IB109 Návrh a implementace paralelních systémů

Programování v prostředí se sdílenou pamětí

Jiří Barnat

Rizika spojená se sdílenou pamětí

Race condition

Pozorování

- Paralelní programy mohou při opakovaném spouštění zdánlivě náhodně vykazovat různá chování.
- Výsledek provedení programu může záviset na absolutním pořadí provedení instrukcí programu, tj. na proložení instrukcí zúčastněných procesů/vláken.

Race condition

- Nedokonalost paralelního programu, která se projevuje takovýmto nedeterministickým chováním se označuje jako **race condition**, (zkráceně race).

Race condition – příklad

Příklad

```
*myStructure p;

P0 {
  p = new myStructure;
  p -> data = 1;
  cout <<(p->data)<<endl;
}
```

```
P1 {
  p = new myStructure;
  p -> data = 2;
  cout <<(p->data)<<endl;
}
```

Atomicita operací

Pozorování

- Jednoduchý příkaz ve vyšším programovacím jazyce neodpovídá nutně jedné instrukci procesoru.
- V moderních operačních systémech je každé vlákno podrobeno plánovacímu procesu.
- Vykonání posloupnosti instrukcí procesoru odpovídající jednomu příkazu vyššího programovacího jazyka může být přerušeno a proloženo vykonáním instrukcí jiného vlákna.

Atomicita operací

Příklad

- Přičtení čísla do proměnné efektivně může znamenat načtení proměnné do registru, provedení aritmetické operace, a uložení výsledku do paměti.
- Při vhodném souběhu následujících procesů, se může efekt jednoho přiřazení do sdílené globální proměnné zcela vytratit

```
volatile int a=0;

P0 {                    P1 {
  a = a + 10;             a = a + 20;
}                       }
```

- Demonstrujte proložení instrukcí, které vyústí v jinou hodnotu, než 30.

Relativní rychlost výpočtu

Pozorování

- Nelze spoléhat na současný souběh vláken, potažmo relativní rychlost výpočtu jednotlivých vláken.

Příklad

```
volatile int a=0;

    P0 {                    P1 {
      usleep 200;             a = 1;
      a = 0;                  usleep 200;
    }                       }
```

- Po skončení obou vláken (současně spuštěných) bude mít sdílená proměnná ve většině případů hodnotu 0. Není to však ničím garantováno, tj. může nastat situace, kdy bude mít hodnotu 1.

Uváznutí

Uváznutí (Deadlock)

- Pokud mají vlákna inkrementální požadavky na unikátní sdílené zdroje, může dojít k tzv. uváznutí, tj. nemožnosti pokračování ve výpočtu.

Příklad

```
P0 {                    P1 {
  zamkni A;               zamkni B;
  zamkni B;               zamkni A;
...                     ...
}                       }
```

Hladovění

Hladovění, Stárnutí, Neprogrese (Livelock)

- Jev, kdy alespoň jedno vlákno není schopné vzhledem k paralelnímu souběhu s jiným vláknem pokročit ve výpočtu za danou hranici.

Příklad

- ```
  volatile int a=0;

  P0 {                          P1 {
    while (true) {;               while (a == 0) { };
      a++; a--;                   ...;
    }...
  }                             }
  ```

- Vlákno P1 může na vyznačeném řádku strávit mnoho času.
  ```

Thread-safe a re-entrantní procedury

Thread-safe procedura

- Označení procedury či programu, jejíž kód je bezpečné provádět (vzhledem k sémantice výstupu a stabilitě výpočtu) souběžné několika vlákny bez nutnosti vzájemné domluvy/synchronizace.
- Knihovní funkce nemusí být thread-safe!
  - rand() -> rand_r()

Re-entrantní procedura

- Procedura, jejíž provádění může být v rámci jednoho vlákna přerušeno, kód kompletně vykonán od začátku do konce v rámci téže úlohy, a poté obnoveno/dokončeno přerušené vykonávání kódu.
- Termím pochází z dob, kdy nebyly multitaskingové operační systémy.

Vztah thread-safe a re-entrantních procedur

Neporovnatelné

- Re-entrantní procedura nemusí být thread-safe.
  viz `http://en.wikipedia.org/wiki/Reentrancy_(computing)`
- Thread-safe procedura nemusí být re-entrantní.
  (Problémem je například používání globálních zámků.)

Příklad

- Thread-safe procedura, která není re-entrantní:

