Paralelní programování

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 10

BAB36PRGA – Programování v C

Přehled témat

- Část 1 – Úvod do paralelního programování
  - Úvod
  - Paralelní výpočet/zpracování
  - Semafory
  - Sdílená paměť
  - Zprávy

Část I

Část 1 – Úvod do paralelního programování

Paralelní programování

- Myšlenka paralelního programování pochází z 60. let 20. století, kdy vznikly první víceprogramové a pseudoparalelní systémy.
- Paralelismus může být hardwarový nebo softwarový.
  - Hardwarový – skutečný hardwarový paralelismus víceprocesorových systémů.
  - Softwarový – pseudoparalelismus.
- Pseudoparalelismus – program s paralelními konstrukcemi může běžet v pseudoparalelním prostředí na jedno- nebo víceprocesorových systémech.

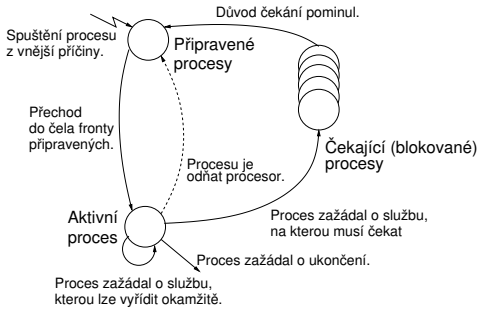
Motivace, proč se zabývat paralelním programováním

- Zvýšení výpočetního výkonu.
  - S víceprocesorovým systémem můžeme řešit výpočetní problém rychleji.
- Efektivní využití výpočetního výkonu.
  - I běžící program může čekat na data.
  - Např. běžný program s interakcí s uživatelem obvykle čeká na vstup uživatele.
- Současné zpracování mnoha požadavků.
  - Zpracování požadavků od jednotlivých klientů v architektuře klient/server.

Proces – Spuštěný program

- Proces je vykonávaný program běžící ve vyhrazeném paměťovém prostoru.
- Proces je entita operačního systému (OS), která je rozvrhována pro nezávislé provádění.
- Proces se obvykle nachází v jednom ze tří základních stavů:
  - Provádí se – právě běží na procesoru (CPU);
  - Blocked – čeká na periferii;
  - Waiting – čeká na procesor .
- Proces je v operačním systému identifikován svým identifikátorem, např. *Process IDentificator* – PID.
- Plánovač OS spravuje běžící procesy, které mají být přiděleny dostupným procesorům.

Stavy procesu



Víceprocesorové systémy

- Víceprocesorové systémy umožňují skutečný paralelismus.
- Je nutné synchronizovat procesory a podporovat datovou komunikaci.
  - Zdroje pro synchronizaci činností.
  - Prostředky pro komunikaci mezi procesory (procesy).

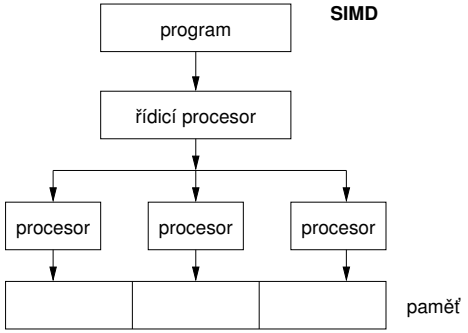
Možné architektury paralelní provádění programů (výpočtů)

- Řízení jednotlivých instrukcí.
  - **SIMD** – Single-Instruction, Multiple-Data – stejné instrukce jsou prováděny současně na různých datech.
    - "Procesory" jsou identické a běží synchronně.
    - Např. "vektorizace", jako MMX, SSE, 3Dnow! a AVX, AVX2 atd.
  - **MIMD** – Multiple-Instruction, Multiple-Data – procesory pracují nezávisle a asynchronně.
- Řízení přístupu do paměti.
  - Systémy se sdílenou pamětí – centrální sdílená paměť.

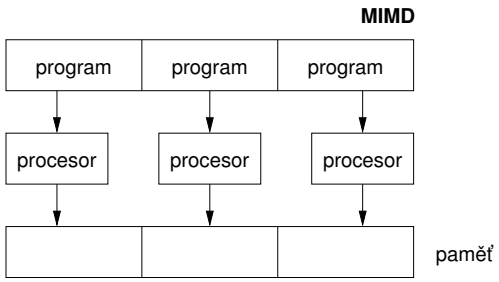
    Např. vícejádrové procesory.
  - Systémy s distribuovanou pamětí – každý procesor má vlastní paměť.

    Např. výpočetní sítě.

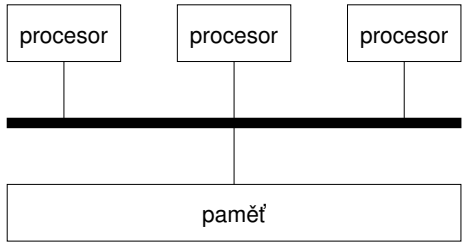
SIMD – Single-Instruction, Multiple-Data



MIMD – Multiple-Instruction, Multiple-Data

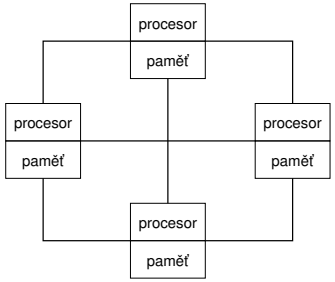


Systémy se sdílenou pamětí



- Procesory komunikují prostřednictvím sdílené paměti.
- Procesory mohou také synchronizovat své činnosti, tj. poskytovat exkluzivní přístup k paměti.

