Paralelné programovanie

POSIX Threads

Bc. št. prog. Informatika - 2010/2011

Ing. Michal Čerňanský, PhD.

Fakulta informatiky a
informačných technológií,
STU Bratislava

Vlákna

- Procesy
- Vlákna – odľahčené procesy
- Fibres – odľahčené vlákna
- Všeobecne o POSIX threads
- Rutiny
  - Vytváranie
  - Mutexy

Procesy

- Vlákno (Thread) – nezávislý tok inštrukcií
- Funkcia bežiaca nezávisle od hlavného toku programu
- Proces
  - Objekt operačného systému
  - Informácia o programe, zdrojoch,stave vykonávania programu:

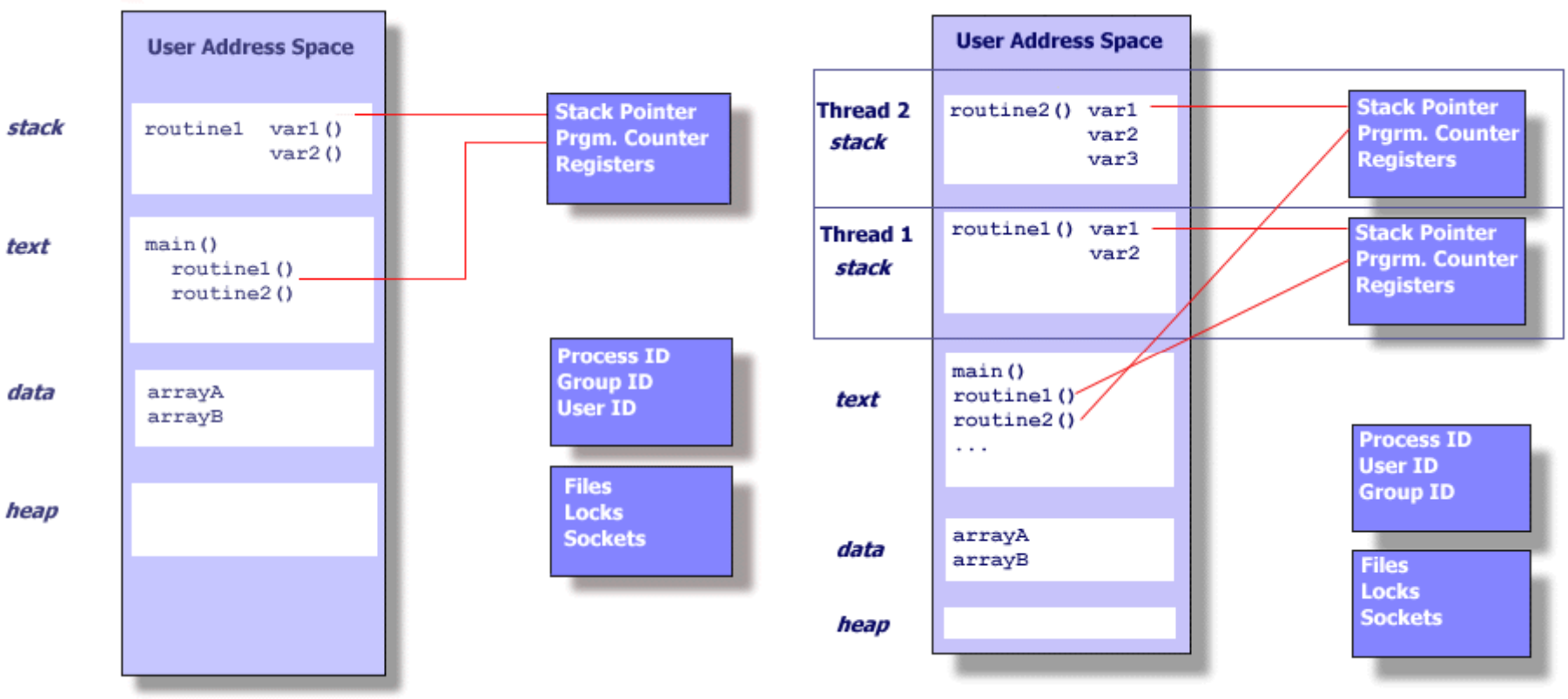
Procesy

- ID procesu, skupiny, používateľa (Process ID, process group ID, user ID, and group ID)
- Prostredie (Environment)
- Pracovný adresár (Working directory)
- Programové inštrukcie (Program instructions)
- Registre (Registers)
- Zásobník (Stack)
- Halda resp. hromada (Heap)
- Deskriptory súborov (File descriptors)
- Akcie na signály (Signal actions)
- Zdieľané knižnice (Shared libraries)
- Medziprocesová komunikácia: rady správy, rúry, semafóry, zdieľaná pamäť (Inter-process communication tools: message queues, pipes, semaphores, or shared memory).

