Vícevláknové programování

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 11

BAB36PRGA – Programování v C

Přehled témat

- Část 1 –Vícevláknové programování

Úvod

Vícevláknové aplikace a operační systém

Modely vícevláknových aplikací

Mechanismy synchronizace

Vlákna POSIX

C11 Vlákna

Debugging

Část I

Část 1 –Vícevláknové programování

Obsah

Terminologie – Vlákna

- Vlákno je nezávislé provádění posloupnosti instrukcí.
  - Je to samostatně prováděný **výpočetní tok**.

Typicky malý program, který je zaměřen na určitou část.

- Vlákno je spuštěno v rámci procesu.
  - Sdílí stejný paměťový prostor jako proces.
  - Vlákno běží ve stejném paměťovém prostoru procesu.
- Vlákno **runtime environment** – každé vlákno má svůj samostatný prostor proměnných.
  - Identifikátor vlákna a prostor synchronizačních proměnných.
  - Čítač programu (*Program Counter* – PC) nebo ukazatel instrukce (*Instruction Pointer* – IP) – adresa prováděné instrukce.

Udává, kde se vlákno nachází ve své programové sekvenci.

  - Paměťový prostor lokálních proměnných **stack**.

Kde lze použít vlákna?

- Vlákna jsou odlehčené varianty procesů, které sdílejí paměťový prostor.
- Existuje několik případů, kdy je užitečné použít vlákna, nejtypičtější situace jsou následující.
  - **Efektivnější využití dostupných výpočetních zdrojů**.
    - Když proces čeká na zdroje (např. čte z periferie), je zablokován a řízení je předáno jinému procesu.
    - Vlákno také čeká, ale jiné vlákno v rámci téhož procesu může využít vyhrazený čas pro provádění procesu.
    - Máme-li vícejádrové procesory, můžeme urychlit výpočet využitím více jader současně **paralelními algoritmy**.
  - **Pracování s asynchronními událostmi**.
    - Během blokované i/o operace může být procesor využit pro jiné výpočty.
    - Jedno vlákno může být vyhrazeno pro i/o operace, např. pro komunikační kanál, další vlákno pro výpočty.

Příklady použití vláken

- Vstupní/výstupní operace
  - Vstupní operace mohou zabrat značnou část času běhu, což může být většinou nějaké čekání, např. na vstup uživatele.
  - Během komunikace může být vyhrazený čas procesoru využit pro výpočetně náročné operace.
- Interakce s grafickým uživatelským rozhraním (GUI)
  - Grafické rozhraní vyžaduje okamžitou odezvu pro příjemnou interakci uživatele s naší aplikací.
  - Interakce uživatele generuje události, které ovlivňují aplikaci.
  - Výpočetně náročné úlohy by neměly snižovat interaktivitu aplikace.

Zajistit příjemný uživatelský zážitek s naší aplikací.

Obsah

Vlákna a procesy

Proces

- Výpočetní tok.
- Má vlastní paměťový prostor.
- Entita (objekt) operačního systému.
- Synchronizace s využitím OS (IPC).
- CPU přidělený plánovačem OS.
- \- Čas pro vytvoření procesu.

Vlákna procesu

- Výpočetní tok.
- Běží ve stejném paměťovém prostoru procesu.
- Uživatelská entita nebo entita operačního systému.
- Synchronizace prostřednictvím výhradního přístupu k proměnným.
- Procesor přidělený v rámci vyhrazeného času procesu.
- \+ Vytvoření je rychlejší než vytvoření procesu.

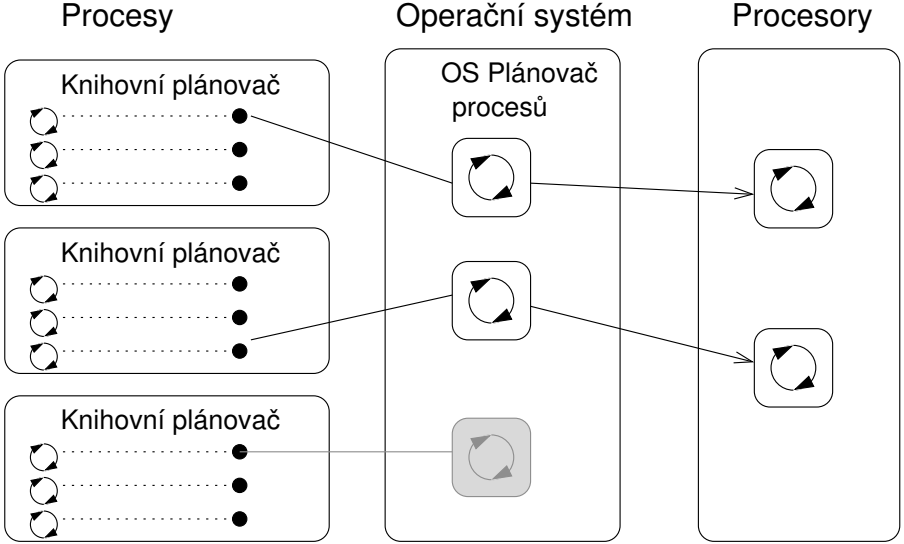
Vícevláknové a víceprocesové aplikace

- Vícevláknová aplikace.
  - \+ Aplikace může využívat vyšší stupeň interaktivity.
  - \+ Snadnější a rychlejší komunikace mezi vlákny využívajícími stejný paměťový prostor.
  - – Nepodporuje přímo škálování paralelního výpočtu do distribuovaného výpočetního prostředí s různými výpočetními systémy (počítači).
- I na jednojádrových jednoprocesorových systémech může vícevláknová aplikace lépe využít procesor.