Systémy s distributivní pamětí



- S výhradním přístupem do paměti není problém.
- Je však nutné řešit komunikaci mezi procesory.

Úloha operačního systému (OS)

- OS poskytuje hardwarovou abstrakční vrstvu – zapouzdřuje HW a odděluje uživatele od konkrétní hardwarové architektury (pravý/pseudoparalelismus).
- OS je zodpovědný za synchronizaci běžících procesů.
- OS poskytuje uživatelská rozhraní (systémová volání).
  - K vytváření a ukončování procesů.
  - Ke správě procesů a procesorů.
  - Plánovatprocesory na dostupných procesorech.
  - Řízení přístupu ke sdílené paměti.
  - Mechanismy pro meziprocesovou komunikaci (IPC).
  - Mechanismy pro synchronizaci procesů.

Paralelní zpracování a programovací jazyky

- Pokud jde o programovací jazyky s podporou paralelního zpracování, lze je rozdělit na jazyky bez explicitní podpory paralelismu a s explicitní podporou paralelismu.
  - Bez explicitní podpory paralelismu – možné mechanismy paralelního zpracování.
    1. Paralelní zpracování je realizováno kompilátorem a operačním systémem.
    2. Paralelní konstrukce jsou explicitně označeny pro kompilátor.
    3. Paralelní zpracování je realizováno systémovými voláními operačního systému.
  - S explicitní podporou paralelismu.

Příklad paralelního výpočtu realizovaného překladačem 1/2

Příklad – násobení pole

```
1  #include "my_malloc.h"
   #define SIZE 30000000
   int main(int argc, char *argv[])
6  {
7     int i;
8     int *in1 = (int*)myMalloc(SIZE * sizeof(int));
9     int *in2 = (int*)myMalloc(SIZE * sizeof(int));
10    int *out = (int*)myMalloc(SIZE * sizeof(int));
11    for (i = 0; i < SIZE; ++i) {
12       in1[i] = i;
13       in2[i] = 2 * i;
14    }
15    for (i = 0; i < SIZE; ++i) {
16       out[i] = in1[i] * in2[i];
17       out[i] = out[i] - (in1[i] + in2[i]);
18    }
19    return 0;
20 }
```


Příklad paralelního výpočtu realizovaného překladačem 2/2

Příklad 1

```
1  icc compute.c
2  time ./a.out
4  real 0m0.562s
5  user 0m0.180s
6  sys  0m0.384s
```

Příklad 2

```
1  icc -msse compute.c; time ./a.out
2  compute.c(8) : (col. 2) remark: LOOP WAS VECTORIZED.
4  real 0m0.542s
5  user 0m0.136s
6  sys  0m0.408s
```

Příklad 3

```
1  icc -parallel  compute.c; time ./a.out
2  compute.c(12) : (col. 2) remark: LOOP WAS AUTO-PARALLELIZED.
4  real 0m0.702s
5  user 0m0.484s
6  sys  0m0.396s
```


Příklad – OpenMP – Násobení matic 1/2

- Open Multi-Processing (OpenMP) - aplikační programové rozhraní pro multiplatformní *multiprocessing* se sdílenou pamětí. http://www.openmp.org
- Makry můžeme kompilátor instruovat v vytvoření paralelní konstrukce, například paralelizaci přes vnější smyčku přes proměnnou *i*.

```
1  void multiply(int n, int a[n][n], int b[n][n], int c[n][n])
2  {
3     int i;
4  #pragma omp parallel private(i)
5  #pragma omp for schedule (dynamic, 1)
6     for (i = 0; i < n; ++i) {
7        for (int j = 0; j < n; ++j) {
8           c[i][j] = 0;
9           for (int k = 0; k < n; ++k) {
10             c[i][j] += a[i][k] * b[k][j];
11          }
12       }
13    }
14 }
```

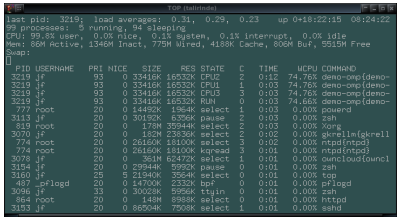
lec10/demo-omp-matrix.c

Pro zjednodušení jsou použity čtvercové matice stejných rozměrů.