Vlákna

- Vlákna existujú v rámci procesov
- Môžu byť plánované a vykonávané OS
- Vykonávané nezávisle
- Duplikujú iba potrebné zdroje:
  - Ukazateľ na zásobník
  - Registre
  - Vlastnosti pre plánovanie (priorita, politika)
  - Množina signálov
  - ...

Vlákna


User Address Space
stack
routine1 var1()
var2()
text
main()
routine1()
routine2()
data
arrayA
arrayB
heap
Stack Pointer
Prgm. Counter
Registers
Process ID
Group ID
User ID
Files
Locks
Sockets
User Address Space
Thread 2
stack
routine2() var1
var2
var3
Thread 1
stack
routine1() var1
var2
text
main()
routine1()
routine2()
...
data
arrayA
arrayB
heap
Stack Pointer
Prgrm. Counter
Registers
Stack Pointer
Prgrm. Counter
Registers
Process ID
User ID
Group ID
Files
Locks
Sockets

Vlákna

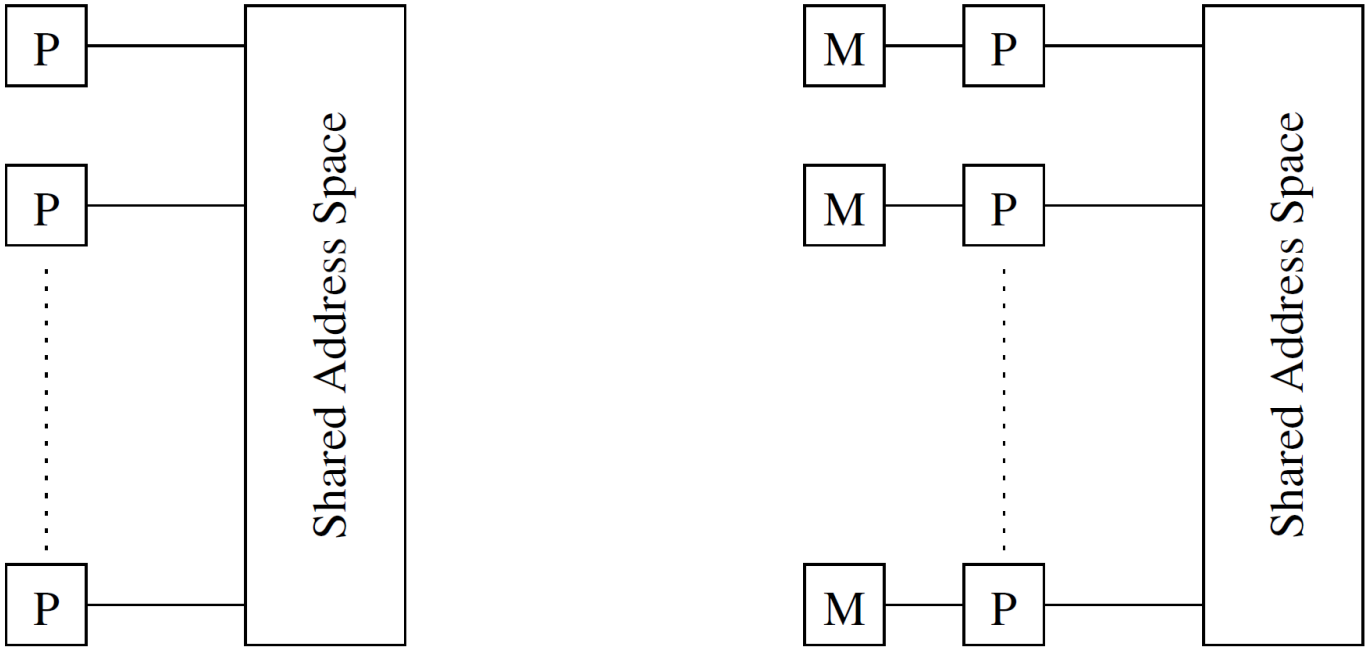
- Vlákno existuje v rámci procesu a používa zdroje procesu
- Má vlastný nezávislý tok inštrukcií
- Duplikuje iba zdroje potrebné na nezávislý beh
- Zdieľa zdroje procesu s ostatnými vláknami
- „Lightweight Process“ – väčšia časť inicializačnej práce už vykonaná procesom

