8. Vnitřní reprezentace datových typů

B0B99PRPA – Procedurální programování

Stanislav Vítek

Katedra radioelektroniky
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přehled témat

- Část 1 – Pole v dynamické paměti
  - 2D pole v dynamické paměti
  - Struktura s ukazatelem na pole
- Část 2 – Vnitřní reprezentace datových typů
  - Přesnost výpočtů
  - Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači
  - Reprezentace celých čísel
  - Reprezentace reálných čísel
  - Bitové operace
- Část 3 – Standardní knihovny

Část I

Pole v dynamické paměti

I. Pole v dynamické paměti

2D pole v dynamické paměti

Struktura s ukazatelem na pole

2D pole v dynamické paměti

- Pole ukazatelů na jednotlivé řádky pole
  - nelze měnit počet řádků
  - délka řádků může být různá

```
1  int *p[2];
2  /* prvni radek */
3  p[0] = (int *)malloc (3*sizeof(int));
4  /* druhy radek */
5  p[1] = (int *)malloc (3*sizeof(int));
```

2D pole v dynamické paměti

- Ukazatel na ukazatel
  - lze měnit počet řádků délka řádků může být různá

```
1  int ** p;
2  p = (int **)malloc (2*sizeof(int));
3  p[0] = (int *)malloc (3*sizeof(int));
4  p[1] = (int *)malloc (3*sizeof(int));
```

- Ukazatel na N-prvkové pole
  - ekvivalent pole ve statické paměti

```
1  int (*p)[3];
2  /* alokujeme souvisly blok 6 prvku */
3  p = (int (*)[3])malloc (6*sizeof(int));
```

I. Pole v dynamické paměti

2D pole v dynamické paměti

Struktura s ukazatelem na pole

Struktura s ukazatelem na pole

- Téměř vždy při práci s polem potřebujeme informaci o alokované velikosti
- Velmi často tuto informaci z různých důvodů nemáme
- Řešením může být struktura, která obsahuje metadata pole

```
1  typedef struct
2  {
3    int delka;
4    int *data;
5  } pole;
```

```
1  void init (pole * x, int y) {
2    x->delka = velikost;
3    x->data = malloc(y*sizeof(int));
4  }
6  int main() {
7    pole a;
8    init (&a, 5);
9  }
```

Co zde chybí?

Část II

Vnitřní reprezentace datových typů

II. Vnitřní reprezentace datových typů

Přesnost výpočtů

Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači

Reprezentace celých čísel

Reprezentace reálných čísel

Bitové operace

Ztráta přesnosti při aritmetických operacích 1/2

```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;
}
```

lec08/sum.c

```
a   : 10000000000.000000000000
b   :           0.000000000100
a+b: 10000000000.000000000000
```

Ztráta přesnosti při aritmetických operacích 2/2

```c
int main(void)
{
  const int number = 100;
  double dV = 0.0;
  float fV = 0.0f;
  for (int i = 0; i < number; ++i) {
    dV += 1.0 / 10.0;
    fV += 1.0 / 10.0;
  }
  printf("double: %lf float: %lf", dV, fV);
  return 0;
}
```

lec08/div.c

```
double: 10.000000 float: 10.000002
```

Strojová přesnost

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

$$v + 1.0 == 1.0$$

- Zaokrouhlovací chyba – nejméně ϵ_m.
- Přesnost výpočtu
  - aditivní chyba roste s počtem operací v řádu $\sqrt{N}\epsilon_m$
  - často se však kumuluje preferabilně v jednom směru v řádu $N\epsilon_m$
- Absolutní chyba aproximace $E(x) = \hat{x} - x$
  - $\hat{x}$ přesná hodnota, x aproximace
- Relativní chyba $RE(x) = (\hat{x} - x)/x$

Podmíněnost numerických úloh

$$C_p = \frac{\text{relativní chyba výstupních údajů}}{\text{relativní chyba vstupních údajů}}$$

- 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.

Příklady chyb

- Ariane 5 – 4. 6. 1996

  40 sekund po startu explodovala. Datová konverze z 64-bitového desetinné reprezentace na 16-ti bitový znaménkový integer.

- Systém Patriot – 25. 2. 1991

  Systémový čas v desetinách sekundy, převod na sekundy realizován dělením 10, registry pouze 24 bitů.

- Mars Climate Orbiter – 23. 10. 1999

  Chyba při výměně dat při výpočtu impulsu motorů. Jeden systém počítal v librách/s, ale druhý to interpretoval jako N/s.

