Standardní knihovny C, rekurze

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 07

B0B36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

Část 1 – Standardní knihovny, čtení/zápis ze souboru

Část 2 – Rekurze

Část 3 – Zadání 7. domácího úkolu (HW07)

Zadání – povinná část

Zadání – volitelná část

Zadání – bonusová část

Část I

Část 1 – Standardní knihovny, čtení/zápis ze souboru

Standardní knihovny

- Jazyk C sám osobě neobsahuje prostředky pro vstup/výstup dat, složitější matematické operace ani:
  - práci z textovými řetězci
  - správu paměti pro dynamické přidělování
  - vyhodnocení běhových chyb (run-time errors)
- Tyto a další funkce jsou obsaženy ve standardních knihovnách, které jsou součástí překladače jazyka C
  - Knihovny – přeložený kód se připojuje k programu, např `libc.so`
  - Hlavičkové soubory – obsahují prototypy funkcí, definici typů, makra a konstanty a vkládají se do zdrojových souborů příkazem preprocesoru `#include <jmeno_knihovny.h>`

Např. `#include <stdio.h>`

Standardní knihovny

- `stdio.h` – Vstup a výstup (formátovaný i neformátovaný)
- `stdlib.h` – Matematické funkce, alokace paměti, převod řetězců na čísla, řazení (`qsort`), vyhledávání (`bsearch`), generování náhodných čísel (`rand`)
- `limits.h` – Rozsahy číselných typů
- `math.h` – Matematické funkce
- `errno.h` – Definice chybových hodnot
- `assert.h` – Zpracování běhových chyb

- `ctype.h` – Klasifikace znaků (`char`)
- `string.h` – Řetězce, blokové přenosy dat v paměti (`memcpy`)
- `locale.h` – Internacionalizace
- `time.h` – Datum a čas

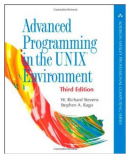
Standardní knihovny (POSIX)

Komunikace s operačním systémem (OS)

POSIX – Portable Operating System Interface

- `stdlib.h` – Funkce využívají prostředků OS
- `signal.h` – Asynchronní události,vlákna
- `unistd.h` – Procesy, čtení/zápis souborů, ...
- `pthread.h` – Vlákna (POSIX Threads)
- `threads.h` – Standardní knihovna pro práci s vlákny (C11)

Advanced Programming in the UNIX Environment, 3rd edition, *W. Richard Stevens, Stephen A. Rago* Addison-Wesley, 2013, ISBN 978-0-321-63773-4



Základní práce se soubory – otevření souboru

- Knihovna `stdio.h`
- Přístup k souboru `FILE *f;`
- Otevření souboru

  `FILE *fopen(char *filename, char *mode);`
- Práce s binárními i textovými soubory
- Soubory jsou čteny/zapisovány sekvenčně
  - Se soubory se pracuje jako s proudem dat
  - Aktuální „pozici" v souboru si můžeme představit jako kurzor
  - Při otevření souboru se kurzor nastavuje na začátek souboru
- Režim práce se souborem je dán hodnotou proměnné `mode`
  - `"r"` – režim čtení,
  - `"w"` – režim zápisu

    Vytvoří soubor, pokud neexistuje, jinak smaže obsah souboru
  - `"a"` – režim přidávání do souboru

    Kurzor je nastaven na konec souboru.
  - Můžeme otevřít s příznakem `+`, např. `"+r"` pro otevření souboru pro čtení i zápis

    viz `man fopen`

Testování – otevření/zavření souboru

- Testování otevření souboru

```
1 char *fname = "file.txt";
2
3 if ((f = fopen(fname, "r")) == NULL) {
4   fprintf(stderr, "Error: open file '%s'\n", fname);
5 }
```

- Zavření souboru – `int fclose(FILE *file);`

```
1 if (fclose(f) == EOF) {
2   fprintf(stderr, "Error: close file '%s'\n", fname);
3 }
```

- Dosažení konce souboru – `int feof(FILE *file);`

Příklad – čtení souboru znak po znaku

- Čtení znaku: `int getc(FILE *file);`
- Hodnota znaku (`unsigned char`) je vrácena jako `int`

```
1 int count = 0;
2 while ((c = getc(f)) != EOF) {
3     printf("Read character %d is '%c'\n", count,
      c);
4     count++;
5 }
```

lec07/read_file.c

- Pokud nastane chyba nebo konec souboru vrací funkce `getc` hodnotu `EOF`
- Pro rozlišení chyby a konce souboru lze využít funkce `feof()` a `ferror()`

