

Sisteme de Operare

Sincronizarea proceselor – partea I

Cristian Vidrașcu

<http://www.info.uaic.ro/~vidrascu>

- Introducere
- Problema secțiunii critice
 - Enunțul problemei și cerințele de rezolvare
 - Soluții pentru cazul a 2 procese
 - Soluții pentru cazul a $n > 2$ procese
 - Soluții hardware
 - Semafoare
- Interblocajul și înfometarea
- Probleme clasice de sincronizare
 - Problema Producător-Consumator
 - Problema Cititori și Scriitori
 - Problema Cina Filozofilor
 - Problema Bărbierului Adormit
- Monitoare

- Procesarea concurentă este fundamentul sistemelor de operare multiprogramate
- Pentru a asigura execuția ordonată, sistemul de operare trebuie să ofere mecanisme pentru sincronizarea și comunicația proceselor

➤ “race conditions”:

Uneori procesele cooperante pot partaja un spațiu de stocare pe care fiecare proces îl poate citi și scrie (acest spațiu comun poate fi e.g. o zonă în memoria principală, ori un fișier pe disc).

În acest context, rezultatul final al execuției acelor procese poate depinde nu numai de datele de intrare, ci și de “cine execută exact ce anume și când anume” (i.e. de ordinea exactă de execuție a instrucțiunilor atomice ale acelor procese).

Asemenea situații sunt numite “race conditions”.

Introducere

➤ Exemplu de “race condition”:

Două procese A și B care partajează o variabilă v , inițializată cu valoarea 0. Procesul A execută operația $v:=v+1$, iar B execută operația $v:=v-1$. Rezultatul firesc al execuției celor două procese ar fi ca variabila v să aibă în final tot valoarea 0.

Cele două operații constau de fapt din următoarele secvențe de instrucțiuni atomice (în limbaj mașină):

```
A: LD   reg, adr_v  
    INC reg  
    ST   reg, adr_v
```

```
B: LD   reg, adr_v  
    DEC reg  
    ST   reg, adr_v
```

Dacă ambele instrucțiuni Load sunt executate înaintea ambelor instrucțiuni Store, atunci rezultatul final este eronat.

Introducere

➤ Cum evităm “race conditions” ?

Ideea de evitare a acestor situații, ce sunt nedorite în orice context ce implică memorie partajată, fișiere partajate, sau orice alt fel de resursă partajată, constă în a găsi o cale de a împiedica să avem mai mult de un singur proces, în același timp, care să citească sau să scrie resursa partajată.

Introducere

- Cum evităm “race conditions” ? (cont.)

Cu alte cuvinte, avem nevoie de **excludere mutuală**, adică de o tehnică care să ne garanteze că dacă un proces utilizează o resursă partajată, atunci toate celelalte procese vor fi împiedicate să o utilizeze.

Notă: alegerea operațiilor primitive adecvate pentru realizarea excluderii mutuale este o problemă de proiectare majoră pentru fiecare sistem de operare, pe care o vom studia în continuare.

Problema Secțiunii Critice

- Enunțul problemei secțiunii critice
- Cerințele de rezolvare
- Soluții pentru cazul a 2 procese
- Soluții pentru cazul a N procese
- Soluții concrete (cu instrucțiuni hardware specializate)
- Semafoare

Problema Secțiunii Critice

Enunțul problemei secțiunii critice:

- Avem n procese P_i , $i=0, \dots, n-1$, cu viteze de execuție necunoscute
- Fiecare proces are o zonă de cod, numită **secțiune critică (SC)**, în care efectuează diverse operații asupra unei resurse partajate
- Execuția secțiunilor critice de către procese trebuie să se producă **mutual exclusiv** în timp: la orice moment de timp cel mult un proces să se afle în SC proprie
- Oprirea oricărui proces are loc numai în afara SC
- Fiecare proces trebuie să ceară permisiunea să intre în secțiunea lui critică. Secvența de cod ce implementează această cerere este numită **secțiunea de intrare**
- Secțiunea critică poate fi urmată de o **secțiune de ieșire**
- Restul codului din fiecare proces este **secțiunea rest**