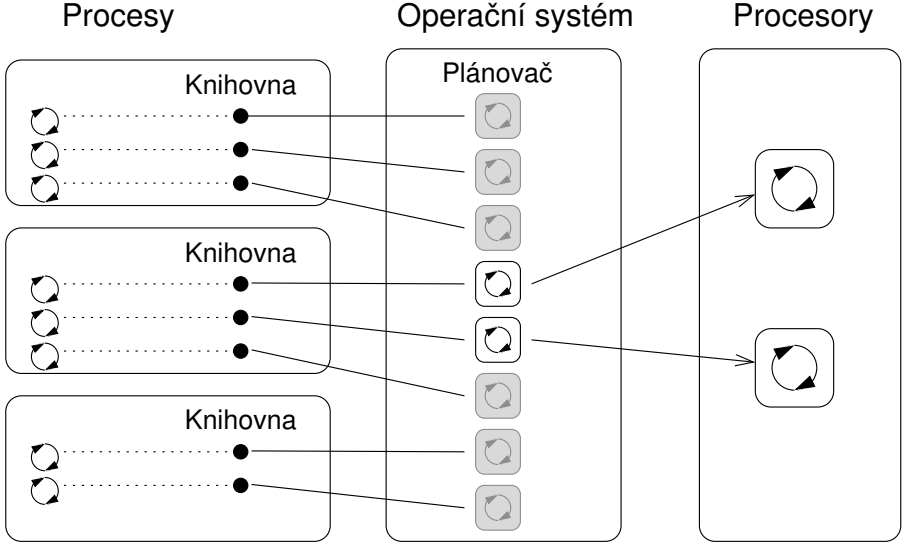
Vlákna v operačním systému

- Vlákna běží v rámci procesu, ale pokud jde o implementaci, vlákna mohou být v uživatelském prostoru nebo jako entity operačního systému.
  - **Uživatelský prostor procesu** – vlákna jsou implementována knihovnou určenou uživatelem.
    - Vlákna nepotřebují zvláštní podporu operačního systému.
    - Vlákna jsou plánována místním plánovačem poskytovaným knihovnou.
    - Vlákna obvykle nemohou využívat více procesorů (více jader).
  - **OS entity**, které jsou plánovány systémovým plánovačem.
    - Může využívat vícejádrové nebo víceprocesorové výpočetní zdroje.

Vlákna v uživatelském prostoru



Vlákna jako entity operačního systému



Vlákna uživatele vs. vlákna operačního systému

Uživatelská vlákna

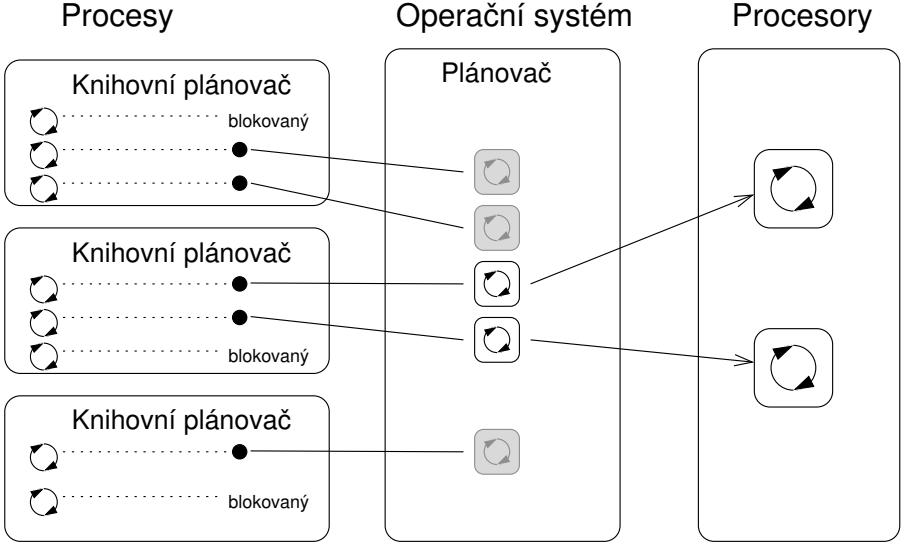
+ Nepotřebují podporu operačního systému.
+ Vytvoření nepotřebuje (drahé) systémové volání.
  Drahé je relativní k nákladům na vytvoření vlákna, systémového vlákna a procesu.
- Priorita provádění vláken je řízena v rámci přiděleného času procesu.
- Vlákna nemohou běžet současně (pseudoparalelismus).

Vlákna operačního systému

+ Vlákna mohou být naplánována v konkurenci všech vláken v systému.
+ Vlákna mohou běžet současně (na vícejádrovém nebo víceprocesorovém systému – skutečný paralelismus).
- Vytváření vláken je trochu složitější (systémové volání).

Vysoký počet vláken naplánovaných operačním systémem může zvýšit režii. Moderní operační systémy však používají plánovače O(1) - plánování procesu nezávisí na počtu procesů. Plánovací algoritmy jsou založeny na komplexních heuristikách.

Kombinování uživatelských vláken a vláken operačního systému



Obsah

Kdy používat vlákna?

