

Stromy

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 10

BOB36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

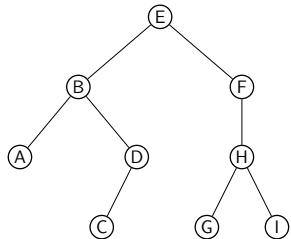
- Část 1 – Stromy
 - Stromy
 - Binární strom
 - Příklad binárního stromu v C
 - Stromové struktury
- Část 2 – Příklad načítání grafu, kompilace a projekt s více soubory
 - Načítání grafu jako seznamu hran – projekt s více soubory

Část I

Část 1 – Stromy

Lineární a nelineární spojové struktury

- Spojové seznamy představují lineární spojovou strukturu.
- Nelineární spojové struktury (např. stromy).
Každý prvek má nejvýše jednoho následníka. Každý prvek může mít více následníků.
- **Binární strom:** každý prvek (uzel) má nejvýše dva následníky.



- kořen stromu
- list
- levý podstrom
- pravý podstrom

Binární strom

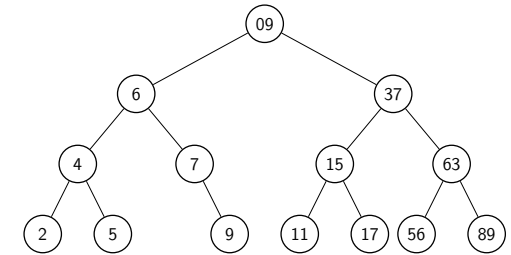
- Pro přehlednost uvažujeme datové položky uzlů stromu jako hodnoty typu `int`.
- Uzel stromu reprezentujeme strukturou `node_t`.

```
1 typedef struct node {
2     int value;
3     struct node *left;
4     struct node *right;
5 } node_t;
```
- Strom je pak reprezentován kořenem stromu, ze kterého máme přístup k jednotlivým uzlům (potomci `left` a `right` a jejich potomci).

```
node_t *tree;
```

Příklad – Binární vyhledávací strom

- Binární vyhledávací strom – Binary Search Tree (BST).
- Pro každý prvek (uzel) platí, že hodnota (`value`) potomka vlevo je menší (nebo `NULL`) a hodnota potomka vpravo je větší (nebo `NULL`).



BST – tree_insert() 1/2

- Při vložení prvku dynamicky alokujeme uzel pomocnou (lokální) funkcí, např. `newNode()`.

```
8 static node_t* newNode(int value)
9 {
10     node_t *node= (node_t*)malloc(sizeof(node_t));
11     if (!node) {
12         fprintf(stderr, "ERROR: Memory allocation fail file: %s line: %d\n", __FILE__,
13             __LINE__);
14         exit(-1);
15     }
16     node->value = value;
17     node->left = node->right = NULL;
18     return node;
19 }
20
```

`lec10/tree/tree-int.c`
- Uvedením klíčového slova `static` je funkce viditelná pouze v modulu `tree-int.c`.

BST – tree_insert() 2/2

- Vložení prvku – využijeme rekurze a vkládáme na první volně vhodné místo, splňující podmínku BST.
Binární vyhledávací strom nemusí být nutně vyvážený!

```
23 node_t* tree_insert(int value, node_t *node)
24 {
25     if (node == NULL) {
26         return newNode(value); // vracíme nový uzel
27     } else {
28         if (value <= node->value) { //vložení do levého podstromu
29             node->left = tree_insert(value, node->left);
30         } else { // vložení do pravého podstromu
31             node->right = tree_insert(value, node->right);
32         }
33         return node; // vracíme vstupní uzel!!!
34     }
35 }
```

