

Sincronizzazione tra processi e shared memory

Reti di Calcolatori A.A. 2023/24

Prof.ssa Chiara Petrioli - Dipartimento di Ingegneria Informatica, Automatica e Gestionale, Sapienza Università di Roma

Michele Mastrogiovanni - Dipartimento di Ingegneria Informatica

1. Sincronizzazione tra processi

Sincronizzazione tra processi

3

Finora i processi, una volta avviati, hanno eseguito il programma loro assegnato senza tenere conto dello **stato dell'esecuzione altrui**.

La comunicazione tra processi può essere considerata efficace se questi si trovano nello **stato adeguato**:

- Anonymous / named pipes
Necessità dell'altro processo sull'**estremità opposta** di una pipe, altrimenti deadlock; operazioni bloccanti
- Socket Unix
Fallimento delle operazioni se l'altro processo non è disponibile; operazioni sia bloccanti che non
- Message queue
Comunicazioni sia bloccanti che non; **più processi** sia in lettura che scrittura su una stessa queue

Operazioni **non bloccanti** → importanza critica assicurarsi che i dati inviati siano effettivamente ricevuti

Sincronizzazione tra processi

4

Negli esempi di multi-processing visti:

- IPC bloccante
 - Con le pipes non ci sono alternative
 - Socket e message queues bloccanti
- Cooperazione tra processi limitata
 - Solo trasmissione dati
 - Un processo in attesa di dati necessari non può proseguire

Vera utilità del multi-processing:

- Risolvere **sotto-problemi indipendenti** di un problema comune
- Risolvere **parzialmente** un problema (ad es. a livello **locale**) in vista di un ricongiungimento di tutte le soluzioni parziali

Sincronizzazione tra processi: semafori Unix

5

Per sfruttare a pieno il multi-processing quindi è necessario **condividere risorse** (ad es. dati comuni) e **controllarne l'accesso** da parte dei processi.

I meccanismi di IPC visti finora possono essere usati per implementare il controllo dell'accesso, e generalmente più di 2 processi possono accedere in parallelo alle risorse.

Semaforo Unix

- È un contatore con garanzie di **atomicità**: leggere o aggiornare il valore del contatore è considerata una singola operazione
- L'accesso atomico al valore del semaforo assicura ad un processo che **nessun'altra operazione** possa **interferire** (ad es. leggere se il valore è pari ad 1 ed incrementarlo a 2)
- Più processi con accesso allo **stesso semaforo** possono quindi accedere senza equivoci ad una risorsa condivisa

Semafori Unix

6

Un processo implementa l'accesso ad una risorsa sfruttando un semaforo nel seguente modo:

1. Controlla il valore del semaforo
2. Se il valore è **positivo** → può **accedere** alla risorsa
 - a. Decrementa di 1 il contatore → "una unità" della risorsa non è più disponibile perché attualmente in uso
3. Se il valore è **zero** → **blocca l'esecuzione** ed **attende** che la risorsa si liberi
 - a. Un processo esce dall'attesa tramite un segnale inviato sul semaforo
 - b. Una volta ripresa l'esecuzione, il processo torna al **punto 1**
4. Se ha avuto **accesso** alla risorsa ed ha terminato l'uso:
 - a. Incrementa il contatore di 1 → "una unità" della risorsa è tornata disponibile per altri processi
 - b. Eventuali processi in attesa saranno risvegliati e potranno **tentare l'accesso** alla risorsa condivisa

L'**ordine di accesso** alla risorsa **non è specificato**: un processo che ha rilasciato una risorsa potrebbe riacquisirla immediatamente, facendo andare di nuovo in attesa un processo svegliato appositamente per tentare l'accesso.