Příklad – OpenMP – Násobení matic 2/2

- Porovnání násobení 1000× 1000 matic s OpenMP na iCore5 (2 jádra s HT).

```
gcc -std=c99 -O2 -o demo-omp demo-omp-matrix.c -fopenmp
./demo-omp 1000
Size of matrices 1000 x 1000 naive
        multiplication with O(n^3)
c1 == c2: 1
Multiplication single core 9.33 sec
Multiplication  multi-core 4.73 sec
export OMP_NUM_THREADS=2
./demo-omp 1000
Size of matrices 1000 x 1000 naive
        multiplication with O(n^3)
c1 == c2: 1
Multiplication single core 9.48 sec
Multiplication  multi-core 6.23 sec
```



Použijte např. program top pro zobrazení běžících procesů/vláken.

lec10/demo-omp-matrix.c

Jazyky s explicitní podporou paralelismu

- Má podporu pro vytváření nových procesů.
  - Spuštěný proces vytvoří kopii sebe sama.
    - Oba procesy provádějí totožný kód (zkopírovaný).
    - Proces parent (rodič) a proces child (dítě) jsou rozlišeny identifikátorem procesu (PID).
  - Segment kódu (paměť s instr. programu) je explicitně spojen s novým procesem.
- Bez ohledu na to, jak je nový proces vytvořen, nejdůležitější je vztah k provádění nadřazeného procesu a přístupu do paměti.
  - Zastaví nadřazený proces své provádění až do konce podřízeného procesu?
  - Je paměť sdílená podřízeným a rodičovským procesem?
- Granularita procesů – paralelismus od úrovně instrukcí až po paralelismus programů.

Paralelismus – úroveň příkazů

Příklad – blok parbegin-parend

parbegin
S_1;
S_2;
...
S_n
parend

- Příkazy S_1 jsou S_n prováděny paralelně.
- Provádění hlavního programu je přerušeno, dokud nejsou ukončeny všechny příkazy S_1 až S_n.
- Příkazy S_1 jsou S_n prováděny paralelně.

Příklad – doparalelní

```
for i = 1 to n doparalel {
   for j = 1 to n do {
      c[i,j] = 0;
      for k = 1 to n do {
         c[i,j] = c[i,j] + a[i,k]*b[k,j];
} } }
```

Paralelní provádění vnější smyčky nad všemi i.

Například OpenMP v C.

Paralelismus – úroveň procedur

- Procedura je spojena s procesem provádění.

```
...
procedure P;
...
PID x_pid = newprocess(P);
...
killprocess(x_pid);
```

  - P je procedura a x_{pid} je identifikátor procesu.
- Přiřazení procedury/funkce k procesu v deklaraci
  `PID x_pid process(P)`.
  - Proces je vytvořen při vytvoření proměnné x.
  - Proces je ukončen na konci x nebo dříve.

Např. vlákna (pthreads) v jazyce C.

Paralelismus – úroveň programu (procesu)

- Nový proces může být pouze celý program.
- Nový program je vytvořen systémovým voláním, které v okamžiku volání vytvoří kompletní kopii sebe sama včetně všech proměnných a dat.

Příklad - Vytvoření kopie procesu systémovým voláním fork

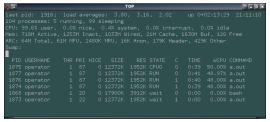
```
if (fork() == 0) {
   /* code executed by the child process */
} else {
   /* code executed by the parent process */
}
```

Např. `fork()` v jazyce C

Příklad – `fork()`

```
#define NUMPROCS 4
for (int i = 0; i < NUMPROCS; ++i) {
   pid_t pid = fork();
   if (pid == 0) {
      compute(i, n);
      exit(0);
   } else {
      printf("Child %d created\n", pid);
   }
}
printf("All processes created\n");
for (int i = 0; i < NUMPROCS; ++i) {
   pid_t pid = wait(&r);
   printf("Wait for pid %d return: %d\n", pid, r);
}
void compute(int myid, int n)
{
   printf("Process myid %d start computing\n", myid);
   ...
   printf("Process myid %d finished\n", myid);
}
```

lec10/demo-fork.c




```
clang  demo-fork.c && ./a.out
Child 2049 created
Process myid 0 start computing
Child 2050 created
Process myid 1 start computing
Process myid 2 start computing
Child 2051 created
Child 2052 created
Process myid 3 start computing
All processes created
Process myid 1 finished
Process myid 0 finished
Wait for pid 2050 return: 0
Process myid 3 finished
Process myid 2 finished
Wait for pid 2049 return: 0
Wait for pid 2051 return: 0
Wait for pid 2052 return: 0
```


Semafory

- E. W. Dijkstra – Semafor je mechanismus pro synchronizaci paralelních procesů se sdílenou pamětí.
- Semafor je celočíselná proměnná s následujícími operacemi.
  - *InitSem* - inicializace.
  - *Wait*
    Pokud $S > 0$, pak $S \leftarrow S - 1$ *(zdroje jsou k dispozici, v tomto případě získáme jeden).*
    V opačném případě pozastaví provádění volajícího procesu *(počkejte, až se S stane $S > 0$).*
  - *Signal*
    Jestliže existuje čekající proces, probuďte ho *(nechte proces získat jeden prostředek)..*
    V opačném případě zvýšíme hodnotu S o jedničku, tj. na $S \leftarrow S + 1$.*(uvolnit jeden prostřed*
- Semafory lze použít k řízení přístupu ke sdílenému prostředku.
  - S < 0 – sdílený prostředek je používán. Proces požádá o přístup ke zdroji a čeká na jeho uvolnění.
  - S > 0 - sdílený prostředek je k dispozici. Proces prostředek uvolní.