Problema Secțiunii Critice

Soluția problemei secțiunii critice trebuie să satisfacă următoarele 3 cerințe:

- **Excluderea mutuală** – dacă procesul P_i execută instrucțiuni în SC proprie, atunci nici un alt proces nu poate executa în propria SC.
- **Progresul** – dacă nici un proces nu execută în SC proprie, și există unele procese care doresc să intre în propriile lor SC, atunci numai acele procese care nu execută în secțiunile lor rest pot participa la luarea deciziei care va fi următorul proces ce va intra în SC proprie, iar aceasta selecție nu poate fi amânată la infinit.
- **Așteptarea limitată** – trebuie să existe o limită a numărului de permisiuni acordate altor procese de a intra în SC proprii, între momentul când un proces a cerut accesul în propria SC și momentul când a primit permisiunea de intrare.

Problema Secțiunii Critice

Opțiuni de implementare a excluderii mutuale:

- **Dezactivarea întreruperilor**

(posibilă doar pentru sistemele uniprocessor și eficientă doar pentru secvențe critice scurte)

- **Soluții de așteptare ocupată**

- execută o buclă while de așteptare dacă SC este ocupată
- folosirea unor instrucțiuni atomice specializate

- **Sincronizare blocantă**

- sleep (inserarea în coada de așteptare) cât timp SC este ocupată

Primitivele de sincronizare (diverse abstracții, precum lacătele pe fișiere), ce sunt puse la dispoziție de un sistem, pot fi implementate prin aceste tehnici sau prin combinații ale unora dintre aceste tehnici.

Problema Secțiunii Critice

Un șablon tipic de proces:

repeat

secțiunea de intrare

secțiunea critică

secțiunea de ieșire

secțiunea rest

forever

Problema Secțiunii Critice

Soluții pentru cazul a $n=2$ procese:

- Două procese P_0 și P_1 ce execută fiecare într-o buclă infinită câte un program ce constă din două secțiuni: secțiunea critică c_0 , respectiv c_1 , și restul programului – secțiunea necritică r_0 , respectiv r_1 . Execuția secțiunilor c_0 și c_1 nu trebuie să se suprapună în timp.
- Când se va prezenta procesul P_i , se va utiliza P_j pentru a ne referi la celălalt proces ($j=1-i$).

Problema Secțiunii Critice

Soluția 1 (o primă idee de rezolvare)

- Cele două procese vor partaja o variabilă întreagă comună **turn** inițializată cu 0 (sau cu 1).
- Dacă **turn = i**, atunci procesul P_i este cel căruia i se permite să-și execute SC.

Problema Secțiunii Critice

Soluția 1

repeat

while turn \neq i **do** *nothing*;

secțiunea critică

turn := j;

secțiunea rest

forever

Așteptare ocupată



Problema Secțiunii Critice

Soluția 1 **este incompletă !**

- Motivul: această soluție satisface condițiile de excludere mutuală și de așteptare limitată, în schimb cerința de progres nu este îndeplinită (e.g., dacă **turn=0** și procesul P_1 este gata să intre în SC proprie, nu poate face aceasta, chiar dacă procesul P_0 este în secțiunea sa rest).

```
P0:  
repeat  
  while turn ≠ 0 do nothing;  
  secțiunea critică  
  turn := 1;  
  secțiunea rest  
forever
```

```
P1:  
repeat  
  while turn ≠ 1 do nothing;  
  secțiunea critică  
  turn := 0;  
  secțiunea rest  
forever
```


Problema Secțiunii Critice

Soluția 2 (o a doua idee de rezolvare)

- Variabila comună **turn** este înlocuită cu un tablou comun **flag[]**, inițializat cu valoarea false:
flag[0] = false , **flag[1] = false** .
- Prin **flag[i] = true** se indică faptul că procesul P_i dorește să-și execute SC.