- Vlákna jsou výhodná vždy, když aplikace splňuje některé z následujících kritérií.

- Skládá se z několika nezávislých úloh.
- Může být blokována po určitou dobu.
- Obsahuje výpočetně náročnou část (a zároveň je žádoucí zachovat interaktivitu).
- Musí pohotově reagovat na asynchronní události.
- Obsahuje úlohy s nižší a vyšší prioritou než zbytek aplikace.
- Hlavní výpočetní část lze urychlit paralelním algoritmem s využitím vícejádrových procesorů.

Typické vícevláknové aplikace

- Servery – obsluhují více klientů současně. Může vyžadovat přístup ke sdíleným zdrojům a mnoho i/o operací.
- Výpočetní aplikace – s vícejádrovým nebo víceprocesorovým systémem lze zkrátit dobu běhu aplikace současným použitím více procesorů.
- Aplikace v reálném čase – pro splnění požadavků na reálný čas můžeme využít specifické plánovače.

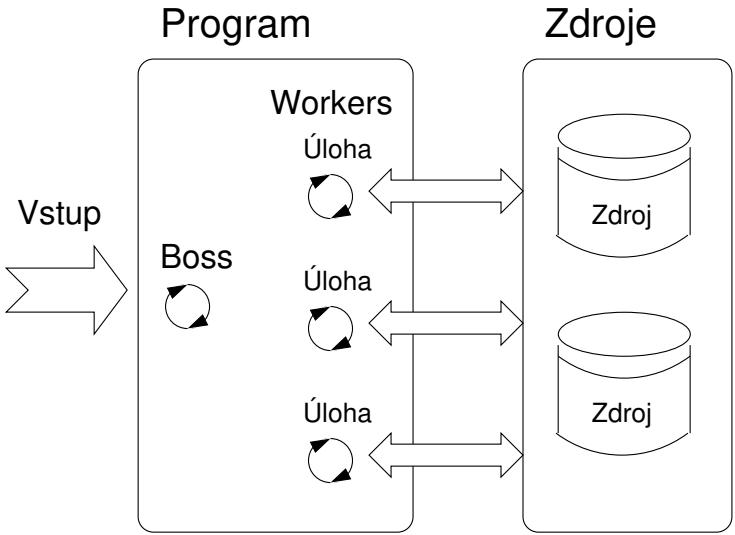
Vícevláknová aplikace může být efektivnější než složité asynchronní programování; vlákno čeká na událost oproti explicitnímu přerušení a přepínání kontextu.

Modely vícevláknových aplikací

- Modely se zabývají vytvářením a rozdělováním práce jednotlivým vláknům.
  - **Boss/Worker** – hlavní vlákno řídí rozdělení práce na ostatní vlákna.
  - **Peer** – vlákna běží paralelně bez určeného správce (šéfa).
  - **Pipeline** – zpracování dat v posloupnosti operací.

    Předpokládá dlouhý tok vstupních dat a jednotlivá vlákna pracují paralelně na různých částech toku

Model Boss/Worker



Model Boss/Worker– role

- Hlavní vlákno je zodpovědná za správu požadavků. Pracuje v cyklu.
  1. Přijme nový požadavek.
  2. Vytvoří vlákno pro obsluhu daného požadavku.

     Nebo předá požadavek existujícímu vláknu.
  3. Čekat na nový požadavek.
- Výstup/výsledky přiřazeného požadavku může řídit konkrétní pracovní vlákno nebo hlavní vlákno.
  - Konkrétní vlákno (worker) řešící požadavek.
  - Hlavní vlákno používající synchronizační mechanismy (např. frontu událostí).

Příklad – Boss/Worker

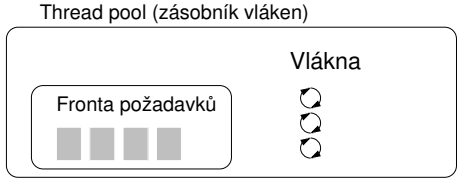
```
1  // Boss
2  while(1) {
3    switch(getRequest()) {
4      case taskX:
5         create_thread(taskX);
6         break;
7      case taskY:
8         create_thread(taskY);
9         break;
10   }
11 }
```

```
1  // Task solvers
2  taskX()
3  {
4    solve the task // synchronized
       usage of shared resources
5    done;
6  }

8  taskY()
9  {
10   solve the task // synchronized
       usage of shared resources
11   done;
12 }
```

Rezervoár/zásobník vláken – Thread Pool

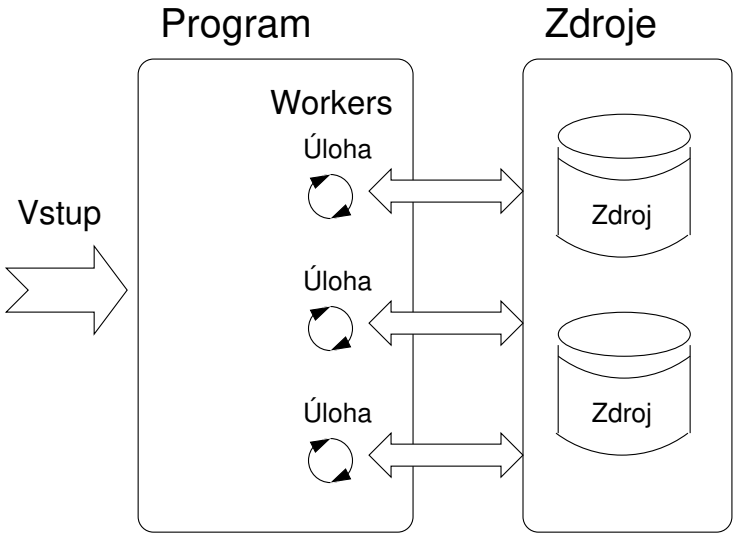
- Hlavní vlákno vytváří vlákna po přijetí nového požadavku.
- Režie s vytvářením nových vláken může být snížena využití zásobníku vláken (**Thread Pool**) s již vytvořenými vlákny.
- Vytvořená vlákna čekají na nové úlohy.



