Přesnost a rychlost výpočtu

Jan Faigl

Department of Computer Science
Faculty of Electrical Engineering
Czech Technical University in Prague

Lecture 10

B3B36PRG – Programming in C

Přehled témat

Part I

Část 1 – Přesnost výpočtu

Přesnost výpočtu - Příklad součtu dvou čísel

```c
#include <stdio.h>

int main(void)
{
    double a = 1e+10;
    double b = 1e-10;

    printf("a   : %24.12lf\n", a);
    printf("b   : %24.12lf\n", b);
    printf("a+b: %24.12lf\n", a + b);

    return 0;
}
```

```
clang sum.c && ./a.out
a   : 10000000000.000000000000
b   :           0.000000000100
a+b: 10000000000.000000000000
```

lec10/sum.c

Přesnost výpočtu - Příklad dělení dvou čísel

```
1  #include <stdio.h>
3  int main(void)
4  {
5     const int number = 100;
6     double dV = 0.0;
7     float fV = 0.0f;
9     for (int i = 0; i < number; ++i) {
10       dV += 1.0 / 10.0;
11       fV += 1.0 / 10.0;
12    }
14    printf("double value: %lf ", dV);
15    printf(" float value: %lf ", fV);
17    return 0;
18 }
20 clang division.c && ./a.out
21 double value: 10.000000  float value: 10.000002
```

lec10/division.c

Přesnost výpočtu - strojová přesnost

- Strojová přesnost ϵ_m - nejmenší desetinné číslo, které přičtením k 1.0 dává výsledek různý od 1, pro $|v| < \epsilon_m$, platí

$$v + 1.0 == 1.0.$$

Symbol == odpovídá porovnání dvou hodnot (test na ekvivalenci).

- Zaokrouhlovací chyba - nejméně ϵ_m.
- Přesnost výpočtu - aditivní chyba roste s počtem operací v řádu $\sqrt{N} \cdot \epsilon_m$.
  - Často se však kumuluje preferabilně v jedno směru v řádu $N \cdot \epsilon_m$.

Zdroje a typy chyby

- Chyby matematického modelu - matematická aproximace fyzikální situace.
- Chyby vstupních dat.
- Chyby numerické metody.
- Chyby zaokrouhlovací.

- Absolutní chyba aproximace
  $E(x) = \hat{x} - x$, $\hat{x}$ přesná hodnota, x aproximace.
- Relativní chyba $RE(x) = \frac{\hat{x}-x}{x}$.

Podmíněnost numerických úloh

- Podmíněnost úlohy $C_p = \frac{\text{relativní chyba výstupních údajů}}{\text{relativní chyba vstupních údajů}}$.
- Dobře podmíněná úloha $C_p \approx 1$.
- Výpočet je dobře podmíněný, je-li málo citlivý na poruchy ve vstupních datech.
- Numericky stabilní výpočet - vliv zaokrouhlovacích chyb na výsledek je malý.
- Výpočet je stabilní, je-li dobře podmíněný a numericky stabilní.

Možnosti zvýšení přesnosti

- Reprezentace racionálních čísel - podíl dvou celočíselných hodnot, např. *Homogenní souřadnice*.
- „Libovolná přesnost“ - speciální knihovny, např. `gmp` až do výše volné paměti.

  `https://gmplib.org/manual/index`

  - Souřadnice x,y - 7511164176768 346868669952 3739567104 ~ 2008,57; 92,76.

Součin dvou velkých čísel knihovnou gmp - 1/2

- V HW04B je uveden příklad $(995663 \cdot 995669)^8$ jako prvočíselný rozklad čísla

  93286507371999205962977351361478938826658030508392059192574037139225431706458485578508891574576 1.

  https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b3b36prg/hw/hw02

- Použijme knihovnu gmp pro mocninu a součin dvou čísel, `#include<gmp.h>`.

  https://gmplib.org/

  - Typ celých čísel `mpz_t`, pomocné funkce `mpz_init_set_str()`, `mpz_init()`, `gmp_printf()` a `mpz_clears()` a operace `mpz_pow_ui()` a `mpz_mul()`.

    Mocnina `unsigned integer` a násobení - multiplication.

- Knihovna nemusí být součástí operačního systému, proto může být nutné specifikovat cestu k hlavičkovému souboru a vlastní knihovně (`-lgmp`).
  - Můžeme zadat cestu ručně při kompilaci (nebo do `Makefile`).
  - Alternativně můžeme použít nástroj `pkg-config` (nebo `pkgconf`).

    https://www.freedesktop.org/wiki/Software/pkg-config/ http://pkgconf.org/

- Argumenty pro překlad (`CFLAGS`).

```
$ pkgconf --cflags gmp
-I/usr/local/include
```

- Argumenty pro linkování (`LDFLAGS`).

```
$ pkgconf --libs gmp
-L/usr/local/lib -lgmp
```

Součin dvou velkých čísel knihovnou gmp - 2/2

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <gmp.h>
const char* resultSrc =
"93286507371999205962977351361478938826658030508392059"
"92059192574037139225431706458485578508891574576l";
int main(int argc, char *argv[])
{
    int ret = EXIT_SUCCESS;
    mpz_t n1, n2, result;
    mpz_init_set_str(n1, "995663", 10);
    mpz_init_set_str(n2, "995669", 10);
    mpz_init(result);
    gmp_printf("n1: %Zd\n", n1);
    gmp_printf("n2: %Zd\n", n2);
    gmp_printf("%Zd^%d x %Zd^%d\n\n", n1, 8, n2, 8);
    mpz_pow_ui(n1, n1, 8);
    mpz_pow_ui(n2, n2, 8);
    gmp_printf("%Zd x %Zd\n\n", n1, n2);
    mpz_mul(result, n1, n2);
    gmp_printf("%Zd\n\n", result);
    printf("Result from HW04\n%s\n", resultSrc);
    mpz_clears(n1, n2, result, NULL);
    return ret;
}
```

```
$ ./demo-gmp-mpz
n1: 995663
n2: 995669
995663^8 x 995669^8
9658261242946078679826999262556952968634003091 21 x
     9658726868682611515370370822602315664810477758 41
9328650737199920596297735136147893882665803050839205 9
1925740371392254317064584855785088915745761

Result from HW04
9328650737199920596297735136147893882665803050839205 9
1925740371392254317064584855785088915745761
```

lec10/gmp/demo-gmp-mpz.c

Racionální čísla knihovny gmp - 1/3

- „Libovolné přesnosti“ reprezentace, např. souřadnic v rovině jako výsledek operací výpočetní geometrie, můžeme realizovat podílem dvou („libovolně velkých“) celých čísel.
  - Souřadnice x,y - 7511164176768 346868669952 3739567104 ~ 2008,57; 92,76.
- Knihovna gmp k tomuto účelu poskytuje typ `mpq_t`, kromě typu necelého čísla `mpf_t`, který využijeme pro převod `mpq_t` na necelé číslo typu `double`.