II. Vnitřní reprezentace datových typů

Přesnost výpočtů

Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači

Reprezentace celých čísel

Reprezentace reálných čísel

Bitové operace

Datové typy

- Při návrhu algoritmu abstrahujeme od binární podoby paměti počítače
- S daty pracujeme jako s hodnotami různých datových typů, které jsou uloženy v paměti předepsaným způsobem
- Datový typ specifikuje:
  - Množinu hodnot, které je možné v počítači uložit

    Záleží na způsobu reprezentace
  - Množinu operací, které lze s hodnotami typu provádět
- **Jednoduchý typ** je takový typ, jehož hodnoty jsou atomické, tj. z hlediska operací dále nedělitelné

Reprezentace dat v počítači

- V počítači není u datové položky určeno jaký konkrétní datový typ je v paměti uložen
  - Proto musíme přidělení paměti definovat s jakými typy dat budeme pracovat
  - Překladač pak tuto definici hlídá a volí odpovídající strojové instrukce pro práci s datovými položkami například jako s odpovídajícími číselnými typy
- Příklad ekvivalentních reprezentací v paměti počítače
  - $01000001_{(2)}$ – binární zápis jednoho bajtu (8-mi bitů);
  - $65_{(10)}$ – odpovídající číslo v dekadické soustavě;
  - $41_{(16)}$ – odpovídající číslo v šestnáctkové soustavě;
  - znak A – tentýž obsah paměťového místa o velikosti 1B může být interpretován také jako znak A.

II. Vnitřní reprezentace datových typů

Přesnost výpočtů

Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači

Reprezentace celých čísel

Reprezentace reálných čísel

Bitové operace

Číselné soustavy

- Číselné soustavy – poziční číselné soustavy (polyadické) jsou charakterizovány bází udávající kolik číslic lze maximálně použít

  $x_d = \sum_{i=-n}^{m} a_i z^i$, kde a_i je číslice a z_i je základ soustavy
- Dvojková soustava (bin) – 2 číslice 0 nebo 1

  $11010,01_{(2)} = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 + 0 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2}$
- Desítková soustava (dec) – 10 číslic, znaky 0 až 9

  $138,24_{(10)} = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 8 \cdot 10^0 + 2 \cdot 10^{-1} + 4 \cdot 10^{-2}$
- Šestnáctková soustava (hex) – 16 číslic, znaky 0 až 9 a A až F

  $0x7D_{(16)} = 7 \cdot 16^1 + D \cdot 16^0$

Kódování záporných čísel

- **Přímý kód** – znaménko je určeno 1. bitem (zleva), snadné stanovení absolutní hodnoty, dvě nuly, příklad reprezentace:
  - $121_{(10)}$ $0111\ 1001_{(2)}$
  - $-121_{(10)}$ $1111\ 1001_{(2)}$
  - $0_{(10)}$ $0000\ 0000_{(2)}$
  - $-0_{(10)}$ $1111\ 1111_{(2)}$
- **Inverzní kód** – záporné číslo odpovídá bitové negaci kladné hodnoty čísla; dvě nuly; příklad reprezentace:
  - $121_{(10)}$ $0111\ 1001_{(2)}$
  - $-121_{(10)}$ $1000\ 0111_{(2)}$
  - $0_{(10)}$ $0000\ 0000_{(2)}$
  - $-0_{(10)}$ $1111\ 1111_{(2)}$
- **Doplňkový kód** – záporné číslo je uloženo jako hodnota kladného čísla po bitové negaci zvětšená o 1; jediná reprezentace nuly
  - $121_{(10)}$ $0111\ 1001_{(2)}$
  - $-121_{(10)}$ $1000\ 0111_{(2)}$
  - $127_{(10)}$ $0111\ 1111_{(2)}$
  - $-128_{(10)}$ $1000\ 0000_{(2)}$

Více-bajtová reprezentace a pořadí bajtů

- Číselné typy s více-bajtovou reprezentací mohou mít bajty uloženy v různém pořadí
  - **little-endian** – nejméně významný bajt (LSB) na nejnižší adrese

    x86, ARM
  - **big-endian** – nejvíce významný bajt (MSB) na nejnižší adrese

    Motorola, ARM
- Pořadí je důležité při přenosu hodnot z paměti jako posloupnosti bajtů a jejich následné interpretaci
- **Network byte order** – je definován pro síťový přenos a není tak nutné řešit konkrétní architekturu
  - hodnoty z paměti jsou ukládány a přenášeny v tomto pořadí bajtů a na cílové stanici pak zpětně zapsány do konkrétního nativního pořadí