```
WC {
  je-li odemčeno, vejdi a zamkni, jinak čekej
  ...
  odemkni a opusť onu místnost
}
```

Thread-safe a re-entrantní procedury

Nebezpečné akce vzhledem k paralelnímu zpracování

- Nekontrolovaný přístup ke globálním proměnným a haldě.
- Uchovávání stavu procedury do globálních proměnných.
- Alokace, dealokace zdrojů globálního rozsahu (soubory, . . .).
- Nepřímý přístup k datům skrze odkazy nebo ukazatele.
- Viditelný vedlejší efekt (modifikace nestálých proměnných).

Bezpečná strategie

- Přístup pouze k lokálním proměnným (zásobník).
- Kód je závislý pouze na argumentech dané funkce.
- Veškeré volané podprocedury a funkce jsou thread-safe.

Procedura, která není thread-safe

```
*myStructure p;

*myStructure function() {
  p=new myStructure;
  return p;
}

P0 {
  *myStructure x;
  x=function();
}
```

```
P1 {
  *myStructure x;
  x=function();
}
```

Přístup ke sdíleným proměnným

Pozorování

- Přístup ke sdíleným proměnným je „kořenem všeho zla“.
- Veškeré modifikace a neatomická čtení globálních proměnných musí být **serializovány**.

Kritická sekce

- Část kódu, jehož provedení je neproložitelné instrukcemi jiného vlákna.
- Realizace kritické sekce musí být odolná vůči plánování.

Zamykání

- Vlákno vstupující do volné kritické sekce, svým vstupem znemožní přístup ostatním vláknům (sekci tzv. zamkne).
- Ostatní vlákna čekají před vstupem do kritické sekce.
- Při odchodu z kritické sekce, je zámek uvolněn, získá ho **náhodně** jedno z čekajících vláken.

Zamykání a související pojmy

Jednoduché řešení zámku

- Sdílená atomicky přistupovaná bitová proměnná, jejíž hodnota indikuje přítomnost procesu/vlákna v přidružené kritické sekci.
- Manipulována při vstupu a výstupu z/do kritické sekce.
- Vyžaduje podporu HW pro atomickou manipulaci.

Aktivní čekání – spinlock

- Dokud neuspěje, vlákno opakovaně zkouší vstoupit do kritické sekce (tj. po tuto dobu neustále provádí tentýž kód).

Uspávání

- Procesy/vlákna se po neúspěchu vstoupit do kritické sekce sami vzdají procesorového kvanta (uspí se).
- Jsou buzeny buď po vypršení časového limitu nebo explicitně jiným běžícím vláknem.

Rizika zamykání

Rizika

- Uváznutí, stárnutí, snížení výkonnosti.

Přístup ke sdíleným globálním proměnným

- Manipulace se zámkem vynucuje vylití cache pamětí.
- Mnoho přístupů k zamykaným proměnným může být úzkým místem výkonu aplikace, z principu nelze odstranit.

Petersonův algoritmus (spinlock, user-space)

- Spravedlivý algoritmus pro řízení vzájemného vyloučení.