```
49 double mpq2d(const mpq_t *op)
50 {
51    double ret;
52    mpf_t v;
53    mpf_init(v);
54    mpf_set_q(v, *op);
55    ret = mpf_get_d(v);
56    mpf_clear(v);
57    return ret;
58 }
```

lec10/gmp/demo-gmp-mpq.c

Racionální čísla knihovny gmp - 2/3

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <gmp.h>

double mpq2d(const mpq_t *op);

int main(int argc, char *argv[])
{
    int ret = EXIT_SUCCESS;

    unsigned long xl = 75111641767681;
    unsigned long yl = 3468686699521;
    unsigned long denl = 37395671041;
    const unsigned int digits = 21;

    double xd = 1. * xl;
    double yd = 1. * yl;
    double dend = 1. * denl;

    printf("unsigned long: %lu %lu %lu\n", xl, yl, denl);
    printf("double:        %.01f %.01f %.01f\n", xd, yd, dend);

    printf("double x,y (.2): %.21f %.21f\n", xd/dend, yd/dend);
    printf("double x,y (.46): %.461f %.461f\n\n", xd/dend, yd/
     dend);

    mpq_t x, y;
    mpq_inits(x, y, NULL);
    mpq_set_ui(x, xl, denl);
    mpq_set_ui(y, yl, denl);

    mpq_canonicalize(x);
    mpq_canonicalize(y);

    mpf_t xmpf, ympf;
    mpf_inits(xmpf, ympf, NULL);
    mpf_set_q(xmpf, x);
    mpf_set_q(ympf, y);

    gmp_printf("mpq x,y (canonical form): %Qd %Qd\n",
     x, y);
    gmp_printf("mpf x,y (to %d decimal digits):  %.*Ff
      %.*Ff\n", digits, digits, xmpf, digits, ympf);
    gmp_printf("mpq x,y (double .46):  %.46lf %.46lf\n
     ",  mpq2d(&x), mpq2d(&y));

    mpq_clears(x, y, NULL);
    mpf_clears(xmpf, ympf, NULL);
    return ret;
}
```

lec10/gmp/demo-gmp-mpq.c

Racionální čísla knihovny gmp - 3/3

- Souřadnice x,y - 7511164176768 346868669952 3739567104 ~ 2008,57; 92,76.

```
$ make
clang -c  -I/usr/local/include  -g demo-gmp-mpq.c -o demo-gmp-mpq.o
clang demo-gmp-mpq.o -L/usr/local/lib -lgmp  -o demo-gmp-mpq
clang -c  -I/usr/local/include  -g demo-gmp-mpz.c -o demo-gmp-mpz.o
clang demo-gmp-mpz.o -L/usr/local/lib -lgmp  -o demo-gmp-mpz
$ ./demo-gmp-mpq
unsigned long: 7511164176768 346868669952 3739567104
double:        7511164176768 346868669952 3739567104
double x,y (.2): 2008.57 92.76
double x,y (.46): 2008.56515416817615005129482597112655639648437500000
     92.75637000362274875442381016910076141357421875000
mpq x,y (canonical form):  399190273/198744 1536231/16562
mpf x,y (to 21 decimal digits):  2008.565154168176146200000 92.756370003622750875500
mpq x,y (double .46):  2008.56515416817592267761938273906707763671875000000
     92.75637000362274875442381016910076141357421875
```

lec10/gmp/demo-gmp-mpq.c

Makefile s pkg-config a gmp

```
1  CFLAGS+=$(shell pkg-config --cflags gmp)
2  LDFLAGS+=$(shell pkg-config --libs gmp)
4  CFLAGS+=-g
6  DEMO_MPQ=demo-gmp-mpq
7  DEMO_MPZ=demo-gmp-mpz
9  TARGETS+=$(DEMO_MPQ) $(DEMO_MPZ)
11 bin: $(TARGETS)
13 info:
14   @echo $(CFLAGS)
15   @echo $(LDFLAGS)
17 $(DEMO_MPQ): $(DEMO_MPQ).o
18   $(CC) $< $(LDFLAGS) -o $@
20 $(DEMO_MPZ): $(DEMO_MPZ).o
21   $(CC) $< $(LDFLAGS) -o $@
23 %.o : %.c
24   $(CC) -c $(CPPFLAGS) $(CFLAGS) $< -o $@
26 clean:
27   $(RM) $(DEMO_MPQ) $(DEMO_MPZ) *.o
```

lec10/gmp/Makefile

```
$ make info
-I/usr/local/include -g
-L/usr/local/lib -lgmp
```

```
$ gmake
clang -c  -I/usr/local/include -g demo-gmp-mpq.c -o demo-gmp-mpq.o
clang demo-gmp-mpq.o -L/usr/local/lib -lgmp -o demo-gmp-mpq
clang -c  -I/usr/local/include -g demo-gmp-mpz.c -o demo-gmp-mpz.o
clang demo-gmp-mpz.o -L/usr/local/lib -lgmp -o demo-gmp-mpz
```

Reprezentace necelých čísel – IEEE 754

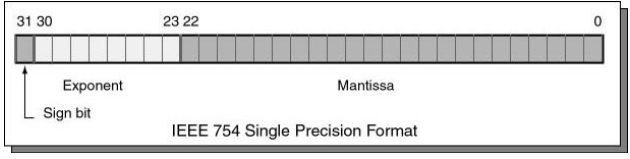
- Reálné číslo x se zobrazuje ve tvaru

  $$x = (-1)^{s} \textbf{mantisa} \cdot 2^{\textbf{exponent}-\textbf{bias}}.$$

  Základ 2.

  IEEE 754, ISO/IEC/IEEE 60559:2011

- Mantisa je **normalizována** na první jedničku vlevo (v soustavě o dvojkovém základu).
- **float** – 32 bitů (4 bajty): s – 1 bit znaménko (+ nebo −), **exponent** – 8 bitů, tj. 256 možností. **mantisa** – 23 bitů ≈ 16,7 milionu možností.

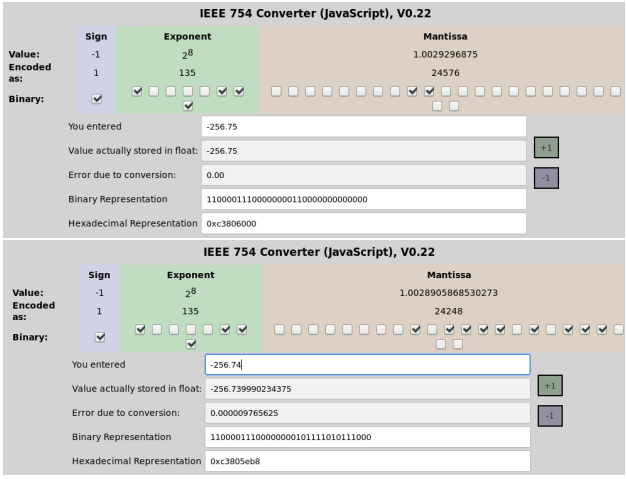


- **double** – 64 bitů (8 bajtů).
  - s – 1 bit znaménko (+ nebo −).
  - **exponent** – 11 bitů, tj. 2048 možností.
  - **mantisa** – 52 bitů ≈ 4,5 biliardy možností (4 503 599 627 370 495).
- **bias** umožňuje reprezentovat exponent vždy jako kladné číslo.