Hodnota semaforu může představovat počet dostupných zdrojů. Pak můžeme získat (nebo čekat na) k zdrojů – wait(k): $S \leftarrow S - k$ pro $S > k$ a také uvolnit k zdrojů – signal(k): $S \leftarrow S + k$.

Implementace semaforu

- Operace se semaforem musí být atomické.

Procesor nemůže být během provádění operace přerušen.

- Strojová instrukce *TestAndSet* načte a uloží obsah adresovaného paměťového prostoru a nastaví paměť na nenulovou hodnotu.
- Během provádění instrukce *TestAndSet* drží procesor systémovou sběrnici a přístup do paměti není povolen žádnému jinému procesoru.

Použití semaforů

- Semafory lze využít pro definování **kritických sekcí**.
- Kritické sekce je část programu, kde musí být zaručen exkluzivní přístup ke sdílené paměti (zdrojům).

Příklad kritické sekce chráněné semaforem

```
InitSem(S,1);
Wait(S);
/* Kód kritické sekce */
Signal(S);
```

- Synchronizace procesů semafory.

Příklad synchronizace procesů.

```
/* process p */
...
InitSem(S,0)
Wait(S); ...
exit();
```

```
/* process q */
...
Signal(S);
exit();
```

Příklad – Semafor 1/4 (systémové volání)

- Semafor je entita operačního systému (OS).

```c
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/sem.h>
/* create or get existing set of semphores */
int semget(key_t key, int nsems, int flag);
/* atomic array of operations on a set of semphores */
int semop(int semid, struct sembuf *array, size_t nops);
/* control operations on a st of semaphores */
int semctl(int semid, int semnum, int cmd, ...);
```


Příklad – Semafor 2/4 (synchronizační protokol)

- Příklad, kdy hlavní (primární) proces čeká, až budou připraveny dva další procesy (sekundární).
  1. *Primární* proces pozastaví provádění a čeká, až budou připraveny dva další *sekundární* procesy.
  2. *Sekundární* procesy pak čekají na uvolnění primárním procesem.
- Navrhovaný synchronizační "protokol".
  - Definuje náš způsob synchronizace procesů s využitím semaforů OS.
  - Sekundární proces zvýší semafor o 1.
  - Sekundární proces čeká, až semafor získá hodnotu 0, a pak je ukončen.
  - Primární proces čeká na dva sekundární procesy a sníží semafor o 2.
    - Musí také zajistit, aby hodnota semaforu nebyla 0; jinak by sekundární procesy byly předčasně ukončeny.
  - Musíme použít atomické operace se semaforem.

lec10/sem-primary.c lec10/sem-secondary.c

Příklad – Semafor 3/4 (primární proces)

```c
int main(int argc, char* argv[])
{
   struct sembuf sem[2]; // structure for semaphore atomic operations
   int id = semget(1000, 1, IPC_CREAT | 0666); // create semaphore
   if (id != -1) {
      int r = semctl(id, 0, SETVAL, 0) == 0;
      sem[0].sem_num = 0;  // operation to acquire semaphore
      sem[0].sem_op = -2;  // once its value will be >= 2
      sem[0].sem_flg = 0;  // representing two secondary processses are ready
      sem[1].sem_num = 0;  // the next operation in the atomic set
      sem[1].sem_op = 2;   // of operations increases the value of
      sem[1].sem_flg = 0;  // the semaphore about 2
      printf("Wait for semvalue >= 2\n");
      r = semop(id, sem, 2); // perform all (two) operations (in sem array) atomically
      printf("Press ENTER to set semaphore to 0\n");
      getchar();
      r = semctl(id, 0, SETVAL, 0) == 0; // set the value of semaphore
      r = semctl(id, 0, IPC_RMID, 0) == 0; // remove the semaphore
   }
   return 0;
}
```

lec10/sem-primary.c

Příklad – Semafor 4/4 (sekundární proces)

```c
int main(int argc, char* argv[])
{
   struct sembuf sem;
   int id = semget(1000, 1, 0);
   int r;
   if (id != -1) {
      sem.sem_num = 0; // add the secondary process
      sem.sem_op = 1;  // to the "pool" of resources
      sem.sem_flg = 0;
      printf("Increase semafore value (add resource)\n");
      r = semop(id, &sem, 1);
      sem.sem_op = 0;
      printf("Semaphore value is %d\n", semctl(id, 0, GETVAL, 0));
      printf("Wait for semaphore value 0\n");
      r = semop(id, &sem, 1);
      printf("Done\n");
   }
   return 0;
}
```

lec10/sem-secondary.c

- Entity IPC lze zobrazit nástrojem `ipcs`.

```
clang sem-primary.c -o sem-primary
clang sem-secondary.c -o sem-secondary
```


Problémy se semafory

- Hlavní problémy vyplývají z nesprávného použití.
- Typické chyby jsou následující.
  - Špatně identifikovaná kritická sekce.
  - Proces může být zablokován vícenásobným voláním `Wait(S)`.
  - Např. **uváznutí** (`deadlock`) může vzniknout, např. v následujících situacích.

Příklad – Deadlock

```
/* Process 1*/          /* Process 2*/
...                     ...
Wait(S1);               Wait(S2);
Wait(S2);               Wait(S1);
...                     ...
Signal(S2);             Signal(S1);
Signal(S1);             Signal(S2);
...                     ...
```


Sdílená paměť

- Označená část paměti přístupná z různých procesů.
- Služba operačního systému poskytovaná systémovými voláními.