Vlákna

- Vlákno zdieľa zdroje procesu s ostatnými vláknami:
  - Zmeny vykonané inými vláknami na zdieľaných systémových prostriedkoch sú viditeľné ostatnými vláknami
  - Dva ukazateľe s rovnakou adresou ukazujú na to isté miesto v pamäti
  - Je možné zapisovať a čítať z toho istého miesta v pamäti, potreba synchronizovať
  - Vláknová bezpečnosť (Thread Safeness)

Vlákna

- Zdieľaná pamäť – prístupná z každého vlákna
- Zásobník, súkromná pamäť vlákien – lokálna pamäť
- Logický pamäťový model:



Vlákna

- Portabilita
  - sekvenčné aj paralelné počítačové systémy
- Zakrytie oneskorení pri prístupe (Latency Hiding)
  - pamäť, IO, komunikácia
  - sekvenčné aj paralelné počítačové systémy
- Jednoduché plánovanie a vyrovnávanie záťaže
  - možnosť definovať väčší počet súbežných úloh
  - systém sa stará o dynamické plánovanie vlákien
  - maximalizácia vyťaženia procesorov

Vlákna

- Použitie vlákien:
  - Práca môže byť vykonaná vo viacerých súbežných úlohách
  - Údaje je možné spracovávať viacerými súbežnými úlohami
  - Nerovnomerné zaťaženie procesora v rôznych častiach programu
  - Potreba vykonávať asynchrónne operácie
  - Rôzna dôležitosť úloh v programe (priority)
- V paralelných aj sekvenčných prostrediach

Vlákna

- Modely použitia vlákien:
  - Hlavné vláko – pracovné vlákna (Master – Worker)
  - Prúdové spracovanie (Pipeline)
  - Seberovné vlákna (Peer)

POSIX Threads - Pthreads

- Množstvo implementácií vlákien
- POSIX Threads – štandard na UNIX OS
- Implementované ako knižnica funkcií
- Na väčšine UNIX aj nie UNIX systémoch
- Podobnosť konceptov a konštrukcií aj s inými implementáciami vlákien aj v iných jazykoch a prostrediach

POSIX Threads - Pthreads

- Menežovanie – riadenie vlákien
- Vzájomné vylučovanie (Mutual Exclusion)
- Podmienené premenné (Condition Variables)

Pthreads – riadiace funkcie

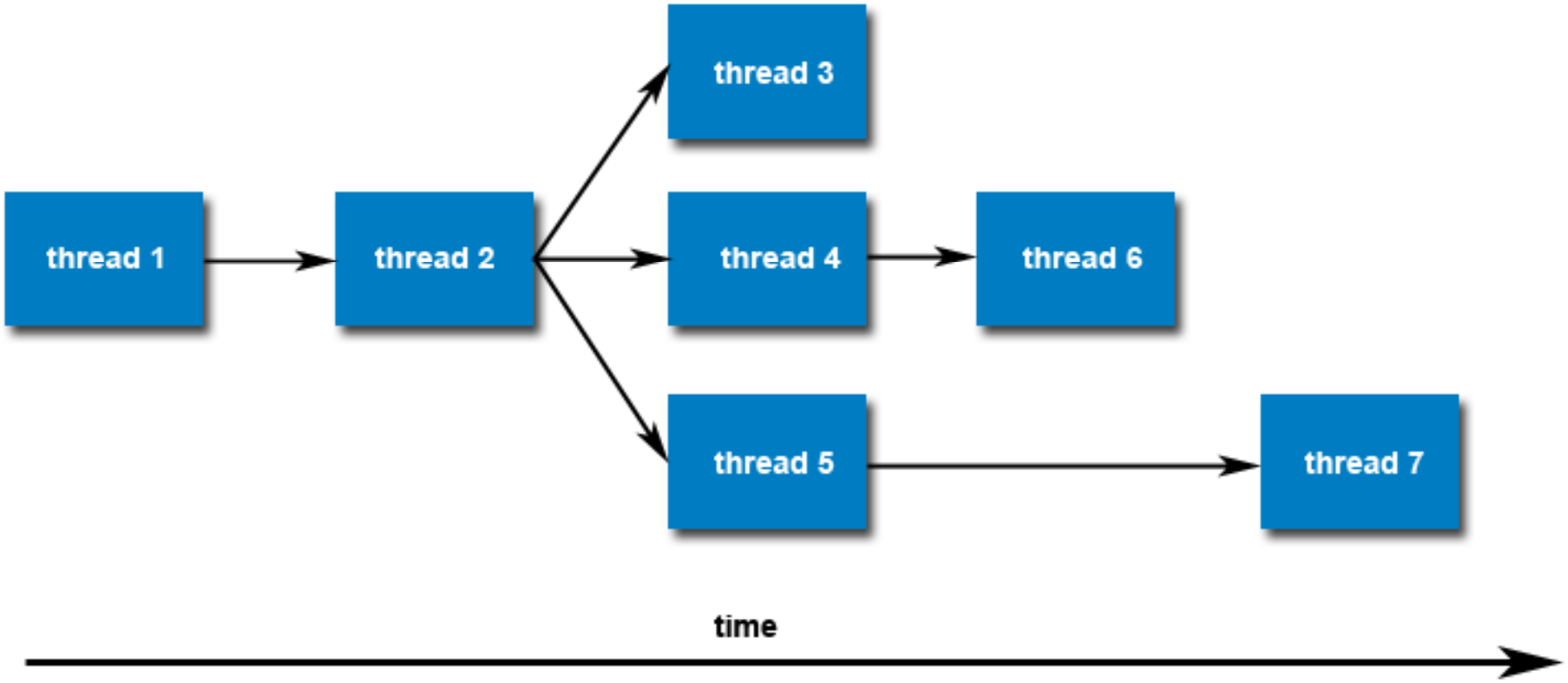
- pthread_create (thread,attr,start_routine,arg)
- pthread_exit (status)

