

Abstraktní datový typ

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 09

BAB36PRGA – Programování v C

Část I

Část 1 – Abstraktní datový typ

Přehled témat

■ Část 1 – Abstraktní datový typ

Datové struktury

Zásobník

Fronta

Spojový seznam - zásobník vs. fronta

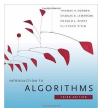
Prioritní fronta

Halda

Zdroje



Introduction to Algorithms, 3rd Edition, Cormen, Leiserson, Rivest, and Stein, The MIT Press, 2009, ISBN 978-0262033848.



Algorithms (4th Edition) Robert Sedgewick and Kevin Wayne Addison-Wesley Professional, 2010, ISBN: 978-0321573513.



<http://algs4.cs.princeton.edu/home>

■ Data Structure & Algorithms Tutorial

http://www.tutorialspoint.com/data_structures_algorithms

■ Algorithms and Data Structures with implementations in Java and C++

<http://www.algolist.net>

■ Algoritmy jednoduše a srozumitelně

Algoritmy + Datové struktury = Programy

<http://algoritmy.eu>

Datové struktury a abstraktní datový typ

- **Datová struktura** (typ) je množina dat a operací s těmito daty.
- **Abstraktní datový typ** formálně definuje data a operace s nimi.
 - Fronta (Queue)
 - Zásobník (Stack)
 - Pole (Array)
 - Tabulka (Table)
 - Seznam (List)
 - Strom (Tree)
 - Množina (Set)

Nezávislé na konkrétní implementaci

Abstraktní datový typ (ADT) – Vlastnosti

- Počet datových položek může být
 - Neměnný – **statický datový typ** – počet položek je konstantní. *Např. pole, řetězec, struktura*
 - Proměnný – **dynamický datový typ** – počet položek se mění v závislosti na provedené operaci. *Např. vložení nebo odebrání určitého prvku*
- Typ položek (dat)
 - **Homogenní** – všechny položky jsou stejného typu.
 - **Nehomogenní** – položky mohou být různého typu.
- Existence bezprostředního následníka.
 - **Lineární** – existuje bezprostřední následník prvku, např. pole, fronta, seznam,
 - **Nelineární** – neexistuje přímý jednoznačný následník, např. strom.

Abstraktní datový typ

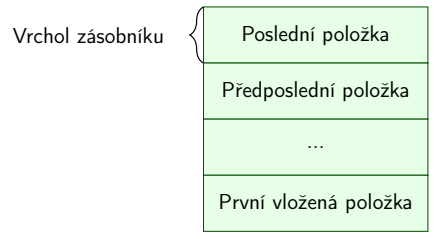
- Množina druhů dat (hodnot) a příslušných operací, které jsou přesně specifikovány a to **nezávisle na konkrétní implementaci**.
- Můžeme definovat
 - Matematicky – signatura a axiomy
 - Rozhraním (interface) a popisem operací, kde rozhraní poskytuje
 - Konstruktor vracějící odkaz (na strukturu nebo objekt). *Procedurální i objektově orientovaný přístup.*
 - Operace, které akceptují odkaz na argument (data) a mají přesně definovaný účinek na data.

Příklad ADT – Zásobník

Zásobník je **dynamická datová struktura** umožňující vkládání a odebírání hodnot tak, že naposledy vložená hodnota se odebere jako první. **LIFO – Last In, First Out**

Základní operace:

- Vložení hodnoty na vrchol zásobníku;
- Odebrání hodnoty z vrcholu zásobníku;
- Test na prázdnot zásobníku.



Příklad ADT – Operace nad zásobníkem

Základní operace nad zásobníkem jsou

- **push()** – vložení prvku na vrchol zásobníku;
- **pop()** – vyjmutí prvku z vrcholu zásobníku;
- **isEmpty()** – test na prázdnotu zásobníku.

Další operace nad zásobníkem mohou být

- **peek()** – čtení hodnoty z vrcholu zásobníku;
- **search()** – vrátí pozici prvku v zásobníku;
- **size()** – vrátí aktuální počet prvků (hodnot) v zásobníku.

Alternativně také třeba top().

Pokud se nachází v zásobníku, jinak -1.

Zpravidla není potřeba.

Příklad ADT – Rozhraní zásobníku 2/2

- Součástí definice rozhraní ADT je také popis chování operací.

```

1 /*
2  * Function: stack_push
3  * -----
4  * This routine push the given value onto the top of the stack.
5  *
6  * value - value to be placed on the stack
7  * stack - stack to push
8  *
9  * returns: The function returns status value:
10 *
11 * OK - success
12 * CLIB_MEMFAIL - dynamic memory allocation failure
13 *
14 * This function requires the following include files:
15 *
16 * prg_stack.h prg_errors.h
17 */
18 int stack_push(void *value, void **stack);
    
```

Příklad ADT – Rozhraní zásobníku 1/2

- Zásobník můžeme definovat rozhraním (funkcemi), bez konkrétní implementace.

```

1 int stack_push(void *value, void **stack);
2 void* stack_pop(void **stack);
3 _Bool stack_is_empty(void **stack);
4 void* stack_peek(void **stack);

5 void stack_init(void **stack); // init. dat. reprezent.
6 void stack_delete(void **stack); // kompletní smazání
7 void stack_free(void **stack); // uvolnění paměti
    
```

- V tomto případě používáme obecný zápis s ukazatelem typu **void**.
- Je plně v režii programátora (uživatele) implementace, aby zajistil správné chování programu.
 - Alokaci proměnných a položek vkládaných do zásobníku.
 - A také následně uvolnění paměti.
- Do zásobníku můžeme dávat rozdílné typy, musíme však zajistit jejich správnou interpretaci.