Problema Secțiunii Critice

Soluția 2

repeat

flag[i] := true;

while flag[j] **do** *nothing*;

secțiunea critică

flag[i] := false;

secțiunea rest

forever

Așteptare ocupată



Problema Secțiunii Critice

Solutia 2 **este incompletă !**

- Motivul: condițiile de excludere mutuală și de așteptare limitată sunt satisfacute, în schimb cerința de progres nu este îndeplinită
[soluția e dependentă de *timing*-ul (i.e. sincronizarea) proceselor]

```
P0:  
repeat  
  flag[0] := true;  
  while flag[1] do nothing;  
  secțiunea critică  
  flag[0] := false;  
  secțiunea rest  
forever
```

```
P1:  
repeat  
  flag[1] := true;  
  while flag[0] do nothing;  
  secțiunea critică  
  flag[1] := false;  
  secțiunea rest  
forever
```



Problema Secțiunii Critice

Soluția 3 (completă !) (Peterson '81)

- Este o combinație a soluțiilor 1 și 2.
- Procesele partajează variabila `turn` și tabloul `flag[]`.
- Inițializări: `flag[0] = flag[1] = false`, `turn = 0` (sau `1`).
- Pentru a intra în SC, procesul P_i setează `flag[i] = true` și apoi îi dă voie celui alt proces P_j să intre în propria sa SC, dacă dorește acest lucru (`turn = j`).
- Dacă ambele procese doresc să intre în același timp, valoarea lui `turn` va decide căruia dintre cele două procese îi este permis să intre primul în SC proprie.
- Istoric, prima soluție completă e cea datorată lui Dekker ('65)

Problema Secțiunii Critice

Solutia 3

repeat

flag[i] := true;

turn := j;

while (flag[j] **and** turn=j)

do *nothing*;

secțiunea critică

flag[i] := false;

secțiunea rest

forever

Așteptare ocupată



Problema Secțiunii Critice

Soluția 3 **este corectă și completă !** Justificare:

– Motivul #1: condiția de excludere mutuală este satisfăcută. Într-adevăr:

Fiecare proces P_i intră în SC proprie doar dacă fie $flag[j]=false$, fie $turn=i$. Dacă ambele procese ar putea să execute în SC proprie în același timp, atunci am avea $flag[0]=flag[1]=true$. Aceasta înseamnă că P_0 și P_1 nu ar fi putut să-și execute cu succes instrucțiunile *while* proprii în același timp.

Problema Secțiunii Critice

Soluția 3 **este corectă și completă !** Justificare:

- Motivul #2: condițiile de progres și de așteptare limitată sunt satisfăcute. Într-adevăr:

```
P0:  
repeat  
    flag[0] := true;  
    turn := 1;  
    while (flag[1] and turn=1)  
        do nothing;  
    secțiunea critică  
    flag[0] := false;  
    secțiunea rest  
forever
```



```
P1:  
repeat  
    flag[1] := true;  
    turn := 0;  
    while (flag[0] and turn=0)  
        do nothing;  
    secțiunea critică  
    flag[1] := false;  
    secțiunea rest  
forever
```

Problema Secțiunii Critice

Soluția 3 **este corectă și completă !** Justificare:

– Motivul #2 (cont.):

Un proces P_i poate fi împiedicat să intre în SC (i.e., să **progreseze**) doar dacă este blocat în bucla *while*. În acest caz, dacă P_j nu-i gata să intre în SC, atunci **flag[j]=false** și P_i poate intra în SC proprie.

Dacă însă P_j a setat deja **flag[j]=true** și-și execută și el bucla *while*, atunci avem **turn=i** sau **turn=j**. Dacă **turn=i**, atunci P_i va intra în SC.

Dacă însă **turn=j**, atunci P_j va intra în SC, iar după ce P_j va ieși din SC, își va reseta **flag[j]** la **false**, permițându-i lui P_i să intre în SC.

Aceasta deoarece, chiar dacă apoi P_j setează **flag[j]** la **true** pentru a intra din nou în SC, el va seta de asemenea și **turn=i**. Astfel, P_i va termina bucla *while* și va intra în SC (**progres**) după cel mult o intrare a lui P_j în SC (**așteptare limitată**).

