Sistemi Operativi

Modulo 4: Gestione risorse e deadlock
A.A. 2021-22

Renzo Davoli
Alberto Montresor

Introduzione

"When two trains approach each other at a crossing, both shall come to a full stop and neither shall start up again until the other has gone"

Legge del Kansas
di inizio secolo scorso

Risorse

- Un sistema di elaborazione è composto da un insieme di risorse da assegnare ai processi presenti
- I processi competono nell'accesso alle risorse
- Esempi di risorse
  - memoria
  - stampanti
  - processore
  - dischi
  - interfaccia di rete
  - descrittori di processo

Classi di risorse

- Le risorse possono essere suddivise in classi
  - le risorse appartenenti alla stessa classe sono equivalenti
  - esempi: byte della memoria, stampanti dello stesso tipo, etc.
- Definizioni:
  - le risorse di una classe vengono dette *istanze* della classe
  - il numero di risorse in una classe viene detto *molteplicità* del tipo di risorsa
- Un processo non può richiedere una specifica risorsa, ma solo una risorsa di una specifica classe
  - una richiesta per una classe di risorse può essere soddisfatta da qualsiasi istanza di quel tipo

Assegnazione delle risorse

- Risorse ad assegnazione statica
  - avviene al momento della creazione del processo e rimane valida fino alla terminazione
  - esempi: *descrittori di processi, aree di memoria (in alcuni casi)*
- Risorse ad assegnazione dinamica
  - i processi
    - richiedono le risorse durante la loro esistenza
    - le utilizzano una volta ottenute
    - le rilasciano quando non più necessarie (eventualmente alla terminazione del processo
  - esempi: *periferiche di I/O, aree di memoria (in alcuni casi)*

Tipi di richieste

- Richiesta singola:
  - si riferisce a una singola risorsa di una classe definita
  - è il caso normale
- Richiesta multipla
  - si riferisce a una o più classi, e per ogni classe, ad una o più risorse
  - deve essere soddisfatta integralmente

Tipi di richieste

- Richiesta bloccante
  - il processo richiedente si sospende se non ottiene immediatamente l'assegnazione
  - la richiesta rimane pendente e viene riconsiderata dalla funzione di gestione ad ogni rilascio
- Richiesta non bloccante
  - la mancata assegnazione viene notificata al processo richiedente, senza provocare la sospensione

Tipi di risorse

- Risorse non condivisibili (seriali)
  - una singola risorsa non può essere assegnata a più processi contemporaneamente
  - esempi:
    - i processori
    - le sezioni critiche
    - le stampanti
- Risorse condivisibili
  - esempio:
    - file di sola lettura

Risorse prerilasciabili ("preemptable")

- Definizione
  - una risorsa si dice prerilasciabile se la funzione di gestione può sottrarla ad un processo prima che questo l'abbia effettivamente rilasciata
- Meccanismo di gestione:
  - il processo che subisce il prerilascio deve sospendersi
  - la risorsa prerilasciata sarà successivamente restituita al processo

Risorse prerilasciabili

- Una risorsa è prerilasciabile:
  - se il suo stato non si modifica durante l'utilizzo
  - oppure il suo stato può essere facilmente salvato e ripristinato
- Esempi:
  - processore
  - blocchi o partizioni di memoria
    (nel caso di assegnazione dinamica)

Risorse non prerilasciabili

- Definizione
  - la funzione di gestione non può sottrarle al processo al quale sono assegnate
  - sono non prerilasciabili le risorse il cui stato non può essere salvato e ripristinato
- Esempi
  - stampanti
  - classi di sezioni critiche
  - partizioni di memoria
    (nel caso di gestione statica)

Deadlock

- Come abbiamo visto
  - i deadlock impediscono ai processi di terminare correttamente
  - le risorse bloccate in deadlock non possono essere utilizzati da altri processi
- Ora vediamo
  - le condizioni che necessarie affinché un deadlock si presenti
  - le tecniche che possono essere utilizzate per gestire il problema dei deadlock

Condizioni per avere un deadlock

- Mutua esclusione / non condivisibili
  - le risorse coinvolte devono essere non condivisibili (seriali)
- Assenza di prerilascio
  - le risorse coinvolte non possono essere prerilasciate, ovvero devono essere rilasciate volontariamente dai processi che le controllano
- Richieste bloccanti (detta anche "hold and wait")
  - le richieste devono essere bloccanti, e un processo che ha già ottenuto risorse può chiederne ancora

Condizioni per avere un deadlock

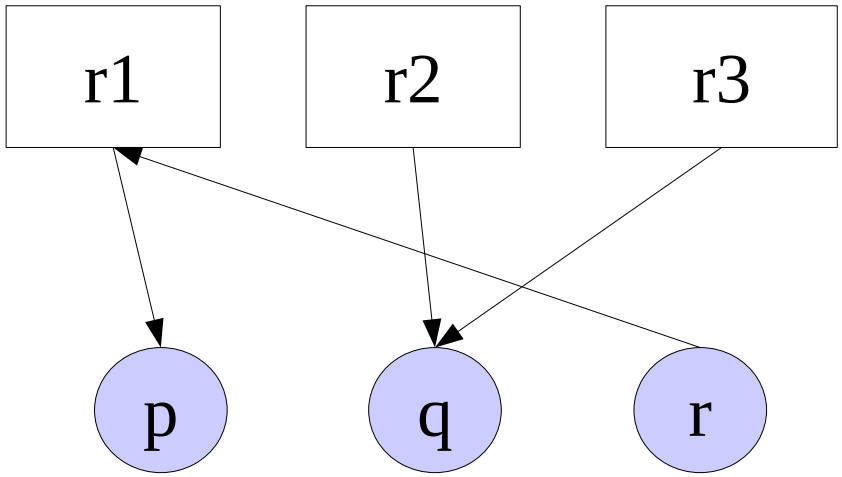
- Attesa circolare
  - esiste una sequenza di processi P_0,P_1, ..., P_n, tali per cui P_0 attende una risorsa controllata da P_1, P_1 attende una risorsa controllata da P_2, ..., e P_n attende una risorsa controllata da P_0

- L'insieme di queste condizioni è necessario e sufficiente
  - devono valere tutte contemporaneamente affinché un deadlock si presenti nel sistema

Grafo di Holt

- Caratteristiche
  - è un grafo *diretto*
    - gli archi hanno una direzione
  - è un grafo *bipartito*
    - i nodi sono suddivisi in due sottoinsiemi e non esistono archi che collegano nodi dello stesso sottoinsieme
    - i sottoinsiemi sono *risorse* e *processi*
  - gli archi *risorsa → processo* indicano che la risorsa è assegnata al processo
  - gli archi *processo → risorsa* indicano che il processo ha richiesto la risorsa