Implementace zásobníku

- **ADT není závislý naa konkrétní implementaci** – zásobník můžeme implementovat různě.
 - Polem fixní velikosti (definujeme chování při zaplnění);
 - Polem s měnitelnou velikostí (realokace);
 - Spojovým seznamem.
- Ukážeme si tři různé implementace, každá se shodným rozhraním a jménem typu **stack_t**, ale definované v samostatných modulech.
 - `lec09/stack_array.h`, `lec09/stack_array.c`
 - `lec09/stack_array_alloc.h`, `lec09/stack_array_alloc.c`
 - `lec09/stack_linked_list.h`, `lec09/stack_linked_list.c`
- Ukázkové implementace také slouží jako příklady, jak zacházet s dynamickou pamětí a jak se vyhnout tzv. únikům paměti (**memory leaks**).

Implementace zásobníku polem 1/3

- Struktura zásobníku se skládá z dynamicky alokovaného pole hodnot ukazatelů odkazující na jednotlivé prvky uložené do zásobníku.

```
1 typedef struct {
2     void **stack; // array of void pointers
3     int count;
4 } stack_t;
```

- Pro inicializaci a uvolnění paměti implementujeme pomocné funkce.

```
6 void stack_init(stack_t **stack);
7 void stack_delete(stack_t **stack);
8 void stack_free(stack_t *stack);
```

- Základní operace se zásobníkem mají tvar

```
10 int stack_push(void *value, stack_t *stack);
11 void* stack_pop(stack_t *stack);
12 _Bool stack_is_empty(const stack_t *stack);
13 void* stack_peek(const stack_t *stack);
```

- a jsou pro všechny tři implementace totožné.

lec09/stack_array.h

Implementace zásobníku polem 3/3

```
28 int stack_push(void *value, stack_t *stack)
29 {
30     int ret = STACK_OK;
31     if (stack->count < MAX_STACK_SIZE) {
32         stack->stack[stack->count++] = value;
33     } else {
34         ret = STACK_MEMFAIL;
35     }
36     return ret;
37 }
38 void* stack_pop(stack_t *stack)
39 {
40     return stack->count > 0 ? stack->stack[--(stack->count)]: NULL;
41 }
42 void* stack_peek(const stack_t *stack)
43 {
44     return stack_is_empty(stack) ? NULL : stack->stack[stack->count - 1];
45 }
46 _Bool stack_is_empty(const stack_t *stack)
47 {
48     return stack->count == 0;
49 }
```

Proč v metodě pop() používáme $--(stack \rightarrow count)$ a v peek() $count - 1$?

Implementace zásobníku polem 2/3

- Maximální velikost zásobníku je definována hodnotou makra `MAX_STACK_SIZE`.

Lze předdefinovat při překladu, např. `clang -DMAX_STACK_SIZE=100`.

```
1 #ifndef MAX_STACK_SIZE
2 #define MAX_STACK_SIZE 5
3 #endif
4 void stack_init(stack_t **stack)
5 {
6     *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
7     (*stack)->stack = myMalloc(sizeof(
8         void*)*MAX_STACK_SIZE);
9     (*stack)->count = 0;
10 }
11 #include <stdlib.h>
12 void* myMalloc(size_t size)
13 {
14     void *ret = malloc(size);
15     if (!ret) {
16         fprintf(stderr, "Malloc failed!\n");
17         exit(-1);
18     }
19     return ret;
20 }
```

lec09/my_malloc.c

- `stack_free()` uvolní paměť vložených položek v zásobníku.

- `stack_delete()` kompletně uvolní paměť alokovanou zásobníkem.

```
21 void stack_free(stack_t *stack)
22 {
23     while (!stack_is_empty(stack)) {
24         void *value = stack_pop(stack);
25         free(value);
26     }
27 }
28 void stack_delete(stack_t **stack)
29 {
30     stack_free(*stack);
31     free((*stack)->stack);
32     free(*stack);
33     *stack = NULL;
34 }
```

lec09/stack_array.c

Zásobník – Příklad použití 1/3

- Položky (hodnoty typu `int`) alokujeme dynamicky.

```
1 int* getRandomInt()
2 {
3     int *r = myMalloc(sizeof(int)); // dynamicky alokovaný int
4     *r = rand() % 256;
5     return r;
6 }
7 stack_t *stack;
8 stack_init(&stack);
9 for (int i = 0; i < 15; ++i) {
10     int *pv = getRandomInt();
11     int r = stack_push(pv, stack);
12     printf("Add %2i entry '%3i' to the stack r = %i\n", i, *pv, r);
13     if (r != STACK_OK) {
14         fprintf(stderr, "Error: Stack is full!\n");
15         fprintf(stderr, "Info: Release pv memory and quit pushing\n");
16         free(pv); // Nutné uvolnit alokovanou paměť
17         break;
18     }
19 }
20 }
```

lec09/demo-stack_array.c

- V případě zaplnění zásobníku **nezapomenout uvolnit paměť**.