Příklad systémových volání

```c
/* obtain a shared memory identifier */
int shmget(key_t key, size_t size, int flag);
/* attach shared memory */
void* shmat(int shmid, const void *addr, int flag);
/* detach shared memory */
int shmdt(const void *addr);
/* shared memory control */
int shmctl(int shmid, int cmd, struct shmid_ds *buf);
```

- OS spravuje informace o využití sdílené paměti.
- OS také spravuje oprávnění a přístupová práva.

Příklad – Sdílená paměť 1/4 (zápis)

- Zápis načteného řádku z `stdin` do sdílené paměti.

```c
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/shm.h>
#include <stdio.h>
#define SIZE 512
int main(int argc, char *argv[])
{
   char *buf;
   int id;
   if ((id = shmget(1000, SIZE, IPC_CREAT | 0666)) != -1) {
      if ( (buf = (char*)shmat(id, 0, 0)) ) {
         fgets(buf, SIZE, stdin);
         shmdt(buf);
      }
   }
   return 0;
}
```

lec10/shm-write.c

Příklad – Sdílená paměť 2/4 (čtení)

- Načtení řádku ze sdílené paměti a vytisknutí na `stdout`.

```c
#include <sys/types.h>
#include <sys/shm.h>
#include <stdio.h>
#define SIZE 512
int main(int argc, char *argv[])
{
   int id;
   char *buf;
   if ((id = shmget(1000, 512, 0)) != -1) {
      if ((buf = (char*)shmat(id, 0, 0)) ) {
         printf("mem:%s\n", buf);
      }
      shmdt(buf);
   } else {
      fprintf(stderr, "Cannot access to shared memory!\n");
   }
   return 0;
}
```

lec10/shm-read.c

Příklad – Sdílená paměť 3/4 (ukázka)

1. Použijeme `shm-write` k zápisu textového řetězce do sdílené paměti.
2. Použijeme `shm-read` k načtení dat (řetězce) ze sdílené paměti.
3. Odstranění segmentu sdílené paměti.

   `ipcrm -M 1000`
4. Pokus o čtení dat ze sdílené paměti.

```
% clang -o shm-write shm-write.c
% ./shm-write
Hello! I like programming in C!
```

```
% clang -o shm-read shm-read.c
% ./shm-read
mem:Hello! I like programming in C!
% ./shm-read
mem:Hello! I like programming in C!
% ipcrm -M 1000
% ./shm-read
Cannot access to shared memory!
```

lec10/shm-write.c lec10/shm-read.c

Příklad – Sdílená paměť 4/4 (stav)

- Seznam přístupů do sdílené paměti nástrojem `ipcs`.

```
after creating shared memory segment and before writing the text
m        65539          1000 --rw-rw-rw-    jf    jf    jf    jf
     1          512          1239          1239 22:18:48 no-entry 22:18:48
after writing the text to the shared memory
m        65539          1000 --rw-rw-rw-    jf    jf    jf    jf
     0          512          1239          1239 22:18:48 22:19:37 22:18:48
after reading the text
m        65539          1000 --rw-rw-rw-    jf    jf    jf    jf
     0          512          1239          1260 22:20:07 22:20:07 22:18:48
```


Zprávy a fronty zpráv

- Procesy mohou komunikovat prostřednictvím zpráv odesílaných/přijímaných do/z front(y) systémových zpráv.
- Fronty jsou entity operačního systému s definovanými systémovými voláními.

Příklad systémových volání

```c
#include <sys/types.h>
#include <sys/ipc.h>
#include <sys/msg.h>
/* Create a new message queue */
int msgget(key_t key, int msgflg);
/* Send a message to the queue -- block/non-block (IPC_NOWAIT) */
int msgsnd(int msqid, const void *msgp, size_t msgsz, int msgflg);

/* Receive message from the queue -- block/non-block (IPC_NOWAIT) */
int msgrcv(int msqid, void *msgp, size_t msgsz, long msgtyp, int msgflg);

/* Control operations (e.g., destroy) the message queue */
int msgctl(int msqid, int cmd, struct msqid_ds *buf);
```

Jiný systém předávání zpráv může být implementován uživatelskou knihovnou, např. síťovou komunikací.

Příklad – Předávání zpráv 1/4 (synchronizace, primární)

- Dva procesy jsou synchronizovány námi definovaným protokolem zpráv.
  1. Proces `primary` čeká na zprávu od procesu `secondary`.
  2. Primární proces informuje sekundární proces o řešení úlohy.
  3. Sekundární proces informuje primární proces o řešení.
  4. Primární proces odešle zprávu o ukončení.