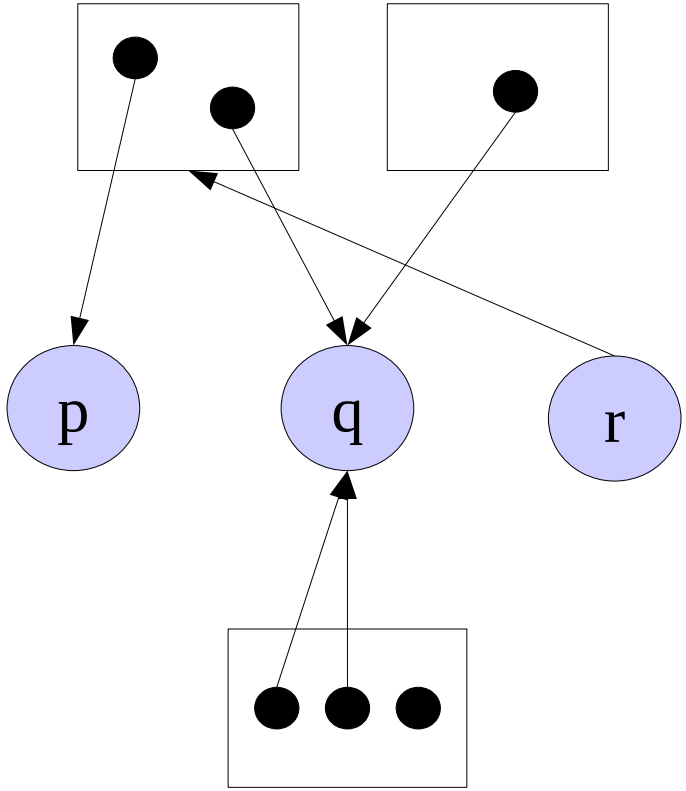
Grafo di Holt - Esempio



Grafo di Holt generale

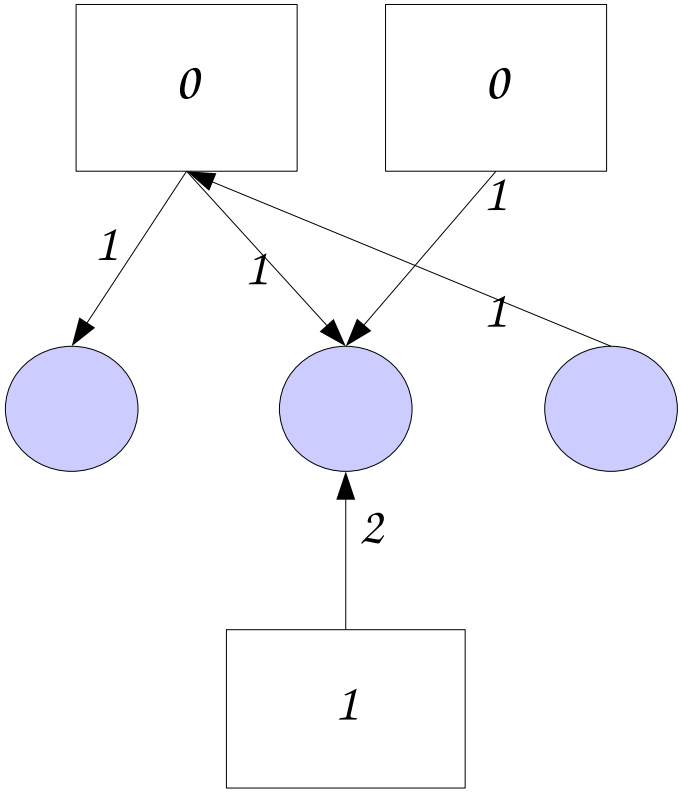
- Nel caso di classi contenenti più istanze di una risorsa
  - l'insieme delle risorse è partizionato in classi e gli archi di richiesta sono diretti alla classe e non alla singola risorsa
- Rappresentazione
  - i processi sono rappresentati da *cerchi*
  - le classi sono rappresentati come *contenitori rettangolari*
  - le risorse come *punti* all'interno delle classi
- Nota:
  - non si rappresentano grafi di Holt con archi relativi a richieste che possono essere soddisfatte
  - se esiste almeno un'istanza libera della risorsa richiesta, la risorsa viene assegnata

Grafo di Holt generale - Esempio



Grafo di Holt - Notazione operativa

- Nell'implementazione il grafo di Holt viene memorizzato come grafo pesato (con pesi ai nodi risorsa e pesi sugli archi)
- sugli archi:
  - la molteplicità della richiesta (archi processo → classe)
  - la molteplicità dell'assegnazione (archi classe → processo)
- all'interno delle classi
  - il numero di risorse non ancora assegnate



Metodi di gestione dei deadlock

- Deadlock detection and recovery
  - permettere al sistema di entrare in stati di deadlock; utilizzare un algoritmo per rilevare questo stato ed eventualmente eseguire un'azione di recovery
- Deadlock prevention / avoidance
  - impedire al sistema di entrare in uno stato di deadlock
- Ostrich algorithm (Algoritmo dello struzzo)
  - ignorare il problema del tutto!

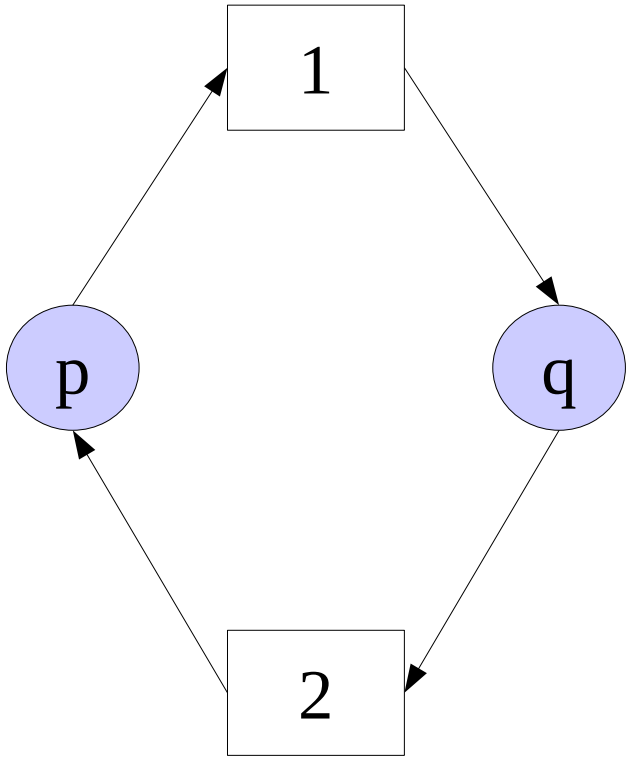
Deadlock detection

- Descrizione
  - mantenere aggiornato il grafo di Holt, registrando su di esso tutte le assegnazioni e le richieste di risorse
  - utilizzare il grafo di Holt al fine di riconoscere gli stati di deadlock
- Problema:
  - come riconoscere uno stato di deadlock?