Zásobník – Příklad použití 2/3

- Po vyjmutí položky a jejím zpracování je nutné uvolnit paměť.

```
22 printf("\nPop the entries from the stack\n");
23 while (!stack_is_empty(stack)) {
24     int *pv = (int*)stack_pop(stack);
25     printf("Popped value is %3i\n", *pv);
26     free(pv);
27 }
28 stack_delete(&stack);
```

lec09/demo-stack_array.c

- Na závěr uvolníme paměť zásobníku funkcí `stack_delete()`.
- Při výchozí kompilaci má zásobník dle `MAX_STACK_SIZE` kapacitu 3.

```
$ clang stack_array.c demo-stack_array.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry ' 83' to the stack r = 1
Error: Stack is full!
Info: Release pv memory and quit pushing
Pop the entries from the stack
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77
```

Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 1/3

- V případě naplnění pole vytvoříme nové o „něco“ větší pole, zvětšení je definované hodnotou makra `STACK_RESIZE`.
- Počáteční velikost je definována makrem `INIT_STACK_SIZE`.

```
#ifndef INIT_STACK_SIZE           #ifndef STACK_RESIZE
#define INIT_STACK_SIZE 3         #define STACK_RESIZE 3
#endif                             #endif
void stack_init(stack_t **stack)
{
    *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
    (*stack)->stack = myMalloc(sizeof(void*)*INIT_STACK_SIZE);
    (*stack)->count = 0;
    (*stack)->size = INIT_STACK_SIZE;
}
```

- Dále pak funkcí `push()`, kterou modifikujeme o realokaci pole `stack->stack`.

Zásobník – Příklad použití 3/3

- Při kompilaci můžeme specifikovat hodnotu makra `MAX_STACK_SIZE`.

```
$ clang -DMAX_STACK_SIZE=5 stack_array.c demo-stack_array.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry ' 83' to the stack r = 0
Add 4 entry '  4' to the stack r = 0
Add 5 entry '143' to the stack r = 1
Error: Stack is full!
Info: Release pv memory and quit pushing
Pop the entries from the stack
Popped value is 4
Popped value is 83
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77
```

lec09/stack_array.h
lec09/stack_array.c
lec09/demo-stack_array.c

- Vyzkoušejte si zakomentovat různá volání `free()` a sledovat chování programu – nástrojem `valgrind`!

Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 2/3

- Volání `realloc()` rozšíří alokovanou paměť nebo alokuje novou a obsah původní paměti překopíruje a následně paměť uvolní, nebo alokace selže a `realloc()` vrací `NULL`.

```
1 int stack_push(void *value, stack_t *stack)
2 {
3     int ret = STACK_OK;
4     if (stack->count == stack->size) { // try to realloc
5         void **tmp = (void**)realloc(
6             stack->stack,
7             sizeof(void*) * (stack->size + STACK_RESIZE)
8         );
9         if (tmp) { // realloc has been successful, stack->stack has been eventually freed
10            stack->stack = tmp; //
11            stack->size += STACK_RESIZE;
12        }
13    }
14    if (stack->count < stack->size) {
15        stack->stack[stack->count++] = value;
16    } else {
17        ret = STACK_MEMFAIL;
18    }
19    return ret;
20 }
```

Viz man realloc
lec09/stack_array-alloc.c

Implementace zásobníku rozšiřitelným polem 3/3

- Použití `stack_array-alloc` je identické jako `stack_array`.
- Soubor `demo-stack_array-alloc.c` pouze vkládá `stack_array-alloc.h` místo `stack_array.h`.

```
$ clang stack_array-alloc.c demo-stack_array-alloc.c && ./a.out
Add 0 entry '77' to the stack r = 0
Add 1 entry '225' to the stack r = 0
Add 2 entry '178' to the stack r = 0
Add 3 entry '83' to the stack r = 0
Add 4 entry '4' to the stack r = 0
Pop the entries from the stack
Popped value is 4
Popped value is 83
Popped value is 178
Popped value is 225
Popped value is 77
```

lec09/stack_array-alloc.h
lec09/stack_array-alloc.c
lec09/demo-stack_array-alloc.c

Implementace zásobníku spojovým seznamem 2/3

- Při vkládání prvku `push()` alokujeme položku spojového seznamu.

```
7 int stack_push(void *value, stack_t *stack)
8 {
9     int ret = STACK_OK;
10    stack_entry_t *new_entry = malloc(sizeof(stack_entry_t));
11    if (new_entry) {
12        new_entry->value = value;
13        new_entry->next = stack->head;
14        stack->head = new_entry;
15    } else {
16        ret = STACK_MEMFAIL;
17    }
18    return ret;
19 }

21 void* stack_pop(stack_t *stack)
22 {
23     void *ret = NULL;
24     if (stack->head) {
25         ret = stack->head->value; //retrive the value
26         stack_entry_t *tmp = stack->head;
27         stack->head = stack->head->next;
28         free(tmp); // release stack_entry_t
29     }
30     return ret;
31 }
```

lec09/stack_linked_list.c

Implementace zásobníku spojovým seznamem 1/3

Viz 8. přednáška.

- Zásobník také můžeme implementovat spojovým seznamem.
- Definujeme strukturu `stack_entry_t` pro položku seznamu.

```
1 typedef struct entry {
2     void *value; //ukazatel na hodnotu vloženého prvku
3     struct entry *next;
4 } stack_entry_t;

5
6 typedef struct {
7     stack_entry_t *head;
8 } stack_t;

9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
```

- Struktura zásobníku `stack_t` obsahuje pouze ukazatel na `head`.
- Inicializace pouze alokuje strukturu `stack_t`.

```
1 void stack_init(stack_t **stack)
2 {
3     *stack = myMalloc(sizeof(stack_t));
4     (*stack)->head = NULL;
5 }
```

Implementace zásobníku spojovým seznamem 3/3

- Implementace `stack_is_empty()` a `stack_peek()` je triviální.