- pthread_attr_init (attr)
- pthread_attr_destroy (attr)

Pthreads – riadiace funkcie

- Vytvorenie vlákna
  - Funkcia main() je vykonávaná v rámci jedného predvoleného vlákna
  - Ostatné vlákna je potrebné explicitne vytvoriť
  - pthread_create vytvorí nové vlákno
    - thread: identifikátor vlákna
    - attr: atribúty pre vlákno, NULL ak štandardné
    - start_routine: C funkcia, kt. sa bude vykonávať v rámci vlákna
    - arg: jediný argument pre C funkciu

Pthreads – riadiace funkcie



Pthreads – riadiace funkcie

- Atribúty vlákna
  - pthread_attr_init - inicializácia atribútov
  - pthread_attr_destroy – odstránenie atribútov

  - Iné funkcie použité na nastavenie alebo čítanie atribútov

Pthreads – riadiace funkcie

- Ukončenie vlákna
  - Skončí C funkcia vlákna
  - Vlákno zavolá f. pthread_exit
  - Iné vlákno zavolá pthread_cancel
  - Celý proces je ukončený volaním exec alebo exit

Pthreads – riadiace funkcie

```
#include <pthread.h>
#include <stdio.h>
#define NUM_THREADS 5

void *PrintHello(void *threadid) {
  long tid;
  tid = (long)threadid;
  printf("Hello World! It's me, thread #%ld!\n", tid)
  pthread_exit(NULL);
}

int main (int argc, char *argv[]) {
  pthread_t threads[NUM_THREADS];
  int rc;
  long t;

  for(t=0; t<NUM_THREADS; t++){
    printf("In main: creating thread %ld\n", t);
    rc = pthread_create(&threads[t], NULL, PrintHello, (void *)t);
    if (rc){
      printf("ERROR; return code from pthread_create() is %d\n", rc);
      exit(-1);
    }
  }
  pthread_exit(NULL);
}
```