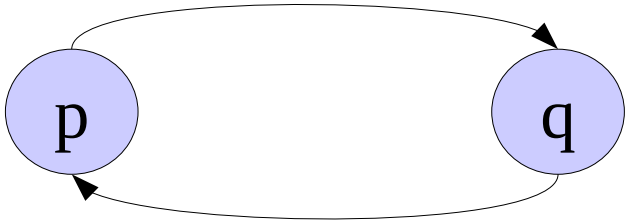
Caso 1 - Una sola risorsa per classe

- Teorema
  - se le risorse sono a richiesta bloccante, non condivisibili e non prerilasciabili
  - *lo stato è di deadlock se e solo se il grafo di Holt contiene un ciclo*
- Dimostrazione
  - si utilizza una variante del grafo di Holt, detto *grafo Wait-For*
  - si ottiene un grafo wait-for eliminando i nodi di tipo risorsa e collassando gli archi appropriati
  - il grafo di Holt contiene un ciclo se e solo se il grafo Wait-for contiene un ciclo
  - se il grafo Wait-for contiene un ciclo, abbiamo attesa circolare

Grafo Wait-for



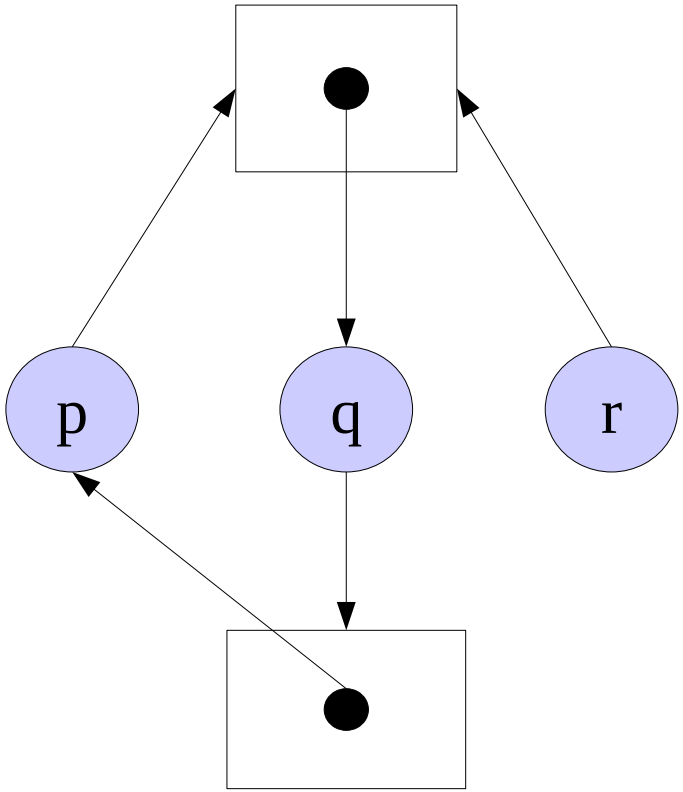
Grafo di Holt



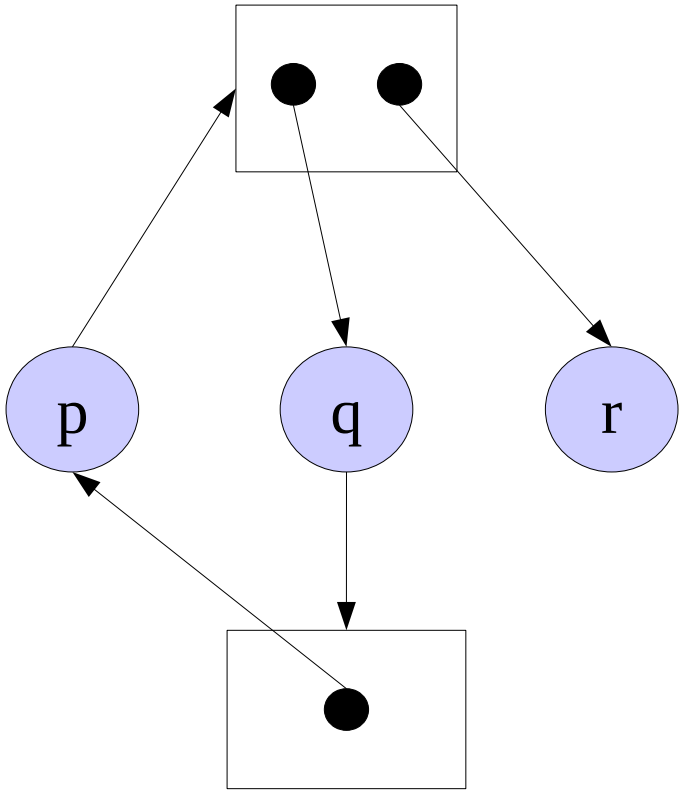
Grafo Wait-For

Caso 2 - Più risorse per classe

- La presenza di un ciclo nel caso di Holt non è condizione sufficiente per avere deadlock