Problema Secțiunii Critice

Prima soluție corectă și completă: Dekker '65

- Inițial propusă de Dekker într-un context diferit, a fost aplicată de Dijkstra pentru rezolvarea problemei SC.
- Dekker a adus ideea unui proces favorit și a permiterii accesului în SC a oricărui dintre procese în cazul când o cerere de acces este necontestată de celălalt
- În schimb, dacă este un conflict (i.e. ambele procese vor să intre simultan în SC-urile proprii), unul dintre procese este favorizat, iar prioritatea se inversează după execuția cu succes a SC.
- Procesele partajează variabila `turn` și tabloul `flag[]`.
- Inițializări: `flag[0] = flag[1] = false`, `turn = 0` (sau `1`).

Problema Secțiunii Critice

repeat

flag[i] := true;

while (flag[j]) **do**

if (turn=j) **then begin**

 flag[i] := false;

while (turn=j) **do nothing;**

 flag[i] := true;

end

secțiunea critică

turn := j;

flag[i] := false;

secțiunea rest

forever

Așteptare ocupată



Temă:
demonstrați
corectitudinea
acestui algoritm.

Problema Secțiunii Critice

Soluții pentru procese multiple:

- Trebuie dezvoltați algoritmi diferiți de cei anteriori pentru a rezolva problema secțiunii critice pentru cazul a n procese ($n > 2$)

Problema Secțiunii Critice

Soluția 1 (Eisenberg & McGuire '72)

(Prima soluție corectă, fiind o generalizare a soluției lui Peterson)

- Structurile de date comune (partajate de cele n procese) sunt variabila $turn$ și tabloul $flag[]$, cu $turn \in \{0, 1, \dots, n-1\}$,
 $flag[i] \in \{idle, want-in, in-cs\}$, $0 \leq i \leq n-1$.
- Inițializări:
 $flag[i] = idle$, $0 \leq i \leq n-1$, și
 $turn = 0$ (sau orice valoare între 0 și $n-1$).

Problema Secțiunii Critice

```
var k:0..n;
```

```
repeat
```

```
  repeat
```

```
    flag[i] := want-in;
```

```
    k := turn;
```

```
    while k ≠ i do
```

```
      if flag[k]=idle then k := (k + 1) mod n;
```

```
      else k := turn;
```

```
    flag[i] := in-cs;
```

```
    k := 0;
```

```
    while (k<n) and (k=i or flag[k]≠in-cs) do k := k + 1;
```

```
  until (k≥n) and (turn=i or flag[turn]=idle);
```

```
  turn := i;
```

```
  secțiunea critică
```

```
  k := (turn + 1) mod n;
```

```
  while (flag[k]=idle) do k := (k + 1) mod n;
```

```
  turn := k;
```

```
  flag[i] := idle;
```

```
  secțiunea rest
```

```
forever
```

Soluția 1

Temă:
demonstrați
corectitudinea
acestui algoritm.

Problema Secțiunii Critice

Soluția 2 – Algoritmul brutarului (Lamport '74)

- La intrarea în magazin, fiecare client primește un număr de ordine.
- Clientul cu cel mai mic număr este servit primul.
- Dacă P_i și P_j primesc același număr și dacă $i < j$, atunci P_i este servit primul.
- Algoritmul este deterministic
(numele proceselor sunt unice și total ordonate).

Problema Secțiunii Critice

Soluția 2 – Algoritmul brutarului (bakery alg.)

- Structurile de date comune (partajate de cele n procese) sunt tablourile `choosing[]` și `number[]`.
- Inițializări: `choosing[i] = false` , `number[i] = 0`.
- Notatii:
 - $(a,b) < (c,d)$ dacă $a < c$ sau ($a = c$ și $b < d$) ;
 - $\max(a_0, \dots, a_{n-1})$ = un număr k astfel încât
 $k \geq a_i$, pentru $i=0, \dots, n-1$.

Problema Secțiunii Critice

Soluția 2 – Algoritmul brutarului (bakery alg.)

repeat

 choosing[i] := true;

 number[i] := max(number[0], ..., number[n-1]) + 1;

 choosing[i] := false;

for j := 0 **to** n-1 **do begin**

while choosing[j] **do** *nothing*;

while number[j] ≠ 0 **and**

 (number[j], j) < (number[i], i) **do** *nothing*;

end

secțiunea critică

 number[i] := 0;

secțiunea rest

forever

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (1)

