ("classico" Teoria dei Sistemi, Controlli Automatici)

esempio: massa-molla-attrito



$$F(t) - kp(t) - bv(t) = Ma(t)$$

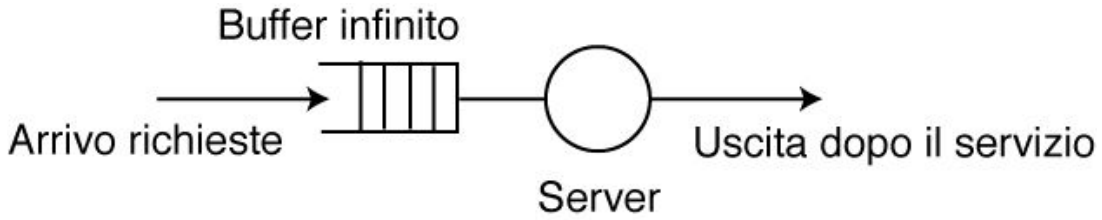


$$u(t) = F(t)$$
$$x(t) = \begin{bmatrix} p(t) & v(t) \end{bmatrix}^T$$
$$y(t) = p(t)$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/M & -b/M \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t)$$
$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t)$$

Modelli guidati da eventi

esempio: sistema client/server con buffer a capacità infinita



Molti sistemi fisici non vengono ben descritti da variabili temporali

- sistemi manifatturieri
- sistemi di comunicazione
- sistemi di controllo del traffico
- ...

In questi casi infatti

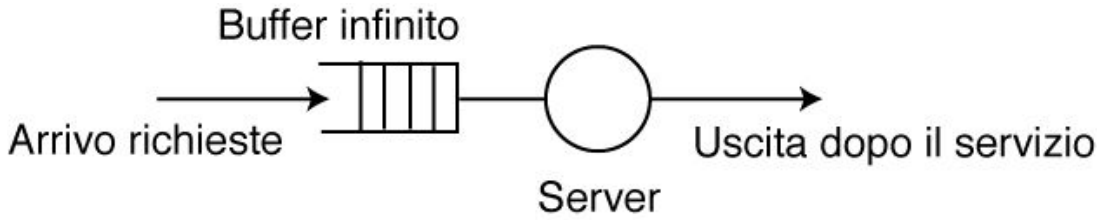
- le variabili possono assumere valori simbolici (es: on/off) in un set finito
- il sistema cambia stato (e le variabili il loro valore) in modo asincrono
- ... in corrispondenza di opportuni eventi

Si parla allora di Sistemi (Dinamici) a Eventi Discreti

- **DEDS** = Discrete Event Dynamic Systems

Modelli guidati da eventi

esempio: sistema client/server con buffer a capacità infinita

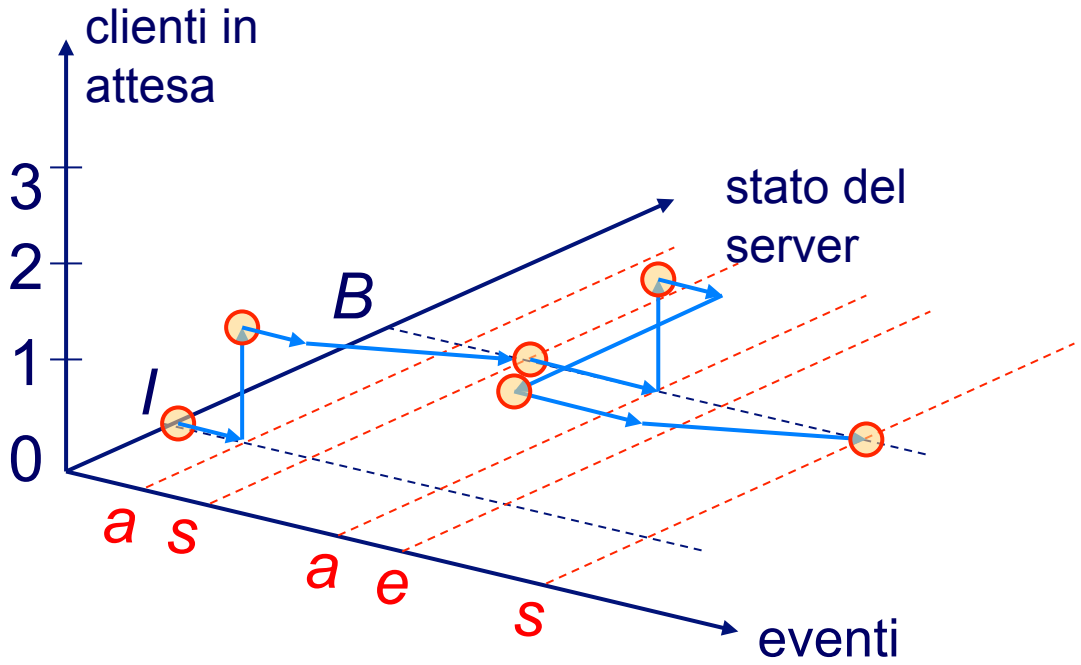


- qual è lo stato del sistema?
  - numero di clienti in attesa nel buffer (numero naturale)
  - stato del server *(Idle = I, Busy = B)*
  - $X = \{I, B\} \times N$
- quando cambia lo stato?
  - se arriva un nuovo cliente (evento *a*)
  - se inizia un servizio (evento *s*)
  - se finisce un servizio (evento *e*)

"evento" = un'azione *istantanea* sul sistema che ne provoca l'immediato cambiamento di stato

Modelli guidati da eventi

come evolve lo stato del sistema?