- Vlastnosti fondu vláken je třeba vzít v úvahu.
  - Počet předem vytvořených vláken.
  - Maximální počet požadavků ve frontě požadavků.
  - Definice chování, pokud je fronta plná a žádné z vláken není k dispozici.

Např. zablokovat příchozí požadavky.

Peer Model


Program
Zdroje
Workers
Úloha
Úloha
Úloha
Vstup
Zdroj
Zdroj

Vlastnosti a příklad *Peer* modelu

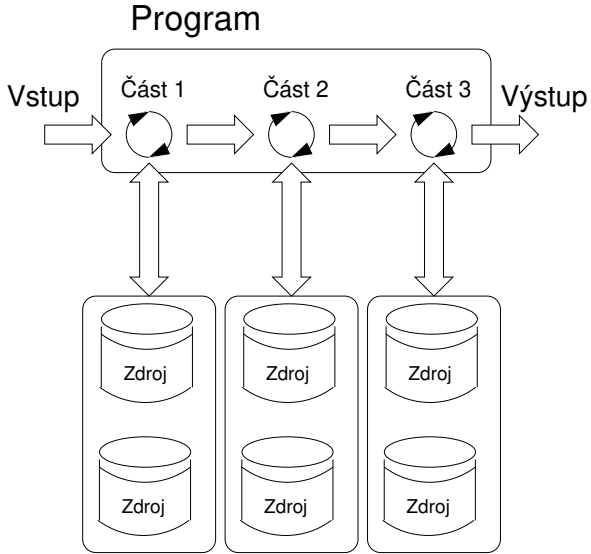
- Neobsahuje hlavní vlákno; první vlákno vytvoří všechna ostatní vlákna a pak:
  - Stane se jedním z ostatních vláken (ekvivalentní).
  - Pozastaví své provádění a čeká na ostatní vlákna.
- Každé vlákno je zodpovědné za svůj vstup a výstup.
- Příklad

```
1 // Boss
2 {
3   create_thread(task1);
4   create_thread(task2);
5   .
6   .
7   start all threads;
8   wait to all threads;
9 }
```

```
1  // Task solvers
2  task1()
3  {
4    wait to be exectued
5    solve the task // synchronized usage of shared resources
6    done;
7  }

9  task2()
10 {
11   wait to be exectued
12   solve the task // synchronized usage of shared resources
13   done;
14 }
```

Zpracování datového toku – *Pipeline* model



Pipeline model – vlastnosti a příklad

- Dlouhý vstupní tok dat s **sekvence operací** (část zpracování) – každá vstupní datová jednotka musí být zpracována všemi částmi operací zpracování.
- V určitém čase jsou různé vstupní datové jednotky zpracovány jednotlivými částmi zpracování – vstupní jednotky musí být nezávislé.

```
1  main()
2  {
3    create_thread(stage1);
4    create_thread(stage2);
5    ...
6    ...
7    wait // for all pipeline;
8  }

10 stage1()
11 {
12    while(input) {
13       get next program input;
14       process input;
15       pass result to next the stage
          ;
16    }
17 }
```

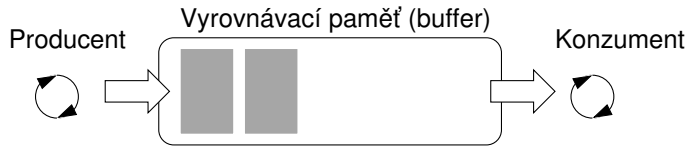
```
1  stage2()
2  {
3     while(input) {
4        get next input from thread;
5        process input;
6        pass result to the next stage;
7     }
8  }
9  ...
10 stageN()
11 {
12    while(input) {
13       get next input from thread;
14       process input;
15       pass result to output;
16    }
17 }
```

Model Producent/konzument (Producer/Consumer)

- Předávání dat mezi jednotkami lze realizovat vyrovnávací pamětí.

  Nebo jen vyrovnávací paměť odkazů (ukazatelů) na jednotlivé datové jednotky.

  - Producent – vlákno, které předává data jinému vláknu.
  - Konzument – vlákno, které přijímá data od jiného vlákna.
- Přístup k vyrovnávací paměti musí být synchronizovaný (výhradní přístup).



Použití vyrovnávací paměti nemusí nutně znamenat zkopírování dat.

Obsah

Synchronizační mechanismy

- Synchronizace vláken používá stejné principy jako synchronizace procesů.
  - Protože vlákna sdílejí paměťový prostor s procesem, probíhá hlavní komunikace mezi vlákny prostřednictvím paměti a (globálních) proměnných.
  - Rozhodující je řízení přístupu do stejné paměti.
  - **Exkluzivní (výhradní) přístup** ke **kritické sekci**.
- Základní synchronizační primitiva jsou **mutexy** a **podmíněné proměnné** (*Condition Variables*).
  - **Mutex/Locker** pro exkluzivní přístup ke kritické sekci (mutexy nebo spinlocky).
  - **Podmíněná proměnná** synchronizace vláken podle hodnoty sdílené proměnné.