Příklad `Primary` process 1/2

```c
struct msgbuf {
   long mtype;
   char mtext[SIZE];
};
int main(int argc, char *argv[])
{
   struct msgbuf msg;
   int id = msgget(KEY, IPC_CREAT | 0666);
   int r;
   if (id != -1) {
```


Příklad – Předávání zpráv 2/4 (primární)

Příklad `Primary` process 2/2

```c
      msg.mtype = 3; //type must be > 0
      printf("Wait for other process \n");
      r = msgrcv(id, &msg, SIZE, 3, 0);
      printf("Press ENTER to send work\n");
      getchar();
      strcpy(msg.mtext, "Do work");
      msg.mtype = 4; //work msg is type 4
      r = msgsnd(id, &msg, sizeof(msg.mtext), 0);
      fprintf(stderr, "msgsnd r: %d\n",r);
      printf("Wait for receive work results\n",r);
      msg.mtype = 5;
      r = msgrcv(id, &msg, sizeof(msg.mtext), 5, 0);
      printf("Received message: %s\n", msg.mtext);
      printf("Press ENTER to send exit msg\n");
      getchar();
      msg.mtype = EXIT_MSG; //I choose type 10 as exit msg
      r = msgsnd(id, &msg, 0, 0);
   }
   return 0;
}
```

lec10/msg-primary.c

Příklad – Předávání zpráv 3/4 (sekundární)

```c
int main(int argc, char *argv[])
{
   ...
   msg.mtype = 3;
   printf("Inform main process\n");
   strcpy(msg.mtext, "I'm here, ready to work");
   r = msgsnd(id, &msg, sizeof(msg.mtext), 0);
   printf("Wait for work\n");
   r = msgrcv(id, &msg, sizeof(msg.mtext), 4, 0);
   printf("Received message: %s\n", msg.mtext);
   for (i = 0; i < 4; i++) {
     sleep(1);
     printf(".");
     fflush(stdout);
   } //do something useful
   printf("Work done, send wait for exit\n");
   strcpy(msg.mtext, "Work done, wait for exit");
   msg.mtype = 5;
   r = msgsnd(id, &msg, sizeof(msg.mtext), 0);
   msg.mtype = 10;
   printf("Wait for exit msg\n");
   r = msgrcv(id, &msg, SIZE, EXIT_MSG, 0);
   printf("Exit message has been received\n");
```

lec10/msg-secondary.c

Příklad – Předávání zpráv 4/4 (ukázka)

1. Spustit primární proces.
2. Spustit sekundární proces.
3. Provedení výpočtu.
4. Odstranění vytvořené fronty zpráv **msgid**.

`#define KEY 1000`

`ipcrm -Q 1000`

```
% clang msg-primary.c -o primary
% ./primary
Wait for other process
Worker msg received, press ENTER to send work msg

msgsnd r: 0
Wait for receive work results
Received message: I am going to wait for exit msg
Press ENTER to send exit msg

%ipcrm -Q 1000

%ipcrm -Q 1000
ipcrm: msqs(1000): : No such file or directory
%
```

```
% clang msg-secondary.c -o secondary
% ./secondary
Inform main process
Wait for work
Received message:Do work
....done
Work done, send wait for exit
Wait for exit msg
Exit message has been received
%ipcs -q
Message Queues:
T ID     KEY  MODE     OWNER GROUP
q 65536 1000 -rw-rw- jf    jf
%
```

lec10/msg-primary.c lec10/msg-secondary.c

Komunikace standardním vstupem/výstupem

- Z aplikace můžeme spouštět jiné procesy.
- U spuštěného procesu přesměrujeme standardní vstupy a výstupy (*stdin*, *stdout*, *stderr*).
- Proces běží:
  - V rámci vykonávání naší aplikace.
  - Jako nový paralelní proces, obdoba volání `fork()`.
- Tento mechanismus umožňuje propojování kódu na úrovni programů (binárních).
- Binární kód může být vytvořen v jiném prog. jazyce.

Znovu použitelnost na úrovni samostatných programů je jednou z hlavních motivačních oddělení jádra (výpočetního) programu a grafického rozhraní.

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Úvod do paralelního programování
  - Principy a hlavní architektury
  - Program a proces v OS
- Paralelní výpočet
- Synchronizace a mezi-procesová komunikace (Inter-Process Communication – IPC)
  - Semafory
  - Sdílená paměť
  - Zprávy

- Příště: Vícevláknové programování

Část III

Appendix

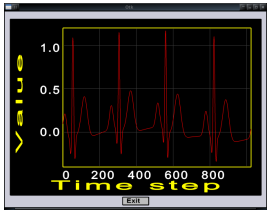
Generátor signálů a vizualizace

- Mějme generátor signálů `sgen`, což je program, který generuje posloupnost hodnot na `stdout`.
- Vizualizace může být realizována v jiné aplikaci `tsignal_viewer`, která čte hodnoty ze `stdin`.
- Tyto dvě aplikace můžeme propojit rourou `./sgen | ./tsignal_viewer`.

```
$ ./sgen
0.000000
1.075095
1.031029
0.916540
0.748307
0.549199
0.342897
0.149521
-0.016643
-0.147374
-0.239653
-0.293963
-0.314364
-0.306833
-0.279048
-0.239311
-0.195373
```

```
$ ./sgen | wc
65772   65772  618529
$ ./sgen | ./tsignal_viewer
```

- HW9B je rozšířením konceptu uživatelem definovaného komunikačního protokolu mezi generátorem signálů a řídicí aplikací s vizualizací a **vícevláknovou aplikací**.