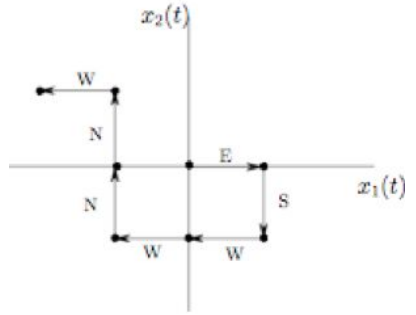
un sistema ad eventi discreti è caratterizzato dalle seguenti proprietà

- lo spazio degli stati è un insieme discreto (di cardinalità finita o infinita)
- l'evoluzione dello stato è guidata da eventi

Esempi di DEDS

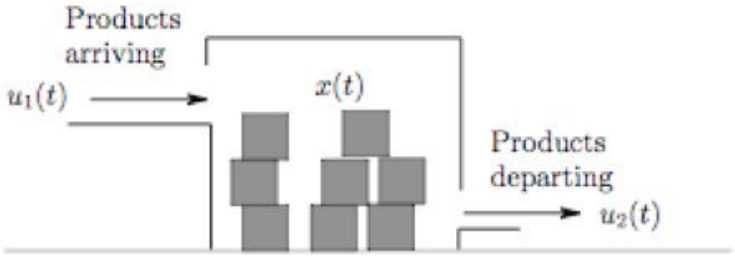
"Random walk" con passi unitari lungo assi coordinati nel piano

- insieme degli stati $X = (x_1,x_2) \in Z \times Z$
- insieme degli eventi E = {N,S,W,E}
- in questo caso, eventi concorrenti "commutano"



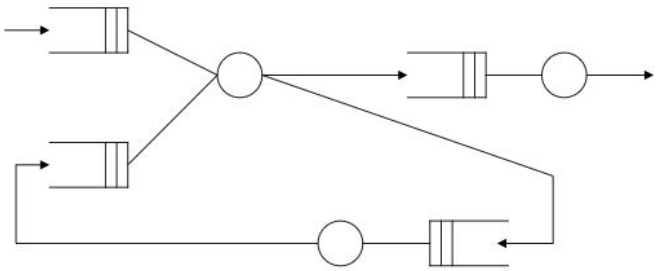
Magazzino di prodotti

- stato X = # prodotti nel magazzino
- insieme degli eventi E = {A,P}



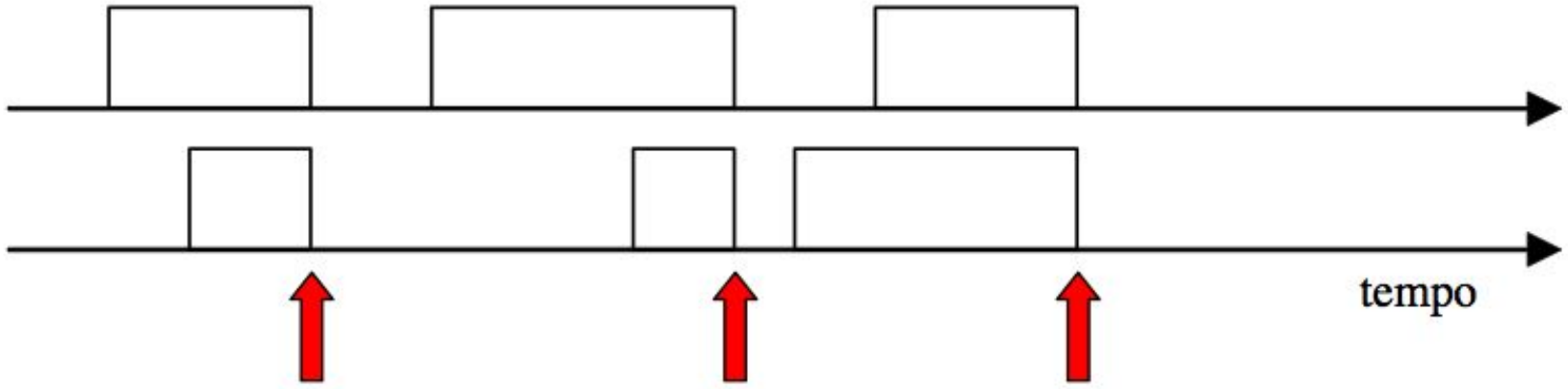
Code e reti di code (di servizio)

- stato X = # clienti in ciascuna coda
- eventi E = {A,S,P}
- capacità max di ciascuna coda
- disciplina di servizio (FIFO, ...)



Time- o Event-driven?

Il tempo è presente, ma non fondamentale nell'evoluzione del sistema ...