Spící vlákno může být probuzeno další signalizací od jiného vlákna.

Mutex – Zámek kritické sekce

- Mutex je sdílená proměnná přístupná z jednotlivých vláken.
- Základní operace, které mohou vlákna s mutexem provádět.
  - Zamknout mutex (získá mutex volající vlákno).
    - Pokud vlákno nemůže mutex získat (protože ho drží jiné vlákno), vlákno je blokováno a čeká na uvolnění mutexu.
  - Odemkne již získaný mutex.
    - Pokud se o získání mutexu pokouší jedno nebo více vláken (voláním zámku na mutexu), je jedno z vláken vybráno pro získání mutexu.

Příklad – Mutex a kritická sekce

- Zamknout/odemknout přístup ke kritické sekci mutexem `drawingMtx`

```
1  void add_drawing_event(void)
2  {
3     Tcl_MutexLock(&drawingMtx);
4     Tcl_Event * ptr = (Tcl_Event*)Tcl_Alloc(sizeof(Tcl_Event));
5     ptr->proc = MyEventProc;
6     Tcl_ThreadQueueEvent(guiThread, ptr, TCL_QUEUE_TAIL);
7     Tcl_ThreadAlert(guiThread);
8     Tcl_MutexUnlock(&drawingMtx);
9  }
```

Příklad použití podpory vláken z knihovny TCL.

- Příklad použití konceptu `ScopedLock`

```
1  void CCanvasContainer::draw(cairo_t *cr)
2  {
3     ScopedLock lk(mtx);
4     if (drawer == 0) {
5        drawer = new CCanvasDrawer(cr);
6     } else {
7        drawer->setCairo(cr);
8     }
9     manager.execute(drawer);
10 }
```

`ScopedLock` *uvolní (odemkne) mutex, jakmile je lokální proměnná* `lk` *na konci volání funkce zničena.*

Zobecněné modely mutexu

- Rekurzivní – mutex může být stejným vláknem uzamčen vícekrát.
- Try – operace uzamčení se okamžitě vrátí, pokud mutex nelze získat.
- Timed – omezuje dobu získání mutexu.
- *Spinlock* – vlákno opakovaně kontroluje, zda je zámek k dispozici pro získání.

Vlákno není nastaveno do blokovaného režimu, pokud zámek nelze získat.

Spinlock

- Za určitých okolností může být výhodné neblokovat vlákno během získávání mutexu (zámku), např.,
  - Provedení jednoduché operace se sdílenými daty/proměnnými v systému se skutečným paralelismem (s použitím vícejádrového procesoru).
  - Zablokování vlákna, pozastavení jeho provádění a předání přiděleného času CPU jinému vláknu může vést ke značné režii.
  - Jiná vlákna rychle provedou jinou operaci s daty, sdílený prostředek by tak byl rychle přístupný.
- Během zamykání vlákno aktivně testuje, zda je zámek volný.

  Plýtvá časem procesoru, který lze využít k produktivním výpočtům jinde.
- Podobně jako u semaforu musí být takový test proveden instrukcí TestAndSet na úrovni CPU.
- **Adaptivní mutex** kombinuje oba přístupy a používá **spinlocks** pro přístup ke zdrojům uzamčeným právě běžícím vláknem a blokuje/uspává, pokud takové vlákno neběží.

Na jednoprocesorových systémech s pseudoparalelismem nemá smysl používat spinlocky.

Podmíněná proměnná

- **Podmíněná proměnná** umožňuje signalizaci vlákna z jiného vlákna.
- Koncept **podmíněné proměnné** umožňuje následující synchronizační operace.
  - Čekat – proměnná byla změněna/oznámená.
  - Časované čekání na signál z jiného vlákna.
  - Signalizace jiného vlákna čekajícího na proměnnou podmínky.
  - Signalizace všech vláken čekajících na proměnnou podmínky.

Všechna vlákna jsou probuzena, ale přístup k podmíněné proměnné je chráněn mutexem, který je třeba získat, pouze jedno vlákno může mutex zamknout.

Příklad – Použití podmíněné proměnné

- Příklad použití podmíněné proměnné se zámkem (mutexem), který umožňuje exkluzivní přístup k podmíněné proměnné z různých vláken.

```
Mutex mtx; // shared variable for both threads
CondVariable cond; // shared condition variable
```

```
// Thread 1
Lock(mtx);
// Before code, wait for Thread 2
CondWait(cond, mtx);  // wait for cond
... // Critical section
UnLock(mtx);
```

```
// Thread 2
Lock(mtx);
... // Critical section
// Signal on cond
CondSignal(cond, mtx);
UnLock(mtx);
```

Paralelismus a funkce

- V paralelním prostředí lze funkce volat vícekrát.
- Pokud jde o paralelní provádění, funkce mohou být **reentrantní** nebo **thread-safe**.
  - **Reentrant** – v jednom okamžiku může být stejná funkce provedena vícekrát současně.
  - **Thread-Safe** – funkce může být volána více vlákny současně.
- Pro dosažení těchto vlastností je třeba splnit následující podmínky.
  - **Reentrantní funkce** nezapisuje do statických dat a nepracuje s globálními daty.
  - **Vláknově bezpečná funkce** (thread-safe) přistupuje ke globálním datům s využitím synchronizačních primitiv.