- Nezpůsobuje stárnutí ani uváznutí.
- Vyžaduje atomické zápisy do proměnných.
- Citlivý na provádění instrukcí mimo pořadí.

POSIX Thread API

Historie a POSIX standard

Historie

- SMP systémy
- Vlákna implementována jednotlivými výrobci HW
- IEEE POSIX 1003.1c standard

IEEE POSIX 1003.1c

- Programátorský model semaforů a provádění operací v kritické sekci
- Rozhraní pro C
- POSIX threads, PThreads

Jiné normy

- Operační systémy: NT Threads (Win32), Solaris threads, ...
- Programovací jazyky: Java threads, C++11 threading, ...

Základní dělení funkcionality

Správa vláken

- Vytváření, oddělování a spojování vláken
- Funkce na nastavení a zjištění stavu vlákna

Vzájemná vyloučení (mutexes)

- Vytváření, ničení, zamykání a odemykání mutexů
- Funkce na nastavení a zjištění atributů spojených s mutexy

Podmínkové/podmíněné proměnné (conditional variable)

- Slouží pro komunikaci/synchronizaci vláken
- Funkce na vytváření, ničení, "čekání na" a "signalizování při" specifické hodnotě podmínkové proměnné
- Funkce na nastavení a zjištění atributů proměnných

POSIX standard

Přes 60 API funkcí

- `#include <pthread.h>`
- Překlad s volbou `-pthread`

Mnemotechnické předpony funkcí

- `pthread_`, `pthread_attr_`
- `pthread_mutex_`, `pthread_mutexattr_`
- `pthread_cond_`, `pthread_condattr_`
- `pthread_key_`

Pracuje se skrytými objekty (Opaque objects)

- Objekty v paměti, o jejichž podobě programátor nic neví.
- Přistupovány výhradně pomocí odkazu (handle).
- Nedostupné objekty a neplatné (dangling) reference.

Atributy objektů

Idea

- Vlastnosti všech vláken, mutexů i podmínkových proměnných nastavovány speciálními objekty.
- Některé vlastnosti entity musí být specifikovány již v době vzniku entity.

Typy atributových objektů

- Vlákna: `pthread_attr_t`
- Mutexy: `pthread_mutexattr_t`
- Podmínkové proměnné: `pthread_condattr_t`

Vznik a destrukce

- Funkce `_init` a `_destroy` s odpovídající předponou
- Parametr odkaz na odpovídající atributový objekt

Správa vláken

Vytváření vlákna

- Každý program má jedno hlavní vlákno
- Další vlákna musí být explicitně vytvořena programem
- Každé vlákno (i vytvořené) může dále vytvářet další vlákna
- Vlákno vytvářeno funkcí `pthread_create`
- Vytvářené vlákno je ihned připraveno k provádění
- Může být plánovačem spuštěno dříve, než se dokončí volání vytvářecí funkce
- Veškerá data potřebná při spuštění vlákna, musí být připravena před voláním vytvářecí funkce
- Maximální počet vláken je závislý na implementaci

Správa vláken