Formátované čtení ze souboru

- `int fscanf(FILE *file, const char *format, ...);`
- Analogie formátovanému výstupu – hodnoty jsou předávány odkazem
- Vrací počet přečtených položek, například pro vstup

```
record 1 13.4
```

- příkaz: `int r = fscanf(f, "%s %d %lf\n", str, &i, &d);`
- bude hodnota proměnné

`r == 3`

- Při čtení textového řetězce je nutné zajistit dostatečný paměťový prostor pro načítaný textový řetězec, např. omezením velikosti řetězce

```
char str[10];
int r = fscanf(f, "%9s %d %lf\n", str, &i, &d);
```

lec07/file_scanf.c

Zápis do souboru

- Po znaku – `int putc(int c, FILE *file);`
- Formátovaný výstup

`int fprintf(FILE *file, const *format, ...);`

```
int main(int argc, char *argv[]) {
   char *fname = argc > 1 ? argv[1] : "out.txt";
   FILE *f;
   if ((f = fopen(fname, "w")) == NULL) {
      fprintf(stderr, "Error: Open file '%s'\n", fname);
      return -1;
   }
   fprintf(f, "Program arguments argc: %d\n", argc);
   for(int i = 0; i < argc; ++i) {
      fprintf(f, "argv[%d]='%s'\n", i, argv[i]);
   }
   if (fclose(f) == EOF) {
      fprintf(stderr, "Error: Close file '%s'\n", fname);
      return -1;
   }
   return 0;
}
```

lec07/file_printf.c

- Identicky lze použít `stdin`, `stdout`, `stderr`

Náhodný přístup k souborům – `fseek()`

- Nastavení pozice kurzoru v souboru relativně vůči `whence` v bajtech
- `int fseek(FILE *stream, long offset, int whence);`, kde `whence`
  - `SEEK_SET` – nastavení pozice od začátku souboru
  - `SEEK_CUR` – relativní hodnota vůči současné pozici v souboru
  - `SEEK_END` – nastavení pozice od konce souboru
- `fseek()` vrací 0 v případě úspěšného nastavení pozice
- Nastavení pozice v souboru na začátek

`void rewind(FILE *stream);`

Binární čtení/zápis z/do souboru

- Pro čtení a zápis bloku dat můžeme využít funkce `fread` a `fwrite` z knihovny `stdio.h`
- Načtení `nmemb` prvků, každý o velikosti `size` bajtů
  `size_t fread(void* ptr, size_t size, size_t nmemb, FILE *stream);`
- Zápis `nmemb` prvků, každý o velikosti `size` bajtů
  `size_t fwrite(const void *ptr, size_t size, size_t nmemb, FILE *stream);`
- Funkce vrací počet přečtených/zapsaných bajtů
- Pokud došlo k chybě nebo detekci konce souboru funkce vrací menší než očekávaný počet bajtů

Zpracování chyb

- Základní chybové kódy jsou definovány v `errno.h`
- Tyto kódy jsou ve standardních C knihovnách používány jako příznaky nastavené v případě selhání volání funkce v globální proměnné `errno`
- Například otevření souboru `fopen()` vrací hodnotu `NULL`, pokud se soubor nepodařilo otevřít
- Z této hodnoty, ale nepoznáme proč volání selhalo
- Pro funkce, které nastavují `errno`, můžeme podle hodnoty identifikovat důvod chyby
- Textový popis číselných kódů pro standardní knihovnu C je definován v `string.h`
- Řetězec můžeme získat voláním funkce

```
char* strerror(int errnum);
```


Příklad použití errno

- Otevření souboru

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <errno.h>
3  #include <string.h>
4
5  int main(int argc, char *argv[]) {
6     FILE *f = fopen("soubor.txt", "r");
7     if (f == NULL) {
8        int r = errno;
9        printf("Open file failed errno value %d\n", errno);
10       printf("String error '%s'\n", strerror(r));
11    }
12    return 0;
13 }
```

lec07/errno.c

- Výstup při neexistujícím souboru

```
Open file failed errno value 2
String error 'No such file or directory'
```

- Výstup při pokusu otevřít soubor bez práv přístupu k souboru