Deadlock

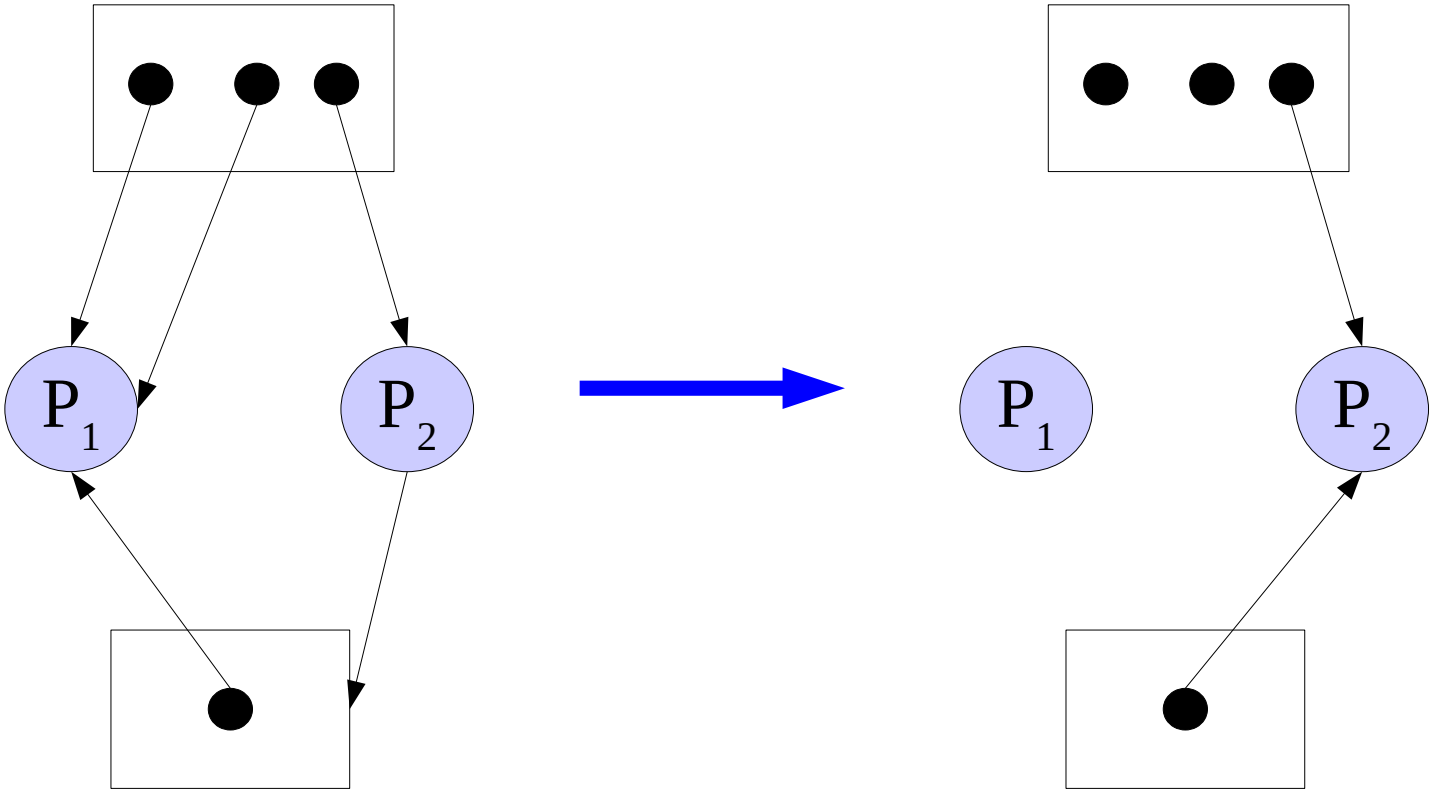


No Deadlock

Riducibilità di un grafo di Holt

- Definizione
  - un grafo di Holt si dice *riducibile* se esiste almeno un nodo processo con solo archi entranti
- Riduzione
  - consiste nell'eliminare tutti gli archi di tale nodo e riassegnare le risorse ad altri processi
- Qual è la logica?
  - eventualmente, un nodo che utilizza una risorsa prima o poi la rilascerà; a quel punto, la risorsa può essere riassegnata

Esempio di riduzione

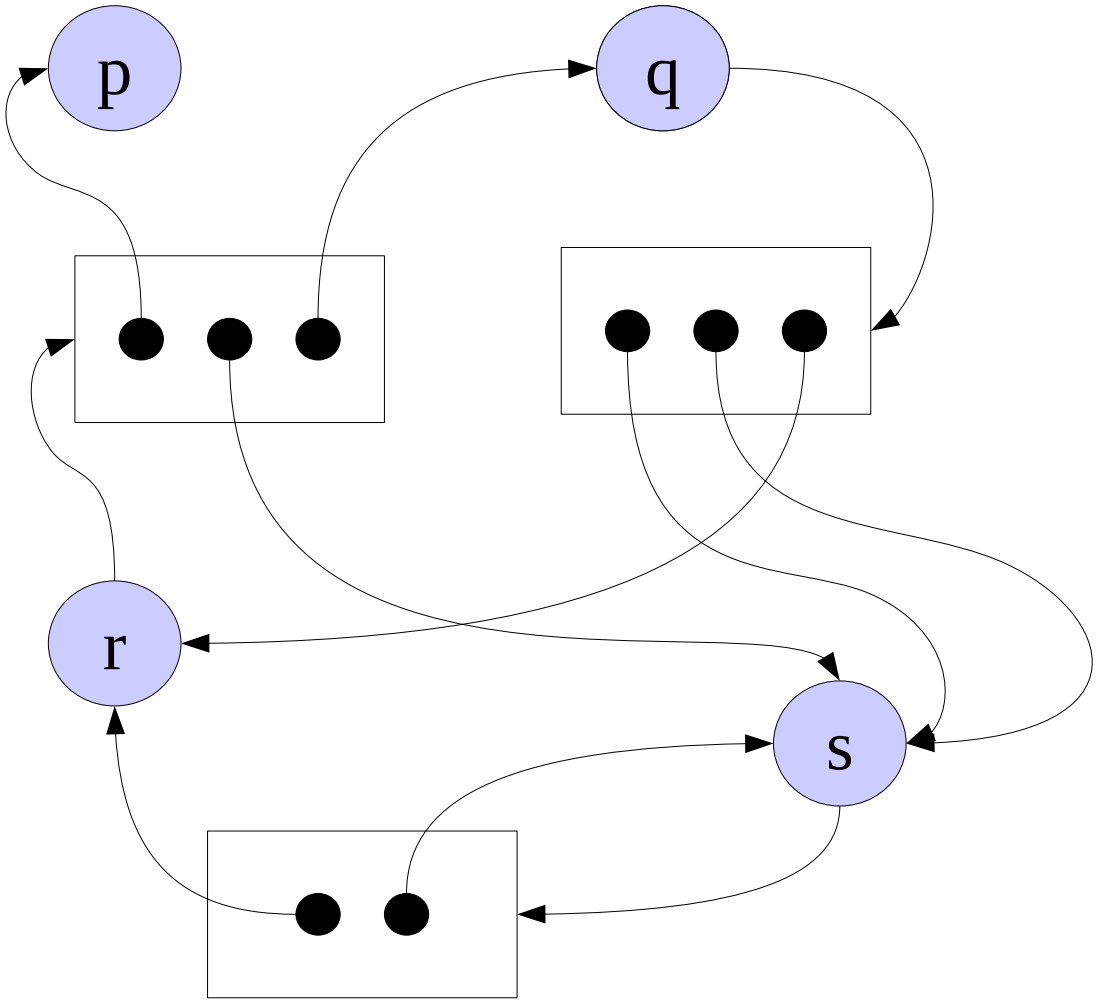


Riduzione per P_1

Deadlock detection con grafo di Holt

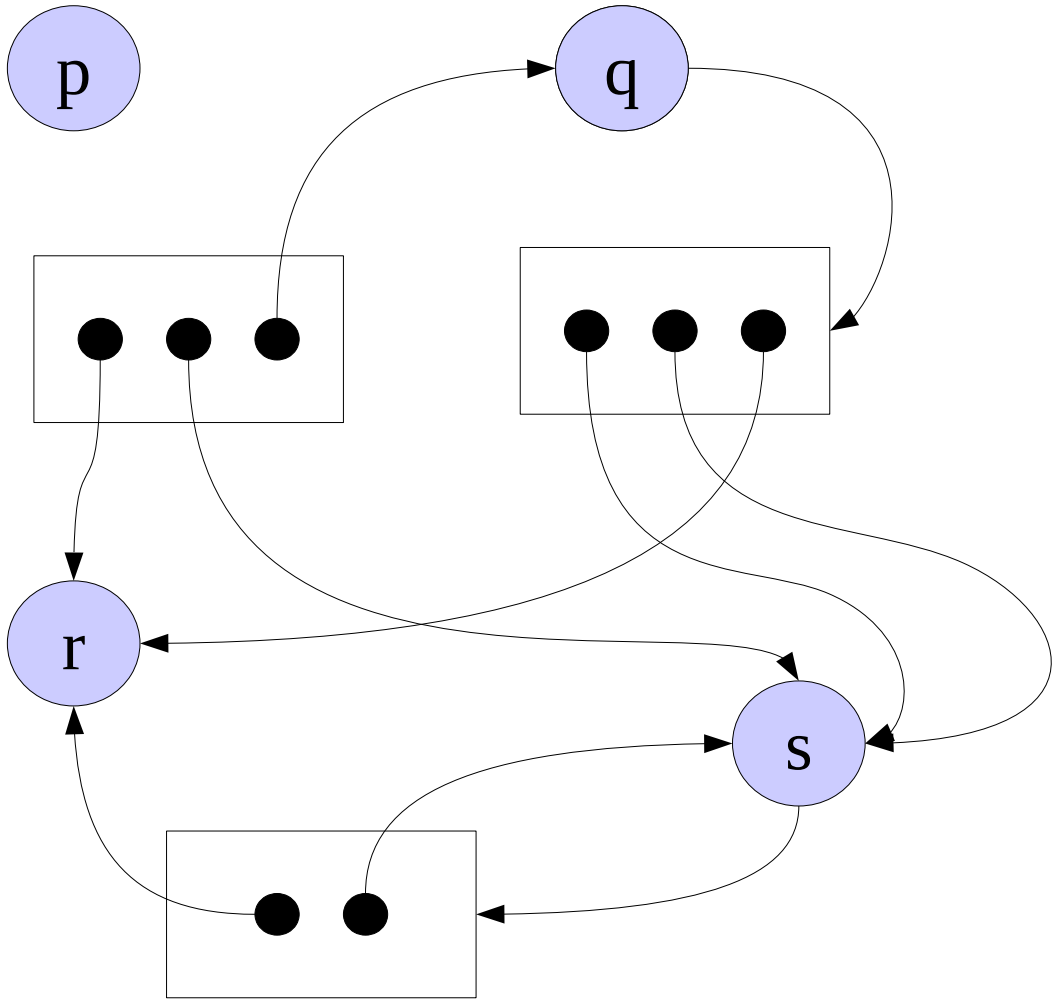
- Teorema
  - se le risorse sono a richiesta bloccante, non condivisibili e non prerilasciabili
  - lo stato non è di deadlock se e solo se il grafo di Holt è *completamente riducibile*, i.e. esiste una sequenza di passi di riduzione che elimina tutti gli archi del grafo