Uso di semafori Unix

7

Librerie: `sys/types.h`, `sys/ipc.h`, `sys/sem.h`

- `int semget(key_t key, int nsems, int semflg)`
Crea o accede ad un semaforo, molto simile ad una message queue: **identificatore** del semaforo (`key`), il numero di semafori da creare (`nsems`, tipicamente 1) ed alcune flag (sono accettate le stesse di `open`: permessi Unix ecc.)
Analogamente alle message queue, `IPC_PRIVATE` può essere fornito come chiave per autonomamente creare un semaforo da condividere con **child processes**; in alternativa si può usare `ftok` su un file noto ai processi che devono condividere il semaforo. **Valori di ritorno**: ID del semaforo se l'operazione ha successo, in alternativa -1

In realtà `semget` viene usata per ottenere un **“insieme di semafori”** (semaphore set):

- Raggruppa **più di un semaforo** in un'unica struttura
- Un processo può sfruttare l'insieme di semafori per implementare **transazioni**
- In questo contesto, per transazione si intende un **insieme di operazioni su uno o più semafori** di uno stesso insieme; **tutte** devono essere eseguite con **successo**, oppure **nessuna** viene effettivamente svolta

Uso di semafori Unix

8

➤ `int semctl(int semid, int semnum, int cmd, ...)`

Permette l'esecuzione di **vari comandi** sul semaforo: per ogni comando viene garantita l'**atomicità** della sua esecuzione.

Il comando `cmd` viene eseguito sul semaforo identificato dalla **coppia** `semid` e `semnum`: rispettivamente l'ID del semaphore set ed il numero dell'effettivo semaforo nell'insieme. Tipicamente viene usata per l'**inizializzazione** dei semafori tramite il comando `SETVAL`, e l'ultimo argomento (...) rappresenta il valore da usare.

Valore di ritorno: interpretazione **dipende da** `cmd`; in caso di errori -1

```
1 union semun {
2   int val;
3   struct semid_ds *buf;
4   unsigned short *array;
5   struct seminfo *__buf;
6 };
```

Deve essere **definita** nel programma
che invoca `semctl`: analogo a `msgbuf`
per le message queue

```
1 struct semid_ds {
2   struct ipc_perm sem_perm;
3   time_t sem_otime;
4   time_t sem_ctime;
5   unsigned long sem_nsems;
6 };
```

struct già
definite

```
1 struct ipc_perm {
2   key_t __key;
3   uid_t uid;
4   gid_t gid;
5   uid_t cuid;
6   gid_t cgid;
7   unsigned short mode;
8   unsigned short __seq;
9 };
```


Uso di semafori Unix

9

➤ `int semctl(int semid, int semnum, int cmd, ...)`

Permette l'esecuzione di **vari comandi** sul semaforo: per ogni comando viene garantita l'**atomicità** della sua esecuzione.

Il comando `cmd` viene eseguito sul semaforo identificato dalla **coppia `semid` e `semnum`**: rispettivamente l'ID del semaphore set ed il numero dell'effettivo semaforo nell'insieme. Tipicamente viene usata per l'**inizializzazione** dei semafori tramite il comando `SETVAL`, e l'ultimo argomento (...) rappresenta il valore da usare.

Valore di ritorno: interpretazione **dipende da `cmd`**; in caso di errori -1

```
1 union semun {  
2   int val;  
3   struct semid_ds *buf;  
4   unsigned short *array;  
5   struct seminfo *__buf;  
6 };
```

Valore per il contatore del semaforo, da usare con comando `SETVAL`

Usati per altri comandi

Deve essere definita nel programma che invoca `semctl`: analogo a `msgbuf` per le message queue

Uso di semafori Unix

10

➤ `int semop(int semid, struct sembuf *sops, size_t nsops)`

Usata per gestire l'accesso da parte dei processi ad una risorsa condivisa.

In realtà esegue atomicamente un **array di operazioni** sul semaphore set il cui

ID è `semid`; l'array è rappresentato dal puntatore `sops` e la dimensione dell'array è specificata da `nsops`.

Ogni **operazione** su semaforo è rappresentata da una variabile di tipo `struct sembuf`:

- `sem_num` → Numero del semaforo all'interno del semaphore set
- `sem_flg` → Flag relative all'operazione
- `sem_op` → Valore dipende dal tipo di operazione:
 - **Positivo** → **Rilascio** di risorse: viene sommato al contatore
 - **Negativo** → **Richiesta** di risorse: se maggiore del contatore, il processo va in **attesa**
 - `0` → Processo in **attesa** che il contatore diventi 0

— Non entra in attesa se viene specificata la flag `IPC_NOWAIT`

```
1 struct sembuf {  
2     unsigned short sem_num;  
3     short          sem_op;  
4     short          sem_flg;  
5 };
```