Hlavní problémy vícevláknových aplikací

- Hlavní problémy s vícevláknovými aplikacemi se týkají synchronizace.
  - **Uváznutí** (**Deadlock**) – vlákno čeká na prostředek (mutex), který je právě uzamčen jiným vláknem, které čeká na prostředek (vlákno) již uzamčený prvním vláknem.
  - **Souběh** (**Race condition**) – přístup několika vláken ke sdíleným prostředkům (paměti/proměnným) a alespoň jedno z vláken nepoužívá synchronizační mechanismy (např. kritickou sekci).

    Vlákno čte hodnotu, zatímco jiné vlákno ji zapisuje. Pokud operace čtení/zápisu nejsou atomické, data nejsou platná.

Obsah

POSIX Funkce knihovny `pthread`

- Knihovna POSIXových vláken (`<pthread.h>` a `-lpthread`) je sada funkcí pro podporu vícevláknového programování.
- Základní typy pro vlákna, mutexy a podmíněné proměnné jsou
  - `pthread_t` – typ pro reprezentaci vlákna;
  - `pthread_mutex_t` – typ pro mutex;
  - `pthread_cond_t` – typ pro proměnnou podmínky.
- Vlákno je vytvořeno voláním funkce `pthread_create()`, která okamžitě spustí nové vlákno jako funkci předanou jako ukazatel na funkci.

Vlákno volající vytvoření pokračuje ve vykonávání.

- Vlákno může čekat na jiné vlákno funkcí `pthread_join()`.
- Partikulární mutex a podmíněné proměnné musí být inicializovány voláním knihovních funkcí.

Poznámka, inicializované sdílené proměnné před vytvořením vlákna.

  - `pthread_mutex_init()` – inicializace proměnné mutex.
  - `pthread_cond_init()` – inicializace podmíněné proměnné.

Lze nastavit další atributy, viz dokumentace.

Vlákna POSIX – Příklad 1/10

- Vytvoření aplikace se třemi aktivními vlákny.
  - Obsluha uživatelského vstupu – funkce `input_thread()`.
    - Uživatel zadá periodu výstupu obnovení stisknutím vyhrazených kláves.
  - Zobrazení výstupu – funkce `output_thread()`.
    - Aktualizce výstupu pouze tehdy, když uživatel interaguje s aplikací nebo když alarm signalizuje, že uplynula perioda.
  - Alarm s periodou definovanou uživatelem – funkce `alarm_thread()`.
    - Obnovení výstupu nebo provedení jiné akce.
- Pro zjednodušení program používá `stdin` a `stdout` s hlášením aktivity vlákna do `stderr`.
- Synchronizační mechanismy jsou demonstrují použití mutexu a podmíněné proměnné.
  - `pthread_mutex_t mtx` – výhradní přístup k `data_t data`;
  - `pthread_cond_t cond` – signalizace vláken.

Sdílená data se skládají z aktuální periody alarmu (`alarm_period`), požadavku na ukončení aplikace (`quit`) a počtu vyvolání alarmu (`alarm_counter`).

Vlákna POSIX – Příklad 2/10

- Včetně hlavičkových souborů, definice datových typů, deklarace globálních proměnných.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <stdbool.h>
4  #include <termios.h>
5  #include <unistd.h>  // for STDIN_FILENO
6  #include <pthread.h>

8  #define PERIOD_STEP 10
9  #define PERIOD_MAX 2000
10 #define PERIOD_MIN 10

12 typedef struct {
13    int alarm_period;
14    int alarm_counter;
15    bool quit;

17    pthread_mutex_t *mtx; // avoid global variables for mutex and
18    pthread_cond_t *cond; // conditional variable
19 } data_t; // data structure shared among the threads
```

Vlákna POSIX – Příklad 3/10

- Funkce prototypů a inicializace proměnných a struktur.

```
21 void call_termios(int reset); // switch terminal to raw mode
22 void* input_thread(void*);
23 void* output_thread(void*);
24 void* alarm_thread(void*);

26 // - main function -------------------------------
27 int main(int argc, char *argv[])
28 {
29    data_t data = { .alarm_period = 100, .alarm_counter = 0, .quit = false };
30    enum { INPUT, OUTPUT, ALARM, NUM_THREADS }; // named ints for the threads
31    const char *threads_names[] = { "Input", "Output", "Alarm" };
32    void* (*thr_functions[])(void*) = {
33       input_thread, output_thread, alarm_thread // array of thread functions
34    };

36    pthread_t threads[NUM_THREADS]; // array for references to created threads
37    pthread_mutex_t mtx;
38    pthread_cond_t cond;
39    pthread_mutex_init(&mtx, NULL); // initialize mutex with default attributes
40    pthread_cond_init(&cond, NULL); // initialize condition variable with default attributes
41    data.mtx = &mtx;                // make the mutex accessible from the shared data structure
42    data.cond = &cond;              // make the cond accessible from the shared data structure
```

Vlákna POSIX – Příklad 4/10

- Vytvoření vláken a čekání na ukončení všech vláken.