Pthreads – riadiace funkcie

- „Joinable“ vlákno

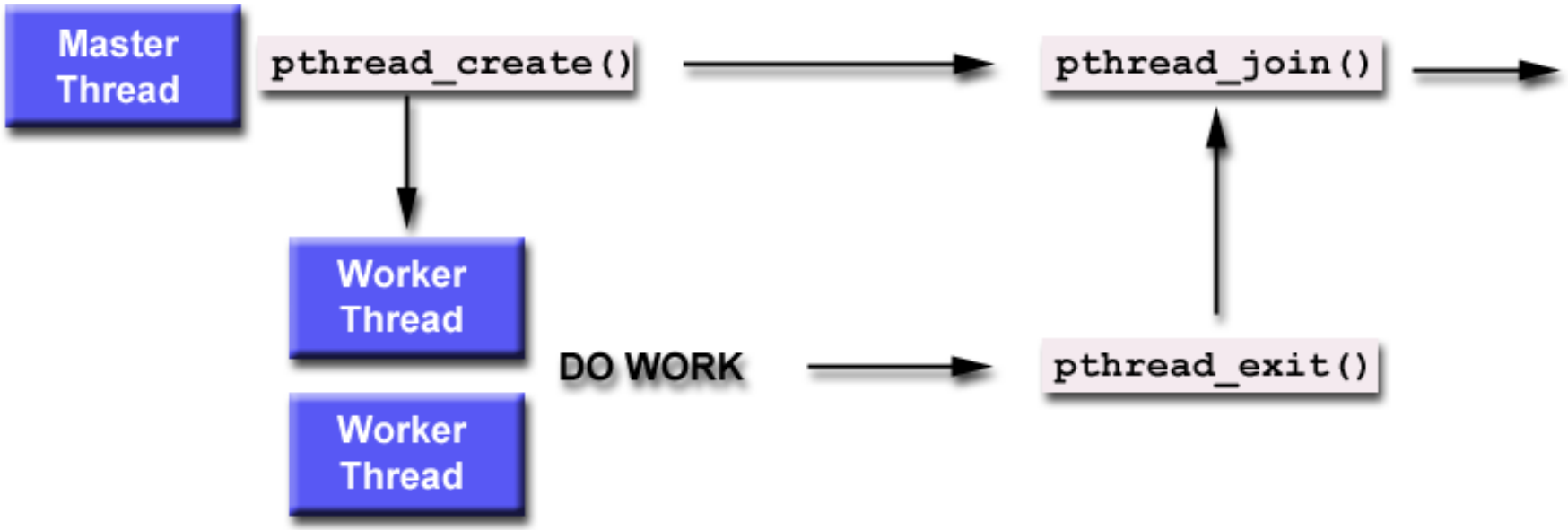
- pthread_join (threadid,status)
- pthread_detach (threadid)

- pthread_attr_setdetachstate (attr,detachstate)
- pthread_attr_getdetachstate (attr,detachstate)

Pthreads – riadiace funkcie

- „Joinable“ vlákno – hlavné vlákno môže počkať na ukončenie vytvoreného vlákna
- Spôsob synchronizácie vlákien
- Možnosť získať výsledok ukončeného vlákna
- Pre dané vlákno je možné iba jedno volanie pthread_join()
- Musí byť špecifikované pri vytvorení vlákna v atribútoch
- Možnosť „odpútať“ „joinable“ vlákno - pthread_detach()