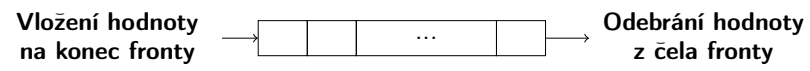
```
33 _Bool stack_is_empty(const stack_t *stack)
34 {
35     return stack->head == 0;
36 }
37
38 void* stack_peek(const stack_t *stack)
39 {
40     return stack_is_empty(stack) ? NULL : stack->head->value;
41 }
```

lec09/stack_linked_list.c

- Použití je identické jako v obou předchozích případech. lec09/demo-stack_linked_list.c
- Výhoda spojového seznamu proti implementaci `stack_array` je v „neomezené“ kapacitě zásobníku. Omezení pouze do výše volné paměti.
- Výhoda spojového seznamu proti `stack_array-alloc` je v automatickém uvolnění paměti při odebrání prvků ze zásobníku.
- Nevýhodou spojového seznamu je větší paměťová režie (položka `next`).

Příklad ADT – Fronta

- **Fronta** je dynamická datová struktura, kde se odebírají prvky v tom pořadí, v jakém byly vloženy.
- Jedná se o strukturu typu **FIFO** (First In, First Out).



- Implementace
 - Pole – *Pamatujeme si pozici začátku a konce fronty v poli.*
 - Pozice cyklicky rotují (modulo velikost pole). Kruhová fronta.
 - Spojovým seznamem — *Pamatujeme si ukazatel na začátek a konec fronty.*
 - Můžeme implementovat tak, že přidáváme na začátek (**head**) a odebíráme z konce. `push()` a `popEnd()` z 8. přednášky
 - Nebo přidáváme na konec a odebíráme ze začátku (**head**). `pushEnd()` a `pop()` z 8. přednášky.
 - Z hlediska vnějšího (ADT) chování fronty na vnitřní implementaci nezáleží.

ADT – Příklad implementace fronty

- Implementace fronty pole a spojovým seznamem.
- Využijeme shodné rozhraní a jméno typu `queue_t` definované v samostatných modulech.
 - `lec09/queue_array.h`, `lec09/queue_array.c`
 - `lec09/queue_linked_list.h`, `lec09/queue_linked_list.c`

Implementace vychází ze zásobníku, liší se zejména ve funkci `pop()` a `peek()` spolu s udržováním prvního a posledního prvku.

```
typedef struct {
    ...
} queue_t;
void queue_delete(queue_t **queue);
void queue_free(queue_t *queue);
void queue_init(queue_t **queue);
int queue_push(void *value, queue_t *queue);
void* queue_pop(queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
void* queue_peek(const queue_t *queue);
```

ADT – Operace nad frontou

- Základní operace nad frontou jsou vlastně identické jako pro zásobník:
 - `push()` – vložení prvku na konec fronty;
 - `pop()` – vyjmutí prvku z čela fronty;
 - `isEmpty()` – test na prázdnost fronty .
- Další operace mohou být
 - `peek()` – čtení hodnoty z čela fronty;
 - `size()` – vrátí aktuální počet prvků ve frontě.
- Hlavní rozdíl je v operacích `pop()` a `peek()`, které vracejí nejdříve vložený prvek do fronty.

Na rozdíl od zásobníku, u kterého je to poslední vložený prvek.

Příklad implementace fronty polem 1/2

- Téměř identická implementace s implementací `stack_array`.
- Zásadní změna ve funkci `queue_push()`.

```
int queue_push(void *value, queue_t *queue)
{
    int ret = QUEUE_OK;
    if (queue->count < MAX_QUEUE_SIZE) {
        queue->queue[queue->end] = value;
        queue->end = (queue->end + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
        queue->count += 1;
    } else {
        ret = QUEUE_MEMFAIL;
    }
    return ret;
}
```

Ukládáme na konec (proměnná `end`), která odkazuje na další volné místo (pokud `count < MAX_QUEUE_SIZE`). *end vždy v rozsahu $0 \leq end < MAX_QUEUE_SIZE$.*

- Dále implementujeme `queue_pop()` a `queue_peek()`. `lec09/queue_array.c`

Příklad implementace fronty polem 2/2

- Funkce `queue_pop()` vrací hodnotu na pozici `start` tak jako metoda `queue_peek()`.

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
    void* ret = NULL;
    if (queue->count > 0) {
        ret = queue->queue[queue->start];
        queue->start = (queue->start + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
        queue->count -= 1;
    }
    return ret;
}

void* queue_peek(const queue_t *queue)
{
    return queue_is_empty(queue)
        ? NULL : queue->queue[queue->start];
}

```

lec09/queue_array.c

- Příklad použití viz `lec09/demo-queue_array.c`.

Implementace fronty spojovým seznamem 2/3

- `push()` vkládá prvky na konec seznamu `end`.

```
8 int queue_push(void *value, queue_t *queue)
9 {
10     int ret = QUEUE_OK;
11     queue_entry_t *new_entry = malloc(sizeof(queue_entry_t));
12     if (new_entry) { // fill the new_entry
13         new_entry->value = value;
14         new_entry->next = NULL;
15         if (queue->end) { // if queue has end
16             queue->end->next = new_entry; // link new_entry
17         } else { // queue is empty
18             queue->head = new_entry; // update head as well
19         }
20         queue->end = new_entry; // set new_entry as end
21     } else {
22         ret = QUEUE_MEMFAIL;
23     }
24     return ret;
25 }

```

lec09/queue_linked_list.c

Příklad implementace fronty spojovým seznamem 1/3

- Spojový seznam s udržováním začátku `head` a konce `end` seznamu. Viz `lec08/linked_list.c`

- Strategie vkládání a odebírání prvků.
 - Vložení prvku do fronty `queue_push()` dáme prvek na konec seznamu `end`.
Aktualizujeme pouze `end→next` s konstantní složitostí $O(1)$.
 - Odebrání prvku z fronty `queue_pop()` vezmeme prvek z počátku seznamu `head`.
Aktualizujeme pouze `head→next` opět s konstantní složitostí $O(1)$.
 - Nemusíme lineárně procházet seznam a aktualizovat `end` při odebrání prvku z fronty.