    vždy big-endian

II. Vnitřní reprezentace datových typů

Přesnost výpočtů

Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači

Reprezentace celých čísel

Reprezentace reálných čísel

Bitové operace

Reprezentace reálných čísel

- Pro uložení čísla vyhrazujeme omezený paměťový prostor
- Příklad – zápis čísla $\frac{1}{3}$ v dekadické soustavě
  - = 33333333...3333
  - = $0,3\overline{3}$
  - ≈ $0,33333333333333333333$
  - ≈ $0,333$
- V trojkové soustavě: $0 \cdot 3^1 + 0 \cdot 3^0 + 1 \cdot 3^{-1}$
- Nepřesnosti v zobrazení reálných čísel v konečné posloupnosti bitů způsobují
  - Iracionální čísla, např. e, π, $\sqrt{2}$
  - Čísla, která mají v dané soustavě periodický rozvoj, např. $\frac{1}{3}$
  - Čísla, která mají příliš dlouhý zápis

Model reprezentace reálných čísel 1/2

- Reálná čísla se zobrazují jako aproximace daným rozsahem paměťového místa
- Reálné číslo x se zobrazuje ve tvaru

  $x = m \cdot z^e$
- Pro jednoznačnost zobrazení musí být mantisa normalizována

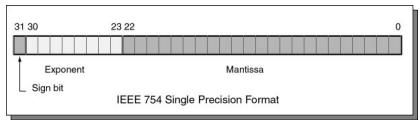
  $0,1 \lesssim m < 1$
- Ve vyhrazeném paměťovém prostoru je pro zvolený základ uložen exponent a mantisa jako dvě celá čísla

Model reprezentace reálných čísel 2/2

- Reálné číslo x se zobrazuje ve tvaru IEEE 754

$$x = (-1)^s \cdot m \cdot 2^{e-b}$$

- `float` – 32 bitů (4 bajty): s – 1 bit znaménko (+ nebo -), mantisa – 23 bitů ≈ 16,7 milionu možností; exponent – 8 bitů



- `double` – 64 bitů (8 bajtů): s – 1 bit znaménko (+ nebo -), mantisa – 52 bitů ≈ 4,5 biliardy možností, exponent – 11 bitů
- Čím větší exponent, tím větší mezery mezi sousedními aproximacemi čísel
- `bias` umožňuje reprezentovat exponent vždy jako kladné číslo

Využití struktury, unionu a bitových operací

```
typedef union t_fp32 {
  float fp;           // float hodnota
  unsigned int uint;  // 32b int na stejne adrese
  struct {            // rozklad 32b slova na slozky
    unsigned int mantisa:DELKA_MAN; // - 23b mantisa
    unsigned int exp:DELKA_EXP;     // - 8b exponent
    unsigned int signum:DELKA_SIG;  // - 1b znamenko
  } fp_deleny;
} t_fp32;
```

II. Vnitřní reprezentace datových typů

Přesnost výpočtů

Základní číselné typy a jejich reprezentace v počítači

Reprezentace celých čísel

Reprezentace reálných čísel

Bitové operace

Bitové operátory

- Bitové operátory vyhodnocují operandy bit po bitu

Bitové AND	`x&y`	`1` když `x` i `y` je rovno `1`
Bitové OR	`x|y`	`1` když `x` nebo `y` je rovno `1`
Bitové XOR	`x^y`	`1` pokud pouze `x` nebo pouze `y` je `1`
Bitové NOT	`~x`	`1` pokud `x` je rovno `0`
Posun vlevo	`x<<y`	posun `x` o `y` bitů vlevo
Posun vpravo	`x>>y`	posun `x` o `y` bitů vpravo

Příklad

```
21 & 56     = 00010101 & 00111000     = 00010000
21 | 56     = 00010101 | 00111000     = 00101101
21 ^ 56     = 00010101 ^ 00111000     = 00111101
~21         = ~00010101               = 11101010
21 << 2     = 00010101 << 2           = 01010100
21 >> 1     = 00010101 >> 2           = 00001010
```

Operace bitového posunu

- Operátory bitového posunu posouvají celý bitový obraz proměnné nebo konstanty o zvolený počet bitů vlevo nebo vpravo
- Při posunu vlevo jsou uvolněné bity zleva doplňovány 0
- Při posunu vpravo jsou uvolněné bity zprava
  - u čísel kladných nebo čísel typu `unsigned` plněny `0`
  - u záporných čísel bud plněny `0` (logický posun) nebo `1` (aritmetický posun vpravo), dle implementace překladače.
- Operátory bitového posunu mají nižší prioritu než aritmetické operátory!
  - `i << 2 + 1` znamená `i << (2 + 1)`