  Lze zvolit, např. bias $= 2^{eb-1} - 1$, *kde eb je počet bitů exponentu.*

http://www.root.cz/clanky/norma-ieee-754-a-pribuzni-formaty-plovouci-radove-tecky

Příklad reprezentace **float** hodnot dle IEEE 754



- Chyba reprezentace -256.75 vs -256.74.
- `Infinity` (0x7f800000), `-Infinity` (0xff800000), a `NaN` (0x7fffffff).

https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html

Příklady reprezentace hodnot typu `float`

Reprezentace čísla 85,125 (`float`)

- 85 odpovídá $1010101_{(2)}$.
- 0,125 odpovídá 001
  - $0,125/2^{-1} = 0,25 \quad | \quad 0$
  - $0,125/2^{-2} = 0,50 \quad | \quad 0$
  - $0.125/2^{-3} = 1.00 \quad | \quad 1$
- $85,125$ odpovídá $1010101,001_{(2)} =$
  $= 1,010101001_{(2)} \times 2^{6}$,
- Bias pro `float` je 127.
- Exponet je 127 + 6 = 133
- 133 odpovídá $10000101_{(2)}$.
- Normalizovaná mantisa je $010101001_{(2)}$, kterou doplníme nulami na 23 bitů (zprava, je to desetinné číslo).
- **0 - 1000 0101 - 0101 0100 1000 0000 0000 000**.
- **01000010 10101010 01000000 00000000**.
- V šestnáctkové soustavě **0x42 0xaa 0x40 0x00**, tedy **0x42aa4000**.

Reprezentace čísla 0,1 (`float`)

- 0,1 má periodický rozvoj
  1. $0,1 * 2 = 0,2 \quad | \quad 0$
  2. $0,2 * 2 = 0,4 \quad | \quad 0$
  3. $0,4 * 2 = 0,8 \quad | \quad 0$
  4. $0,8 * 2 = 1,6 \quad | \quad 1$
  5. $0,6 * 2 = 1,2 \quad | \quad 1$
  6. $0,2 * 2 = 0,4 \quad | \quad 0$
- Opakuje se 0011, 23-bitů tak reprezentuje menší hodnotu.
- $0,1_{(10)} \sim 0,0001\,1001\,1001\,1001\,1001\,1001\,100_{(2)} =$
  $= 1,1001\,1001\,1001\,1001\,1001\,100_{(2)} \times 2^{-4}$.
- Exponet je 127 − 4 = 123 odpovídá $0111\,1011_{(2)}$.
- Normalizovaná mantisa ~~1,~~100 1100 1100 1100 1100 1100.
- **0 - 0111 1011 - 100 1100 1100 1100 1100 1100**.
- **00111101 11001100 11001100 11001100**.
- V šestnáctkové soustavě to je **0x3d 0xcc 0xcc 0xcc**, tedy **0x3dcccccc**.
- Prakticky je 0,1 převedeno na o něco větší číslo **0x3dcccccd**, protože absolutní chyba je menší.

`lec10/floats.c`

Sčítání mnoha malých necelých čísel - 1/2

- Na příkladu součtu dvou velmi odlišných čísel (např. $1 \times 10^{10} + 1 \times 10^{-10}$) dochází z důvodu omezené reprezentace mantisy k zaokrouhlovací chybě.
- V případě naivní implementace součtu velkého počtu (např. 2^{30}) velmi malých hodnot (např. 1×10^{-20}) může dojít vlivem zaokrouhlování k významné chybě.

lec10/addition.c

```
// small value to be sum
float v = 1e-20f; //float literal
// 1073741824 is 2^30 values (1e9)
const size_t power = 30;
size_t n = 1l<<power ;
// multiplication factor for print
const double k = 1e11;
float *values = init_values(n, v);

double sum1 = v*n * k;
```

Přímé násobení - výsledek
1.073 741 789 925 364 287 228 1.

```
float sum_naive(size_t n, float *v)
{
   float r = 0;
   for (size_t i = 0; i < n; ++i) {
      r += v[i];
   }
   return r;
}

double sum2 = sum_naive(n, values) * k;
```

Naivní součet - výsledek
0.022 737 367 544 323 205 947 9.

```
float sum_alter(size_t n, float *v, size_t power)
{
   float r = 0;
   const size_t order = power - 1;
   size_t k = 2;
   for (size_t l = 1; l < order; ++l, k *= 2) {
      for (size_t i = 0; i < n; i += k) {
         v[i] = v[i] + v[i+k/2];
      }
   }
   k /= 2;
   for (size_t i = 0; i < n; i += k) {
      r += v[i];
   }
   return r;
}
float sum3 = sum_alter(n, values, power) * k;
```

Sčítání po dvojicích - výsledek
1.073 741 793 632 507 324 218 8.

Sčítání mnoha malých necelých čísel - 2/2

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
float* init_values(size_t n, float v);
float sum_naive(size_t n, float *v);
float sum_alter(size_t n, float *v, size_t power);
int main(void)
{
   float v = 1e-20f; // small value to be sum
   const size_t power = 30; // try 3 vs.  30
   size_t n = 1l<<power ; // 1073741824 is 2^30 values
   const double k = 1e11;
   float *values = init_values(n, v);
   double sum1 = v * n  * k;
   double sum2 = sum_naive(n, values)  * k;
   float sum3 = sum_alter(n, values, power)  * k;
   printf("Sum of %lu numbers of the value %.22lf\n", n, v);
   printf("Sum1 (multiplication): %.22lf\n", sum1);
   printf("Sum2 (naive)         : %.22lf\n", sum2);
   printf("Sum3 (alter)         : %.22lf\n", sum3);
   free(values);
   return EXIT_SUCCESS;
}
```

```c
float* init_values(size_t n, float v)
{
   float *r = malloc(n * sizeof(v));
   if (!r) {
      fprintf(stderr, "ERROR: MEM_ALLOC\n");
      exit(-1);
   }
   for (size_t i = 0; i < n; ++i) {
      r[i] = v;
   }
   return r;
}
```