```
43     call_termios(0); // switch terminal to raw mode
44     for (int i = 0; i < NUM_THREADS; ++i) {
45        int r = pthread_create(&threads[i], NULL, thr_functions[i], &data);
46        printf("Create thread '%s' %s\r\n", threads_names[i], ( r == 0 ? "OK" : "FAIL") );
47     }

49     int *ex;
50     for (int i = 0; i < NUM_THREADS; ++i) {
51        printf("Call join to the thread %s\r\n", threads_names[i]);
52        int r = pthread_join(threads[i], (void*)&ex);
53        printf("Joining the thread %s has been %s - exit value %i\r\n", threads_names[i],
       (r == 0 ? "OK" : "FAIL"), *ex);
54     }

56     call_termios(1); // restore terminal settings
57     return EXIT_SUCCESS;
58  }
```

Vlákna POSIX – Příklad 5/10 (Přepnutí terminálu)

- Přepnutí terminálu do režimu *raw*.

```
59 void call_termios(int reset)
60 {
61    static struct termios tio, tioOld; // use static to preserve the initial
       settings
62    tcgetattr(STDIN_FILENO, &tio);
63    if (reset) {
64       tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &tioOld);
65    } else {
66       tioOld = tio; //backup
67       cfmakeraw(&tio);
68       tcsetattr(STDIN_FILENO, TCSANOW, &tio);
69    }
70 }
```

Volající je zodpovědný za vhodné volání funkce, např. pro zachování původního nastavení musí být funkce volána s argumentem 0 pouze jednou.

Vlákna POSIX – Příklad 6/10 (Vstupní vlákno 1/2)

```
72 void* input_thread(void* d)
73 {
74    data_t *data = (data_t*)d;
75    static int r = 0;
76    int c;
77    while (( c = getchar()) != 'q') {
78       pthread_mutex_lock(data->mtx);
79       int period = data->alarm_period; // save the current period
80       // handle the pressed key detailed in the next slide
   ...
95       if (data->alarm_period != period) { // the period has been changed
96          pthread_cond_signal(data->cond); // signal the output thread to refresh
97       }
98       data->alarm_period = period;
99       pthread_mutex_unlock(data->mtx);
100   }
101   r = 1;
102   pthread_mutex_lock(data->mtx);
103   data->quit = true;
104   pthread_cond_broadcast(data->cond);
105   pthread_mutex_unlock(data->mtx);
106   fprintf(stderr, "Exit input thread %lu\r\n", pthread_self());
107   return &r;
108 }
```

Vlákna POSIX – Příklad 7/10 (Vstupní vlákno 2/2)

- `input_thread()` – zpracuje požadavek uživatele na změnu periody.

```
81 switch(c) {
82    case 'r':
83       period -= PERIOD_STEP;
84       if (period < PERIOD_MIN) {
85          period = PERIOD_MIN;
86       }
87       break;
88    case 'p':
89       period += PERIOD_STEP;
90       if (period > PERIOD_MAX) {
91          period = PERIOD_MAX;
92       }
93       break;
94 }
```

Vlákna POSIX – Příklad 8/10 (výstupní vlákno)

```
96  void* output_thread(void* d)
97  {
98     data_t *data = (data_t*)d;
99     static int r = 0;
100    bool q = false;
101    pthread_mutex_lock(data->mtx);
102    while (!q) {
103       pthread_cond_wait(data->cond, data->mtx); // wait for next event
104       q = data->quit;
105       printf("\rAlarm time: %10i   Alarm counter: %10i", data->alarm_period,
       data->alarm_counter);
106       fflush(stdout);
107    }
108    pthread_mutex_unlock(data->mtx);
109    fprintf(stderr, "Exit output thread %lu\r\n", (unsigned long)pthread_self());
110    return &r;
111 }
```

Vlákna POSIX – Příklad 9/10 (Alarm vlákno)

```
113 void* alarm_thread(void* d)
114 {
115    data_t *data = (data_t*)d;
116    static int r = 0;
117    pthread_mutex_lock(data->mtx);
118    bool q = data->quit;
119    useconds_t period = data->alarm_period * 1000; // alarm_period is in ms
120    pthread_mutex_unlock(data->mtx);

122    while (!q) {
123       usleep(period);
124       pthread_mutex_lock(data->mtx);
125       q = data->quit;
126       data->alarm_counter += 1;
127       period = data->alarm_period * 1000; // update the period is it has been changed
128       pthread_cond_broadcast(data->cond);
129       pthread_mutex_unlock(data->mtx);
130    }
131    fprintf(stderr, "Exit alarm thread %lu\r\n", pthread_self());
132    return &r;
133 }
```

Vlákna POSIX – Příklad 10/10

- Příkladový program `lec11/threads.c` lze zkompilovat a spustit.

```
clang -c threads.c -std=gnu99 -O2 -pedantic -Wall  -o threads.o
clang threads.o -lpthread -o threads
```

- Periodu lze změnit klávesami 'r' a 'p'.
- Aplikace je ukončena po stisknutí 'q'.