`lec10/tree/tree-int.c`

Průchod binárním vyhledávacím stromem

- Při hledání prvku konkrétní hodnoty se postupně zanořujeme hlouběji do stromu. Může nastat jedna z následujících situací:
Např. hodnota value představuje klíč nějaké datové položky.
 - Aktuální prvek má hledanou hodnotu klíče, hledání je ukončeno.
 - Hodnota klíče je menší než hodnota aktuálního prvku, pokračujeme v hledání v další úrovni levého potomka.
 - Hodnota klíče je větší než hodnota aktuálního prvku, pokračujeme v hledání v další úrovni pravého potomka.
 - Aktuální prvek má hodnotu `null`, hledání je ukončeno, prvek ve stromu není.
- Při průchodu stromem můžeme postupovat rekurzivně tak, že nejdříve navštívujeme levé potomky a následně pak pravé potomky.
Pokud budeme při takovém průchodu vypisovat hodnoty v levém podstromu, pak hodnotu prvku a následně hodnoty v pravém podstromu, vypíšeme hodnoty uložené ve stromu uspořádané (sestupně nebo vzestupně, podle toho jestli jsou vlevo prvky menší nebo větší).

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Binární strom celočíselných hodnot int

- Kromě vložení prvků do stromu funkci `tree_insert()`,

Viz předchozí příklad.

implementuje následující funkce:

- `tree_free()` – Kompletní smazání stromu, včetně uvolnění paměti všech prvků;
- `tree_size()` – Vrábí počet prvků ve stromu;
- `tree_print()` – Vypsání prvků uložených ve stromu (BST).

```

1 void tree_free(node_t **tree); // chceme také smazat a vynulovat hodnotu ukazatele
   tree (na úrovni volající funkce), proto **tree
2 int tree_size(const node_t *const tree);
3 void tree_print(const node_t *const node);

```

lec10/tree/tree-int.h

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 13 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_free()

```

40 void tree_free(node_t **tree)
41 {
42     if (tree && *tree) {
43         node_t * node = *tree;
44         if ( node->left ) {
45             tree_free(&(node->left));
46         }
47         if ( node->right ) {
48             tree_free(&(node->right));
49         }
50         free(*tree);
51         *tree = NULL; // fill the tree variable
52                       // of the calling function to NULL
53     }
54 }

```

Předáváme ukazatel na ukazatel, abychom mohli po uvolnění paměti nastavit hodnotu ukazatele (ve volající funkci) na NULL. Proměnná je předána hodnotou.

```

...
tree_free(&*tree);
// zde chceme mít tree == NULL

```

lec10/tree/tree-int.h

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 14 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_size() a tree_print()

- Určení počtu prvků implementujeme rekurzí.

```

56 int tree_size(const node_t *const node)
57 {
58     return node == NULL ?
59         0 :
60         tree_size(node->left) + 1 + tree_size(node->right);
61 }

```

- Podobně výpis hodnot.

```

74 void tree_print(const node_t *const node)
75 {
76     if (node) {
77         tree_print(node->left);
78         printf("%d ", node->value);
79         tree_print(node->right);
80     }
81 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 15 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad použití – 1/3

- Strom naplníme for cyklem.
- Vypíšeme počet prvků a uložené hodnoty funkcí `tree_print()`.

```

22 ...
23 for (int i = 0; i < n; ++i) {
24     printf("Insert value %i\n", values[i]);
25     if (root == NULL) {
26         root = tree_insert(values[i], NULL);
27     } else {
28         tree_insert(values[i], root);
29     }
30 }
31 printf("No. of tree nodes is %i\n", tree_size(root));
32 printf("Print tree: ");
33 tree_print(root);
34 printf("\n");
35
36 tree_free(&root);
37 printf("After tree_free() root is %p\n", root);
38 return 0;
39 }

```

lec10/tree/demo-tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 16 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad použití – 3/3

- Program spustíme bez a s argumentem pro načtení „balanced“ stromu.