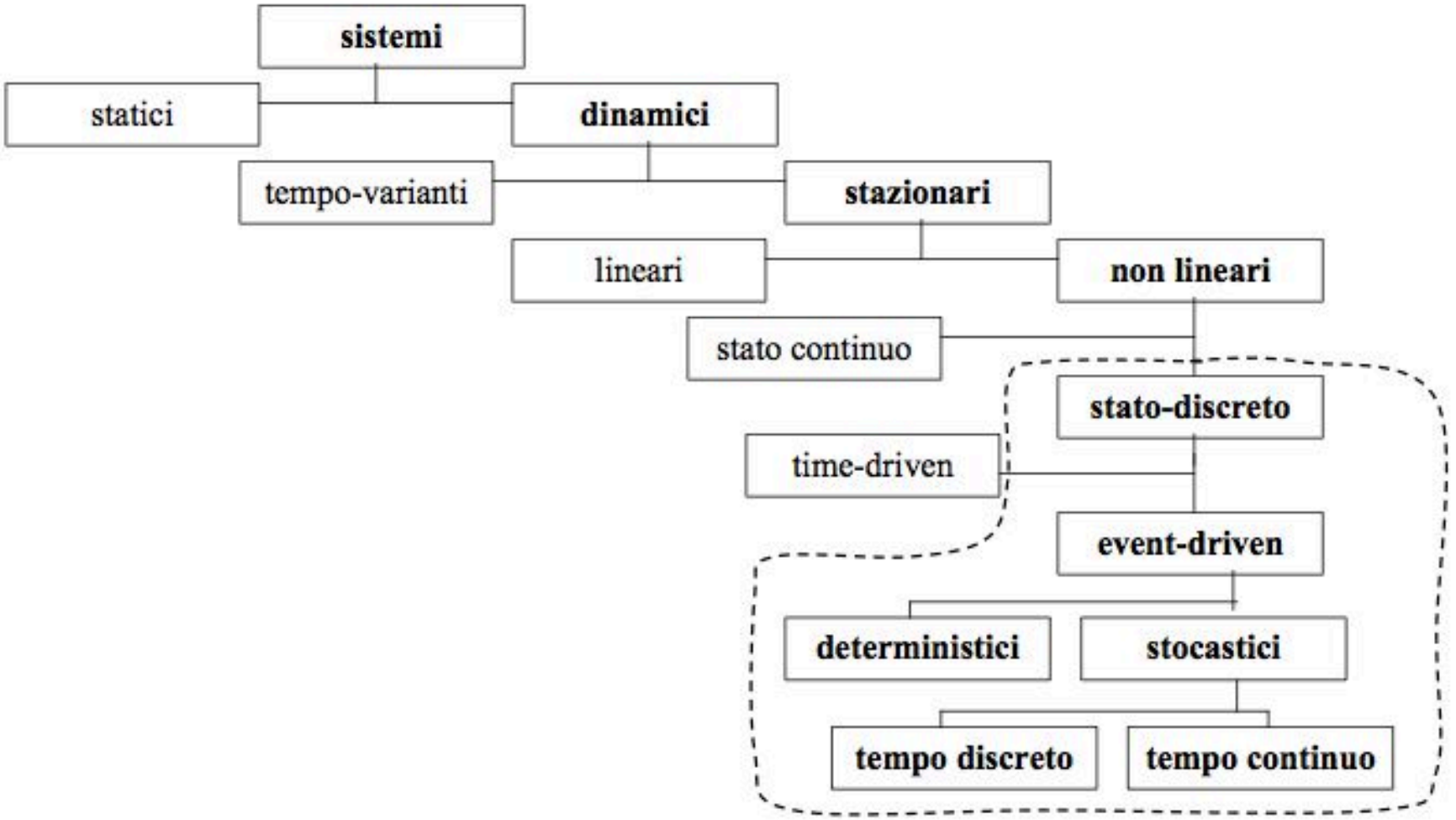


pulsante di comando manuale (oppure risposta del mouse)

- 0 = non premuto, 1 = premuto
- il sistema reagisce al rilascio del pulsante (premuto più o meno a lungo)
- nella figura, a partire dallo stesso stato iniziale, i due ingressi *diversi nel tempo* producono lo *stesso* risultato (evoluzione dello stato)

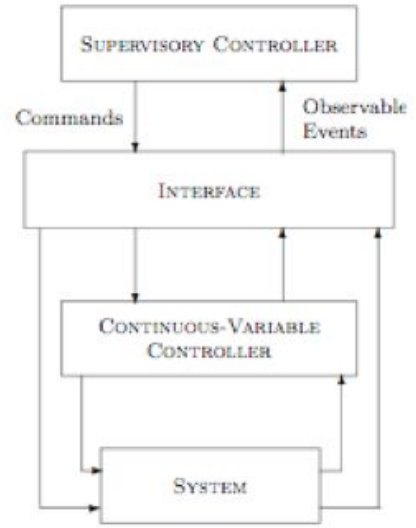
Spesso si è comunque interessati a informazioni temporali, per poter valutare alcune caratteristiche o prestazioni: tempi medi di attesa in coda, tempi medi tra guasti, tempi di lavorazione, pezzi prodotti/unità di tempo (= throughput) negli FMS, ...

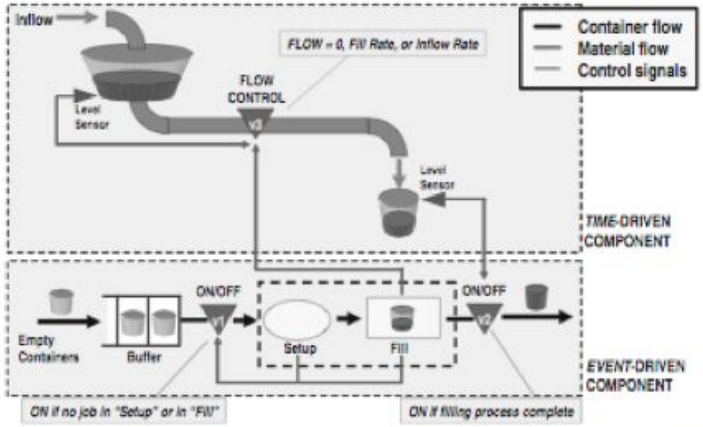
Classificazione dei sistemi



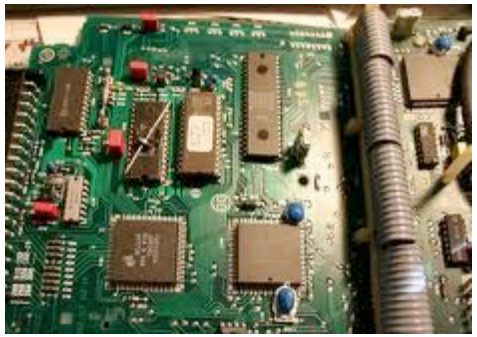
SISTEMI IBRIDI = combinazioni di sistemi time-driven e event-driven

Esempi di sistemi ibridi

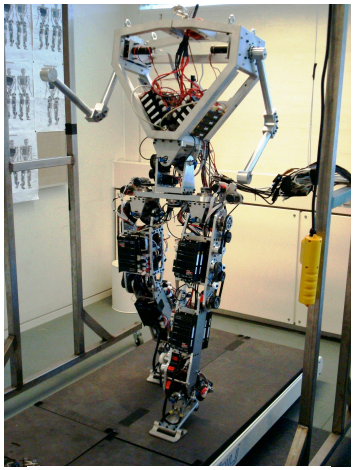


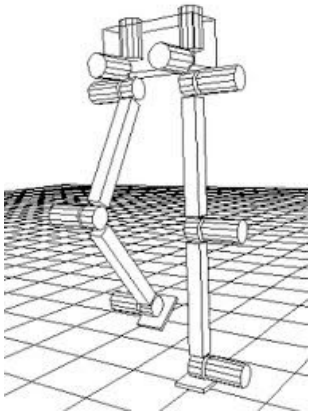


supervisione logica di processi continui



sistemi automotive





sequenza di supporti nella locomozione

SISTEMI IBRIDI = combinazioni di sistemi time-driven e event-driven

Modelli per l'automazione

Cosa si vuole descrivere con i modelli nel contesto del "controllo logico"