```
int pthread_create (
        pthread_t *thread_handle,
        const pthread_attr_t *attribute,
        void * (*thread_function)(void *),
        void *arg);
```

- `thread_handle` odkaz na vytvořené vlákno
- `attribute` odkaz na atributy vytvořeného vlákna (NULL pro přednastavené nastavení atributů)
- `thread_function` ukazatel na funkci nového vlákna
- `arg` ukazatel na parametry funkce `thread_function`
- Při úspěšném vytvoření vlákna vrací 0

Správa vláken

Ukončení vlákna nastává

- Voláním funkce `pthread_exit`
- Pokud skončí hlavní funkce rodičovského vlákna jinak než voláním `pthread_exit`
- Je-li zrušeno jiným vláknem pomocí `pthread_cancel`
- Rodičovský proces je ukončen (násilně nebo voláním `exit`)

```
void pthread_exit (void *value)
```

- Ukončuje běh vlákna
- Odkazy na prostředky procesu (soubory, IPC, mutexy, ...) otevřené v rámci vlákna se nezavírají
- Data patřící vláknu musí být uvolněna před ukončením vlákna (systém provede uvolnění prostředků až po skončení rodičovského procesu)
- Ukazatel `value` předán při spojení vláken

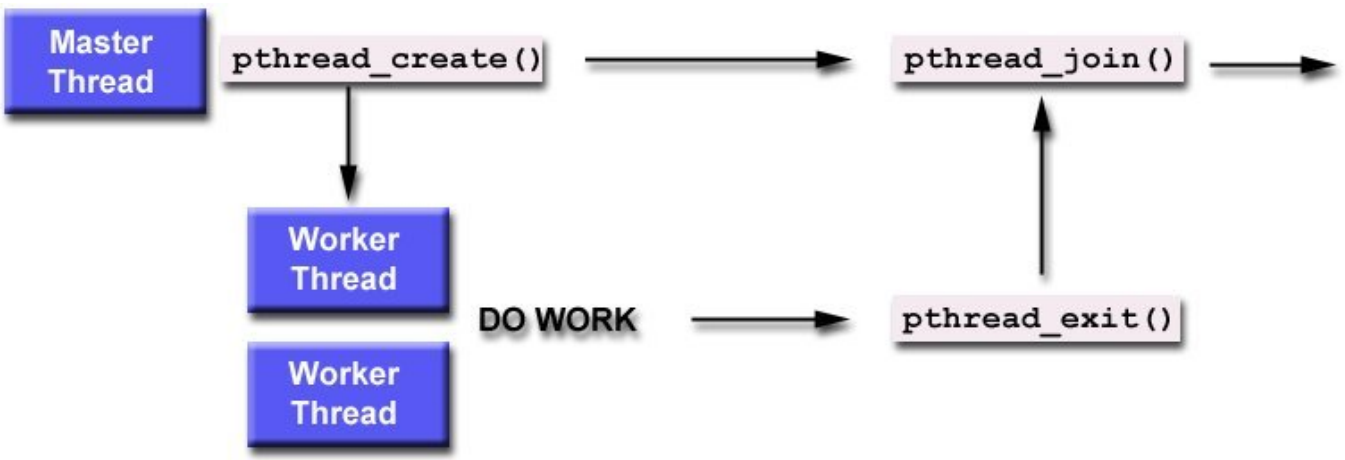
Správa vláken – příklad

```
1   #include <pthread.h>
2   #include <stdio.h>
3   #define NUM_THREADS 5
4
5   void *PrintHello(void *threadid)
6   {   printf("%d: Hello World!\n", threadid);
7       pthread_exit(NULL);
8   }
9
10  int main (int argc, char *argv[])
11  {   pthread_t threads[NUM_THREADS];
12      for(int t=0; t<NUM_THREADS; t++)
13        pthread_create(&threads[t], NULL,
14                       PrintHello, (void *)t);
15      pthread_exit(NULL);
16  }
```

Správa vláken

```
int pthread_join (pthread_t thread_handle,
                  void **ptr_value);
```

- Čeká na dokončení vlákna `thread_handle`
- Hodnota `ptr_value` je ukazatel na pointer specifikovaný vláknem `thread_handle` při volání `pthread_exit`
- Nutný například pokud main má vracet smysluplnou návratovou hodnotu



Vlastnosti (atributy) vláken

Nespojitelná vlákna (Detached threads)

- Nemohou být spojena voláním funkce `pthread_join`
- Šetří systémové prostředky
- Přednastavené nastavení typu vlákna není vždy zřejmé, proto je doporučeno typ vlákna explicitně nastavit

```
int pthread_detach (
      ptrhead_t *thread_handle)

int pthread_attr_setdetachstate(
      pthread_attr_t *attr,
      int detachstate)

int pthread_attr_getdetachstate(
      pthread_attr_t *attr,
      int *detachstate)
```

Vlastnosti (atributy) vláken

Velikost zásobníku

- Minimální velikost zásobníku není určena
- Při velkém počtu vláken se často stává, že vyhrazené místo pro zásobník je vyčerpáno
- POSIX umožňuje zjistit a nastavit pozici a velikost místa vyhrazeného pro zásobník jednoho vlákna

```
int pthread_attr_getstacksize (
      pthread_attr_t *attribute, size_t *stacksize)

int pthread_attr_setstacksize (
      pthread_attr_t *attribute, size_t stacksize)

int pthread_attr_getstackaddr (
      pthread_attr_t *attribute, void **stackadr)

int pthread_attr_setstackaddr (
      pthread_attr_t *attribute, void *stackadr)
```

Zrušení vlákna