- Instrucțiunea atomică specializată **Test-and-Set**

Semantica ei (în pseudo-cod):

```
function Test-and-Set (var target: boolean): boolean;  
begin  
    Test-and-Set := target;  
    target := true;  
end;
```

Exemplu: majoritatea arhitecturilor de calcul multiprocesor posedă o instrucțiune de tipul

`TSL reg, adr`

e.g. pentru μ P Intel x86 avem instrucțiunea

`lock bts op1, op2`

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (1)

- n procese; variabila comună **lock**, inițializată cu false.

repeat

while Test-and-Set (*lock*)

do *nothing*;

secțiunea critică

lock := false;

secțiunea rest

forever

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (2)

- Instrucțiunea atomică specializată **Swap**

Semantica ei (în pseudo-cod):

```
procedure Swap (var a, b: boolean);  
var temp: boolean;  
begin  
    temp := a;  
    a := b;  
    b := temp;  
end;
```

Exemplu: pentru μP Intel x86 avem instrucțiunea

xchg *op1, op2*

unde operanzii sunt doi regiștri, sau un registru și o adresă de memorie.

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (2)

- n procese; variabila comună **lock**, inițializată cu false.

```
var key:boolean;    // variabila locală key
```

```
repeat
```

```
    key := true;
```

```
    repeat
```

```
        Swap(lock, key);
```

```
    until key = false;
```

```
    secțiunea critică
```

```
    lock := false;
```

```
    secțiunea rest
```

```
forever
```

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (3)


- *Notă*: soluțiile anterioare satisfac condițiile de excludere mutuală și de progres, dar nu îndeplinesc și cerința de așteptare limitată.
- O soluție **completă** folosind **Test-and-Set** (sau **Swap**) :
 - n procese;
 - variabila comună **lock**, inițializată cu false, și vectorul comun **waiting**[0.. $n-1$] , inițializat cu false
 - limita de așteptare: $n-1$

Problema Secțiunii Critice

Soluții hardware (3)

```
var j:0..n-1; key:boolean;  
repeat  
    waiting[i]:=true;  
    key:=true;  
    while waiting[i] and key do key:=Test-and-Set(lock);  
    waiting[i]:=false;  
    secțiunea critică  
    j:=i+1 mod n;  
    while j≠i and not waiting[j] do j:=j+1 mod n;  
    if j=i then lock:=false;  
        else waiting[j]:=false;  
    secțiunea rest  
forever
```

Sau : ... **do** *Swap(key, lock);*



Temă:
demonstrați
corectitudinea
acestui algoritm.

Problema Secțiunii Critice

Soluții concrete: Semafoarele

- Concept introdus de E.W. Dijkstra
- Un **semafor** S este o variabilă întreagă care este accesată (exceptând operația de inițializare) numai prin intermediul a două operații standard, atomice:
 - operația P sau **wait()** (*proberen* = a testa), și
 - operația V sau **signal()** (*verhogen* = a incrementa).
- Semantica operației **wait(S)** :
 $\text{while } S \leq 0 \text{ do nothing; } S := S - 1;$
- Semantica operației **signal(S)** : $S := S + 1;$

Problema Secțiunii Critice

Excluderea mutuală implementată cu semafoare

- Problema SC cu n procese; variabila comună **mutex** este un semafor binar (i.e, semafor inițializat cu 1).

repeat

`wait(mutex) ;`

secțiunea critică

`signal(mutex) ;`

secțiunea rest

forever

Problema Secțiunii Critice

Semafoare – implementare la nivelul SO:

- Semafoarele pot suspenda și reporni procese/thread-uri, pentru a evita *așteptarea ocupată* (i.e. risipa de cicli CPU)
- Semaforul se definește ca un articol:

```
typedef struct {  
    int value;  
    struct thread *ListHead;  
} semaphore;
```

- Se consideră următoarele 2 operații:

`suspend()` : suspendă execuția thread-ului care-l apelează
`resume(T)` : reia execuția unui thread T blocat anterior
(printr-un apel `suspend()`)

Problema Secțiunii Critice

Semafoare – implementare la nivelul SO:

– Cele 2 operații atomice cu semafoare se definesc atunci astfel:

1) operația ***wait(S)*** :

```
S.value--;  
if (S.value < 0) {  
    add this thread to S.ListHead;  
    suspend();  
}
```