Pthreads – riadiace funkcie



Pthreads – riadiace funkcie

```
#include <stdio.h>
#include <pthread.h>

void *function( void *ptr ) {
    char *message = (char *) ptr;
    printf("%s \n", message);
    pthread_exit(0);
}

int main(void) {
    pthread_t thread1, thread2;
    char *message1 = "Thread 1";
    char *message2 = "Thread 2";
    int  iret1, iret2;

    iret1 = pthread_create( &thread1, NULL, &function, (void*) message1);
    iret2 = pthread_create( &thread2, NULL, &function, (void*) message2);

    pthread_join( thread1, NULL);
    pthread_join( thread2, NULL);

    printf("Thread 1 returns: %d\n",iret1);
    printf("Thread 2 returns: %d\n",iret2);
    exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

Pthreads – riadiace funkcie

- Menežovanie zásobníkov

- pthread_attr_getstacksize (attr, stacksize)
- pthread_attr_setstacksize (attr, stacksize)

- pthread_attr_getstackaddr (attr, stackaddr)
- pthread_attr_setstackaddr (attr, stackaddr)

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- Mutex – Mutual Exclusion
- Synchronizácia vlákien, ochrana premenných v zdieľanej pamäti
- Zámok na ochranu zdieľaných zdrojov
- Iba jedno vlákno môže vlastniť (uzamknúť) mutex v danom čase
- Ak sa viaceré vlákna pokúsia obdržať vlastníctvo, iba jeden ho získa
- Až keď ho vlákno uvoľní, môže ho získať iné

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- Úprava globálnej premennej – zabránenie súťaženia o prostriedky
- Kritická sekcia – takto chránené globálne
- Postup použitia
  - Vytvorenie a inicializácia mutexu
  - Vlákna sa pokúšajú uzamknúť mutex
  - Iba jedno vlákno uspeje a vykonáva množinu akcií
  - Vlastniace vlákno uvoľní mutex
  - Iné (alebo aj to isté) vlákno sa zmocní mutexu a vykonáva akcie
  - ...
  - Mutex je deštruovaný

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- Pri ochrane zdrojov každé vlákno musí používať mutex – úloha programátora
- Vlákna, ktoré nezískajú mutex, sú uspaté, a keď je mutex vláknom čo ho získalo uvoľnený, ďalšie vlákno je prebudené a získa mutex

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- pthread_mutex_init (mutex,attr)
- pthread_mutex_destroy (mutex)

- pthread_mutexattr_init (attr)
- pthread_mutexattr_destroy (attr)

- pthread_mutex_lock (mutex)
- pthread_mutex_trylock (mutex)
- pthread_mutex_unlock (mutex)

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- Mutex musí byť inicializovaný
  - Statická inicializácia pri jeho deklarácii

    pthread_mutex_t mymutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;

  - Dynamická inicializácia

    pthread_mutex_init(mutex, attr)

    pthread_mutex_destroy(mutex)

    pthread_mutexattr_t attr;

    pthread_mutexattr_init(attr);

    pthread_mutexattr_destroy(attr);

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- Atribút
  - Attr môže byť NULL – štandardné hodnoty
  - Protokol – politika na zabránenie zmene priorít
  - Prioceiling – maximálna priorita
  - Process-shared - zdieľanie procesmi
- Nemajú všetky implementácie

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- pthread_mutex_lock (mutex)
- pthread_mutex_trylock (mutex)

- pthread_mutex_unlock (mutex)

Pthreads – vzájomné vylučovanie

- pthread_mutex_lock() - pokus získať mutex, ak už získaný iným vláknom, uspatie vlákna (blokovanie), až kým nie je mutex uvoľnený
- pthread_mutex_trylock() - pokus získať mutex, ak už získaný iným vláknom, okamžitý návrat z volania funkcie so zodpovdajúcou návratovou hodnotou
- pthread_mutex_unlock() - úvoľnenie mutexu

Pthreads – vzájomné vylučovanie

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <pthread.h>

pthread_mutex_t mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
int  counter = 0;

void *function() {
  pthread_mutex_lock( &mutex );
  counter++;
  printf("Counter value: %d\n",counter);
  pthread_mutex_unlock( &mutex );
  pthread_exit(0);
}

int main(void) {
  int rc1, rc2;
  pthread_t thread1, thread2;

  pthread_create( &thread1, NULL, function, NULL);
  pthread_create( &thread2, NULL, function, NULL);

  pthread_join( thread1, NULL);
  pthread_join( thread2, NULL);

  exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

Pthreads – podmienené premenné

- Ďalšia možnosť synchronizovať vlákna
- Synchronizácia na základe hodnoty dát, testovanie splnenia podmienky
- Polling – obsadzujúce čakanie
- Vždy použité súčasne s mutexom

Pthreads – podmienené premenné

- Ďalšia možnosť synchronizovať vlákna
- Synchronizácia na základe hodnoty dát, testovanie splnenia podmienky
- Polling – obsadzujúce čakanie
- Vždy použité súčasne s mutexom

Pthreads – podmienené premenné

- pthread_cond_init (condition,attr)
- pthread_cond_destroy (condition)

- pthread_condattr_init (attr)
- pthread_condattr_destroy (attr)

- pthread_cond_wait (condition,mutex)
- pthread_cond_signal (condition)
- pthread_cond_broadcast (condition)

Pthreads – podmienené premenné

- Podmeinená premenná musí byť inicializovaná
  - Statická inicializácia pri jej deklarácii

    pthread_cond_t myconvar = PTHREAD_COND_INITIALIZER;

  - Dynamická inicializácia

    pthread_cond_init (condition,attr)

    pthread_cond_destroy (condition)

    pthread_condattr_init (attr)

    pthread_condattr_destroy (attr)

Pthreads – podmienené premenné

- Atribút
  - Attr môže byť NULL – štandardné hodnoty
  - Process-shared - zdieľanie procesmi

Pthreads – podmienené premenné

- pthread_cond_wait(condition,mutex)
  - Blokuje volajúce vlakno, až kým nie je podmienka signalizovaná
  - zodpovedajuci mutex musí byť uzamknutý a pri blokovaní je uvoľnený
  - Po prijatí signálu uzamkne mutex
  - Mutex musí byť exlicitne uvoľnený

Pthreads – podmienené premenné

- The pthread_cond_signal(condition)
  - Signalizácia na zobudenie vlákna čakauceho na podmienenú premennú
  - Zodpovedajúci mutex musí byť pred volaním uzamknutý
  - Zodpovedajúci mutex musí byť uvoľnený aby pthread_cond_wait() funkcia pokračovala

Pthreads – podmienené premenné

- The pthread_cond_broadcast(condition)
  - Ak viac vlákien je v stave čakania na podmienenú premennú
- Volať pthread_cond_signal() pred pthread_cond_wait() je logická chyba, signál sa nezachováva

Pthreads – podmienené premenné