```

$ clang tree-int.c demo-tree-int.c $ clang tree-int.c demo-tree-int.c
$ ./a.out                          $ ./a.out values1
Insert values2 that will result in an unbalanced tree Insert values1 to make balanced tree
Insert value 5                        Insert value 5
Insert value 4                        Insert value 3
Insert value 6                        Insert value 7
Insert value 3                        Insert value 2
Insert value 7                        Insert value 4
Insert value 2                        Insert value 6
Insert value 8                        Insert value 8

No. of tree nodes is 7                No. of tree nodes is 7
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8            Print tree: 2 3 4 5 6 7 8

```

lec10/tree/demo-tree-int.c

- V obou případech je výpis uspořádaný. Jak otestovat, že operace nad stromem (např. `tree_insert()`) zachová vlastnosti BST?

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 17 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Test vlastnosti binárního vyhledávacího stromu

- Ověření zdali je strom binárním vyhledávacím stromem otestujeme funkcí `tree_is_bst()`.

```

1 _Bool tree_is_bst(const node_t *const node);

```

- Funkce rekurzivně projde strom a ověří, že pro každý uzel platí:
 - Hodnota uzlu není menší než nejvyšší hodnota v levém podstromu;
 - Hodnota uzlu není větší než nejmenší hodnota v pravém podstromu;
 - Podstrom levého následníka splňuje vlastnost BST;
 - Podstrom pravého následníka splňuje vlastnost BST.
- K tomu potřebujeme pomocné funkce `getMaxValue()` a `getMinValue()`.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 18 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_is_bst() - 1/3

- Za předpokladu BST můžeme maximální hodnotu nalézt iteračně.

```

84 static int getMaxValue(const node_t *const node)
85 {
86     const node_t *cur = node;
87     while (cur->right) {
88         cur = cur->right;
89     }
90     return cur->value;
91 }

```

- Podobně minimální hodnotu.

```

94 static int getMinValue(const node_t *const node)
95 {
96     const node_t *cur = node;
97     while (cur->left) {
98         cur = cur->left;
99     }
100    return cur->value;
101 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 19 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_is_bst() - 2/3

```

105 _Bool tree_is_bst(const node_t *const node)
106 {
107     _Bool ret = true;
108     if (node != NULL) {
109         if (node->left
110             && getMaxValue(node->left) > node->value) {
111             ret = false;
112         }
113         if (ret && node->right
114             && getMinValue(node->right) <= node->value) {
115             ret = false;
116         }
117         if (ret
118             && (!tree_is_bst(node->left) || !tree_is_bst(node->right))
119             ) {
120             ret = false;
121         }
122     }
123     return ret;
124 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 20 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_is_bst() - 3/3

- Přidáme výpis a volání `tree_is_bst()`.

```

36 ...
37 printf("Max tree depth: %i\n", tree_max_depth(root));
38 printf("Tree is binary seach tree (BST): %s\n",
39        tree_is_bst(root) ? "yes" : "no");

```

- Program spustíme bez a s argumentem pro načtení „balanced“ stromu.

```

$ clang tree-int.c demo-tree-int.c $ clang tree-int.c demo-tree-int.c
$ ./a.out                          $ ./a.out values1
Insert values2 that will result in an unbalanced tree Insert values1 to make balanced tree
tree                                     ...
Print tree: 2 3 4 5 6 7 8                Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
Tree is binary seach tree (BST): yes     Tree is binary seach tree (BST): yes
Print tree by depth row                   ...

```

- V obou případech je podmínka BST splněna.

lec10/tree/demo-tree-int.c

Test sice indikuje, že strom je správně vytvořen, ale vizuálně nám výpis příliš nepomohl. V tomto jednoduchém případě si můžeme dále napsat funkci pro názornější výpis jednotlivých úrovní stromu. K tomu budeme potřebovat určení hloubky stromu.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 21 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace tree_max_depth()

- Funkci implementujeme rekurzí.