Esercizio 2 - 4/6/2002



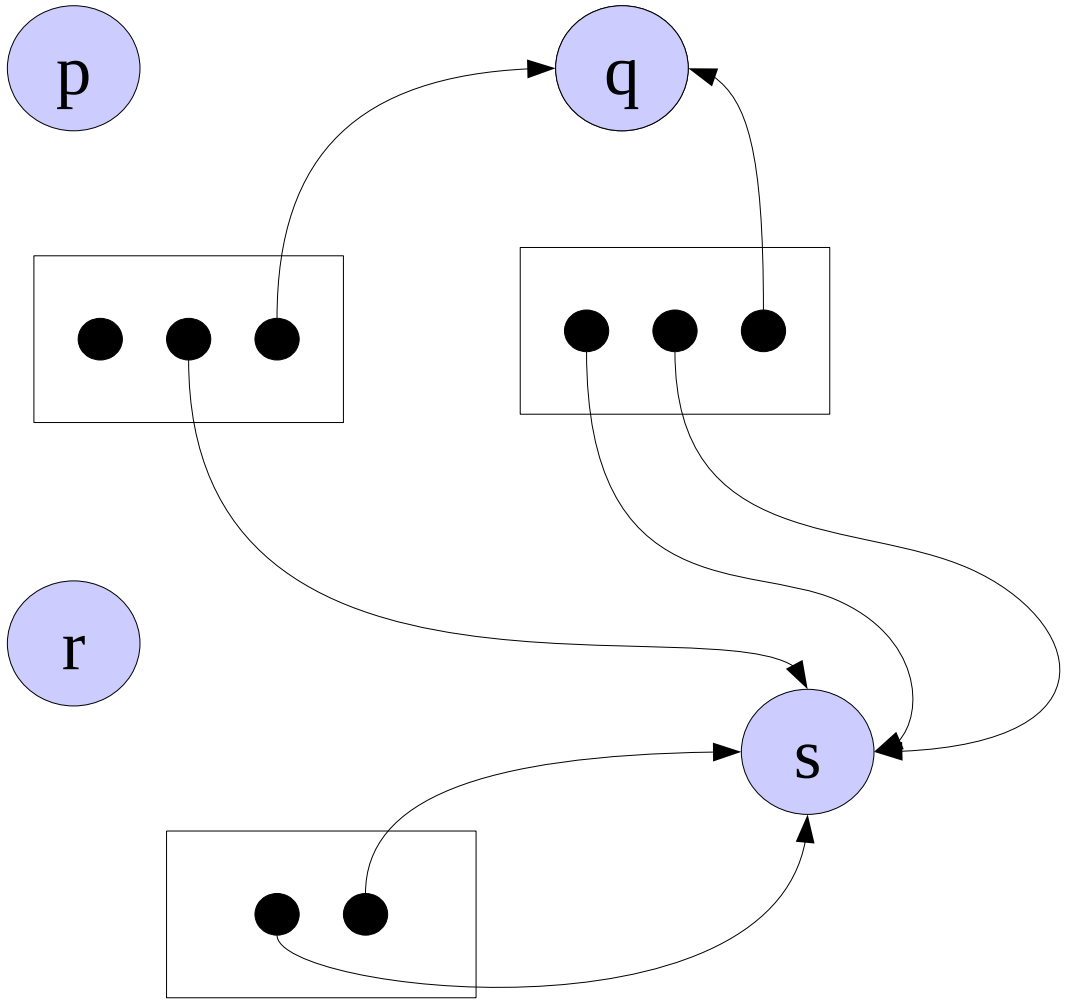
C'è deadlock?