```
#include <pthread.h>
int                 conditionMet = 0;
pthread_cond_t      cond  = PTHREAD_COND_INITIALIZER;
pthread_mutex_t     mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
#define NTHREADS    5

void *threadfunc(void *parm) {
  pthread_mutex_lock(&mutex);
  while (!conditionMet) pthread_cond_wait(&cond, &mutex);
  pthread_mutex_unlock(&mutex);
  return NULL;
}

int main(int argc, char **argv) {
  int i;
  pthread_t threadid[NTHREADS];

  for(i=0; i<NTHREADS; ++i) pthread_create(&threadid[i], NULL, threadfunc, NULL);

  pthread_mutex_lock(&mutex);
  conditionMet = 1;
  pthread_cond_broadcast(&cond);
  pthread_mutex_unlock(&mutex);

  for (i=0; i<NTHREADS; ++i) pthread_join(threadid[i], NULL);

  pthread_cond_destroy(&cond);
  pthread_mutex_destroy(&mutex);

  return 0;
}
```

Pthreads – podmienené premenné

- if (! conditonMet) cond_wait(cond, mutex); - nestačí if
- while (! conditonMet) cond_wait(cond, mutex); - správna konštrukcia

- "Spurious Wakeups" – „falošné prebudenie"
  - cond_wait(cond,mutex) môže skončiť aj keď podmienená premenná nebola signalizovaná
  - Dôsledok náročnosti implementácie v multiprocesorovom poč. systéme
- Správny štýl programovania
  - Po obdržaní mutexu môže byť už podmienka neplatná

Pthreads – podmienené premenné

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <pthread.h>

pthread_mutex_t count_mutex     = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
pthread_mutex_t condition_mutex = PTHREAD_MUTEX_INITIALIZER;
pthread_cond_t condition_cond  = PTHREAD_COND_INITIALIZER;

int  count = 0;
#define COUNT_DONE  10
#define COUNT_HALT1  3
#define COUNT_HALT2  6

void *functionCount1() {
...
}

void *functionCount2() {
...
}

int main(void) {
   pthread_t thread1, thread2;

   pthread_create( &thread1, NULL, functionCount1, NULL);
   pthread_create( &thread2, NULL, functionCount2, NULL);
   pthread_join( thread1, NULL);
   pthread_join( thread2, NULL);

   exit(EXIT_SUCCESS);
}
```

Pthreads – podmienené premenné

```
void *functionCount1() {
   for(;;) {
      pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
      while( count >= COUNT_HALT1 && count <= COUNT_HALT2 ) {
         pthread_cond_wait( &condition_cond, &condition_mutex );
      }
      pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );

      pthread_mutex_lock( &count_mutex );
      count++;
      printf("Counter value functionCount1: %d\n",count);
      pthread_mutex_unlock( &count_mutex );

      if(count >= COUNT_DONE) pthread_exit(0);
    }
}

void *functionCount2() {
    for(;;) {
       pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
       if( count < COUNT_HALT1 || count > COUNT_HALT2 ) {
          pthread_cond_signal( &condition_cond );
       }
       pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );

       pthread_mutex_lock( &count_mutex );
       count++;
       printf("Counter value functionCount2: %d\n",count);
       pthread_mutex_unlock( &count_mutex );

       if(count >= COUNT_DONE) pthread_exit(0);
    }
}
```

Výstup:

```
Counter value functionCount1: 1
Counter value functionCount1: 2
Counter value functionCount1: 3
Counter value functionCount2: 4
Counter value functionCount2: 5
Counter value functionCount2: 6
Counter value functionCount2: 7
Counter value functionCount1: 8
Counter value functionCount1: 9
Counter value functionCount1: 10
Counter value functionCount2: 11
```

Pthreads – podmienené premenné

Init:

```
mutex_init(coun_mutex);
mutex_init(cond_mutex);
cond_init(cond);
```

Thread A cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
while (count>=3 && count<=6)
    cond_wait(cond, mutex);
mutex_unlock(cond_mutex);

mutex_lock(count_mutex);
count := count + 1;
mycount := count;
mutex_unlock(count_mutex);

// do work with my_count
```

Thread B cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
if (count<3 || count>6)
    cond_signal(cond);
mutex_unlock(cond_mutex);

mutex_lock(count_mutex);
count := count + 1;
mycount := count;
mutex_unlock(count_mutex);

// do work with my_count
```

Pthreads – podmienené premenné

- V čase práce s premennou „count“ môže byť podmienka neplatná
- Prerušenie toku vykonávania pred uzamknutím „count_mutex“