```

62 int tree_max_depth(const node_t *const node)
63 {
64     if (node) {
65         const int left_depth = tree_max_depth(node->left);
66         const int right_depth = tree_max_depth(node->right);
67         return left_depth > right_depth ?
68             left_depth + 1 :
69             right_depth + 1;
70     } else {
71         return 0;
72     }
73 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 22 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Výpis hodnot v konkrétní hloubce stromu printDepth()

- Výpis konkrétní vrstvy (hloubky) provedeme rekurzivně lokální funkcí printDepth().

```

128 static void printDepth(int depth, int cur_depth, const node_t *const node)
129 {
130     if (depth == cur_depth) {
131         if (node) {
132             printf("%2d ", node->value);
133         } else {
134             printf(" - ");
135         }
136     } else if (node) {
137         printDepth(depth, cur_depth + 1, node->left);
138         printDepth(depth, cur_depth + 1, node->right);
139     }
140 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 23 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad implementace výpisu stromu tree_print_layers()

- Výpis hodnot po jednotlivých vrstvách (hloubce) implementujeme iteračně pro dílčí hloubky stromu.

```

142 void tree_print_layers(const node_t *const node)
143 {
144     const int depth = tree_max_depth(node);
145     for (int i = 0; i <= depth; ++i) {
146         printDepth(i, 0, node);
147         printf("\n");
148     }
149 }

```

lec10/tree/tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 24 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Příklad použití tree_print_layers()

- Přidáme výpis a volání tree_print_layers().

```

40 ...
41 printf("Print tree by depth row\n");
42 tree_print_layers(root);
43 ...

```

- Program spustíme bez a s argumentem pro načtení *balanced* stromu.

```

1 clang tree-int.c demo-tree-int.c      1 clang tree-int.c demo-tree-int.c
2 ./a.out                                2 ./a.out values1
3 Insert values2 that will result in an  3 Insert values1 to make balanced tree
4   unbalanced tree                    4 ...
5 ...                                    5 ...
6 Print tree: 2 3 4 5 6 7 8             6 Print tree: 2 3 4 5 6 7 8
7 Tree is binary seach tree (BST): yes   7 Tree is binary seach tree (BST): yes
8 Max tree depth: 4                    8 Max tree depth: 3
9 Print tree by depth row               9 Print tree by depth row
10 5                                     10 5
11 4 6                                   11 3 7
12 3 - - 7                              12 2 4 6 8
13 - - - -                               13 - - - - - - - -

```

lec10/tree/demo-tree-int.c

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 25 / 51

Stromy Binární strom Příklad binárního stromu v C Stromové struktury

Stromové struktury

- Stromové struktury jsou významné datové struktury pro vyhledávání.
 - Složitost vyhledávání je *úměrná hloubce stromu*.
- Binární stromy – každý uzel má nejvýše dva následníky.
 - Hloubku stromu lze snížit tzv. vyvažováním stromu.
 - AVL stromy *Georgy Adelson-Velsky a Evgenii Landis*
 - Red-Black stromy
 - Plný binární strom** – každý vnitřní uzel má dva potomky a všechny uzly jsou co nejvíce vlevo.
 - Můžeme **efektivně reprezentovat polem**.
 - Lze použít pro efektivní implementaci prioritní fronty.
 - Pro daný maximální počet uzlů, viz přednáška 11.
 - Heap – halda
 - Halda (heap) je základem řídicího algoritmu *Heap Sort*.
- Vícecestné stromy – např. B–strom (Bayer tree) pro ukládání uspořádaných záznamů.
 - Informativní více v *Algoritmizaci*

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 27 / 51

Načítání grafu jako seznamu hran – projekt s více soubory

Část II

Část 2 – Příklad načítání grafu, kompilace a projekt s více soubory

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 28 / 51

Načítání grafu jako seznamu hran – projekt s více soubory

Dílčí příklady použití jazykových konstrukcí v projektu

- Program složený z více souborů
- Dynamická alokace paměti
- Načítání souboru
- Parsování čísel z textového souboru
- Měření času běhu programu
- Řízení kompilace projektu složeného z více souborů `Makefile`

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 30 / 51

Načítání grafu jako seznamu hran – projekt s více soubory

Zadání

- Vytvořte program, který načte orientovaný graf definovaný posloupností hran.
 - Graf je zapsán v textovém souboru.
- Navrhněte datovou strukturu pro reprezentaci grafu.
- Počet hran není dopředu znám.
 - Zpravidla však budou na vstupu grafy s průměrným počtem hran $3n$ pro n vrcholů grafu.
- Hrana je definována číslem vstupního a výstupního vrcholu a cenou (také celé číslo).
 - Ve vstupním souboru je každá hrana zapsaná samostatně na jednom řádku.
 - Řádek má tvar:


```
from to cost
```

 - kde *from*, *to* a *cost* jsou kladná celá čísla v rozsahu `int`.
- Pro načtení hodnot hran použijte pro zjednodušení funkci `fscanf()`.
- Program dále rozšířte o sofistikovanější, méně výpočetně náročné načítání.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 31 / 51

Načítání grafu jako seznamu hran – projekt s více soubory

Pravidla překladačů v gmake / make

- Pro řízení překladačů použijeme pravidlový předpis programu GNU `make`. `make` nebo `gmake`
- Pravidla se zapisují do souboru `Makefile`.
 - <http://www.gnu.org/software/make/make.html>
- Pravidla jsou deklarativní ve tvaru definice cíle, závislosti cíle a akce, která se má provést.
 - cíl : závislosti *dvojtečka*
 - akce *tabulátor*
- Cíl (podobně jako závislosti) může být například symbolické jméno nebo jméno souboru.
 - `tload.o : tload.c`
 - `clang -c tload.c -o tload.o`
- Předpis může být napsán velmi jednoduše.
 - Například jako v uvedené ukázce.

Flexibilita použití však spočívám především v použití zavedených proměnných, vnitřních proměnných a využití vzorů, neboť většina zdrojových souborů se překládá identicky.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Přednáška 10: Stromy 32 / 51

Příklad – Makefile

- Definujeme pravidlo pro vytvoření souborů `.o` z `.c` z aktuálních souborů v pracovním adresáři s koncovkou `.c`.

```
CC=ccache $(CC)
CFLAGS+=-O2
OBJS=$(patsubst %.c,%.o,$(wildcard *.c))
TARGET=tload
bin: $(TARGET)
$(OBJS): %.o: %.c
$(CC) -c $(CFLAGS) $(CPPFLAGS) -o $@
$(TARGET): $(OBJS)
$(CC) $(OBJS) $(LDPLAGS) -o $@
clean:
$(RM) $(OBJS) $(TARGET)
CC=clang make vs CC=gcc make
```

- Při linkování záleží na pořadí souborů (knihoven)!

- Jednou z výhod dobrých pravidel je možnost paralelního překladu nezávislých cílů.

```
make -j 4
```

Definice datové struktury grafu – `graph.h`

- Zavedeme nový typ datové struktury hrana—`edge_t`,
- kteřý použijeme ve struktuře grafu—`graph_t`.

```
#ifndef __GRAPH_H__
#define __GRAPH_H__
typedef struct {
    int from;
    int to;
    int cost;
} edge_t;
typedef struct {
    edge_t *edges;
    int num_edges;
    int capacity;
} graph_t;
#endif
lec10/graph_load/graph.h
```

- Soubor budeme opakovaně vkládat (`include`) v ostatních zdrojových souborech, proto „zabraňujeme“ opakované definici konstantou preprocesoru `__GRAPH_H__`.

Pomocné funkce pro práci s grafem

- Alokaci/uvolnění grafu implementujeme v samostatných funkcích.
- Při načítání grafu budeme postupně zvětšovat paměť pro uložení načítaných hran.
- Využijeme dynamické alokace paměti—`enlarge_graph()` o definovanou velikost.