```
Open file failed errno value 13
String error 'Permission denied'
```


Testovací makro assert

- Do kódu lze přidat podmínky na nutné hodnoty proměnných
- Testovat můžeme makrem `assert(expr)` z knihovny `assert.h`
- Pokud není `expr` program se ukončí a vypíše jméno zdrojového souboru a číslo řádku.
- Makro vloží příslušný kód do programu

  Získáme tak relativně jednoduchý způsob indikace případné chyby, např. nevhodným argumentem funkce

- Vložení makra lze zabránit kompilací s definováním makra `NDEBUG`

man assert

- Příklad

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

int main(int argc, char *argv[])
{
   assert(argc > 1);
   printf("program argc: %d\n", argc);
   return 0;
}
```

lec07/assert.c

Příklad použití makra assert()

- Kompilace s makrem a spuštění programu bez/s argumentem

```
clang assert.c -o assert
./assert
Assertion failed: (argc > 1), function main, file assert.c
    , line 5.
zsh: abort      ./assert

./assert 2
start argc: 2
```

- Kompilace bez makra a spuštění programu bez/s argumentem

```
clang -DNDEBUG assert.c -o assert
./assert
program start argc: 1
./assert 2
program start argc: 2
```

lec07/assert.c

Příkazy dlouhého skoku

- Příkaz `goto` je možné použít pouze v rámci jedné funkce
- Knihovna `<setjmp.h>` definuje funkce `setjmp` a `longjmp` pro skoky mezi funkcemi
- `setjmp` uloží aktuální stav registrů procesoru a pokud funkce vrátí hodnotu různou od 0, došlo k volání `longjmp`
- Při volání `longjmp` jsou hodnoty registrů procesoru obnoveny a program pokračuje od místa volání `setjmp`

Kombinaci `setjmp` a `longjmp` lze využít pro implementace ošetření výjimečných stavu podobně jako `try-catch`

```
1  #include <setjmp.h>
2  jmp_buf jb;
3  int compute(int x, int y);
4  void error_handler(void);
5  if(setjmp(jb) == 0) {
6     r = compute(x, y);
7     return 0;
8  } else {
9     error_handler();
10    return -1;
11 }
```

```
12 int compute(int x, int y) {
13    if(y == 0) {
14       longjmp(jb, 1);
15    } else {
16       x = (x + y * 2);
17       return (x / y);
18    }
19 }
20 void error_handler(void)  {
21    fprintf("Error\n");
22 }
```

Informativní

Část II

Část 2 – Rekurze

Výpočet faktoriálu

- Iterace

$$n! = n(n-1)(n-2)\dots 2 \cdot 1$$

```
int factorialI(int n)
{
   int f = 1;
   for(; n > 1; --n) {
      f *= n;
   }
   return f;
}
```

- Rekurze

$$n! = 1 \text{ pro } n \leq 1$$
$$n! = n(n-1)! \text{ pro } n > 1$$

```
int factorialR(int n)
{
   int f = 1;
   if (n > 1) {
      f = n * factorialR(n-1);
   }
   return f;
}
```

lec07/demo-factorial.c

Příklad výpis posloupnosti 1/3

- Vytvořte program, který přečte posloupnost čísel a vypíše ji v opačném pořadí
- Rozklad problému:
  - Zavedeme abstraktní příkaz: „*obrať posloupnost*"
  - Příkaz rozložíme do tří kroků:
    1. Přečti číslo

       číslo uložíme pro pozdější „obrácený" výpis
    2. Pokud není detekován konec posloupnost „*obrať posloupnost*"

       pokračujeme ve čtení čísel
    3. Vypiš číslo

       vypíšeme uložené číslo

Příklad výpis posloupnosti 2/3

```
1  void reverse()
2  {
3     int v;
4     if (scanf("%i", &v) == 1) {
5        reverse();
6        printf("%3d ", v);
7     }
8  }
9
10 int main(void)
11 {
12    fprintf(stderr, "Enter a sequence of numbers (use
       ctr+D for the end of the the sequence)\n");
13    reverse();
14    return 0;
15 }
```

lec07/demo-revert_sequence.c

Příklad výpis posloupnosti 3/3

- lec07/demo-revert_sequence.c
- Vytvoření posloupností

```
./generate_numbers.sh | tr '\n' ' ' | cat > numbers.txt
clang demo-revert_sequence.c
./a.out < numbers.txt 2>/dev/null > numbers-r.txt
./a.out < numbers-r.txt 2>/dev/null > numbers-rr.txt
```