```
int pthread_cancel (
      ptrhead_t *thread_handle)
```

- Žádost o zrušení vlákna `thread_handle`
- Adresované vlákno se může a nemusí ukončit
- Vlákno může ukončit samo sebe
- Při zrušení se provádí úklid dat spojených s rušeným vláknem
- Funkce skončí po odeslání žádosti (je neblokující)
- Návratový kód 0 značí, že adresované vlákno existuje, ne že bylo/bude zrušeno

Vzájemné vyloučení

Motivace

- Vícero vláken provádí následující kód

  ```
  if (my_cost < best_cost) best_cost = my_cost;
  ```

- Nedeterministický výsledek pro 2 vlákna a hodnoty:
  `best_cost==100`, `my_cost@1==50`, `my_cost@2==75`

Řešení

- Umístění kódu do kritické sekce
- `pthread_mutex_t`

Inicializace `mutexu`

```
int pthread_mutex_init (
      pthread_mutex_t *mutex_lock,
      pthread_mutexattr_t *attribute)
```

- Parametr `attribute` specifikuje vlastnosti zámku
- `NULL` znamená výchozí (přednastavené) nastavení

Vzájemné vyloučení

`int pthread_mutex_lock (pthread_mutex_t *mutex_lock)`

- Volání této funkce zamyká `mutex_lock`
- Volání je blokující, dokud se nepodaří mutex zamknout
- Zamknout mutex se podaří pouze jednou jednomu vláknu
- Vlákno, kterému se podaří mutex zamknout je v kritické sekci
- Při opouštění kritické sekce, je vlákno "povinné" mutex odemknout
- Teprve po odemknutí je možné mutex znovu zamknout
- Kód provedený v rámci kritické sekce je po odemčení mutexu globálně viditelný (paměťová bariéra)

`int pthread_mutex_unlock (pthread_mutex_t *mutex_lock)`

- Odemyká `mutex_lock`

Vzájemné vyloučení

Pozorování

- Velké kritické sekce snižují výkon aplikace
- Příliš času se tráví v blokujícím volání funkce `pthread_mutex_lock`

```
int pthread_mutex_trylock (pthread_mutex_t *mutex_lock)
```

- Pokusí se zamknout mutex
- V případě úspěchu vrací 0
- V případě neúspěchu `EBUSY`
- Smysluplné využití komplikuje návrh programu
- Implementace bývá rychlejší než `pthread_mutex_lock` (nemusí se manipulovat s frontami čekajících procesů)
- Má smysl aktivně čekat opakovaným volání `trylock`

Vlastnosti (atributy) mutexů

Normální mutex

- Pouze jedno vlákno může jedenkrát zamknout mutex
- Pokud se vlákno, které má zamčený mutex, pokusí znovu zamknout stejný mutex, dojde k uváznutí

Rekurzivní mutex

- Dovoluje jednomu vláknu zamknout mutex opakovaně
- K mutexu je asociován čítač zamknutí
- Nenulový čítač značí zamknutý mutex
- Pro odemknutí je nutno zavolat `unlock` tolikrát, kolikrát bylo voláno `lock`

Normální mutex s kontrolou chyby

- Chová se jako normální mutex, akorát při pokusu o druhé zamknutí ohlásí chybu
- Pomalejší, typicky používán dočasně po dobu vývoje aplikace, pak nahrazen normálním mutexem

Vlastnosti (atributy) mutexů

```
int pthread_mutexattr_settype_np (
      ptrhead_mutexattr_t *attribute,
      int type)
```

- Nastavení typu mutexu
- Typ určen hodnotou proměnné `type`
- Hodnota `type` může být
  - `PTHREAD_MUTEX_NORMAL_NP`
  - `PTHREAD_MUTEX_RECURSIVE_NP`
  - `PTHREAD_MUTEX_ERRORCHECK_NP`