```
$ clang addition.c  -o addition && ./addition
Sum of 1073741824 numbers of the value
     0.00000000000000000000
Sum1 (multiplication): 1.0737417899253642872281
Sum2 (naive)         : 0.0227373675443232059479
Sum3 (alter)         : 1.0737417936325073242188
$ calc "1e-20 * 2^30 * 1e11"
  1.073741824
```

lec10/addition.c

- Implementujte s využitím knihovny gmp.

Part II

Část 2 – Rychlost výpočtu (programu)

Maticové násobení - Naivně

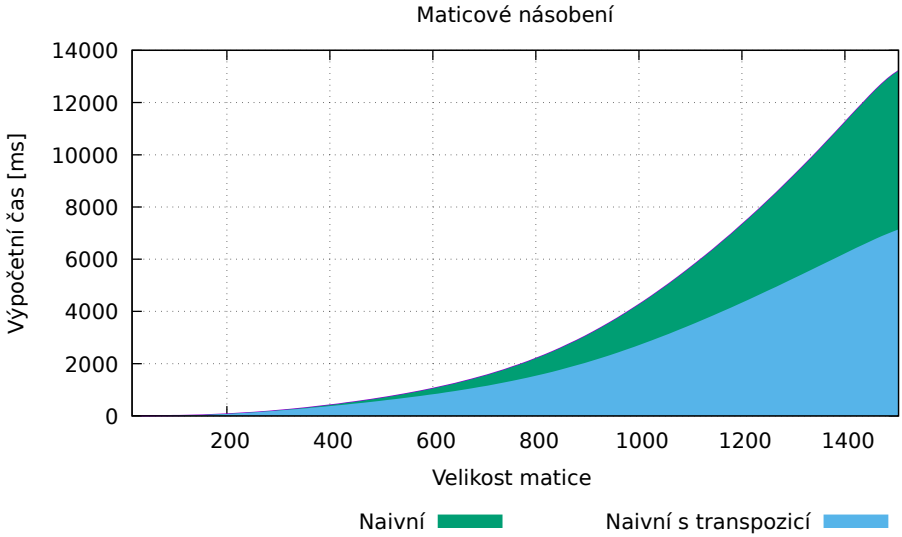
```
1  void simple_multiply(const int n, const double *a, const double *b, double *c)
2  {
3     for (int i = 0; i < n; ++i) {
4        for (int j = 0; j < n; ++j) {
5           double prod = 0;
6           for (int k = 0; k < n; ++k) {
7              prod += a[i * n + k] * b[k * n + j];
8          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

- Pro přehlednost předpokládáme kompatibilní rozměry matic a správně alokované.

Maticové násobení - Naivně s transpozicí

```
1  void simple_multiply_trans(const int n, const double *a, const double *b, double *c)
2  {
3     double * bT = create_matrix(n); // allocate memory for transposed matrix
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          double 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    }
```

Porovnání rychlosti násobení matic

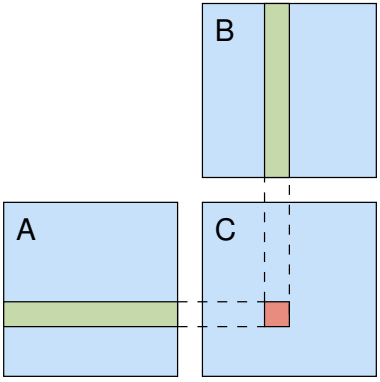


Architektura procesoru a způsob výpočtu

- Příklad násobení matic a násobení transponované matice ukazuje, že kromě instrukcí má zásadní vliv **organizace dat a přístup do paměti**.
- V moderních procesorech hraje **cache** zásadní roli společně s řetězením instrukcí, tzv. **pipelining**, a využitím specifických instrukcí.

  SIMD - Single Instruction Multiple Data
- Proniknutí do detailů fungování cache a řetězení instrukcí je náplní předmětu `Architektura počítačů (B0B35APO)`, kde máte možnost se seznámit s přicházející architekturou RISC V.

  `https://cw.felk.cvut.cz/wiki/courses/b35apo/`



Optimalizace kódu

- Kromě optimalizace výsledného spustitelného kódu při překladů, je možné optimalizovat kódu za běhu nebo již existujících binární (přeložené) soubory.
  - **BOLT** - Binary Optimization and Layout Tool, zrychlení o až 20 %–50 %.

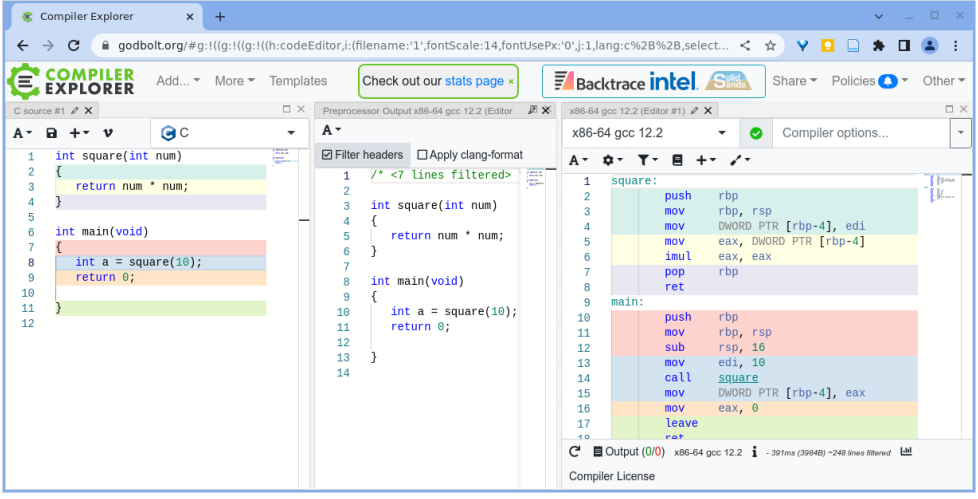
    https://arxiv.org/abs/1807.06735

    https://dl.acm.org/doi/10.5555/3314872.3314876
- Využití speciálních instrukcí v základních funkcí může výpočty (programy) výrazně urychlit, zejména pokud se funkce používají masivně.
  - AVX2 a EVEX instrukce (ze sady SSE4.2) ve funkcích porovnání řetězců `str{n}casecmp()` – až o 38 % méně potřebného času.