Esercizio 2 - 4/6/2002



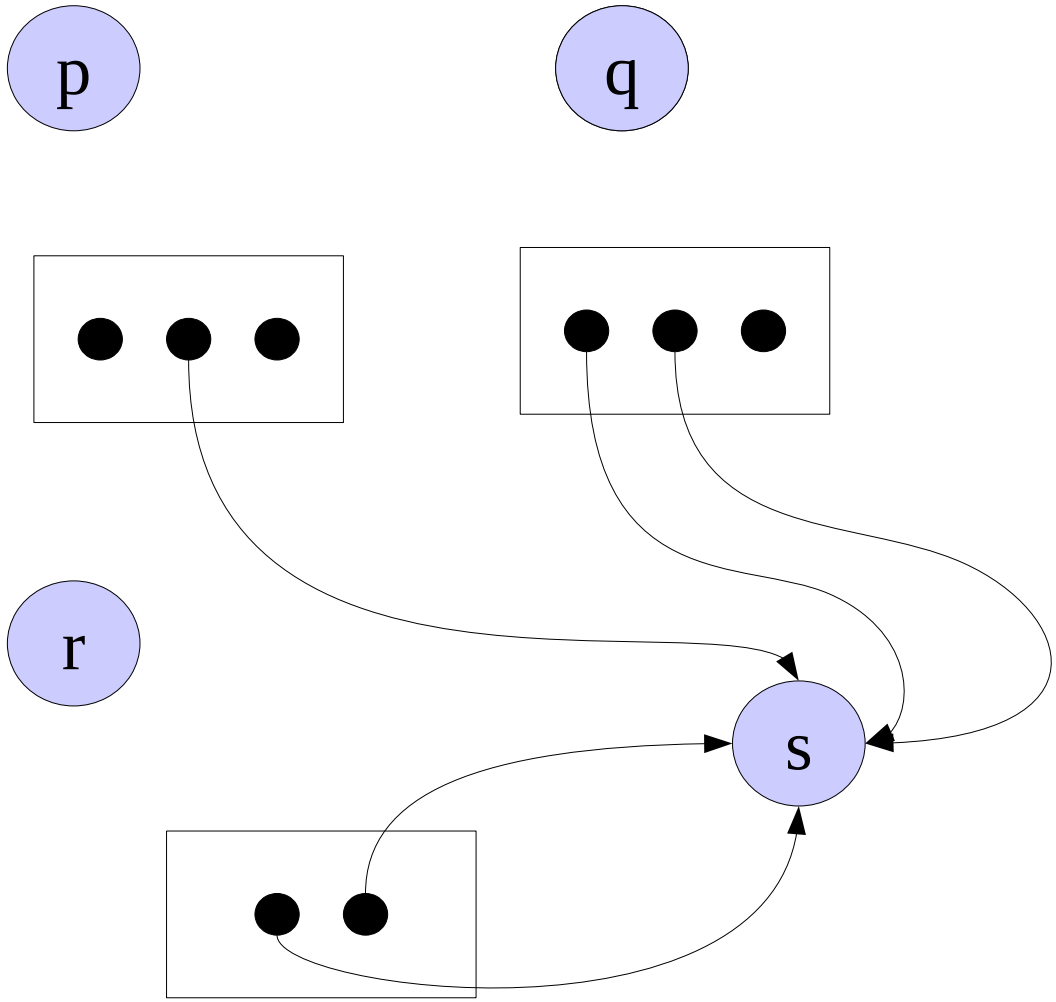
Riduzione di p
Assegnamento
risorsa a r

Esercizio 2 - 4/6/2002



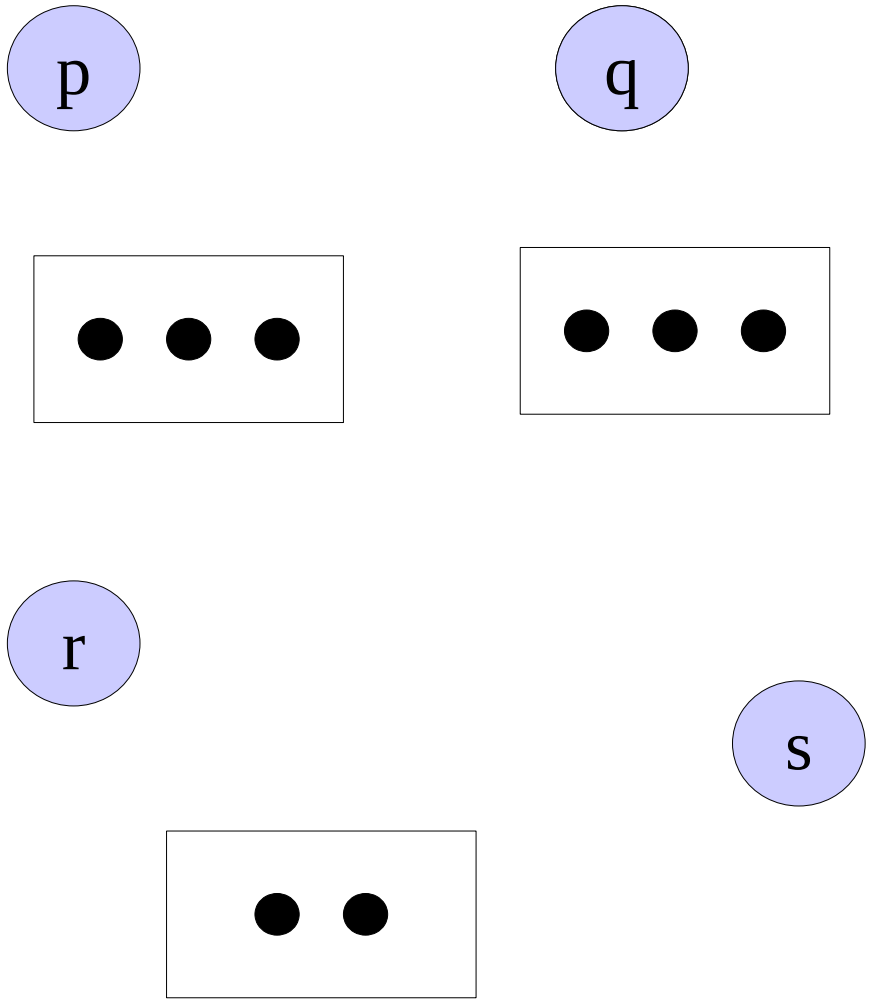
Riduzione di r
Assegnamento risorse a q,s

Esercizio 2 - 4/6/2002



Riduzione di q

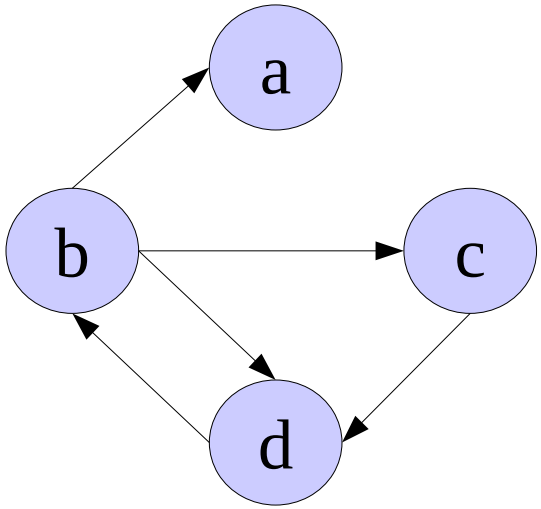
Esercizio 2 - 4/6/2002



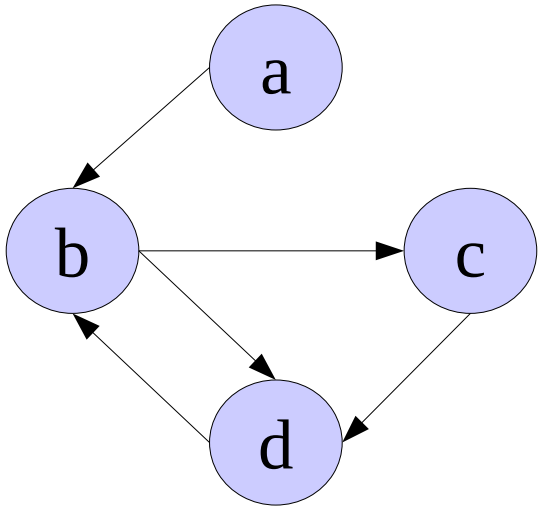
Riduzione di s
Non c'è deadlock

Deadlock detection - Knot

- Definizione
  - dato un nodo *n*, l'insieme dei nodi raggiungibili da *n* viene detto *insieme di raggiungibilità* di *n* (scritto R*(n)*)
  - un knot del grafo G è il sottoinsieme (non banale) di nodi M tale che per ogni *n* in *M*, R*(n)=M*
  - in altre parole: partendo da un qualunque nodo di M, si possono raggiungere tutti i nodi di M e nessun nodo all'infuori di esso.