Bitové operátory – příklad 1/2

- Nastavení N-tého bitu celého čísla

```
1   unsigned char cislo;
2   cislo |= (1<<N);
```

- Nulování N-tého bitu celého čísla

```
1   unsigned char cislo;
2   cislo &= ~(1<<N);
```

- Inverze N-tého bitu celého čísla

```
1   unsigned char cislo;
2   cislo ^= (1<<N);
```

- Získání hodnoty N-tého bitu celého čísla

```
1   unsigned char cislo;
2   char bit = (cislo & (1<<N)) >> N;
```

Bitové operátory – příklad 2/2

```c
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
int main()
{
  uint8_t a = 10;
  for (int i = 7; i >= 0; --i)
  {
    printf ("%i", (a >> i) & 1);
  }
  printf("\n");
  return 0;
}
```

lec08/bites.c

Část III

Standardní knihovny

III. Standardní knihovny

Standardní knihovny

Matematické funkce

Práce se soubory

Zpracování chyb

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)

III. Standardní knihovny

Standardní knihovny

Matematické funkce

Práce se soubory

Zpracování chyb

Matematické funkce

- `<math.h>` – základní funkce pro práci s reálnými čísly
  - Výpočet odmocniny necelého čísla `x`
    `double sqrt(double x);`, `float sqrtf(float x);`
  - `double pow(double x, double y);` – výpočet obecné mocniny
  - `double atan2(double y, double x);` – výpočet arctan
  - Symbolické konstanty:
    - `#define M_PI 3.14159265358979323846`
    - `#define M_PI_2 1.57079632679489661923`
    - `#define M_PI_4 0.78539816339744830962`
  - `isfinite()`, `isnan()`, `isless()`, ... – makra pro porovnání reálných čísel.
  - `round()`, `ceil()`, `floor()` – zaokrouhlování, převod na celá čísla
- `<complex.h>` – funkce pro počítání s komplexními čísly (ISO C99)
- `<fenv.h>` – funkce pro řízení zaokrouhlování a reprezentaci dle IEEE 754

III. Standardní knihovny

Standardní knihovny

Matematické funkce

Práce se soubory

Zpracování chyb

Práce se soubory

- Knihovna `<stdio.h>`
- Přístup k souboru je prostřednictvím ukazatele FILE*
- Otevření souboru FILE *fopen(char *filename, char *mode);
- Práce s textovými a binárními (modifikátor "b") soubory
- Soubory jsou čteny/zapisovány sekvenčně
  - Se soubory se pracuje jako s proudem dat – postupné načítání/zápis
  - 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, ("r" – čtení textového souboru, "rb" – čtení binárního souboru)
  - "w" – režim zápisu (Vytvoří soubor, pokud neexistuje, jinak smaže obsah souboru)
  - "a" – režim přidávání do souboru (Kurzor je nastaven na konec souboru)

Testování otevření / zavření souboru

- Otevření souboru

```
char *fname = "file.txt";

if ((f = fopen(fname, "r")) == NULL) {
  fprintf(stderr, "Error: open '%s'\n", fname);
}
```

- Zavření souboru

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

- Konec 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

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

- 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 z textového souboru

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

```
FILE *f = fopen("text.txt");
int r = fscanf(f, "%s %d %lf\n", str, &i, &d);
```

- 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);
```

Zápis do textového souboru

```
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 '%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 '%s'\n", fname);
    return -1;
  }
  return 0;
}
```

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);
```

- Zjištění pozice kurzoru

```
long int ftell(FILE *stream);
```

Binární čtení/zápis z/do souboru

- Otevření souboru s příznakem `b`

  vliv na řetězce, řídicí znaky např. `\0`, `\n` nebo `EOF` – Ctr+Z

- 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

III. Standardní knihovny

Standardní knihovny

Matematické funkce

Práce se soubory

Zpracování chyb

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

```c
#include <stdio.h>
#include <errno.h>
#include <string.h>
int main(int argc, char *argv[])
{
  FILE *f = fopen("soubor.txt", "r");
  if (f == NULL) {
    int r = errno;
    printf("Open file failed errno %d\n", errno);
    printf("String error '%s'\n", strerror(r));
  }
  return 0;
}
```

Testovací makro `assert()`

- Do kódu lze přidat podmínky na nutné hodnoty proměnných
- Testovat můžeme makrem `assert(expr)`
  - z knihovny `<assert.h>`
  - Pokud není expr `true` 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`

Testovací makro `assert()` – příklad

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