- il funzionamento di *impianti complessi ed eterogenei*: celle robotizzate, centri di lavorazione meccanica, impianti batch/chimici, ...
- un impianto/processo può essere visto come un *insieme di sotto-sistemi*, dispositivi e macchinari opportunamente interconnessi, per ognuno dei quali può essere sviluppato un modello in dettaglio (motore, laminatoio, robot, ...)
- interessa studiare questi processi a un *livello di astrazione più elevato*, in cui si evidenziano le **sequenze di operazioni**, con i relativi problemi di **sincronizzazione**, **parallelismo**, e **conflitti nella allocazione delle risorse**

Alcune domande a cui si cerca risposta

- quale operazione deve essere svolta dopo l'operazione X?
- le operazioni X e Y possono essere fatte in parallelo in modo sincrono/asincrono?
- in quali condizioni non si deve eseguire l'operazione X?
- ci sono risorse sufficienti per svolgere le operazioni pianificate?
- cosa bisogna fare (o non fare) per evitare di finire in un blocco critico (deadlock)?
- come si devono gestire le risorse condivise?

Modelli per l'automazione

Lo studio delle possibili evoluzioni di stato di un DEDS non consente di comprendere e rappresentare esplicitamente i meccanismi interni di funzionamento del sistema

⇒ *uso di diversi tipi di modelli formali*

- modelli **operazionali** (con strutture di transizione)
  - automi
  - reti di Petri (di varie tipologie)
  - Grafcet/Sequential Functional Chart (SFC)

  } vediamo essenzialmente questi tipi di modelli

- modelli **dichiarativi** (con dichiarazione dei comportamenti del sistema)
  - basati su regole
  - basati su equazioni

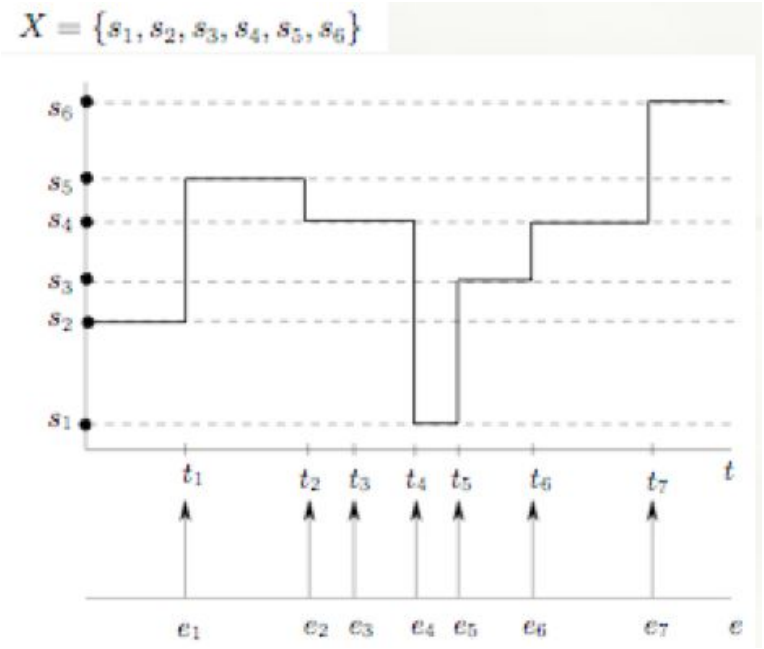
In linea di principio, per descrivere (e studiare) un DEDS si potrebbe usare anche un *linguaggio di programmazione,* con i relativi pregi (+) e difetti (-):

+ è un modello formale
+ è eseguibile (su una data macchina)
+ disponibili supporti di sviluppo (debug)
+ non va tradotto: pronto per il controllo

– modellistica troppo dettagliata
– difficile astrazione dei concetti principali
– non ha strutture standard
– in generale, difficile portabilità del "modello"

Aspetti salienti nei DEDS

- sequenza di eventi $\{e_1,e_2,e_3,e_4,...\}$
- sequenza di eventi temporizzati $\{(t_1,e_1),(t_2,e_2),(t_3,e_3),(t_4,e_4),...\}$
- dato lo stato iniziale, una sequenza di eventi definisce in modo *univoco* l'evoluzione dello stato
- uso di "teoria dei linguaggi": dato un *alfabeto E* di eventi (simboli), tutte le possibili sequenze di eventi (*stringhe*) costituiscono un *linguaggio* (evtl. temporale)
- DEDS a vari livelli di astrazione/interesse
  - **logico** (solo ordine degli eventi)
  - **temporale** (anche gli istanti di occorrenza, tipicamente deterministici)
  - **stocastico** (distribuzioni probabilistiche)

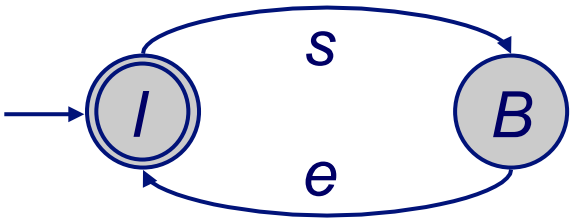


Automi

Un automa è una macchina a stati $G = (X, E, f, \Gamma, x_0, X_m)$ caratterizzata da

- insieme degli stati X (i singoli stati dell'automa sono globali per il sistema)
- insieme degli eventi E
- funzione di transizione $f: X \times E \rightarrow X$ che ad ogni coppia (stato, evento) associa lo stato successivo
- funzione di evento attivo $\Gamma: X \rightarrow 2^E$, per cui $\Gamma(x_0)$ definisce tutti gli eventi e per i quali è definita $f(x,e)$
- stato iniziale $x_0 \in X$ (rappresentato con una freccia accanto al nodo)
- *eventuali* stati "marcati" $X_m \in X$ di interesse (rappresentati da doppi cerchi)

es: server



un automa è anche un generatore di linguaggio:

"alfabeto" di eventi $E = \{s, e\}$

"linguaggio" L generato dall'automa G

$$L(G) = \{\varepsilon, s, se, ses, sese, seses, \ldots\}$$

stringa vuota

tutte le stringhe generabili

Altri tipi di automi

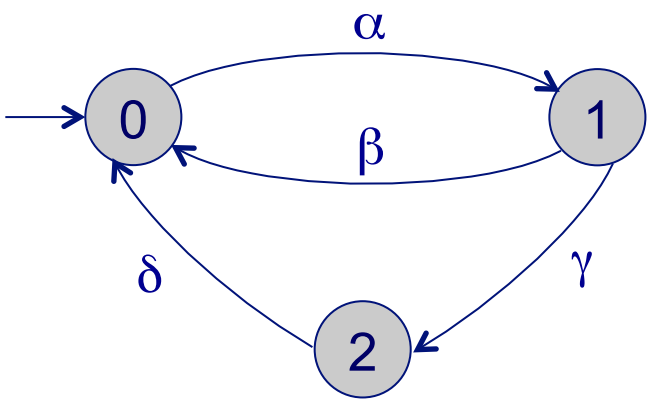
Un automa a stati finiti **con ingressi e uscite** è la sestupla $H = (U, X, Y, f, h, x_0)$ dove

- $U = \{u_1, u_2, u_3, ...\}$ è l'insieme degli eventi in ingresso
- $X = \{x_0, x_1, x_2, x_3, ...\}$ è l'insieme (finito) degli stati ⇒ finite state machine
- $Y = \{y_1, y_2, y_3, ...\}$ è l'insieme degli eventi in uscita
- $f: X \times U \rightarrow X$ è la funzione di transizione dello stato (eventualmente non definita per alcune coppie (x_i, u_k) ⇒ eventi in ingresso non ammissibili in certi stati)
- $h: X \times U \rightarrow Y$ oppure $h: X \rightarrow Y$ è la funzione di uscita
- x_0 è lo stato iniziale

Automi a stati finiti con funzione di transizione deterministica sono i più comuni

- *automi di **Mealy:*** la funzione di uscita dipende sia dallo stato che dall'ingresso (sistema dinamico proprio, con legame diretto in-out): $h: X \times U \rightarrow Y$
- *automi di **Moore:*** la funzione di uscita dipende solo dallo stato e non dall'ingresso (sistema dinamico strettamente proprio): $h: X \rightarrow Y$
- la trasformazione di un automa di Moore in uno di Mealy (e viceversa) è sempre possibile

macchina utensile soggetta a guasti

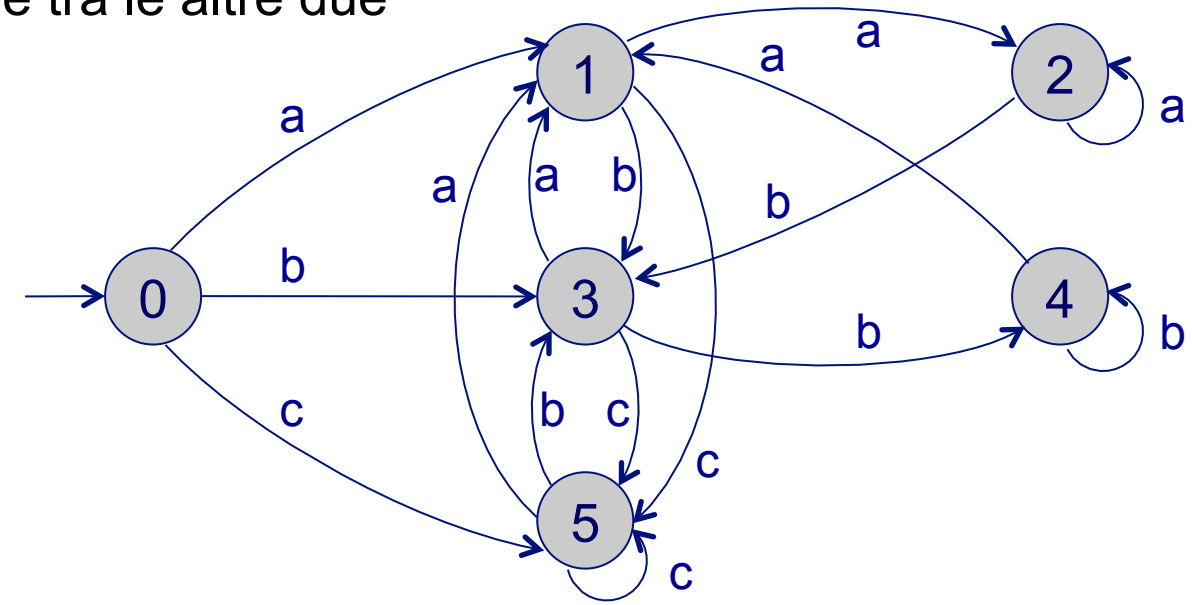


$$L(G) = \{\varepsilon, \alpha, \alpha\beta, \alpha\beta\alpha\beta, \ldots, \alpha\gamma\delta, \alpha\gamma\delta\alpha\beta, \ldots.\}$$

- stato X = {0 = macchina libera, 1 = macchina occupata, 2 = macchina guasta}
- eventi E = {α = inizio lavorazione, β = fine lavorazione, γ = la macchina si guasta, δ = la macchina è riparata}
- hp di lavoro
  - all'inizio del periodo di osservazione, la macchina è libera
  - la macchina si può guastare solo quando esegue una lavorazione (= macchina occupata)
  - il pezzo in lavorazione al momento del guasto viene scartato (= fine lavorazione)