{ b,c,d } non è un knot



{ b,c,d } è un knot

Deadlock detection - Knot

- Teorema
  - dato un grafo di Holt con una sola richiesta sospesa per processo
  - se le risorse sono a richiesta bloccante, non condivisibili e non prerilasciabili,
  - allora il grafo rappresenta uno stato di deadlock se e solo se esiste un knot

Deadlock recovery

- Dopo aver rilevato un deadlock...
- ... bisogna risolvere la situazione
- La soluzione può essere
  - *manuale*
    - l'operatore viene informato e eseguirà alcune azioni che permettano al sistema di proseguire
  - *automatica*
    - il sistema operativo è dotato di meccanismi che permettono di risolvere in modo automatico la situazione, in base ad alcune politiche

Meccanismi per il deadlock recovery

- Terminazione totale
  - tutti i processi coinvolti vengono terminati
- Terminazione parziale
  - viene eliminato un processo alla volta, fino a quando il deadlock non scompare

Meccanismi per il deadlock recovery

- Checkpoint/rollback
  - lo stato dei processi viene periodicamente salvato su disco (*checkpoint*)
  - in caso di deadlock, si ripristina (*rollback*) uno o più processi ad uno stato precedente, fino a quando il deadlock non scompare

Considerazioni

- Terminare processi può essere costoso
  - questi processi possono essere stati eseguiti per molto tempo;
  - se terminati, dovranno ripartire da capo
- Terminare processi può lasciare le risorse in uno stato incoerente
  - se un processo viene terminato nel mezzo di una sezione critica

Deadlock prevention / avoidance

- Prevention
  - per evitare il deadlock si elimina una delle quattro condizioni del deadlock
  - il deadlock viene eliminato *strutturalmente*
- Avoidance
  - prima di assegnare una risorsa ad un processo, si controlla se l'operazione può portare al pericolo di deadlock
  - in quest'ultimo caso, l'operazione viene ritardata

Deadlock prevention

- Attaccare la condizione di "*Mutua esclusione*"
  - permettere la condivisione di risorse
  - e.g. spool di stampa, tutti i processi "pensano" di usare contemporaneamente la stampante
- Problemi dello spooling
  - in generale, lo spooling non sempre è applicabile
    - ad esempio, descrittori di processi
  - si sposta il problema verso altre risorse
    - il disco nel caso di spooling di stampa
    - cosa succede se due processi che vogliono stampare due documenti esauriscono lo spazio su disco?

Deadlock prevention

- Attaccare la condizione di "*Richiesta bloccante*"
  - *Allocazione totale*
    - è possibile richiedere che un processo richiede tutte le risorse all'inizio della computazione
  - Problemi
    - non sempre l'insieme di richieste è noto fin dall'inizio
    - si riduce il parallelismo
- Attaccare la condizione di "*Assenza di prerilascio*"
  - come detto prima:
    - non sempre è possibile
    - può richiedere interventi manuali

Deadlock prevention

- Attaccare la condizione di "*Attesa Circolare*"
  - *Allocazione gerarchica*
    - alle classi di risorse vengono associati valori di priorità
    - ogni processo in ogni istante può allocare solamente risorse di priorità superiore a quelle che già possiede
    - se un processo vuole allocare una risorsa a priorità inferiore, deve prima rilasciare tutte le risorse con priorità uguale o superiore a quella desiderata

Deadlock prevention

- Allocazione gerarchica e allocazione totale: problemi
  - prevengono il verificarsi di deadlock, ma sono altamente inefficienti
- Nell'allocazione gerarchica:
  - l'indisponibilità di una risorsa ad alta priorità ritarda processi che già detengono risorse ad alta priorità
- Nell'allocazione totale:
  - anche se un processo ha necessità di risorse per poco tempo deve allocarla per tutta la propria esistenza

Deadlock Avoidance

- L'algoritmo del banchiere
  - un algoritmo per evitare lo stallo sviluppato da Dijkstra (1965)
  - il nome deriva dal metodo utilizzato da un ipotetico banchiere di provincia che gestisce un gruppo di clienti a cui ha concesso del credito; non tutti i clienti avranno bisogno dello stesso credito simultaneamente

Algoritmo del banchiere

- Descrizione
  - un banchiere desidera condividere un capitale (fisso) con un numero (prefissato) di clienti
    - per Dijkstra l'"unità di misura" erano fiorini olandesi
  - ogni cliente specifica in anticipo la sua necessità massima di denaro
    - che ovviamente non deve superare il capitale del banchiere
  - i clienti fanno due tipi di transazioni
    - *richieste di prestito*
    - *restituzioni*

Algoritmo del banchiere

- Descrizione
  - il denaro prestato ad ogni cliente non può mai eccedere la necessità massima specificata a priori
  - ogni cliente può fare richieste multiple, fino al massimo importo specificato
  - una volta che le richieste sono state accolte e il denaro è stato ottenuto deve garantire la restituzione in un tempo finito

Algoritmo del banchiere

- Metodo di funzionamento
  - il banchiere deve essere in ogni istante in grado di soddisfare tutte le richieste dei clienti, o concedendo immediatamente il prestito oppure comunque facendo loro aspettare la disponibilità del denaro in un tempo finito

Algoritmo del banchiere

- N: numero dei clienti
- IC: capitale iniziale
- **c_i: limite di credito del cliente i ($c_i \leq$ IC)**
- p_i: denaro prestato al cliente i ($p_i \leq c_i$)
- $n_i = c_i - p_i$ credito residuo del cliente i
- $COH = IC - \sum_{i=1..N} p_i$
  saldo di cassa

Algoritmo del banchiere

- Definizione: *Stato SAFE*
  - sia s una permutazione dei valori 1...N
    - esempio, con N=4: s = 1 , 3 , 4 , 2
    - indichiamo con s(i) l'i-esima posizione della sequenza
  - si calcoli il vettore *avail* come segue

    $avail[1] = COH$

    $avail[j+1] = avail[j] + p_{s(j)}$, $con\ j=1...N-1$
  - uno stato del sistema si dice safe se vale la seguente condizione:

    $n_{s(j)} \leq avail[j]$, $con\ j=1...N$

Algoritmo del banchiere

- Lo stato UNSAFE
  - è condizione necessaria *ma non sufficiente* per avere deadlock
  - i.e., un sistema in uno stato UNSAFE può evolvere senza procurare alcun deadlock

Algoritmo del banchiere - Situazione iniziale

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	150

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo
i	c_i	p_i	n_i
1	100	0	100
2	20	0	20
3	30	0	30
4	50	0	50
5	70	0	70

Algoritmo del banchiere - Esempio stato SAFE

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	0

la sequenza 3,2,1,4,5 consente il soddisfacimento di tutte le richieste

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo
i	c_i	p_i	n_i
1	100	70	30
2	20	10	10
3	30	30	0
4	50	10	40
5	70	30	40