} struct già
definita

Uso di semafori Unix

11

Main: creazione e inizializzazione semaforo, setup processi

```
1 int main(){
2     signal(SIGCHLD, handle_sigchld);
3
4     // Creazione di un semaphore set con 1 solo semaforo
5     int semset_id = semget(IPC_PRIVATE, 1, IPC_CREAT | 0600);
6     if(-1 == semset_id){
7         perror("Error during semaphore creation");
8         exit(1);
9     }
10
11    // Definizione struct per inviare comandi ai semafori
12    union semun {
13        int val;
14        struct semid_ds *buf;
15        unsigned short *array;
16        struct seminfo *__buf;
17    };
18
19    // Inizializzazione del semaforo a 0
20    union semun sem_val = {.val = 0};
21    int n = semctl(semset_id, 0, SETVAL, sem_val);
22    if (-1 == n){
23        perror("Error during semaphore initialization");
24        exit(1);
25    }
```

Il contatore del semaforo è **inizializzato a 0**:
qualsiasi processo voglia accedere alla
risorsa condivisa entrerà in attesa

```
27 pid_t child_pid = fork();
28 switch(child_pid){
29     case -1:{
30         perror("fork() failed");
31         exit(1);
32     }
33
34     case 0:{
35         child_routine(semset_id);
36         exit(0);
37     }
38
39     default: break;
40 }
41
42 // Parent process
43 parent_routine(child_pid, semset_id);
44 return 0;
45 }
```

Creazione dei processi e **condivisione dell'ID** del
semaphore set: completamente analogo alle
message queue

Uso di semafori Unix

12

Child process:

- Richiede l'accesso ad una risorsa condivisa
- Eventualmente entra in attesa
- Una volta che la risorsa è disponibile può proseguire con le proprie operazioni
- Al termine delle operazioni rilascia la risorsa

```
1 void child_routine(int semset_id){
2     // Tenta l'accesso ad "una unità" della risorsa controllata
3     // dal semaforo 0 nel semaphore set
4     struct sembuf sem_op = {0, -1, 0};
5     int n = semop(semset_id, &sem_op, 1);
6     if(-1 == n){
7         perror("Child process failed semaphore operation");
8         exit(1);
9     }
10
11     printf("Child process has had access to the resource!\n");
12     sleep(2);
13
14     // Libera "una unità" della risorsa al termine delle operazioni
15     sem_op.sem_op = 1;
16     n = semop(semset_id, &sem_op, 1);
17     if(-1 == n){
18         perror("Child process failed semaphore operation");
19         exit(1);
20     }
21
22     printf("Child process: exit\n");
23     exit(0);
24 }
```

Uso di semafori Unix

13

Parent process:

- Rende disponibile "un'unità" della risorsa condivisa
- Svolge delle operazioni
- Richiede l'accesso alla risorsa condivisa
- Eventualmente entra in attesa
- Entra in possesso della risorsa una volta disponibile e svolge le proprie operazioni
- Al termine delle operazioni rilascia la risorsa condivisa

```
1 void parent_routine(pid_t child_pid, int semset_id){
2   // Rende disponibile "una unità" della risorsa --> sblocca il child process
3   struct sembuf sem_op = {0, 1, 0};
4   int n = semop(semset_id, &sem_op, 1);
5   if(-1 == n){
6     perror("Parent process failed semaphore operation");
7     kill(child_pid, SIGKILL);
8     exit(1);
9   }
10
11   sleep(1);
12
13   // Tenta l'accesso ad "una unità" della risorsa
14   sem_op.sem_op = -1;
15   n = semop(semset_id, &sem_op, 1);
16   if(-1 == n){
17     perror("Parent process failed semaphore operation");
18     kill(child_pid, SIGKILL);
19     exit(1);
20   }
21
22   printf("Parent process has had access to the resource!\n");
23   sleep(2);
24
25   // Libera "una unità" della risorsa
26   sem_op.sem_op = 1;
27   n = semop(semset_id, &sem_op, 1);
28   if(-1 == n){
29     perror("Parent process failed semaphore operation");
30     exit(1);
31   }
32
33   printf("Parent process: exit\n");
34   exit(0);
35 }
```

Considerazioni sui semafori

14

Vantaggi

- Le risorse gestite da semafori possono essere di ogni tipo
- Facile condivisione di un semaforo: basta l'ID del semaphore set
- Esagerati per semplici accessi mutex → utili invece per realizzare pattern producer-consumer
- Implementazione scala a grande numero di processi locali ed anche **remoti**