- Příkaz pro výpis obsahu souborů

```
for i in numbers.txt numbers-r.txt numbers-rr.txt; do
    echo "$i"; cat $i; echo ""; done
```

- Výpis obsahu souborů

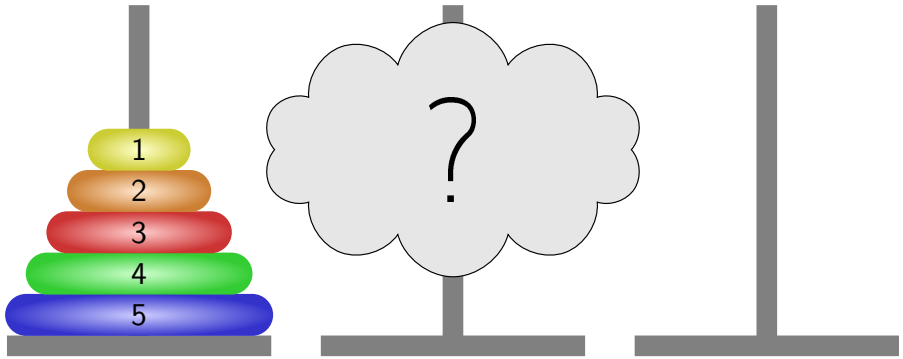
```
numbers.txt
10 4 20 8 8 5 18 6 7 7
numbers-r.txt
  7   7   6  18   5   8   8  20   4  10

numbers-rr.txt
 10   4  20   8   8   5  18   6   7   7
```


Příklad Hanojské věže

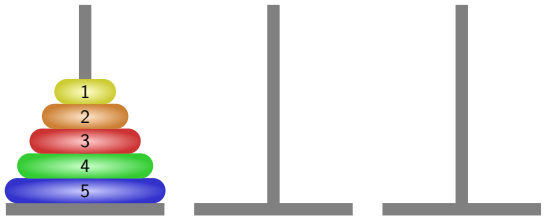
- Přemístit disky na druhou jehlu s použitím třetí (pomocné) jehly za dodržení pravidel:
  1. V každém kroku můžeme přemístit pouze jeden disk a to vždy z jehly na jehlu

     Disky nelze odkládat mimo jehly
  2. Položit větší disk na menší není dovoleno

Hanojské věže – 5 disků



Návrh řešení



- Zavedeme abstraktní příkaz **moveTower(n, 1, 2, 3)** realizující přesun n disků z jehly 1 na jehlu 2 s použitím jehly 3.
- Pro $n > 0$ můžeme příkaz rozložit na tři jednodušší příkazy
  1. **moveTower(n-1, 1, 3, 2)**
     přesun $n-1$ disků z jehly 1 na jehlu 3
  2. „*přenes disk z jehly na jehlu 2*"
     přesun největšího disku na cílovou pozici
     abstraktní příkaz
  3. **moveTower(n-1, 3, 2, 1)**
     přesun $n-1$ disků na cílovou pozici

Příklad řešení

```
1  void moveTower(int n, int from, int to, int tmp)
2  {
3     if (n > 0) {
4        moveTower(n-1, from, tmp, to); //move to tmp
5        printf("Move disc from %i to %i\n", from, to);
6        moveTower(n-1, tmp, to, from); //move from tmp
7     }
8  }
9
10 int main(int argc, char *argv[])
11 {
12    int numberOfDiscs = argc > 1 ? atoi(argv[1]) : 5;
13    moveTower(numberOfDiscs, 1, 2, 3);
14    return 0;
15 }
```

lec07/demo-towers_of_hanoi.c

Příklad výpisu

- lec07/demo-towers_of_hanoi.c

```
clang demo-towers_of_hanoi.c
./a.out 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 2 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 1
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 2
```

```
clang demo-towers_of_hanoi.c
./a.out 4
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 2 to 1
Move disc from 2 to 3
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
Move disc from 3 to 1
Move disc from 2 to 1
Move disc from 3 to 2
Move disc from 1 to 3
Move disc from 1 to 2
Move disc from 3 to 2
```


Rekurzivní algoritmy

- Rekurzivní funkce jsou přímou realizací rekurzivních algoritmů
- Rekurzivní algoritmus předepisuje výpočet „**shora dolů**" v závislosti na velikosti vstupních dat
  - Pro nejmenší (nejjednodušší) vstup je výpočet předepsán přímo
  - Pro obecný vstup je výpočet předepsán s využitím téhož algoritmu pro menší vstup
- Výhodou rekurzivních funkcí je jednoduchost a přehlednost