```
#ifndef __GRAPH_UTILS_H__
#define __GRAPH_UTILS_H__
#include "graph.h"
graph_t* allocate_graph(void);
void free_graph(graph_t **g);
graph_t* enlarge_graph(graph_t *g);
void print_graph(graph_t *g);
#endif
lec10/graph_load/graph_utils.h
```

Alokace paměti grafu

- Testujeme úspěšnost alokace paměti.
- Po alokaci nastavíme hodnoty proměnných na `NULL` a `0`.

Alternativně `calloc()`.

```
#include <assert.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include "graph.h"
graph_t* allocate_graph(void)
{
    graph_t *g = (graph_t*) malloc(sizeof(graph_t));
    if (g == NULL) {
        fprintf(stderr, "Malloc fail: %s line %d\n", __FILE__, __LINE__);
        exit(-1);
    }
    g->edges = NULL;
    g->num_edges = 0;
    g->capacity = 0; /* or we can call calloc */
    return g;
}
lec10/graph_load/graph_utils.c
```

Uvolnění paměti pro uložení grafu

- Testujeme validní hodnotu argumentu funkce—`assert()`.

Pokud nastane chyba, funkci v programu špatně voláme. Až odladíme můžeme kompilovat s `NDEBUG`.

```
void free_graph(graph_t **g)
{
    /* We request to call free_graph only with valid g.
     * The program has to be written to properly call free_graph(). */
    assert(g != NULL && *g != NULL);
    if ((*g)->capacity > 0) {
        free((*g)->edges);
    }
    free(*g);
    *g = NULL;
}
lec10/graph_load/graph_utils.c
```

- Po uvolnění paměti nastavíme hodnotu ukazatele na strukturu na hodnotou `NULL`.

Tisk hran grafu

- Pro tisk hran grafu využijeme pointerovou aritmetiku.

```
void print_graph(graph_t *g)
{
    assert(g != NULL);
    fprintf(stderr, "Graph has %d edges and %d edges are allocated\n",
            g->num_edges, g->capacity);
    edge_t *e = g->edges;
    for (int i = 0; i < g->num_edges; ++i, e++) {
        printf("%d %d %d\n", e->from, e->to, e->cost);
    }
}
62 }
```

- Informace vypisujeme na standardní chybový výstup.

- Graf tiskneme na standardní výstup.

- Při tisku a přeměrování standardního výstupu tak v podstatě můžeme realizovat kopírování souboru s grafem.

Např. `./tload -p g > g2`

Hlavní funkce programu – `main()`

- V `main()` zpracujeme předané argumenty programu, v případě uvedení přepínače `-p` vytiskneme graf na `stdout`.

```
int main(int argc, char *argv[])
{
    int ret = 0;
    int print = 0;
    char *fname;
    int c = 1;
    if (argc > 2 && strcmp(argv[c], "-p") == 0) {
        print = 1;
        c += 1;
    }
    fname = argc > 1 ? argv[c] : NULL;
    fprintf(stderr, "Load file '%s'\n", fname);
    graph_t *graph = allocate_graph();
    int e = load_graph_simple(fname, graph);
    fprintf(stderr, "Load %d edges\n", e);
    if (print) {
        print_graph(graph);
    }
    free_graph(&graph);
    return ret;
}
lec10/graph_load/tgraph.c
```

Jednoduché načtení grafu – deklarace

- Prototyp funkce uvedeme v hlavičkovém souboru—`load_simple.h`.

```
#ifndef __LOAD_SIMPLE_H__
#define __LOAD_SIMPLE_H__
#include "graph.h"
int load_graph_simple(const char *fname, graph_t *g);
#endif
```

- Vkládáme pouze soubor `graph.h`—pro definici typu `graph_t`.

Snažíme se zbytečně nevkládat nepoužívané soubory.

Jednoduché načtení grafu – implementace 1/2

- Používáme funkci `enlarge_graph()`, proto vkládáme `graph_utils.h`.
 - `load_simple.h` vkládá nemusíme, obsahuje pouze prototyp funkce.
 - Obecně je to dobrým zvykem.
 - Nutností v případě definice typů.
- ```