Attenzione

- Creazione di un semaforo ed inizializzazione
Viola il principio di atomicità: non c'è alternativa ad eseguirli in due tempi

2. Memory-mapped I/O

File I/O

16

Tutte le operazioni viste su file finora esplicitamente invocavano operazioni I/O su disco:

- Sequenze di (f)read e/o (f)write

Accedere ai contenuti di un file la cui posizione è nota:

1. Apertura del file dall'inizio (o fine se in modalità **append**)
2. Per ogni contenuto di interesse:
 - a. Spostamento del cursore alla posizione desiderata
 - b. Operazioni I/O
3. Chiusura del file

In questo modo, **alcune parti** del file che **non** sono **di interesse** vengono **comunque caricate**.

Memory-mapped I/O

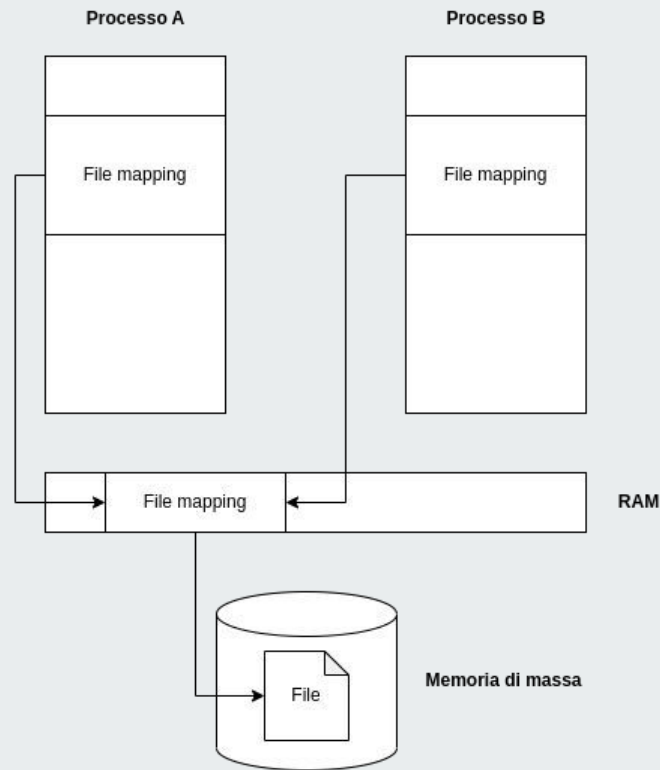
17

Invece di effettuare operazioni I/O su parti di file inutili, è possibile mappare un file in una regione di memoria:

- Il file diventa accessibile come se fosse un **array**
- **Solo** le porzioni **effettivamente utilizzate** vengono caricate dal disco
- Sfruttano lo stesso meccanismo del RAM paging
 - È quindi necessario allineare gli indirizzi alla dimensione delle pagine in uso dal sistema

Altri particolari:

- File mappati vengono **ereditati dopo fork**, ma **non dopo exec**
- Più processi possono condividere il mapping (antenato comune*)
- Più efficiente rispetto ad I/O tradizionale e molto veloce per IPC



Uso di memory-mapped I/O

18

Librerie: `unistd.h` e `sys/mman.h`

➤ `void* mmap(void *start, size_t len, int prot, int flags, int fd, off_t offset)`
Crea un file mapping indicando `start` come indirizzo di inizio (può essere `NULL`), con `len` interpretato come dimensione del mapping. `prot` rappresenta la **modalità di apertura** del mapping: `PROT_READ`, `PROT_WRITE`, `PROT_EXEC`, o `PROT_NONE`. `flags` invece può assumere i valori:

- `MAP_SHARED` → Il **file sottostante viene modificato** ed i **child processes** con accesso al mapping **vedono le modifiche**
- `MAP_PRIVATE` → Tutte le **modifiche** sul mapping rimangono **locali al processo**, il file sottostante rimane **inalterato**
- `MAP_FIXED` → **Non allinea** `start` alla dimensione di paging: alcune implementazioni necessitano l'allineamento

`fd` rappresenta il file descriptor del file da mappare ed `offset` la distanza dall'inizio del file a cui fare riferimento. Valore di ritorno: **indirizzo del mapping** se l'operazione ha successo, altrimenti `MAP_FAILED`