Modellistica con automi

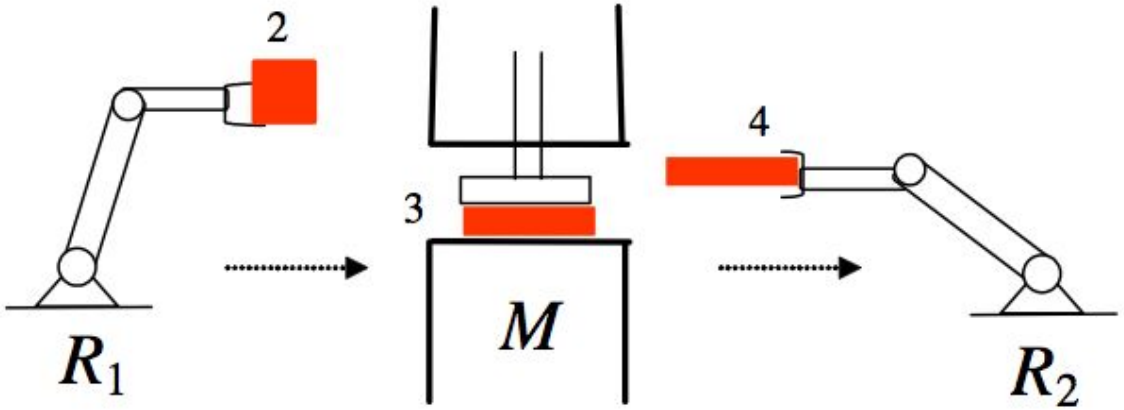
una macchina utensile esegue tre tipi di operazioni; per vincoli tecnologici, una delle tre operazioni non può essere eseguita subito dopo due consecutive esecuzioni della stessa operazione tra le altre due



- eventi E = {a, b, c} ⇐ l'esecuzione delle tre diverse lavorazioni sulla macchina utensile
  - sia c l'operazione che presenta dei vincoli tecnologici
- stato X = { 0 = nessuna operazione eseguita;
  1 = l'ultima operazione eseguita è di tipo a, la penultima non è di tipo a;
  2 = le ultime due operazioni eseguite sono di tipo a;
  3 = l'ultima operazione eseguita è di tipo b, la penultima non è di tipo b;
  4 = le ultime due operazioni eseguite sono di tipo b;
  5 = l'ultima operazione eseguita è di tipo c }

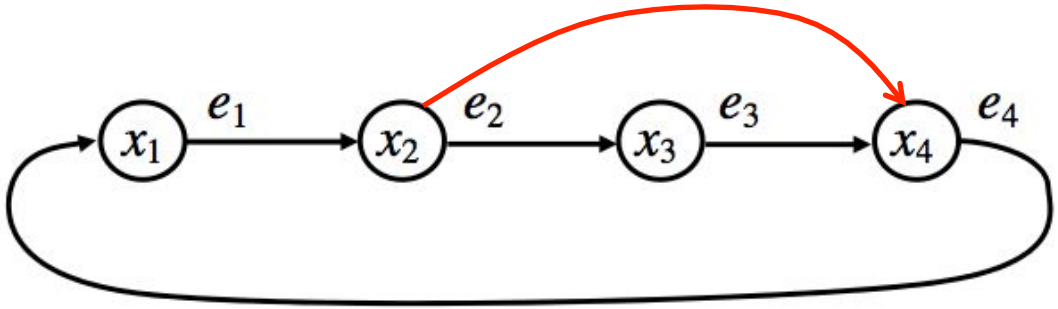
Modellistica con automi

due robot che caricano e scaricano pezzi in/da una macchina (ad es., una pressa)

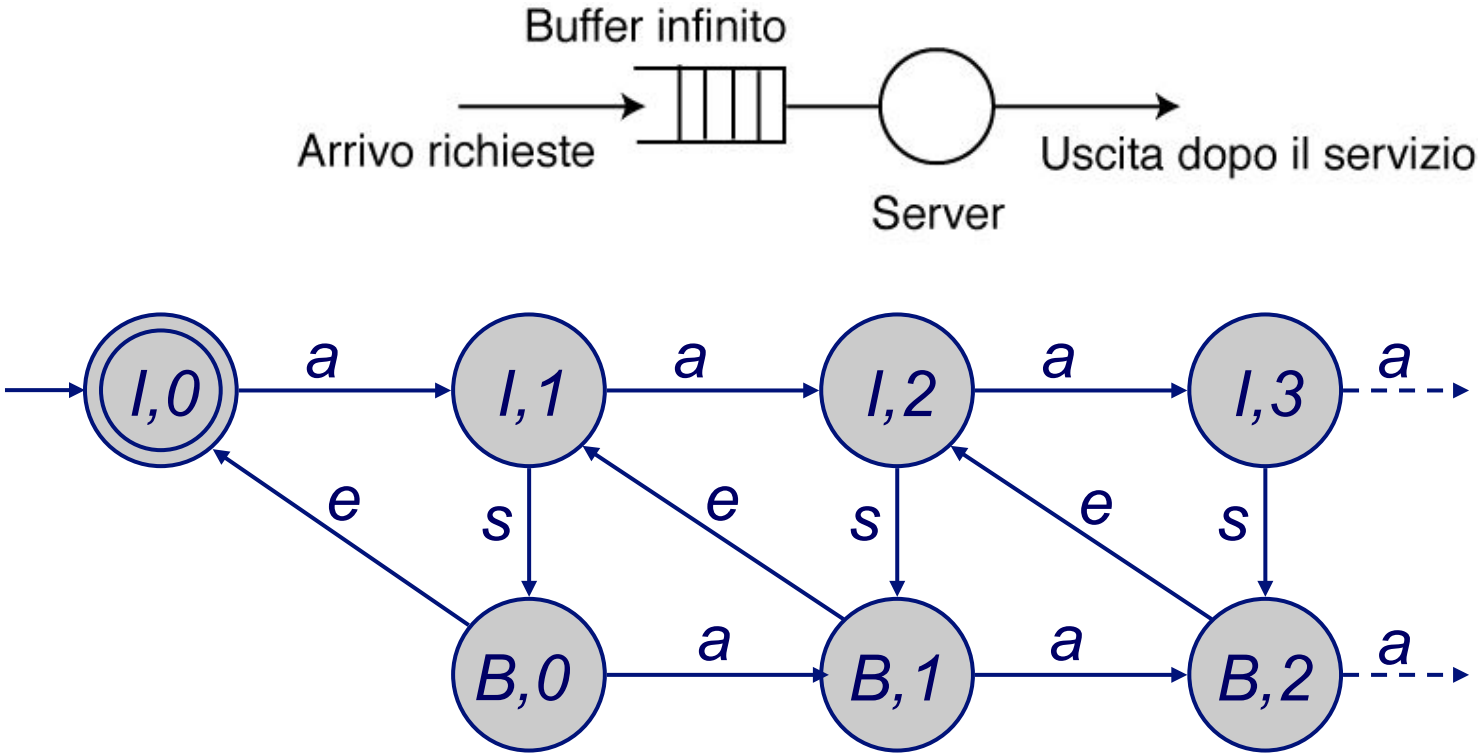


- stati
  - x_1 macchina M in attesa, disponibile per la lavorazione
  - x_2 carico del pezzo su M da parte di robot R_1
  - x_3 lavorazione
  - x_4 scarico del pezzo lavorato da M tramite robot R_2
- eventi (fasi del ciclo produttivo)
  - e_1 inizio carico
  - e_2 inizio lavorazione
  - e_3 inizio scarico
  - e_4 inizio attesa

evento che vorremmo non accadesse ...
come "controllare" tale situazione?