Rekurzivní vs iteračními algoritmy

- Nevýhodou rekurzivních algoritmů může být časová náročnost způsobená např. zbytečným opakováním výpočtu
- Řadu rekurzivních algoritmů lze nahradit iteračními, které počítají výsledek „**zdola nahoru**, tj. od menších (jednodušších) vstupních dat k větším (složitějším).
- Pokud algoritmus výpočtu „**zdola nahoru**" nenajdeme, např. při řešení problému Hanojských věží, lze rekurzivitu odstranit pomocí zásobníku.

Např. zásobník využijeme pro uložení stavu řešení problému.

Rekurze

"To iterate is human, to recurse divine."

L. Peter Deutsch

http://www.devtopics.com/101-great-computer-programming-quotes

Elegance vs obtížnost rekurze

I've often heard people describe understanding recursion as one of those "got it" moments, when the universe opened its secret stores of knowledge and gifted the mind of a burgeoning developer with a very powerful tool. For me, recursion has always been hard. Each time I'm able to peer more into its murky depths, I am humbled to see how little I feel like I really appreciate and understand its power and elegance.

Rick Winfrey, 2012

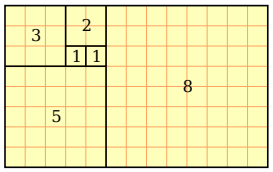
http://selfless-singleton.rickwinfrey.com/2012/11/27/to-iterate-is-human-to-recurse-divine

Fibonacciho posloupnost

- 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, ...

  Nebo 0, 1, 1, 2, 3, 5, ...
- $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$
- pro $F_1 = 1$, $F_2 = 1$

  Nebo $F_1 = 0, F_2 = 1$



- Nekonečná posloupnost přirozených čísel, kde každé číslo je součtem dvou předchozích.
- Limita poměru dvou následujících čísel Fibonacciho posloupnosti je rovna zlatému řezu.
  - Sectio aurea – ideální poměr mezi různými délkami
  - Rozdělení úsečky na dvě části tak, že poměr větší části ku menší je stejný jako poměr celé úsečky k větší části
    $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1{,}618\,033\,988\,749\,894\,848\,\ldots$

Fibonacciho posloupnost – historie

- Indičtí matematici (450 nebo 200 BC)
- Leonardo Pisano (1175–1250) popis růstu populace králíků

italský matematik známý také jako Fibonacci

  - F_n – velikost populace po n měsících za předpokladu
    - První měsíc se narodí jediný pár.
    - Narozené páry jsou produktivní od 2. měsíce svého života.
    - Každý měsíc zplodí každý produktivní pár jeden další pár.
    - Králíci nikdy neumírají, nejsou nemocní atd.
- Henry E. Dudeney (1857–1930) – popis populace krav
  - „Jestliže každá kráva vyprodukuje své první tele (jalovici) za rok a poté každý rok jednu další jalovici, kolik budete mít krav za 12 let, jestliže žádná nezemře a na počátku budete mít jednu krávu?

Po 12 let je k dispozici jeden či více býků

Fibonacciho posloupnost – rekurzivně

- Platí:

$$f_0 = 1$$
$$f_1 = 1$$
$$f_n = f_{n-1} + f_{n-2}, \text{ pro } n > 1$$

```
1 int fibonacci(int n) {
2    return n < 2
3       ? 1
4       : fibonacci(n - 1) + fibonacci(n - 2);
5 }
```

Zápis je elegantní, jak je však takový výpočet efektivní?

Fibonacciho posloupnost – příklad 1/2

- Počet operací při výpočtu Fibonacciho čísla n

```
1  long counter; // store number of indiviual operations
2
3  long fibonnaciRecursive(int n) {
4     counter += 1; // jedno porovnání
5     return n < 2 ? 1l : fibonnaciRecursive(n - 1) +
       fibonnaciRecursive(n - 2);
6  }
7
8  long fibonnaciIterative(int n) {
9     long fibM2 = 1l;
10    long fibM1 = 1l;
11    long fib = 1l;
12    for (int i = 2; i <= n; ++i) {
13       fibM2 = fibM1;
14       fibM1 = fib;
15       fib = fibM1 + fibM2;
16       counter += 3; // dvě přiřazení, jeden součet
17    }
18    return fib;
19 }
```