1 #include <stdio.h>
2 #include "graph_utils.h"
3 #include "load_simple.h"
4 int load_graph_simple(const char *fname, graph_t *g)
5 {
6 int c = 0;
7 int exit = 0;
8 FILE *f = fopen(fname, "r");
9 while (f && !exit) {
10 if (g->num_edges == g->capacity) {
11 enlarge_graph(g);
12 }
13 edge_t *e = g->edges + g->num_edges;
14 while (g->num_edges < g->capacity) {
15 /* read and parse a single line -> NEXT SLIDE! */
16 }
17 }
18 if (f) {
19 fclose(f);
20 }
21 return c;
22 }

```

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 42 / 51

## Jednoduché načtení grafu – implementace 2/2

- Pro načtení řádku s definicí hrany použijeme funkci `fscanf()`.
- ```

16 :!g while (g->num_edges < g->capacity) {
17     int r = fscanf(f, "%d %d %d\n", &(e->from), &(e->to), &(e->cost));
18     if (r == 3) {
19         g->num_edges += 1;
20         c += 1; /* pocet nactenych hran */
21         e += 1; /* posun ukazatele hran o sizeof(edge_t) */
22     } else {
23         exit = 1; /* neco je spatne ukoncuje nactani */
24         break;
25     }
26 }

```
- lec10/graph_load/load_simple.c
- Kontrolujeme počet přečtených parametrů a až pak zvyšujeme počet hran v grafu.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 43 / 51

Spuštění programu 1/3

- Necht' máme soubor `g` definující graf o 1 000 000 uzlech, například vytvořený programem `lec10/graph_creator/graph_creator.c`.
Velikost souboru cca 62 MB (příkaz `du-disk usage`).
- ```

$ du g
62M g
$./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
$ time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
./tload g 1.12s user 0.03s system 99% cpu 1.151 total

```
- Příkazem `time` můžeme změřit potřebný čas běhu programu.
- strojový, systémový a reálný*

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 44 / 51

## Spuštění programu 2/3

- Příznakem `-p` a přeměrováním standardního výstupu můžeme vytisknout `graph` do souboru.  
*V podstatě vstupní soubor zkopírujeme.*
- ```

$ time ./tload -p g > g2
Load file 'g'
Load 2998898 edges
Graph has 2998898 edges and 5242880 edges are allocated
./tload -p g > g2 2.09s user 0.07s system 99% cpu 2.158 total
$ md5 g g2
MD5 (g) = d969461a457e086bc8ae08b5e9cce097
MD5 (g2) = d969461a457e086bc8ae08b5e9cce097

```
- Čas běhu programu je přibližně dvojnásobný.
 - Oba soubory se zdají být z otisku `md5` identické.
- Na Linuxu md5sum případně lze použít otisk sha1, sha256 nebo sha512.*

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 45 / 51

Spuštění programu 3/3

- Implementací sofistikovanějšího načítání
- ```

$ /usr/bin/time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
0.19 real 0.16 user 0.03 sys

```
- Lze získat výrazně rychlejší načítání.
- 160 ms vs 1050 ms*
- ```

$ /usr/bin/time ./tload g
Load file 'g'
Load 2998898 edges
1.15 real 1.05 user 0.10 sys

```

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 46 / 51

Profilování programu

- Program můžeme tzv. profilovat, např. s podporou kompilátoru a programu `gprof`.
 - Program zkompilujeme a linkujeme s přepínačem `-pg`, např. `CFLAGS=-pg LDFLAGS=-pg make`.
 - Po spuštění, např. `./tload g` program vytvoří soubor `tload.gmon`, s informacemi o volání funkci, který zobrazíme programem `gprof`.
- ```

$ CFLAGS=-pg LDFLAGS=-pg make
ccache clang -c graph_utils.c -pg -O2 -o graph_utils.o
ccache clang -c load_int.c -pg -O2 -o load_int.o
ccache clang -c load_simple.c -pg -O2 -o load_simple.o
ccache clang -c tload.c -pg -O2 -o tload.o
ccache clang graph_utils.o load_int.o load_simple.o tload.o -pg -o tload

```
- ```