    03/2022 - https://www.phoronix.com/news/Glibc-strcasecmp-AVX2-EVEX
- *V obou případech (a obecně) je vhodné rozumět principu a využít instrukce Assembleru.*

Informativní

Compiler Explorer

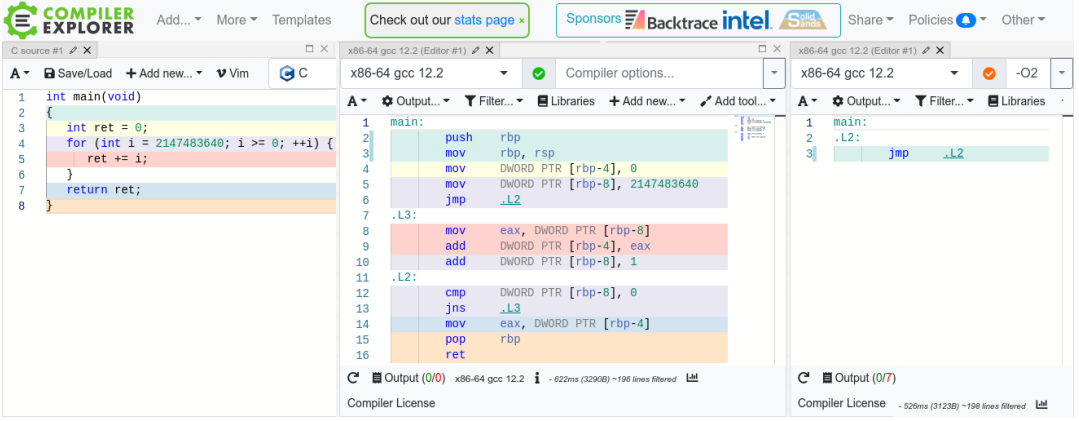


https://godbolt.org/z/K9r1eWqcd

Compiler Explorer – Analýza optimalizovaného kódu

- Vliv optimalizace -O2 na výsledný kód, který obsahuje nedefinované chování, přetečení celého čísla.

Příloha 3. přednášky.



https://godbolt.org/z/G3GEz4vbv

Příklad použití OpenMP - Maticové násobení 1/2

- Open Multi-Processing (OpenMP) - aplikační programové rozhraní (API) multiplatformních výpočtů se sdílenou pamětí. http://www.openmp.org
- Direktivou preprocesoru můžeme instruovat kompilátor k vytvoření kódu paralelního výpočtu, např. paralelizace přes vnější 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 přehlednost uvažujeme čtvercové matice stejných rozměrů.

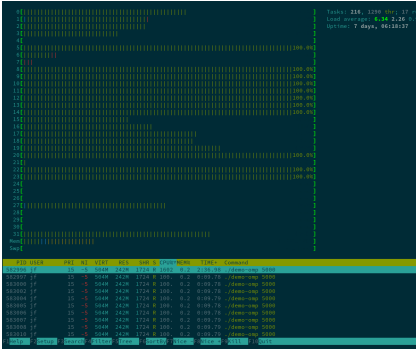
Příklad použití OpenMP - Maticové násobení 2/2

- Příklad násobení matic 1000×1000 s využitím OpenMP na iCore5 (2 jádra s HT ~ 4× výpočetní jednotky).

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

- i7-6700K:
  - 1× vlákno 0.80 s;
  - 2× vlákna 0.39 s;
  - 4× vlákna 0.24 s.

- Násobení matic 5000×5000 (Ryzen 9 5950X).



```
1  OMP_NUM_THREADS=16 ./demo-omp 5000
2  Size of matrices 5000 x 5000 naive
3           multiplication with O(n^3)
4  Multiplication single core 256.00 sec
5  Multiplication  multi-core  18.05 sec
```

lec10/demo-omp-matrix.c

Part III

Část 3 – Kódovací příklady

Kódovací příklad – NATO Abeceda – 1/4

- Implementujme program, který převede vstupní text (ASCII, znaky A–Z a a–z) do NATO abecedy, ve které jsou písmena hláskována prostřednictvím následujících jmen.
  - **A**lpha, **B**ravo, **C**harlie, **D**elta, **E**cho, **F**oxtrot, **G**olf, **H**otel, **I**ndia, **J**uliett, **K**ilo, **L**ima, **M**ike, **N**ovember, **O**scar, **P**apa, **Q**uebec, **R**omeo, **S**ierra, **T**ango, **U**niform, **V**ictor, **W**hiskey, **X**-ray, **Y**ankee, **Z**ulu.
- V programu definujeme pole ukazatelů na textové literály s jednotlivými slovy.
- Programově otestujeme, že slova odpovídají počátečním písmenům A–Z.

- Očekávaný výstup pro vstup `in.txt`.

```
$ cat in.txt
I like PRG and programming in C.
$ clang nato-alphabet.c && ./a.out < in.txt 2>/dev/null
India Lima India Kilo Echo Papa Romeo Golf Alpha November Delta Papa
      Romeo Oscar Golf Romeo Alpha Mike Mike India November Golf
     India November Charlie
```

- Implementujeme testovací funkce.

```
1 static char *words[] = { // static to be "private"
2    "Alpha", "Bravo", "Charlie", "Delta", "Echo", "Foxtrot", "
     Golf", "Hotel", "India", "Juliett", "Kilo", "Lima", "Mike
     ", "November", "Oscar", "Papa", "Quebec", "Romeo", "
     Sierra", "Tango", "Uniform", "Victor", "Whiskey", "X-ray"
     , "Yankee", "Zulu", NULL
3 }; // it is an array of pointers to text literls
5 int count_words_array(char *words[]); // Using array
6 int count_words(char **words); // Pointer to pointers
7 bool check_alphabet_words(char *words[]);
```

Kódovací příklad – NATO Abeceda – 2/4

```c
// array is termined by NULL used for counting
static char *words[] = { "Alpha",  ..,  "Zulu", NULL };
// array-like variant
int count_words_array(char *words[])
{
   int n = 0;
   while(words[n] != NULL) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: \"%s\"\n", words[n]);
      n += 1;
   }
   return n;
}
// pure pointer variant
int count_words(char **words)
{
   int n = 0;
   char **cur = words;
   while (*cur) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: \"%s\"\n", *cur);
      cur++;
      n += 1;
   }
   return c;
}
```

```c
bool check_alphabet_words(char *words[])
{
   bool ret = true; // true is from #include <stdbool.h>
   char c = 'A'; // char is an integer ASCII code number
   char **cur = &words[0]; // there is always at least one item
   while (*cur) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: check %s[0] for '%c'\n", *cur, c);
      if (c != *cur[0]) { // the first letter needs to match
         ret = false; // false is from #include <stdbool.h>
         break;
      } else {
         c += 1;
         cur += 1;
      }
   }
   return ret;
}
```

- Pole `words` je posloupnost prvků stejného typu (ukazatel na `char` – textový řetězec).
- Hodnota `&words[0]` je identická adresa jako hodnota `words`.