```
1 typedef struct entry {
2     void *value;
3     struct entry *next;
4 } queue_entry_t;
5 typedef struct {
6     queue_entry_t *head;
7     queue_entry_t *end;
8 } queue_t;
9
10 void queue_init(queue_t **queue)
11 {
12     *queue = myMalloc(sizeof(queue_t));
13     (*queue)->head = NULL;
14     (*queue)->end = NULL;
15 }

```

lec09/queue_linked_list.h
lec09/queue_linked_list.c

Implementace fronty spojovým seznamem 3/3

- `pop()` odebírá prvky ze začátku seznamu `head`.

```
27 void* queue_pop(queue_t *queue)
28 {
29     void *ret = NULL;
30     if (queue->head) { // having at least one entry
31         ret = queue->head->value; //retrive the value
32         queue_entry_t *tmp = queue->head;
33         queue->head = queue->head->next;
34         free(tmp); // release queue_entry_t
35         if (queue->head == NULL) { // update end if last
36             queue->end = NULL; // entry has been
37         } // popped
38     }
39     return ret;
40 }

```

- Implementace `isEmpty()` a `peek()` je přímočará.

```
42 _Bool queue_is_empty(const queue_t *queue) {
43     return queue->head == 0;
44 }
45 void* queue_peek(const queue_t *queue) {
46     return queue_is_empty(queue) ? NULL : queue->head->value;
47 }

```

lec09/queue_linked_list.c

ADT – Fronta spojovým seznamem – příklad použití

```

1 for (int i = 0; i < 3; ++i) {
2     int *pv = getRandomInt();
3     int r = queue_push(pv, queue);
4     printf("Add %2i entry '%3i' to the queue r = %i\n", i, *pv, r);
5     if (r != QUEUE_OK) { free(pv); break; } // release allocated pv
6 }
7 printf("\nPop the entries from the queue\n");
8 while (!queue_is_empty(queue)) {
9     int *pv = (int*)queue_pop(queue);
10    printf("Popped value is %3i\n", *pv);
11    free(pv);
12 }
13 queue_delete(&queue);
    
```

■ Příklad výstupu

```

clang queue_linked_list.c demo-queue_linked_list.c && ./a.out
Add 0 entry ' 77' to the queue r = 0
Add 1 entry '225' to the queue r = 0
Add 2 entry '178' to the queue r = 0
Pop the entries from the queue
    