$ gprof tload | tail -n 14
% cumulative self self total
time seconds seconds calls ms/call ms/call name
92.1 0.00 0.00 1 4.31 4.31 load_graph_simple [1]
0.0 0.00 0.00 20 0.00 0.00 enlarge_graph [3]
0.0 0.00 0.00 1 0.00 0.00 allocate_graph [4]
0.0 0.00 0.00 1 0.00 0.00 free_graph [5]
0.0 0.00 0.00 0 0.00 0.00

```

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 47 / 51

Jak a za jakou cenu zrychlit načítání seznamu hran

- Zrychlit načítání můžeme přijmutím předpokladů o vstupu.
 - Při použití `fscanf()` je nejdříve načítán řetězec (řádek) pak řetěz reprezentující číslo a následně je parsováno číslo.
 - Převod na číslo je napsán obecně.
 - Můžeme použít postupné „bufferované“ načítání.
 - Převod na číslo můžeme realizovat přímo po přečtení tokenu.
 - Parsováním znaků (číslic) načtené posloupnosti bytů v obráceném pořadí.
- Můžeme získat výrazně rychlejší kód. Vlastní načítání bude méně obecné než `fscanf()`.

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 48 / 51

Zrychlení načítání

- Volání `fscanf()` nahradíme voláním funkce `read_int_values()`, která volá `get_int_value()`.
- ```

16 while (g->num_edges < g->capacity) {
17 int r = read_int_values(f, &(e->from), &(e->to), &(e->cost));
18 //int r = fscanf(f, "%d %d %d\n", &(e->from), &(e->to), &(e->cost));
19 if (r == 3) {
20 g->num_edges += 1;
21 c += 1; /* pocet nactenych hran */
22 e += 1; /* posun ukazatele hran o sizeof(edge_t) */
23 } else {
24 exit = 1; /* neco je spatne ukoncuje nactani */
25 break;
26 }
27 }

```
- ```

1 int read_int_values(FILE *f, int *from, int *to,
2 int *cost)
3 {
4     int rv[] = { from, to, cost };
5     int r = 0;
6     for (int i = 0; i < 3; ++i) {
7         r += get_int_value(f, v[i]);
8     }
9     return r;
10 }
11 static int get_int_value(FILE *f, int *rv)
12 {
13     int r = 0;
14     *rv = 0;
15     while ((r = getc(f)) != EOF && !isdigit(r)) {
16         *rv = *rv * 10 + r - '0';
17     }
18     r = (r != EOF && !isspace(r)) ? 1 : 0;
19     return r;
20 }

```
- ```

$ time ./tload g
Load file 'g'
Load 2999480 edges
real 0m0.638s
user 0m0.545s
sys 0m0.071s

```
- ```

$ time ./tload g
Load file 'g'
Load 2999480 edges
real 0m0.226s
user 0m0.131s
sys 0m0.078s

```
- Předpokládáme, že načítané číslo (počet cifer) se vejde do typu int.*

Jan Faigl, 2025 BOB36PRP – Prednáška 10: Stromy 49 / 51

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Stromy – nelineární spojivé struktury
- Binární vyhledávací strom
- Vyhledání prvku a průchod stromem (rekurzí)
- Rekurzivní uvolnění paměti alokované stromem
- Test splnění vlastností binárního vyhledávacího stromu
- Hloubka stromu a výpis stromu po úrovních
- Příklad jednoduchého binárního vyhledávacího stromu s položkami typu `int`
`lec10/tree`
- Plný binární strom a jeho reprezentace
- Makefile
- Příklad načtení stromu jako seznamu hran
`lec10/graph_load`
- **Příště: Prioritní fronta – polem a haldou. Příklad využití prioritní fronty (haldy) v úloze hledání nejkratší cesty v grafu.**