lec07/demo-fibonacci.c

Fibonacciho posloupnost – rekurzivně 2/2

```
1  int main(int argc, char *argv[])
2  {
3     int n = argc > 1 ? atoi(argv[1]) : 25;
4     counter = 0; // reset counter
5     long fibR = fibonnaciRecursive(n);
6     long counterR = counter;
7
8     counter = 0; // reset counter
9     long fibI = fibonnaciIterative(n);
10    long counterI = counter;
11
12    printf("Fibonacci number recursive: %li\n", fibR);
13    printf("Fibonacci number iteration: %li\n", fibI);
14    printf("Counter recursive: %li\n", counterR);
15    printf("Counter iteration: %li\n", counterI);
16
17    return 0;
18 }
```

lec07/demo-fibonacci.c

```
clang demo-fibonacci.c && ./a.out 30
Fibonacci number recursive: 1346269
Fibonacci number recursive: 1346269
Fibonacci number iteration: 1346269
Counter recursive: 2692537
Counter iteration: 87
```

Fibonacciho posloupnost – rekurzivně vs iteračně

- Rekurzivní výpočet
  - Složitost roste exponenciálně s $n \sim 2^n$
- Iterační algoritmus
  - Počet operací je proporcionální $n \sim 3n$

lec07/demo-fibonacci-stats.c, lec07/fibonacci.sh

- Skutečný počet operací závisí na konkrétní implementaci, programovacím jazyku, překladači a hardware
- Složitost algoritmů proto vyjadřujeme asymptoticky jako funkci velikosti vstupu
  - Například v tzv. „Big O" notaci
    - rekurzivní algoritmus výpočtu má složitost $O(2^n)$
    - iterační algoritmus výpočtu má složitost $O(n)$

Efektivní algoritmy mají polynomiální složitost

Vsuvka – Vykreslení grafu

- Jednoduchou úpravou vypíšeme počty operací na řádek

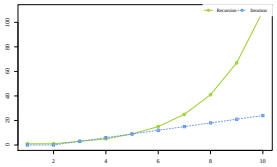
```
printf("%u\t%6.3e\t%6.3e\n", n,
 (double)counterR, (double)counterI);
```

lec07/demo-fibonacci-stats.c

- Program zkompilujeme a spustíme

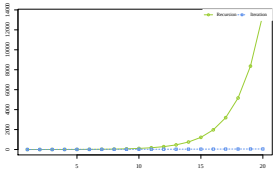
clang demo-fibonacci-stats.c

  - ./a.out 10 > fibonacci.dat && ./fibonacci.sh fibonacci.dat fibonacci-**n10**.pdf



fibonacci-n10.pdf

  - ./a.out 20 > fibonacci.dat && ./fibonacci.sh fibonacci.dat fibonacci-**n20**.pdf



fibonacci-n20.pdf

Přesměrovaný standardní výstup do souboru fibonacci.dat představuje tabulku hodnot, která je vykreslena do grafu skriptem fibonacci.sh s využitím nástroje **R** – https://www.r-project.org/

lec07/demo-fibonacci-stats.c, lec07/fibonacci.sh

Vsuvka – Kompilace s optimalizací

- Můžeme rekurzivní výpočet urychlist kompilací s optimalizacemi?

```
clang demo-fibonacci.c &&
    time ./a.out 50
Fibonacci number recursive:
    20365011074
Fibonacci number iteration:
    20365011074
Counter recursive:
    40730022147
Counter iteration: 147

real    1m35.912s
user    1m35.824s
sys     0m0.000s
```

```
clang -O2 -march=native demo-fibonacci.c
   && time ./a.out 50
Fibonacci number recursive:
    20365011074
Fibonacci number iteration:
    20365011074
Counter recursive:
    40730022147
Counter iteration: 147

real    1m16.042s
user    1m15.968s
sys     0m0.008s
```

- Ano, můžeme, ale pouze zanedbatelně
- V tomto případě je rozhodující asymptotická složitost $O(2^n)$ vs $O(n)$

Obecně se pro odladěné a vypočetně náročné programy vyplatí kompilovat s optimalizací. Nárust výkonů může být několika násobný.

Část III

Část 2 – Zadání 7. domácího úkolu (HW07)

Povinná část

Volitelná část

Bonusová část

Shrnutí přednášky