Masivní paralelismus s využitím grafických karet

- Vykreslování obrázků prováděné pixel po pixelu lze relativně <F10>snadno paralelizovat.
- Grafické procesory (GPU) mají podobný (nebo dokonce vyšší) stupeň integrace s hlavními procesory (CPU).
- Mají obrovský počet paralelních procesorů.

  Například GeForce GTX 1060 ∼ 1280 jader.
- Výpočetní výkon lze využít i v jiných aplikacích.
  - Zpracování proudu dat (instrukce SIMD - procesory).
  - GPGPU - výpočet pro všeobecné účely na GPU. `http://www.gpgpu.org`.
  - OpenCL (Open Computing Language) – abstraktní rozhraní GPGPU.
  - CUDA - Paralelní programovací rozhraní pro grafické karty Nvidia.

    `http://www.nvidia.com/object/cuda_home.html`

Výpočetní výkon (2008)

- Jaký je uváděný výpočetní výkon procesoru?
- Grafické (proudové/stream) procesory.

CSX700	96 GigaFLOPs		
Cell	102 GigaFLOPs		
GeForce 8800 GTX	518 GigaFLOPs	(včetně texturovacích jednotek)	
Radeon HD 4670	480 GigaFLOPs		
GeForce RTX 4060	15 110 GigaFLOPs	(2023)	*Špičkové katalogové hodnoty.*

- Procesory

Phenom X4 9950 (@2,6 GHz)	21 GigaFLOPs	
Core 2 Duo E8600 (@3,3 GHz) a 22 GigaFLOPs		
Cure 2 Quad QX9650 (@3,3 GHz)	35 GigaFLOPs	
Cure 2 Quad QX9650 (@3,3 GHz) a 35 GigaFLOPs		
Core i7 970 (@3,2 GHz) a 42 GigaFLOPs		
Core i9-13900 (@2,00–5,60 GHz)	846 GigaFLOPs	(2023)

Test linpack 32-bit.

- Je uváděný výkon skutečně dosažitelný? *(float vs double)*
- Jaké jsou další charakteristiky? *Např. výpočetní výkon / spotřeba energie.*
  - CSX700 má typickou spotřebu energie kolem 9W.

CUDA

- NVIDIA Compute Unified Device Architecture.
- Rozšíření jazyka C pro přístup k paralelním výpočetním jednotkám GPU.
- Výpočet (**jádro**/keykernel) provádí GPU.
- Jádro se provádí paralelně s využitím dostupných výpočetních jednotek.
- **Host** - Hlavní procesor (proces).
- **Device** - GPU.
- Data musí být v paměti přístupné GPU.

  Host paměť → *Device* paměť
- Výsledek (výpočtu) je uložen v paměti GPU.

  Host memory ← *Device* memory

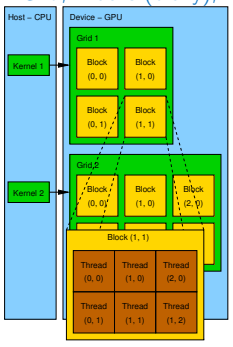
CUDA – výpočetní model

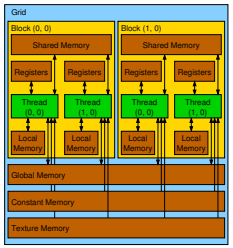
- Jádro (výpočet) je rozděleno do bloků.
- Každý blok představuje paralelní výpočet části výsledku.

  Např. část násobení matic.
- Každý blok se skládá z výpočetních vláken.
- Paralelní výpočty jsou synchronizovány v rámci bloku.
- Bloky jsou uspořádány do **mřížky**.
- Škálovatelnost je realizována rozdělením výpočtu do bloků.

  Bloky nemusí být nutně počítány paralelně. Podle dostupného počtu paralelních jednotek mohou být určité bloky počítány postupně.

CUDA – Grid, Blocks (bloky), Threads (vlákna) a přístup do paměti





- Doba přístupu do paměti.
- Kolize při současném přístupu několika vláken.

CUDA – Příklad – Násobení matic 1/8

- NVIDIA CUDA SDK - verze 2.0, `matrixMul`.
- Jednoduché násobení matic.
  - $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{B}$,
  - Matice mají stejné rozměry $n \times n$,
  - kde n je násobek velikosti bloku.
- Porovnání
  - naivní implementace v jazyce C (3× *for cyklus*),
  - naivní implementace v C s transpozicí matice.
  - CUDA implementace.
- Hardware
  - CPU - Intel Core 2 Duo @ 3 GHz, 4 GB RAM,
  - GPU - NVIDIA G84 (GeForce 8600 GT), 512 MB RAM.