```
./threads
Create thread 'Input' OK
Create thread 'Output' OK
Create thread 'Alarm' OK
Call join to the thread Input
Alarm time:        110   Alarm counter:         20Exit input thread 750871808
Alarm time:        110   Alarm counter:         20Exit output thread 750873088
Joining the thread Input has been OK - exit value 1
Call join to the thread Output
Joining the thread Output has been OK - exit value 0
Call join to the thread Alarm
Exit alarm thread 750874368
Joining the thread Alarm has been OK - exit value 0
```

`lec11/threads.c`

Obsah

Vlákna v C11

- C11 poskytuje „obal“ pro POSIXová vlákna.

  Např. viz `http://en.cppreference.com/w/c/thread`.

- Knihovna je `<threads.h>` a `-lstdthreads`.
- Základní typy
  - `thrd_t` – typ pro reprezentaci vlákna;
  - `mtx_t` – typ pro mutex;
  - `cnd_t` – typ pro podmíněné proměnné.
- Vytvoření vlákna je `thrd_create()` a funkce těla vlákna musí vrátit hodnotu `int`.
- `thrd_join()` se používá k čekání na ukončení vlákna.
- Mutex a podmíněná proměnná jsou inicializovány (bez atributů).
  - `mtx_init()` – inicializuje proměnnou mutex;
  - `cnd_init()` – inicializace podmíněnou proměnnou.

Příklad vláken C11

- Předchozí příklad `lec11/threads.c` implementovaný s vlákny C11 je v `lec11/threads-c11.c`.

```
clang -std=c11 threads-c11.c -lstdthreads -o threads-c11
./threads-c11
```

- Volání funkcí je v podstatě podobné, jen se liší názvy a drobnými úpravami.
  - `pthread_mutex_*()` → `mxt_*()`.
  - `pthread_cond_*()` → `cnd_*()`.
  - `pthread_*()` → `thrd_*()`.
  - Funkce těla vlákna vrací hodnotu int.
  - Neexistuje ekvivalent `pthread_self()`.
  - `thrd_t` závisí na implementaci.
  - Vlákna, mutexy a podmíněné proměnné se vytvářejí/inicializují bez specifikace konkrétních atributů.
  - Program je spojen s knihovnou `-lstdthreads`.

Zjednodušené rozhraní.

`lec11/threads-c11.c`

Obsah

Jak ladit vícevláknové aplikace

- Nejlepším nástrojem pro ladění vícevláknových aplikací je abyste ji nemuseli ladit.
- Toho lze dosáhnout disciplínou a obezřetným přístupem ke sdíleným proměnným.
- V opačném případě lze využít ladicí program s minimální sadou funkcí.

Jak ladit vícevláknové aplikace

- Nejlepším nástrojem pro ladění vícevláknových aplikací je
  abyste ji nemuseli ladit.
- Toho lze dosáhnout disciplínou a obezřetným přístupem ke sdíleným proměnným.
- V opačném případě lze využít ladicí program s minimální sadou funkcí.

Jak ladit vícevláknové aplikace

- Nejlepším nástrojem pro ladění vícevláknových aplikací je
  abyste ji nemuseli ladit.
- Toho lze dosáhnout disciplínou a obezřetným přístupem ke sdíleným proměnným.
- V opačném případě lze využít ladicí program s minimální sadou funkcí.

Podpora ladění

- Požadované funkce ladicího programu.
  - Seznam běžících vláken.
  - Stav synchronizačních primitiv.
  - Přístup k proměnným vláken.
  - Body přerušení (*break points*) v jednotlivých vláknech.

`lldb` – `http://lldb.llvm.org`; `gdb` – `https://www.sourceware.org/gdb`.
`cgdb`, `ddd`, `kgdb`, `Code::Blocks` nebo `Eclipse`, `Kdevelop`, `Netbeans`, `CLion`.

SlickEdit – `https://www.slickedit.com`; TotalView – `http://www.roguewave.com/products-services/totalview`

- **Logování** (**logging**) může být pro ladění programu efektivnější než ruční ladění s ručně nastavenými body přerušení.
  - Slepá ulička většinou souvisí s pořadím zamykání.
  - Zaznamenávání a analýza přístupu k zámkům (mutexům) může pomoci najít nesprávné pořadí synchronizačních operací vláken.

Komentáře – Souběh (*Race Condition*)

- Souběh je obvykle způsoben nedostatečnou synchronizací.
- Je vhodné si zapamatovat následující.
  - Vlákna jsou asynchronní!

    Nepředpokládejte, že provádění kódu je synchronní na jednoprocesorovém systému.
  - Při psaní vícevláknových aplikací předpokládejte, že vlákno může být kdykoli přerušeno nebo spuštěno!

    Části kódu, které vyžadují určité pořadí provádění vláken, potřebují synchronizaci.
  - Nikdy nepředpokládejte, že vlákno čeká po svém vytvoření!

    Může být spuštěno velmi brzy a obvykle mnohem dříve, než očekáváte.
  - Pokud nespecifikujete pořadí provádění vlákna, žádné takové pořadí neexistuje!

    "Vlákna běží v nejhorším možném pořadí". Bill Gallmeister"

Komentáře – Uváznutí (*Deadlock*)

- Uváznutí souvisejí s mechanismy synchronizace.
  - Uváznutí je typicky mnohem snazší odladit než souběh.
  - Uváznutí je často *mutexový deadlock* způsobený pořadím vícenásobného zamykání mutexu.
  - Mutexový deadlock nemůže nastat, pokud v každém okamžiku má (nebo se snaží získat) každé vlákno nejvýše jeden mutex.
  - Nedoporučuje se volat funkce se zamčeným mutexem, zejména pokud se funkce pokouší zamknout jiný mutex.
  - Doporučuje se uzamknout mutex na co nejkratší dobu.

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Vícevláknové programování
  - Terminologie, koncepty a motivace vícevláknového programování
  - Modely vícevláknových aplikací
  - Synchronizační mechanismy
  - Knihovny vláken POSIX a C11

Příklad aplikace

- Komentáře k ladění a problematice vícevláknových aplikací – souběhu a uváznutí