Kódovací příklad – NATO Abeceda – 3/4

- Můžeme použít const.

```c
static const char * const words[] = { "Alpha", ..., NULL };
int count_words_array(const char * const words[])
{
   int n = 0;
   while(words[n] != NULL) {
      n += 1;
   }
   return n;
}
int count_words(const char * const * const words)
{
   int n = 0;
   // cur je ukazatel na data typu konstantní
   // ukazatel na konstantní textový řetězec
   // (na konstantní ukazatel na konstantní hodnoty char).
   const char * const * cur = words; // cur chceme měnit
   while (*cur) {
      cur++; // cur není konstantní ukazatel
      n += 1;
   }
   return n;
}
```

```c
#include <stdio.h>
#include <stdbool.h>
static const char * const words[] = { "Alpha",.., NULL };
int count_words_array(const char * const words[]);
int count_words(const char * const * const words);
bool check_alphabet_words(const char * const words[]);
int main(void)
{
   int ret = EXIT_SUCCESS;
   fprintf(stderr, "DEBUG: size %lu\n", sizeof(words));
   int n = count_words_array(words);
   fprintf(stderr, "DEBUG: no. of words: %i\n", n);
   n = count_words(&words[0]);
   fprintf(stderr, "DEBUG: no. of words: %i\n", n);
   bool checked = check_alphabet_words(words);
   fprintf(stderr, "DEBUG: check_alphabet_words passed [%s]\n", checked ? "
    OK" : "FAIL");
   return ret;
}
```

Kódovací příklad – NATO Abeceda – 4/4

```
1  ...
2  static const char * const words[] = { "Alpha", ..., NULL };
3  ...
4  char my_toupper(char c);
6  int main(void)
7  {
8     ...
9     int c;
10    while ((c = getchar()) != EOF) {
11       c = my_toupper(c); // or toupper() from <ctype.h>
12       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
13          printf("%s ", words[c - 'A']); // always print space
14       }
15    }
16    ...
17 }
19 char my_toupper(char c) // or use toupper() from <ctype.h>
20 {
21    if (c >= 'a' && c <= 'z') {
22       c =  c - 'a' + 'A';
23    }
24    return c;
25 }
```

- Funkci `my_toupper()` můžeme nahradit použitím ternárního operátoru.

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
3  #include <assert.h>
4  #include <stdbool.h>
6  static const char * const words[] = { "Alpha",.., NULL };
7  ...
8  int count_words_array(const char * const words[]);
9  bool check_alphabet_words(const char * const words[]);
11 int main(void)
12 {  // assert macro debug and development only, see -DNDEBUG
13    assert(count_words_array(words) == 'Z' - 'A' + 1);
14    assert(check_alphabet_words(words));
15    int c;
16    while ((c = getchar()) != EOF) {
17       c = (c >= 'a' && c <= 'z') ? c =  c - 'a' + 'A' : c;
18       if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
19          printf("%s\n", words[c - 'A']);
20       }
21    }
22    return EXIT_SUCCESS;
23 }
```

- V rámci zpřehlednění můžeme překlad (řádky 15–21) dát do samostatné funkce `void translate(const char * const words[])`.

Kódovací příklad – NATO Abeceda („*jinak*“) – 1/2

- Slova abecedy uložíme jako řetězec `alphabet` všech slov spojených bez mezery, do kterého budeme odkazovat na jednotlivá slova polem ukazatelů na textové řetězce (`words`).
  - Slov je `'Z' - 'A' + 1`, ale řetězec je posloupnost znaků zakončená `'\0'`.
  - První písmeno slova abecedy používáme k indexaci, např. `'C'harlie` je odkazované ukazatelem `words['C' - 'A']`. První znak slova tak můžeme v abecedě `alphabet` nahradit znakem `'\0'` získáme textové řetězce.

Bez prvního znaku!

```
1  //Ukazatel na textový literál.  Literál nemůžeme měnit!
2  //static char *alphabet = "AlphaBravoCharlie...";
3  static char alphabet[] =
4        "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
5        "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
6        "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
8  //pole ukazatelů na textové řetězce
9  static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };
11 int fill_words(char* str, char *words[]);
13 int main(void)
14 {
15    int ret = fill_words(alphabet, words);
16    if (!ret) {
17       for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
18          fprintf(stderr, "DEBUG: %02d. '%c' - %c%s\n",
                 c, c, c, words[c - 'A']);
19       } //                ↳ První písmeno slova abecedy.
20    }
21    return ret;
22 }
```

```
24 int fill_words(char* alphabet, char *words[])
25 {
26    int ret = EXIT_SUCCESS;
27    char *cur = alphabet; // kurzor do pole s písmeny abecedy
28    for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
29       assert(words[c - 'A'] == NULL); // nemá být nastaveno
30       cur = strchr(cur, c); // vyhledání řetězce začínající c
31       assert(cur); // písmeno c musí být v abecedě
32       *cur = '\0';
33       words[c - 'A'] = ++cur; // nastavení a posun kurzoru
34       assert(words[c - 'A']); //it should be set now
35    }
36    return ret; // pragmaticky vždy EXIT_SUCCESS nebo assert.
37 }
```

- V implementaci použijeme (makro) `assert()` k testování správné incializace datových struktur.

Makro slouží pro ladění, viz `man assert`.

Kódovací příklad – NATO Abeceda („*jinak*“) – 2/2

- Přidáme překlad znaků načítaných ze `stdin` a implementaci zpřehledníme.

```c
static char alphabet[] =
      "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
      "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
      "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };

int fill_words(char* str, char *words[]);

int main(void)
{
   int ret = fill_words(alphabet, words);
   if (!ret) {
      for (char c = 'A'; c <= 'Z'; ++c) {
         fprintf(stderr, "DEBUG: %02d. '%c' - %c%s\n",
           c, c, c, words[c - 'A']);
      } //              ↳ První písmeno slova abecedy.
   }
   int c;
   while ((c = getchar()) != EOF) {
      c = (c >= 'a' && c <= 'z') ? c =  c - 'a' + 'A' : c;
      //   ↳ volání funkce toupper() bude přehlednější!
      if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
         printf("%c%s ", c, words[c - 'A']);
      }
   }
   return ret;
}
```

```c
static char alphabet[] =
      "AlphaBravoCharlieDeltaEchoFoxtrotGolfHotelIndia"
      "JuliettKiloLimaMikeNovemberOscarPapaQuebecRomeo"
      "SierraTangoUniformVictorWhiskeyX-rayYankeeZulu";
static char *words['Z' - 'A' + 1] = { [0] = NULL };

void fill_words(char* str, char *words[]);
void translate(char *words[]);

int main(void)
{
   fill_words(alphabet, words);
   translate(words);
   return EXIT_SUCCESS;
}

void translate(char *words[])
{
   int c;
   while ((c = getchar()) != EOF) {
      c = toupper(c); // funkce z #include<ctype.h>
      if (c >= 'A' && c <= 'Z') {
         printf("%c%s ", c, words[c - 'A']); // první znak!
      }
   }
}
```

- Další rozšíření programu může být zpracování jiných znaků, než znaků abecedy `'A'-'Z'` a `'a'-'z'`.

Kódovací příklad – struct 1/3

- Implementujme složený typ s dvěma položkami typu pole znaků `username` a `number`, kde první položku chceme interpretovat jako textový řetězec (*null terminated*), ale ve druhém případě pouze jako pole znaků.

Ukázkový příklad, jehož hlavní motivace je uložení paměti do souboru a náhled na obsah souboru.