modello del sistema client/server (con buffer illimitato)



un numero infinito di stati

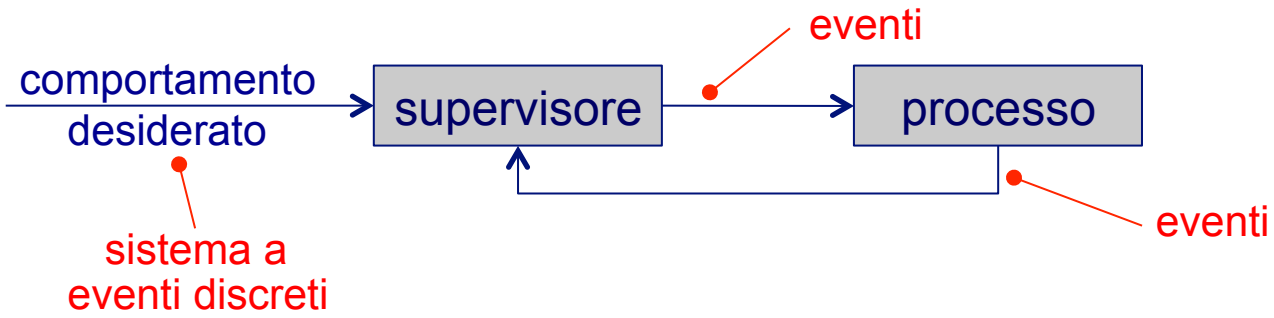
problema: gli automi non sono in grado di rappresentare con un numero finito di stati alcuni “linguaggi” a cardinalità infinita

Controllo di DEDS

Per un sistema dinamico a eventi discreti, si può progettare un controllore (anche esso guidato da eventi) in modo da ottenere un comportamento desiderato; due alternative:

- si implementa **direttamente** il comportamento logico desiderato del sistema automatizzato
- si cerca di modificare opportunamente il comportamento originale del processo (includendo tutti i conflitti, malfunzionamenti e guasti di interesse) in modo da ottenerne uno la cui correttezza è formalmente verificabile (**progetto di un supervisore DEDS**)

processo DEDS (ad anello aperto) + supervisore DEDS = DEDS (ad anello chiuso)



servono

- un modello del processo da controllare
- le specifiche sul comportamento desiderato, espresse tramite modello DEDS ("omogeneo" al modello del processo), vincoli da non violare, "restrizioni" sulle evoluzioni dinamiche, ...
- un supervisore guidato da eventi/*misure* in ingresso e con eventi/*comandi* in uscita
- strumenti di progetto che permettano di combinare/integrare con relativa facilità diversi sottosistemi DEDS e di verificarne il comportamento

Implementazione del supervisore

- il supervisore (= controllore) è un DEDS che evolve in modo **asincrono**, interagendo con il processo da controllare attraverso eventi
- lo strumento di calcolo dedicato al controllo (PIC, PLC o PC) è invece **sincrono** (ha un clock ⇒ tempo di ciclo T_c) e interagisce con il processo scambiando segnali

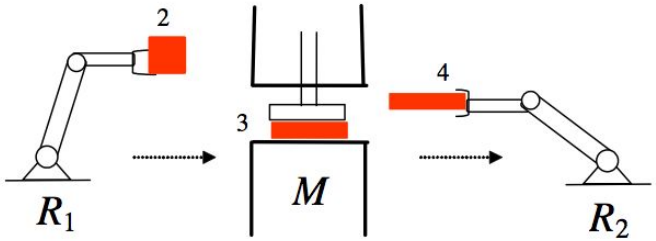
- occorrono quindi
  - *interfaccia eventi-segnali* (e viceversa) per la traduzione delle informazioni
  - opportuna *sincronizzazione* tra evoluzione del DEDS e quella del calcolatore di controllo
- implementazione time-driven del controllore DEDS
  - le problematiche sono quelle generali relative alla **gestione sincrona di eventi asincroni**
  - la permanenza minima dei segnali logici negli stati deve essere maggiore di T_c
    - se un segnale logico cambia stato due volte nello stesso periodo di campionamento, l'evento è perso
  - l'unità di calcolo deve completare sempre le attività in un ciclo T_c ⇒ comportamento real-time
  - il ritardo di controllo complessivo (incluso quello dei moduli I/O) deve essere tollerabile dal sistema
    - un evento che accade subito dopo l'istante di clock, è rilevato con un ritardo T_c; se la corrispondente azione di comando è eseguita entro il successivo T_c, il ritardo totale sarà al più $\mathbf{2T_c}$
  - più eventi accaduti nello stesso tempo T_c sono considerati come simultanei
    - l'ordine effettivo di tale eventi deve essere indifferente nel determinare la relativa azione di controllo

Modello con automa del supervisore

automa **con ingressi e uscite** (di Mealy) per descrivere l'asservimento con due robot di una macchina (processo) e il gestore logico del ciclo di lavorazione (supervisore)