```

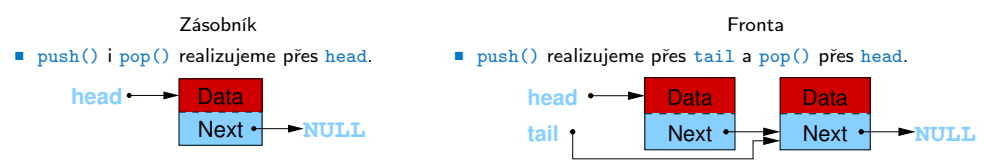
Prioritní fronta

- Fronta
 - První vložený prvek je první odebraný prvek.
- Prioritní fronta
 - Některé prvky jsou při vyjmutí z fronty preferovány.
 - Některé vložené objekty je potřeba obsloužit naléhavěji, např. fronta pacientů u lékaře.*
 - Operace **pop()** odebírá z fronty prvek s nejvyšší prioritou.
 - Vrchol fronty je prvek s nejvyšší prioritou.*
 - Alternativně též prvek s nejnižší hodnotou.*
- Rozhraní prioritní fronty může být identické jako u běžné fronty, avšak specifikace upřesňuje chování dílčích metod.

FIFO

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 snadné pro první prvek (**head**).



- **push()** i **pop()** realizujeme přes **head**.
- **push()** realizujeme přes **tail** a **pop()** přes **head**.

Prioritní fronta – specifikace rozhraní

- Prioritní frontu můžeme implementovat různě složitě a také s různými výpočetními nároky, např.
 - Polem nebo spojovým seznamem s modifikací funkcí **push()** nebo **pop()** a **peek()**.
 - Například tak, že ve funkci **pop()** a **peek()** projdeme všechny dosud vložené prvky a najdeme prvek nejprioritnější.
 - S využitím pokročilé datové struktury pro efektivní vyhledání prioritního prvku (halda).
- Prioritní prvek může být ten s nejmenší hodnotou.
 - Metody **pop()** a **peek()** vrací nejmenší prvek dosud vložený do fronty.
 - Hodnoty prvků potřebujeme porovnávat, proto potřebujeme funkci pro porovnávání prvků.
 - Obecně můžeme realizovat například ukazatelem na funkci.*

Prioritní fronta spojovým seznamem nebo polem a výpočetní náročnost

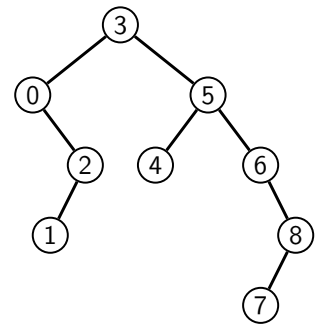
- V naivní implementaci prioritní fronty můžeme zohlednění priority „odložit“ až do doby, kdy potřebujeme odebrat prvek z fronty. *Použijeme „lazy“ (odložený) výpočet.*
- Při odebrání (nebo vrácení) nejmenšího prvku v nejnepříznivějším případě musíme projít všechny položky.
- To může být **výpočetně náročné** a raději bychom chtěli „udržovat“ prvek připravený.
 - Můžeme to například udělat zavedením položky **head**, ve které bude aktuálně nejvyšší (nejvyšší) vložený prvek do fronty.
 - Prvek **head** aktualizujeme v metodě **push()** porovnáním hodnoty aktuálně vkládaného prvku.
 - Tím zefektivníme operaci **peek()**.
 - V případě odebrání prvku, však musíme frontu znovu projít a najít nový prvek.

Nebo můžeme použít sofistikovanější datovou strukturu, která nám umožní efektivně udržovat hodnotu nejmenšího prvku a to jak při operaci vložení **push()** tak při operaci vyjmutí **pop()** prvku z prioritní fronty.

Binární vyhledávací strom vs halda

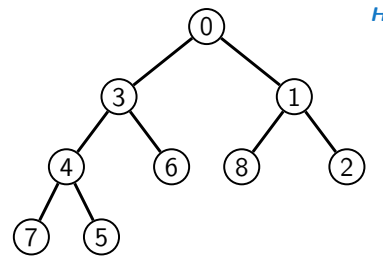
Binární vyhledávací strom

- Může obsahovat prázdná místa.
- Hloubka stromu se může měnit. *Zajistit vyvážený strom je implementačně náročnější než implementace haldy.*



Halda

- Binární plný strom *Hloubka stromu vždy $\lfloor \log_2(n) \rfloor$.*
- Kořen stromu je vždy prvek s nejnižší (nejvyšší) hodnotou.
- Každý podstrom splňuje vlastnost haldy. *Heap property*



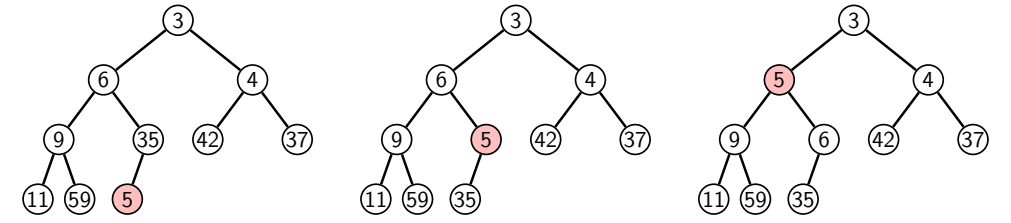
Halda

- Halda je dynamická datová struktura, která má „tvar“ binárního stromu a uspořádání prioritní fronty.
- Každý prvek haldy obsahuje hodnotu a dva potomky, podobně jako binární strom.
- **Vlastnosti haldy** – „Heap property“.
 - **Hodnota každého prvku je menší než hodnota libovolného potomka.**
 - Každá úroveň binárního stromu haldy je plná, kromě poslední úrovně, která je zaplněna zleva doprava. **Binární plný strom**
 - Prvky mohou být odebrány pouze přes kořenové uzel.
- **Vlastnost haldy zajišťuje, že kořen je vždy prvek s nejnižším/nejvyšším ohodnocením.**