```
1  #define USERNAME_SIZE 8
2  #define NUMBER_DIGITS 4
4  struct record {
5      char username[USERNAME_SIZE + 1];
6      char number[NUMBER_DIGITS];
7  };
9  int main(void) {
10     struct record records[] = {
11         { .username = "user01" },
12         { .username = "user02" },
13         { .username = "admin" },
14         { .username = "root" },
15         { .username = '\0' } // null terminating
           array
16     };
18     fprintf(stderr, "DEBUG: size of struct %lu\n",
        sizeof(struct record));
19     fprintf(stderr, "DEBUG: size of records %lu\n",
         sizeof(records));
```

- Položka `username` je o jeden znak delší, uložení `'\0'`.
- Položka `number` je zápis čísla o maximální hodnotě 9999 (počet řádů 4) v textové podobě (0000–9999).
- Velikost složeného typu je dána velikostí jednotlivých položek.
- Pole záznamů incializujeme se zarážkou (poslední prvek obsahuje prázdný řetězec v položce `username`).

```
$ clang struct.c && ./a.out
DEBUG: size of struct 13
DEBUG: size of records 6
```

- Na příkladu si ukážeme, jak převést celé číslo na textovou reprezentaci, k čemuž použijeme několik pomocných funkcí.
- Implementujeme si funkce pro tisk záznamu a pole záznamů.
- Položku `number` naplníme programově z celého čísla s kontrolou, zdali se číslo vejde do `NUMBER_DIGITS`.
- Složený typ a implementaci funkcí realizujeme v samostatném modulu `record.h` a `record.c`.

Kódovací příklad – struct 2/3

```c
#ifndef __RECORD_H__
#define __RECORD_H__

#define USERNAME_SIZE 8
#define NUMBER_DIGITS 4

struct record {
   char username[USERNAME_SIZE + 1];
   char number[NUMBER_DIGITS];
};

void print_record(const struct record * record);
void print(const struct record * const records);

unsigned int fill_numbers(struct record * const records);

#endif
```

record.h

- V C nemůžeme přetěžovat jména funkcí, proto máme funkci `print_record()` a `print()`.
- Funkce `fill_numbers()` vyplní položky `numbers` v posloupnosti hodnot typu `struct record`.

```c
#include <stdio.h>
#include <limits.h>
#include <assert.h> // strukturální testy
#include "record.h"
```

record.c

```c
void print_record(const struct record * record)
{
   if (record) {
      printf("Record\n");
      printf("|- username: \"%s\"\n", record->
    username);
      printf("|- number: ");
      print_chars(NUMBER_DIGITS, record->number);
      printf("\n\n");
      // printf("|- number:  %s\n\n"); // Vyzkoušejte!
   }
}

void print(const struct record * const records)
{
   struct record const *cur = records;
   while (cur && cur->username[0]) {
      print_record(cur);
      cur += 1; // pointer arithmetic
   }
}
```

record.c

Kódovací příklad – struct 3/3

```
7  static unsigned short get_max_number(unsigned int digits)
8  {
9     unsigned int number = 1;
10    assert(sizeof(short) < sizeof(int));// 16 vs.  32?
11    for (unsigned int i = 0; i < digits; ++i) {
12       number *= 10;
13    }
14    assert(number <= USHRT_MAX); // short
15    return number - 1;
16 }
18 static void fill_record_number(unsigned short n, int
       digits, char *number)
19 { //number needs to be at least digits large
20   for (int i = digits - 1; i >= 0; --i) {
21      number[i] = (n % 10) + '0';
22      n = n / 10;
23   }
24 }
                                                  record.c
```

- V programu máme snahu testovat velikost paměťové reprezentace.

```
26 static void print_chars(size_t digits, const char *number)
27 { // number je ukazatel na konstantní hodnotu
28    for (size_t i = 0; i < digits; ++i, ++number) {
29       putchar(*number);
30    }
31 }
                                                  record.c
```

```
54 unsigned int fill_numbers(struct record * const records)
55 {
56    struct record *cur = records;
57    unsigned short n = 0;
58    const short max_number = get_max_number(NUMBER_DIGITS);
60    while (cur && cur->username[0]) {
61       assert(n <= max_number); // Vyplňujeme programově
62       fill_record_number(n, NUMBER_DIGITS, cur->number);
63       n += 1;
64       cur += 1;
65    }
66    return n;
67 }
                                                  record.c
```

- Lokální pomocné funkce jsou `static`.
- Hodnoty položky `number` vyplňujeme programově inkrementálně od hodnoty `0000`.

Kódovací příklad – Načítání a ukládání struct 1/4

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

#include "record.h"

int main(void) {
   int ret = EXIT_SUCCESS;

   struct record records[] = {
      { .username = "user01" },
      { .username = "user02" },
      { .username = "admin" },
      { .username = "root" },
      { .username = "jf" },
      { .username = '\0' } // null terminating array
   };

   fprintf(stderr, "DEBUG: size of struct %lu\n",
    sizeof(struct record));
   fprintf(stderr, "DEBUG: size of records %lu\n",
    sizeof(records));

   unsigned int n = fill_numbers(records); // number!
   print(records);

   const char *fname = "records.dat";
   FILE *fd = fopen("records.dat", "w"); // uložení records
   if (fd) {
      size_t saved = fwrite(records, sizeof(struct record), n, fd);
      size_t size = n * sizeof(struct record);
      printf("DEBUG: saved bytes %lu out of %lu\n", saved * sizeof(
    struct record), size);
   } else {
      fprintf(stderr, "ERROR: Cannot open \"%s\" for writting\n",
     fname);
      ret = EXIT_FAILURE;
   }
   return ret;
};
```

save_struct.c

```
$ clang -c record.c -o record.o
$ clang save_struct.c record.o -o save && ./save
DEBUG: size of struct 13
DEBUG: size of records 78
Record
|- username: "user01"
|- number: 0000
...
Record
|- username: "jf"
|- number: 0004
DEBUG: saved bytes 65 out of 65
```

Kódovací příklad – Načítání a ukládání struct 2/4

- Obsah souboru můžeme zkusit otevřít v textovém editoru nebo použijeme program hexdump.

```
$ clang -c record.c -o record.o
$ clang save_struct.c record.o -o save
$ ./save 1>/dev/null
DEBUG: size of struct 13
DEBUG: size of records 78
$ hexdump -C records.dat
00000000  75 73 65 72 30 31 00 00  00 30 30 30 30 75 73 65  |user01...0000use|
00000010  72 30 32 00 00 00 30 30  30 31 61 64 6d 69 6e 00  |r02...0001admin.|
00000020  00 00 00 30 30 30 32 72  6f 6f 74 00 00 00 00 00  |...0002root.....|
00000030  30 30 30 33 6a 66 00 00  00 00 00 00 00 30 30 30  |0003jf.......000|
00000040  34                                                |4|
00000041
```

- V případě, že vytvořenému souboru records.dat odebereme práva zápisu, např. chmod 0 records.dat, program selže.

```
$ chmod 0 records.dat
$ ./save 1> /dev/null; echo $?
DEBUG: size of struct 13
DEBUG: size of records 78
ERROR: Cannot open file "records.dat" for writting
1
```

Kódovací příklad – Načítání a ukládání struct 3/4

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

#include "record.h"

#define NUM_RECORDS 2

int main(void) {
   const char *fname = "records.dat";

   FILE *fd = fopen(fname, "r");
   if (!fd) {
      perror("Error open file");
      goto error;
   }
   struct record *records = malloc(NUM_RECORDS *
    sizeof(struct record));
   if (!records) {
      perror("Error malloc");
      fclose(fd); // Korektně soubor zavíráme.
      goto error;
   }
   ssize_t loaded;
```

load_struct.c

- Načtení bloku dat funkcí `fread()`.