Pthreads – podmienené premenné

```
void *functionCount1() {
    for(;;) {
        pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
        while( count >= COUNT_HALT1 && count <= COUNT_HALT2 ) {
            pthread_cond_signal( &condition_cond );
            pthread_cond_wait( &condition_cond, &condition_mutex );
        }
        pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );

        // Count
        count++;
        printf("Counter value functionCount1: %d\n",count);

        ...
    }
}

void *functionCount2() {
    for(;;) {
        pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
        while( count < COUNT_HALT1 || count > COUNT_HALT2 ) {
            pthread_cond_signal( &condition_cond );
            pthread_cond_wait( &condition_cond, &condition_mutex );
        }
        pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );

        count++;
        printf("Counter value functionCount2: %d\n",count);

        ...
    }
}
```

Výstup:

```
Counter value functionCount1: 1
Counter value functionCount1: 2
Counter value functionCount1: 3
Counter value functionCount2: 4
Counter value functionCount2: 5
Counter value functionCount2: 6
Counter value functionCount2: 7
Counter value functionCount1: 8
Counter value functionCount1: 9
Counter value functionCount1: 10
```

Pthreads – podmienené premenné

Init:

```
mutex_init(cond_mutex);
cond_init(cond);
```

Thread A cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
while (count>=3 && count<=6) {
   cond_signal(cond);
   cond_wait(cond, mutex);
}
mutex_unlock(cond_mutex);

count := count + 1;
mycount := count;

// do work with my_count
```

Thread B cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
while (count<3 || count>6) {
   cond_signal(cond);
   cond_wait(cond, mutex);
}
mutex_unlock(cond_mutex);

count := count + 1;
mycount := count;

// do work with my_count
```

Pthreads – podmienené premenné

- V čase práce s premennou „count“ môže byť podmienka neplatná
- Prerušenie toku vykonávania po inkrementácií premennej „count“

Pthreads – podmienené premenné

```
void *functionCount1() {
    for(;;) {
        pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
        while( count >= COUNT_HALT1 && count <= COUNT_HALT2 ) {
            pthread_cond_signal( &condition_cond );
            pthread_cond_wait( &condition_cond, &condition_mutex );
        }

        count++;
        printf("Counter value functionCount1: %d\n",count);

        pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );
        ...
    }
}

void *functionCount2() {
    for(;;) {
        pthread_mutex_lock( &condition_mutex );
        while( count < COUNT_HALT1 || count > COUNT_HALT2 ) {
            pthread_cond_signal( &condition_cond );
            pthread_cond_wait( &condition_cond, &condition_mutex );
        }

        count++;
        printf("Counter value functionCount2: %d\n",count);

        pthread_mutex_unlock( &condition_mutex );
        ...
    }
}
```

Výstup:

```
Counter value functionCount1: 1
Counter value functionCount1: 2
Counter value functionCount1: 3
Counter value functionCount2: 4
Counter value functionCount2: 5
Counter value functionCount2: 6
Counter value functionCount2: 7
Counter value functionCount1: 8
Counter value functionCount1: 9
Counter value functionCount1: 10
```

Pthreads – podmienené premenné

Init:

```
mutex_init(cond_mutex);
cond_init(cond);
```

Thread A cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
while (count>=3 && count<=6) {
   cond_signal(cond);
   cond_wait(cond, mutex);

   count := count + 1;
   mycount := count;
}
mutex_unlock(cond_mutex);

// do work with my_count
```

Thread B cyklus:

```
mutex_lock(cond_mutex);
while (count<3 || count>6) {
   cond_signal(cond);
   cond_wait(cond, mutex);

   count := count + 1;
   mycount := count;
}
mutex_unlock(cond_mutex);

// do work with my_count
```

Zdroje

- Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar. Introduction to ParallelComputing, 2nd Edition, Addison-Wesley 2003„Introduction to Parallel Computing“ http://www-users.cs.umn.edu/~karypis/parbook/
- Blaise Barney, Lawrence Livermore National Laboratory: POSIX Threads Programming. https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/

- Obrázky prevzaté z:
  - Ananth Grama, Anshul Gupta, George Karypis, Vipin Kumar. Introduction to ParallelComputing, 2nd Edition, Addison-Wesley 2003„Introduction to Parallel Computing“ http://www-users.cs.umn.edu/~karypis/parbook/
  - Blaise Barney, Lawrence Livermore National Laboratory: POSIX Threads Programming. https://computing.llnl.gov/tutorials/pthreads/