V případě binárního plného stromu je složitost procházení úměrná hloubce stromu, která je pro n prvků úměrná $\log_2(n)$. Složitost operací **push()**, **pop()**, **peek()** tak můžeme očekávat nikoliv $O(n)$ (jako v případě předchozí implementace prioritní fronty polem a spojovým seznamem), ale $O(\log n)$ a pro **peek()** dokonce $O(1)$.

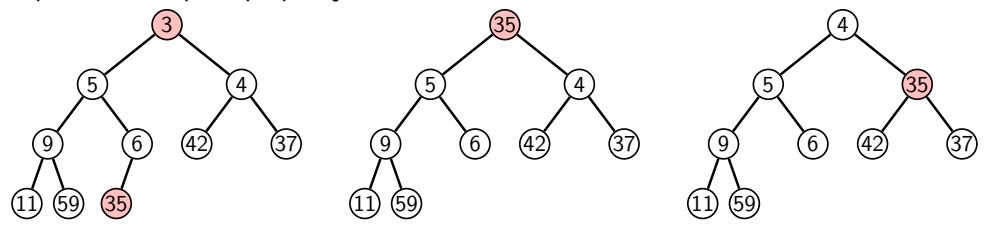
Halda – přidání prvku **push()**

1. Po každém provedení operace **push()** musí být splněny vlastnosti haldy.
2. Prvek přidáme na konec haldy, tj. na první volnou pozici (vlevo) na nejnižší úrovni haldy.
3. Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s nadřazeným prvkem (předkem). *V nejnepříznivějším případě prvek „probublá“ až do kořene stromu.*



Halda – odebrání prvku pop()

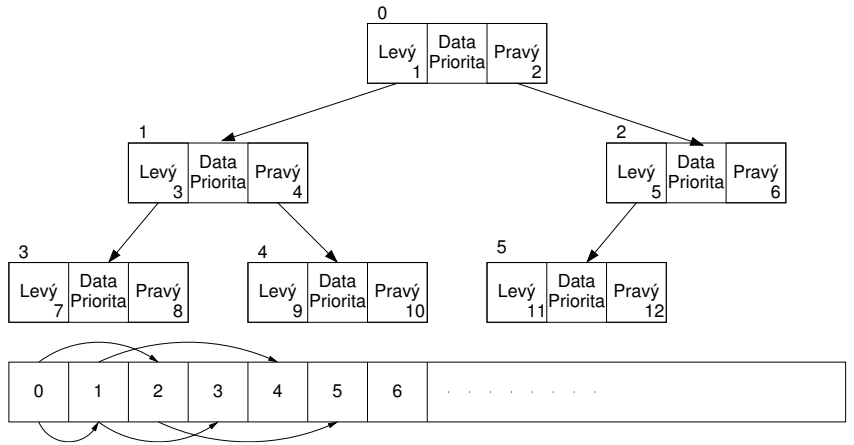
- Při operaci **pop()** odebereme kořen stromu.
- Prázdné místo nahradíme nejpravějším listem.
- Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s potomkem a postup opakujeme. *V nejneprůzračnějším případě prvek „probublá“ až do listu stromu.*



- Jak zjistit nejpravější list?
 - V případě implementace spojovou strukturou (nelineární) můžeme explicitně udržovat odkaz.
 - **Binární plný strom můžeme efektivně reprezentovat polem** – pak nejpravější list je poslední prvek v poli.

Reprezentace binárního stromu polem

- Binární plný strom můžeme reprezentovat lineární strukturou.
- V případě známého maximální počtu prvků v haldě, pak jednoduše předalokovaným polem.



Prioritní fronta haldou

- Prvky ukládáme do haldy a při každém vložení / odebrání zajišťujeme, aby platily vlastnosti **haldy**.
- Operace **peek()** má konstantní složitost a nezáleží na počtu prvků ve frontě, nejnižší prvek je vždy kořen.

Asymptotická složitost v notaci velké O je O(1).

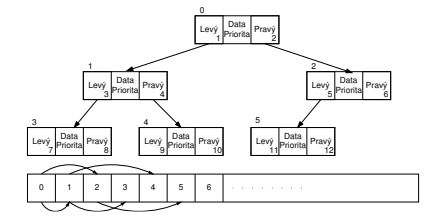
- Operace **push()** a **pop()** udržují vlastnost haldy záměnou prvků až do hloubky stromu. *Pro binární plný strom je hloubka stromu log₂(n), kde n je aktuální počet prvků ve stromu, odtud složitost operace O(log(n)).*

Halda jako binární plný strom reprezentovaný polem

- Pro definovaný maximální počet prvků v haldě si předalokujeme pole o daném počtu prvků.
- Binární **plný strom** má všechny vrcholy na úrovni rovné hloubce stromu co nejvíce vlevo.
- Kořen stromu je první prvek s indexem 0, následníky prvku na pozici *i* lze v poli určit jako prvky s indexy:

- levý následník: $i_{levý} = 2i + 1$;
- pravý následník: $i_{pravý} = 2i + 2$.

Podobně lze odvodit vztah pro předchůdce.



- Kořen stromu reprezentuje **nejprioritnější** prvek.

Např. s nejmenší hodnotu nebo maximální prioritou.

Operace vkládání a odebírání prvků

- I v případě reprezentace polem pracují operace vkládání a odebírání identicky.
 - Funkce `push()` přidá prvek jako další prvek v poli a následně propaguje prvek směrem nahoru až je splněna vlastnost haldy.
 - Při odebrání prvku funkcí `pop()` je poslední prvek v poli umístěn na začátek pole (kořen stromu) a propagován směrem dolů až je splněna vlastnost haldy.
- Dochází pouze k vzájemnému zaměňování hodnot na pozicích v poli (haldě).
 - Z indexu prvku v poli vždy můžeme určit jak levého a pravého následníka, tak i předcházející prvek (rodič) v pohledu na haldu jako binární strom.
- Hlavní výhodou reprezentace polem je přístup do předem alokovaného bloku paměti.
 - Všechny prvky můžeme jednoduše projít v jedné smyčce, například při výpisu.
- Ověření zdali implementace operací `push()` a `pop()` zachovává podmínku haldy můžeme realizovat ověřující funkcí `is_heap()`.

Příklad implementace push()

- Prvek přidáme na konec pole a iterativně kontrolujeme, zdali je splněna vlastnost haldy. Pokud ne, prvek zaměníme s předchůdcem.