```c
   while ((loaded = fread(records, sizeof(struct
    record), NUM_RECORDS, fd))) {
      fprintf(stderr, "DEBUG: loaded records %lu\n",
    loaded);
      for (size_t i = 0; i < loaded; ++i) {
         print_record(&records[i]);
      }
   }
   free(records);
   fclose(fd);
   goto leave;
error:
   fprintf(stderr, "ERROR: during reading from the
    file \"%s\"\n", fname);
   return 1;
leave:
   return 0;
}
```

save_struct.c

```
$ clang load_struct.c record.o -o load && ./load
DEBUG: loaded records 2
...
Record
|- username: "root"
|- number: 0003
DEBUG: loaded records 1
Record
|- username: "jf"
|- number: 0004
```

Kódovací příklad – Načítání a ukládání struct 4/4 (lépe)

```
1  #include <stdio.h>
2  #include <stdlib.h>
4  #include "record.h"
6  #define NUM_RECORDS 2
8  enum { ERROR_FILE = 101, ERROR_MEM = 102};
10 void print_error(int error);
12 int main(void) {
13    int ret = EXIT_SUCCESS;
14    const char *fname = "records.dat";
16    FILE *fd = fopen(fname, "r");
17    if (!fd && (ret = ERROR_FILE)) { // ret!
18       goto leave;
19    }
20    struct record *records = malloc(
          NUM_RECORDS * sizeof(struct record));
21    if (!records && (ret = ERROR_MEM)) { //
       ret!
22       goto leave;
23    }
24    ssize_t loaded;
25    while ((loaded = fread(records, sizeof(struct record), NUM_RECORDS, fd))) {
26       fprintf(stderr, "DEBUG: loaded records %lu\n", loaded);
27       for (size_t i = 0; i < loaded; ++i) {
28          print_record(&records[i]);
29       }
30    }
31    free(records);
33 leave:
34    if (fd) {
35       fclose(fd);
36    }
37    print_error(ret);
38    return ret;
39 }
41 void print_error(int error)
42 {
43    switch (error) {
44       case ERROR_FILE:
45          fprintf(stderr, "ERROR: open file\n");
46          break;
47       case ERROR_MEM:
48          fprintf(stderr, "ERROR: mem allocation\n");
49          break;
50    }
51 }
```

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Numerická přesnost.
- Knihovna `gmp`.
- Maticové násobení a organizace paměti.
- Rychlost výpočtu a architektura procesoru.
- Paralení výpočty `OpenMP`.

Part V

Appendix

ADT – zásobník a fronta

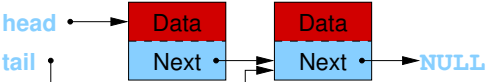
- Obě datové struktury mají stejné rozhraní, např. `push()`, `pop()`, `isEmpty()`.
- Zásobník vs. fronta se liší chováním, tj. jaký prvek vrací při vyjmutí.
- Obě struktury můžeme implementovat polem nebo spojovým seznamem.
- Implementace polem (definované kapacity)
  - Zásobník inkrementujeme/dekrementujeme pouze index na volný prvek v poli.
  - Frontu implementujeme kruhovou frontou v poli, indexy na první a poslední prvek pouze inkrementujeme modulo kapacita pole.
- Postačí jednosměrný spojový seznam, implementace se liší kam přidáváme nové prvky.
  - Přidávání je snadné před první prvek (`head`) nebo za poslední prvek.
  - Odebrání je snadé pro první prvek (`head`).

Zásobník

- `push()` i `pop()` realizujeme přes `head`.

Fronta

- `push()` realizujeme přes `tail` a `pop()` přes `head`.



Kódovací příklad – Číslo karty

- Implementujte program, který nahradí prvních 12 cifer 16 ciferného čísla karty znakem * a zobrazí pouze poslední čtyřčíslí.
- Čísla uvažujte jako hodnoty typu `long`.
- Implementujte s využitím pole.
- Implementujte s využitím dynamické alokace.
- *Program rozšiřte o načítání čísel karet ze souboru.*
- *Program dále rozšiřte o kontrolní součet cifer čísla karty, např. s využitím Luhnův algoritmu.*

https://www.cssz.cz/kontrola-icpe-pomoci-luhnova-algoritmu

```
$ clang card.c && ./a.out
9876543210987654 -> ************7654
1111222233334444 -> ************4444
5555444433332222 -> ************2222
1234567890123456 -> ************3456
```

```
char* hide_card_number(long int card);
int main(void)
{
   long nums[] = {9876543210987654l,
    1111222233334444l, 5555444433332222l,
    1234567890123456l };
   const int n = sizeof(nums) / sizeof(long);
   for (int i = 0; i < n; ++i)
      printf("%ld -> %s\n", nums[i],
    hide_card_number(nums[i]));
   return 0;
}
```

Kódovací příklady

- Ve vstupním řetězci změňte velikost písmen tak, aby první písmeno ve slově bylo vždy velké a další malá. *Title Case*
- Ve vstupním řetězci změňte velikost písmen tak, aby se v každém slově střídala velká-malá písmena. *SpOnGeCaSe*
- Ve vstupním řetězci (větě) zaměňte pořadí slov. *Reverse words*
- Ve vstupním řetězci uspořádejte znaky abecedy vzestupně a na konec řetězce vložte hodnotu součet cifer ve vstupním řetězci. *Rearrange string*

  Např. `"gzve534"` → `"egvz12"`.
- Převeďte vstupní řetězec o jednom až čtyřech slovech na čtyřpísmený ptačí kód.

  4-Letter Birds Code

  Např. `"Arctic Tern"` → `"ARTE"`.
- Napište program, který k zadanému číslu najde nejbližší vyšší číslo použitím stejných číslic.

  Next higher number

  Např. 231334113 → 231334131 *nebo* 897654321 → 912345678.

  Spíš alogoritmizace než programování. Lze implementovat na cca 50 řádků.

  Použijete pro návrh řešení poznámky v textovém souboru nebo spíše „tužku a papír“ (fixu a tabuly)?