Perché usare `PROT_NONE`

- Pagine di memoria **guardia** → protezione da heap buffer overflow
- Intervallo di memoria **riservato** → ad es. garanzia che `mmap` indipendenti siano **contigue** (da usare con flag

`MAP_FIXED`)

Uso di memory-mapped I/O

19

Librerie: `unistd.h` e `sys/mman.h`

➤ `int munmap(void *addr, size_t len)`

Rimuove il mapping di **ogni pagina inclusa anche parzialmente nell'intervallo** di memoria che comincia in `addr` e continua per `len` bytes

Restituisce 0 se l'operazione ha successo, altrimenti -1

➤ `int msync(void *addr, size_t len, int flags)`

Effettua **eventuali scritture** sul file sottostante il mapping

`flags`:

- `MS_ASYNC`
- `MS_SYNC`
- `MS_INVALIDATE`

Invalida ogni **copia in cache** di dati **inconsistenti**

Ritorna 0 se ha successo, altrimenti -1

3. Shared memory

Limiti di memory-mapped I/O

21

Memory-mapped I/O può essere usata come meccanismo di IPC:

- Accesso regolato da semafori
- Porzioni di file dedicate rispettivamente a letture e scritture di un dato processo
- ✗ Necessità di un file su disco

Shared memory

22

Per superare questo limite, due o più processi possono condividere direttamente un **segmento** di memoria.

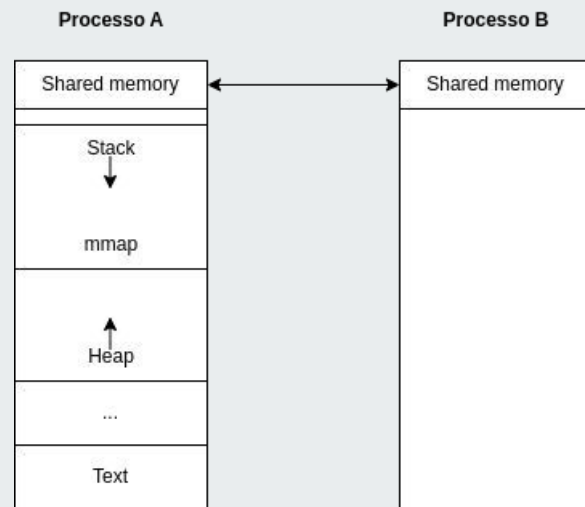
Dopo `fork`, un child process riceve una copia della tabella delle pagine di memoria ma **non il loro contenuto**.

Le pagine vengono copiate solo al momento di un'eventuale modifica da parte del child process ma soprattutto la **modifica rimane locale** al child process.

- Molto efficiente se dopo `fork` viene eseguito `exec` per sostituire il programma del child process

Tuttavia, questo comportamento non è utile ai **fini dell'IPC**; soluzione:

1. Associare un'ID alle pagine da condividere
2. Evitare la copia della pagina e fare direttamente riferimento alla pagina del parent process



Uso di shared memory

23

Librerie: `sys/types.h`, `sys/ipc.h`, `sys/shm.h`

- `int shmget(key_t key, size_t size, int shmflg)`
Restituisce un ID per un segmento di memoria condiviso; `key` ha lo stesso significato visto con `msgget` e `semget`, mentre `size` rappresenta la **dimensione minima** di shared memory (eventuale allineamento alla paging size). `size` può assumere il **valore 0** se si sta accedendo ad un segmento condiviso **già esistente**.
Analogamente ai semafori, le flag `shmflg` specificano permessi ecc.; tuttavia, la flag `IPC_EXCL` permette di ottenere il successo dell'operazione solo se il segmento non era esistente.
Ritorna l'**ID del segmento** se l'operazione ha successo, altrimenti `-1`.
- `void* shmat(int shmid, const void *shmaddr, int shmflg)`
"**Attacca**" un segmento condiviso con ID pari a `shmid` allo spazio gestito dal processo che invoca la funzione. Analogamente a `mmap`, `shmaddr` è l'indirizzo al quale attaccare il segmento in questione (consigliabile `NULL`) e `shmflag` sono flag operative.
Ritorna l'indirizzo al quale è stato attaccato il segmento, altrimenti `(void *)-1` in caso di errori
- `int shmdt(const void *shmaddr)`
"**Stacca**" un segmento condiviso presente al dato indirizzo `shmaddr`. Ritorna `0` se l'operazione ha successo, altrimenti `-1`