Algoritmo del banchiere

- Regola pratica (per il banchiere a singola valuta)
  - lo stato SAFE può essere verificato usando la sequenza che ordina in modo crescente i valori di ni
  - infatti, se esiste una sequenza di verificare la safety di uno stato, sicuramente anche la sequenza che ordina i valori di ni consente di fare altrettanto

Algoritmo del banchiere - Stato SAFE

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	0

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo	
i	c_i	p_i	n_i	avail[i]
3	30	30	0	0
2	20	10	10	30
1	100	70	30	40
4	50	10	40	110
5	70	30	40	120

la sequenza 3,2,1,4,5 consente il soddisfacimento di tutte le richieste

Algoritmo del banchiere - Esempio Stato UNSAFE

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	10

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo
i	c_i	p_i	n_i
1	100	65	35
2	20	10	10
3	30	5	25
4	50	15	35
5	70	35	35

Algoritmo del banchiere - Stato UNSAFE

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	10

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo
i	c_i	p_i	n_i
2	20	10	10
3	30	5	*25*
1	100	65	*35*
5	70	35	35
4	50	15	35

avail[i]
10
20
25
100
135

se esistesse una sequenza, questa sarebbe 2,3,1,5,4

in corsivo sono indicati i casi nei quali la condizione di safety fallisce

Algoritmo del banchiere - Stato UNSAFE

Capitale Iniziale	IC	150

Saldo di cassa	COH	0

Cliente	MAX	Prestito Attuale	Credito residuo	
i	c_i	p_i	n_i	avail[i]
2	20	10	10	45
3	30	5	25	55
1	100	75	35	60
4	50	15	35	135
5	70	0	70	150

UNSAFE non implica deadlock

se il cliente 5 restituisce il suo prestito di 35 euro la situazione ritorna SAFE

Algoritmo del banchiere

- La similitudine fra banchieri e sistemi operativi ora è chiara...
  - il denaro sono le risorse
  - il sistema le deve allocare ai processi senza che si possa verificare deadlock
  - le definizioni viste fino a questo punto riguardano il caso teorico elementare di un sistema avente un'unica classe di risorse
- Algoritmo del banchiere multivaluta
  - è l'estensione del problema del banchiere
  - si ipotizza che il banchiere debba fare prestiti usando valute diverse (euro, dollari, yen, etc.)
  - le diverse valute rappresentano diverse classi di risorse

Algoritmo del banchiere multivaluta

- N: numero dei clienti
- $\overline{\mathbf{IC}}$: capitale iniziale *(vettore, un elemento per ogni valuta)*
- $\overline{\mathbf{c}}_i$: **limite di credito del cliente *i*** ($\overline{\mathbf{c}}_i \leq \overline{IC}$)
- $\overline{p}_i$: denaro prestato al cliente *i* ($\overline{p}_i \leq \overline{c}_i$)
- $\overline{\mathbf{n}}_i = \overline{\mathbf{c}}_i - \overline{p}_i$ credito residuo del cliente *i*
- $\overline{\mathbf{COH}} = \overline{\mathbf{IC}} - \sum_{i=1..N} \overline{p}_i$
  saldo di cassa in valuta k

Algoritmo del banchiere multivaluta

- Definizione: *Stato SAFE*
  - sia *s* una permutazione dei valori *1...N*
    - esempio, con *N=4: s = <1 , 3 , 4 , 2>*
    - indichiamo con *s(i)* l'i-esima posizione della sequenza
  - si calcoli il vettore $avail_k$ come segue

    $\overline{avail[1]} = \overline{COH}$

    $\overline{avail[j+1]} = \overline{avail[j]} + \overline{p}_{s(j)}$, *con j=1...N-1*
  - uno stato del sistema si dice safe se vale la seguente condizione:

    $\overline{n}_{s(j)} \leq \overline{avail[j]}$, *con j=1...N*

Algoritmo del banchiere multivaluta

- Problema
  - la regola di ordinare i processi secondo i valori di n_i non è applicabile
  - l'ordine può essere in generale diverso fra le diverse valute gestite dal banchiere
- Soluzione
  - si può creare la sequenza procedendo passo passo aggiungendo un processo a caso fra quelli completamente soddisfacibili
  - ovvero, al passo j si sceglie quelli per cui

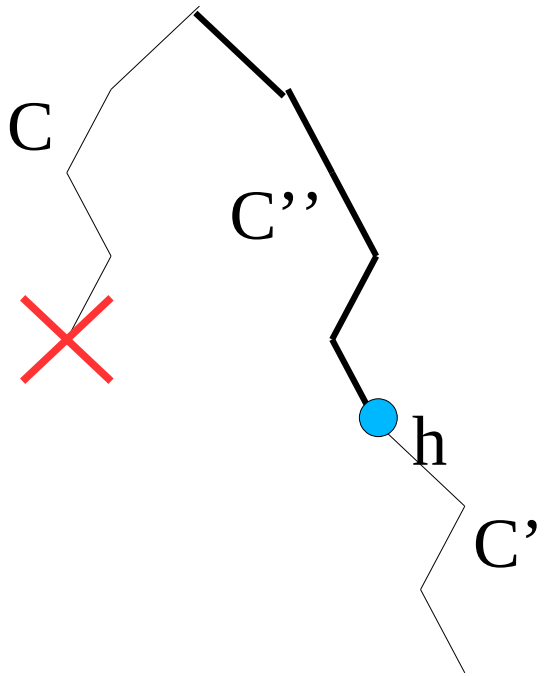
$$n_{s(j)} \leq avail[j]$$

Teorema dell'algoritmo del banchiere

- Teorema
  - se durante la costruzione della sequenza *s* si giunge ad un punto in cui nessun processo risulta soddisfacibile, lo stato non è SAFE, i.e. non esiste alcuna sequenza che consenta di soddisfare tutti i processi
- Dimostrazione
  - per assurdo
  - supponiamo che lo stato sia SAFE, ovvero che esista la sequenza che consente di soddisfare tutti i processi
  - sia C la sequenza interrotta e C' la sequenza che porta allo stato SAFE

Teorema dell'algoritmo del banchiere

Siano *C* e C' le sequenze di processi come in figura



Sia $H=\{ p \in processi \mid p \notin C \}$

sia *h* il primo elemento di *H* che compare in *C'*

tutti gli elementi di *C'* prima di h compaiono in *C*. Chiamiamo *C''* il segmento iniziale di *C'* fino al punto precedente l'applicazione di *h*

le risorse disponibili all'applicazione di *h* in *C'* sono $avail(C'')=COH+ \sum_{j \in C''} p_j$; *h* è applicabile quindi $n \leq avail(C'')$

ma $avail(C)=COH+ \sum_{j \in C} p_j$, quindi se $avail(C) \leq avail(C'')$ allora *h* è applicabile alla fine di C contro l'ipotesi che C non fosse ulteriormente estendibile

Algoritmo dello struzzo

- Algoritmo
  - nascondere la testa sotto la sabbia, ovvero fare finta che i deadlock non si possano mai verificare
- Motivazioni
  - dal punto di vista ingegneristico, il costo di evitare i deadlock può essere troppo elevato
- Esempi
  - è la soluzione più adottata nei sistemi Unix
  - è usata anche nelle JVM