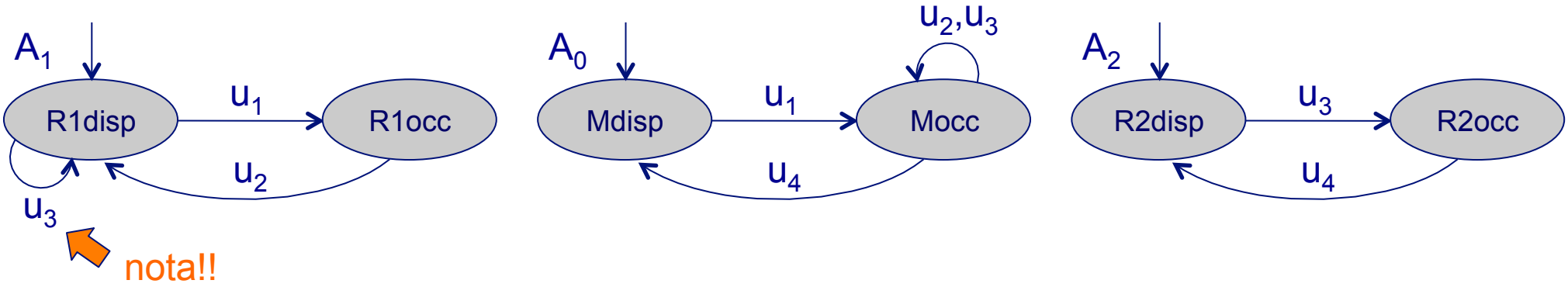
- per ogni componente fisico (due robot + una macchina) introduciamo due stati
  - componente occupato (occ) in una lavorazione (macchina) o in un trasporto (robot)
  - componente disponibile (disp), in attesa di un nuovo compito
  - 6 stati per il processo

X = {Mocc, Mdisp, R1occ, R1disp, R2occ, R2disp}



- gli eventi (in ingresso) sono
  - u_1 inizio ciclo (fine attesa)
  - u_2 fine carico
  - u_3 fine lavorazione
  - u_4 fine scarico

tre automi A_0, A_1 e A_2 per descrivere il processo (non ci sono temporizzazioni!)



Modello con automa del supervisore

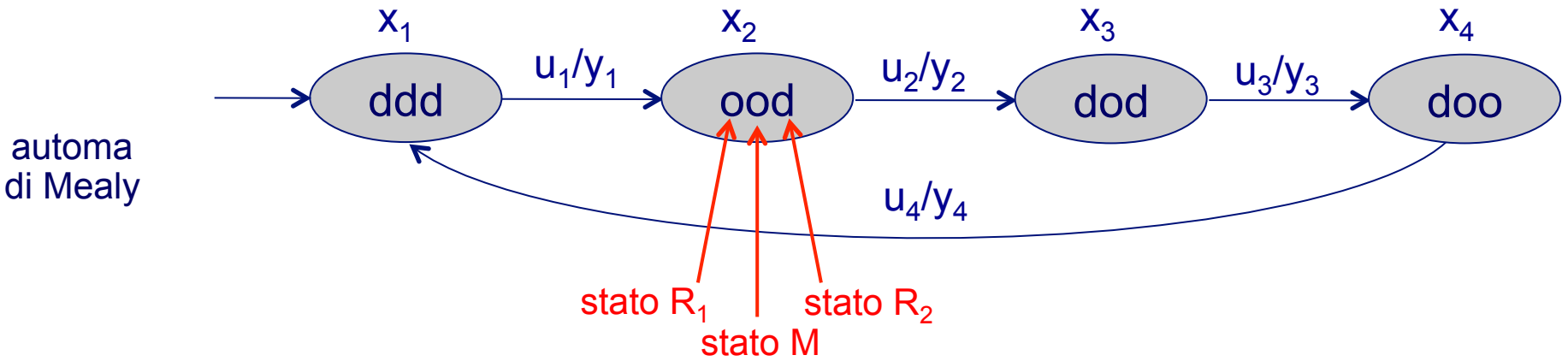
l'automa S che modellizza il gestore logico del ciclo di lavorazione (supervisore) ha 4 stati $X_S = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ che corrispondono alle condizioni operative in tabella:

stato	stato di R_1	stato di M	stato di R_2	codifica	descrizione
x_1	R1disp	Mdisp	R2disp	ddd	M in attesa di lavorazione
x_2	R1occ	Mocc	R2disp	ood	R_1 carica M
x_3	R1disp	Mocc	R2disp	dod	M lavora
x_4	R1disp	Mocc	R2occ	doo	R_2 scarica M

- evoluzione dell'automa S
  - nello stato iniziale x_1 l'unico evento che può avvenire è u_1 (in A_0 e A_1, non in A_2 perché è assente nel suo alfabeto): M e R_1 passano in stato occupato, R_2 resta disponibile ($\Rightarrow x_2$)
  - nello stato x_2 l'evento u_2 è l'unico accettabile in A_0 e A_1 (in A_2 è assente): R_1 cambia stato e torna disponibile ($\Rightarrow x_3$)
  - nello stato x_3 l'unico evento accettabile da tutti e tre gli automi è u_3: R_2 cambia stato e diventa occupato ($\Rightarrow x_4$)
  - nello stato x_4 l'evento u_4 è l'unico accettabile in A_0 e A_2 (in A_1 è assente): anche M e R_2 tornano disponibili ($\Rightarrow x_1$)
  - affinché la composizione sincrona funzioni, è essenziale la presenza dell'evento u_3 nell'alfabeto di A_1 (else u_3 potrebbe scattare prima di u_2) anche se tale evento riguarda un'altra parte del processo (A_2)!

Modello con automa del supervisore

rappresentazione grafica del supervisore S, con l'aggiunta degli eventi in uscita



- gli eventi in ingresso (al supervisore) sono "misure" dal processo
  - u_1 inizio ciclo (fine attesa)
  - u_2 fine carico
  - u_3 fine lavorazione
  - u_4 fine scarico

una certa simmetria...

- gli eventi in uscita (dal supervisore) sono "comandi" per il processo
  - y_1 inizio carico
  - y_2 inizio lavorazione
  - y_3 inizio scarico
  - y_4 fine ciclo (inizio attesa)

- possibile uso inefficiente delle risorse: nello stato x_2 la macchina M risulta occupata durante l'operazione di carico con il robot R_1 ma anche mentre R_1 trasporta il pezzo...
- moltiplicazione degli stati in presenza di operazioni concorrenti: il parallelismo di azioni tra dispositivi rende necessari più stati per rappresentare tutte le possibili sequenze di operazioni
- scarsa modularità: aggiunta di dettagli complica subito l'automa (e va ridisegnato da capo!)