Uso di shared memory

24

Librerie: `sys/types.h`, `sys/ipc.h`, `sys/shm.h`

➤ `int shmctl(int shmid, int cmd, struct shm_id *buf)`

Esegue il comando `cmd` sul segmento condiviso identificato da `shmid`. Alcuni comandi utili:

- `IPC_STAT`
Quanti processi hanno accesso al segmento condiviso
- `IPC_RMID`
Distrukge il segmento condiviso, anche se in uso da altri processi → avverrà quando tutti avranno effettuato il detach Il processo deve avere i permessi adeguati

Ritorna 0 se l'operazione ha successo, altrimenti -1

Un segmento condiviso può essere utilizzato tramite il puntatore restituito da `shmat()` come un qualunque puntatore del processo stesso.

Combinarne l'uso con i semafori permette l'implementazione di un'efficace e flessibile meccanismo di IPC.

Considerazioni su shared memory

25

- Nessuna necessità di `malloc` → memoria è **già allocata** tramite `shmget`
- Aritmetica dei puntatori: l'**unico modo** per operare su un segmento condiviso
~ Il segmento condiviso deve contenere tutto il necessario affinché gli altri processi possano effettivamente svolgere operazioni su tali dati
 - *Esempio:* array disponibile tramite shared memory
 - La variabile contenente la dimensione dell'array dev'essere anch'essa sul segmento condiviso e non in una variabile locale ad un processo
- ✗ No `malloc` o `realloc`? → dimensione condivisa **fissa**, non può essere aumentata
- ✗ Allineamento degli indirizzi → i dati possono **non allinearsi** alla dimensione della pagina: **errore SIGBUS**

Accesso da parte di child processes

- Come per `mmap`, i segmenti condivisi vengono **ereditati dopo fork** ma **non dopo exec**
- Un processo lanciato da `exec` deve **riaprire eventuali file mappati e segmenti condivisi** per poterli usare, **conoscendo** gli opportuni **parametri** (ad es. nome file o ID) e possedendo i **permessi adeguati**

4. Esercizi

Esercizi

27

1. Riscrivere i programmi dell'esercizio 1 (Lezione 5) con le seguenti modifiche:
 - a. Crea un **nuovo file vuoto** e ne esegue il **mapping in memoria**; ogni riga letta da un file esistente (ricevuto tramite `argv`) viene scritta sul mapping. Il processo riceve anche un semaphore set ID per gestire l'accesso al mapping.
 - b. Apre tramite file mapping lo **stesso file** creato dal programma **a** e ne legge le righe da processare; l'accesso è regolato da un semaforo di cui si è ricevuto l'ID tramite `argv`. Inoltre, tramite `argv` viene ricevuto anche l'**ID di un segmento condiviso** ed il relativo semaforo per regolarne l'accesso; il segmento condiviso viene usato per scrivere i risultati del processing di una data riga.
 - c. Questo programma fornisce il nome file che i programmi **a** e **b** useranno per il mapping, inizializza un segmento di memoria condivisa su cui avverrà la comunicazione con il programma **b**, e gestisce anche la creazione e l'inizializzazione dei semafori utilizzati per la sincronizzazione. Infine lancerà i processi che eseguono i due programmi precedenti.

Il resto delle operazioni rimane invariato rispetto all'esercizio originario.

Riferimenti

28

- [http://pelusa.fis.cinvestav.mx/tmatos/LaSumA/LaSumA2_archivos/Paralelizacion/Unix%20Multi-Process%20Programming%20and%20Inter-Process%20Communications%20\(IPC\).htm](http://pelusa.fis.cinvestav.mx/tmatos/LaSumA/LaSumA2_archivos/Paralelizacion/Unix%20Multi-Process%20Programming%20and%20Inter-Process%20Communications%20(IPC).htm)
- [semget, semctl, semop](#)
- https://www.gnu.org/software/libc/manual/html_node/Memory_002dmapped-I_002fO.html
- [mmap, munmap, msync](#)
- [shmget, shmat, shmdt, shmctl](#)