2) operația ***signal(S)*** :

```
S.value++;  
if (S.value <= 0) {  
    remove a thread T from S.ListHead;  
    resume(T);  
}
```

Problema Secțiunii Critice

Semafoare – implementare la nivelul SO:

- mai multe detalii de implementare în S.O.-urile moderne: a se citi, de exemplu, §6.5.2, pag. 227-230, din Silberschatz: “*Operating System Concepts*”, ediția 8 [OSCE8]
- La nivelul aplicațiilor, semafoarele pot fi simulate prin diverse entități logice (e.g. fișiere, canale fifo, semnale, ș.a.)
- Biblioteca IPC (introdusă în UNIX System V) permite lucrul cu semafoare în aplicații (inclusiv în Linux)

Problema Secțiunii Critice

Semafoare – utilizare

- Pot fi folosite pentru a rezolva diverse probleme de sincronizare între procese
- Ex: execută B în P_2 numai după ce s-a executat A în P_1
- Soluție: folosim un semafor *flag* inițializat cu 0

P_1 :

.....

A

signal(*flag*);

.....

P_2 :

.....

wait(*flag*);

B

.....

Problema Secțiunii Critice

Semafoare – utilizare (cont.)

– Putem clasifica semafoarele în 2 tipuri:

- **Semafoarele binare** (i.e., semafoare inițializate cu valoarea 1) **pot asigura excluderea mutuală** (e.g., pot soluționa problema secțiunii critice)
- **Semafoarele generale** (i.e., semafoare inițializate cu valoarea $n > 1$) **pot reprezenta o resursă cu instanțe multiple** (i.e., cu n instanțe) (e.g., pot soluționa problema producător-consumator)

Interblocajul și înfometarea

- **Interblocajul** (*deadlock*)
 - O situație în care două sau mai multe procese așteaptă pe termen nelimitat producerea câte unui eveniment (e.g., execuția unei operații signal pe un semafor), eveniment ce ar putea fi cauzat doar de către unul dintre celelalte procese ce așteaptă.
 - Aceste procese se spune că sunt **interblocate**.
- **Blocajul nelimitat** sau **înfometarea** (*starvation*)
 - O situație în care un(ele) proces(e) așteaptă nelimitat (e.g., la un semafor: procesul ar putea sta suspendat în coada de așteptare asociată acelui semafor pe termen nelimitat).

Interblocajul si infometarea

- **Interblocajul** (*deadlock*)

- Exemplu: 2 procese folosesc 2 semafoare binare S și Q (i.e. inițializate cu 1) în ordinea de mai jos:

P_1 :	P_2 :
<code>wait(S);</code>	<code>wait(Q);</code>
<code>wait(Q);</code>	<code>wait(S);</code>
.....
<code>signal(S);</code>	<code>signal(Q);</code>
<code>signal(Q);</code>	<code>signal(S);</code>

Se observă că este posibil să apară interblocaj. În ce situație apare? (specificați un scenariu de execuție care duce la interblocaj)

Soluție: ambele programe ar trebui să execute operațiile wait() pe cele două semafoare în aceeași ordine !

Probleme clasice de sincronizare

- Problema Producător-Consumator
(Producer-Consumer or Sender-Receiver problem)
- Problema Cititori și Scriitori
(Readers and Writers problem)
- Problema Cina Filozofilor
(Dining-Philosophers problem)
- Problema Bărbierului Adormit
(Sleeping Barber problem)

(va urma)

- **Bibliografie obligatorie**

capitolele despre *sincronizarea proceselor* din

- Silberschatz : “*Operating System Concepts*”

(cap.6 din [OSCE8])

sau

- Tanenbaum : “*Modern Operating Systems*”

(a treia parte a cap.2 din [MOS3])

- Introducere
 - Problema secțiunii critice
 - Enunțul problemei și cerințele de rezolvare
 - Soluții pentru cazul a 2 procese
 - Soluții pentru cazul a $n > 2$ procese
 - Soluții hardware
 - Semafoare
 - Interblocajul și înfometarea
- (va urma)
- Probleme clasice de sincronizare
 - Monitoare

Întrebări ?