CUDA – Příklad – Násobení matic 2/8

Naivní implementace

```
1  void simple_multiply(const int n,
2        const float *A, const float *B, float *C)
3  {
4    for (int i = 0; i < n; ++i) {
5      for (int j = 0; j < n; ++j) {
6        float prod = 0;
7        for (int k = 0; k < n; ++k) {
8          prod += A[i * n + k] * B[k * n + j];
9        }
10       C[i * n + j] = prod;
11     }
12   }
13 }
```

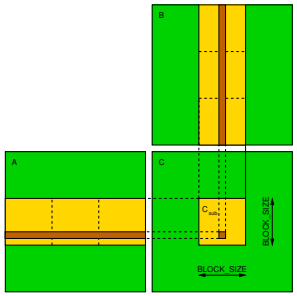
CUDA – Příklad – Násobení matic 3/8

Naivní implementace s transpozicí

```
1  void simple_multiply_trans(const int n, const float  *a,  const float *b, float  *c)
2  {
3    float * bT = create_matrix(n);
4    for (int i = 0; i < n; ++i) {
5      bT[i*n + i] = b[i*n + i];
6      for (int j = i + 1; j < n; ++j) {
7        bT[i*n + j] = b[j*n + i];
8        bT[j*n + i] = b[i*n + j];
9      }
10   }
11   for (int i = 0; i < n; ++i) {
12     for (int j = 0; j < n; ++j) {
13       float tmp = 0;
14       for (int k = 0; k < n; ++k) {
15         tmp += a[i*n + k] * bT[j*n + k];
16       }
17       c[i*n + j] = tmp;
18     }
19   }
20   free(bT);
21 }
```


CUDA – Příklad – Násobení matic 4/8

- CUDA – výpočetní strategie
  - Rozdělíme matice do bloků.
  - Každý blok vypočítá jednu dílčí matici C_{sub}.
  - Každé vlákno jednotlivých bloků vypočítá jeden prvek C_{sub}.



CUDA – Příklad – Násobení matic 5/8

CUDA – Implementace – hlavní funkce

```
1  void cuda_multiply(const int n, const float *hostA, const float *hostB, float *hostC)
2  {
3    const int size = n * n * sizeof(float);
4    float *devA, *devB, *devC;
5    cudaMalloc((void**)&devA, size);
6    cudaMalloc((void**)&devB, size);
7    cudaMalloc((void**)&devC, size);
8    cudaMemcpy(devA, hostA, size, cudaMemcpyHostToDevice);
9    cudaMemcpy(devB, hostB, size, cudaMemcpyHostToDevice);
10   dim3 threads(BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE);  // BLOCK_SIZE == 16
11   dim3 grid(n / threads.x, n /threads.y);
12   // Call kernel function matrixMul
13   matrixMul<<<grid, threads>>>(n, devA, devB, devC);
14   cudaMemcpy(hostC, devC, size, cudaMemcpyDeviceToHost);
15   cudaFree(devA);
16   cudaFree(devB);
17   cudaFree(devC);
18 }
```


CUDA – Příklad – Násobení matic 6/8

Implementace CUDA – *kernel* funkce

```
1  __global__ void matrixMul(int n, float* A, float* B, float* C) {
2    int bx = blockIdx.x; int by = blockIdx.y;
3    int tx = threadIdx.x; int ty = threadIdx.y;
4    int aBegin = n * BLOCK_SIZE * by;  //beginning of sub-matrix in the block
5    int aEnd = aBegin + n - 1; //end of sub-matrix in the block
6    float Csub = 0;
7    for (
8          int a = aBegin, b = BLOCK_SIZE * bx;
9          a <= aEnd;
10         a += BLOCK_SIZE, b += BLOCK_SIZE * n
11       ) {
12      __shared__ float As[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE]; // shared memory within
13      __shared__ float Bs[BLOCK_SIZE][BLOCK_SIZE]; // the block
14      As[ty][tx] = A[a + n * ty + tx]; // each thread reads a single element
15      Bs[ty][tx] = B[b + n * ty + tx]; // of the matrix to the memory
16      __syncthreads(); // synchronization, sub-matrix in the shared memory
17      for (int k = 0; k < BLOCK_SIZE; ++k) { // each thread computes
18         Csub += As[ty][k] * Bs[k][tx]; // the element in the sub-matrix
19      }
20      __syncthreads();
21   }
22   int c = n * BLOCK_SIZE * by + BLOCK_SIZE * bx;
23   C[c + n * ty + tx] = Csub; // write the results to memory
24 }
```


CUDA – Příklad – Násobení matic 7/8

- CUDA zdrojové kódy.

Příklad – Vyhrazený zdrojový soubor `cuda_func.cu`

1. Deklarace externí funkce.

```
1 extern "C" { // declaration of the external function (cuda kernel)
2  void cuda_multiply(const int n, const float *A, const float *B, float *C);
3 }
```

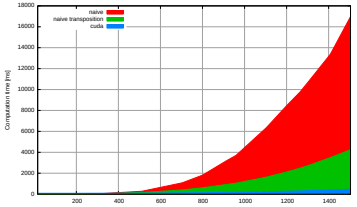
2. Zkompilujeme kód CUDA do kódu C++.

```
1 nvcc --cuda cuda_func.cu -o cuda_func.cu.cc
```

3. Kompilace souboru `cuda_func.cu.cc` pomocí standardního kompilátoru.

CUDA – Příklad – Násobení matic 8/8

Výpočetní čas (v milisekundách)



N	Naive	Transp.	CUDA	N	Naive	Transp.	CUDA
112	2	1	81	704	1083	405	122
208	11	11	82	1104	6360	1628	235
304	35	33	84	1264	9763	2485	308

- Matlab 7.6.0 (R2008a):
  n=1104; A=rand(n,n); B=rand(n,n); tic; C=A*B; toc
  Uplynulý čas je 0,224183 sekundy.