```

81 #define GET_PARENT(i) ((i-1) >> 1) // parent is (i-1)/2
82 _Bool pq_push(pq_heap_s *pq, int label, int cost)
83 {
84     _Bool ret = false;
85     if (pq && pq->len < pq->size && label >= 0 && label < pq->size) {
86         pq->cost[pq->len] = cost; //add the cost to the next free slot
87         pq->label[pq->len] = label; //add label of new entry
88         int cur = pq->len; // index of the entry added to the heap
89         int parent = GET_PARENT(cur);
90         while (cur >= 1 && pq->cost[parent] > pq->cost[cur]) {
91             pq_swap(pq, parent, cur); // swap parent<->cur
92             cur = parent;
93             parent = GET_PARENT(cur);
94         }
95         pq->len += 1;
96         ret = true;
97     }
98     // assert(pq_is_heap(pq, 0)); // testing the implementation
99     return ret;
100 }
101

```

Příklad implementace pq_is_heap()

- Pro každý prvek haldy musí platit, že jeho hodnota je menší než levý i pravý následník.

```

18 typedef struct {
19     int size; // the maximal number of entries
20     int len; // the current number of entries
21     int *cost; // array with costs - lowest cost is highest priority
22     int *label; // array with labels (each label has cost/priority)
23 } pq_heap_s;
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000
1001
1002
1003
1004
1005
1006
1007
1008
1009
1010
1011
1012
1013
1014
1015
1016
1017
1018
1019
1020
1021
1022
1023
1024
1025
1026
1027
1028
1029
1030
1031
1032
1033
1034
1035
1036
1037
1038
1039
1040
1041
1042
1043
1044
1045
1046
1047
1048
1049
1050
1051
1052
1053
1054
1055
1056
1057
1058
1059
1060
1061
1062
1063
1064
1065
1066
1067
1068
1069
1070
1071
1072
1073
1074
1075
1076
1077
1078
1079
1080
1081
1082
1083
1084
1085
1086
1087
1088
1089
1090
1091
1092
1093
1094
1095
1096
1097
1098
1099
1100
1101
1102
1103
1104
1105
1106
1107
1108
1109
1110
1111
1112
1113
1114
1115
1116
1117
1118
1119
1120
1121
1122
1123
1124
1125
1126
1127
1128
1129
1130
1131
1132
1133
1134
1135
1136
1137
1138
1139
1140
1141
1142
1143
1144
1145
1146
1147
1148
1149
1150
1151
1152
1153
1154
1155
1156
1157
1158
1159
1160
1161
1162
1163
1164
1165
1166
1167
1168
1169
1170
1171
1172
1173
1174
1175
1176
1177
1178
1179
1180
1181
1182
1183
1184
1185
1186
1187
1188
1189
1190
1191
1192
1193
1194
1195
1196
1197
1198
1199
1200
1201
1202
1203
1204
1205
1206
1207
1208
1209
1210
1211
1212
1213
1214
1215
1216
1217
1218
1219
1220
1221
1222
1223
1224
1225
1226
1227
1228
1229
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236
1237
1238
1239
1240
1241
1242
1243
1244
1245
1246
1247
1248
1249
1250
1251
1252
1253
1254
1255
1256
1257
1258
1259
1260
1261
1262
1263
1264
1265
1266
1267
1268
1269
1270
1271
1272
1273
1274
1275
1276
1277
1278
1279
1280
1281
1282
1283
1284
1285
1286
1287
1288
1289
1290
1291
1292
1293
1294
1295
1296
1297
1298
1299
1300
1301
1302
1303
1304
1305
1306
1307
1308
1309
1310
1311
1312
1313
1314
1315
1316
1317
1318
1319
1320
1321
1322
1323
1324
1325
1326
1327
1328
1329
1330
1331
1332
1333
1334
1335
1336
1337
1338
1339
1340
1341
1342
1343
1344
1345
1346
1347
1348
1349
1350
1351
1352
1353
1354
1355
1356
1357
1358
1359
1360
1361
1362
1363
1364
1365
1366
1367
1368
1369
1370
1371
1372
1373
1374
1375
1376
1377
1378
1379
1380
1381
1382
1383
1384
1385
1386
1387
1388
1389
1390
1391
1392
1393
1394
1395
1396
1397
1398
1399
1400
1401
1402
1403
1404
1405
1406
1407
1408
1409
1410
1411
1412
1413
1414
1415
1416
1417
1418
1419
1420
1421
1422
1423
1424
1425
1426
1427
1428
1429
1430
1431
1432
1433
1434
1435
1436
1437
1438
1439
1440
1441
1442
1443
1444
1445
1446
1447
1448
1449
1450
1451
1452
1453
1454
1455
1456
1457
1458
1459
1460
1461
1462
1463
1464
1465
1466
1467
1468
1469
1470
1471
1472
1473
1474
1475
1476
1477
1478
1479
1480
1481
1482
1483
1484
1485
1486
1487
1488
1489
1490
1491
1492
1493
1494
1495
1496
1497
1498
1499
1500
1501
1502
1503
1504
1505
1506
1507
1508
1509
1510
1511
1512
1513
1514
1515
1516
1517
1518
1519
1520
1521
1522
1523
1524
1525
1526
1527
1528
1529
1530
1531
1532
1533
1534
1535
1536
1537
1538
1539
1540
1541
1542
1543
1544
1545
1546
1547
1548
1549
1550
1551
1552
1553
1554
1555
1556
1557
1558
1559
1560
1561
1562
1563
1564
1565
1566
1567
1568
1569
1570
1571
1572
1573
1574
1575
1576
1577
1578
1579
1580
1581
1582
1583
1584
1585
1586
1587
1588
1589
1590
1591
1592
1593
1594
1595
1596
1597
1598
1599
1600
1601
1602
1603
1604
1605
1606
1607
1608
1609
1610
1611
1612
1613
1614
1615
1616
1617
1618
1619
1620
1621
1622
1623
1624
1625
1626
1627
1628
1629
1630
1631
1632
1633
1634
1635
1636
1637
1638
1639
1640
1641
1642
1643
1644
1645
1646
1647
1648
1649
1650
1651
1652
1653
1654
1655
1656
1657
1658
1659
1660
1661
1662
1663
1664
1665
1666
1667
1668
1669
1670
1671
1672
1673
1674
1675
1676
1677
1678
1679
1680
1681
1682
1683
1684
1685
1686
1687
1688
1689
1690
1691
1692
1693
1694
1695
1696
1697
1698
1699
1700
1701
1702
1703
1704
1705
1706
1707
1708
1709
1710
1711
1712
1713
1714
1715
1716
1717
1718
1719
1720
1721
1722
1723
1724
1725
1726
1727
1728
1729
1730
1731
1732
1733
1734
1735
1736
1737
1738
1739
1740
1741
1742
1743
1744
1745
1746
1747
1748
1749
1750
1751
1752
1753
1754
1755
1756
1757
1758
1759
1760
1761
1762
1763
1764
1765
1766
1767
1768
1769
1770
1771
1772
1773
1774
1775
1776
1777
1778
1779
1780
1781
1782
1783
1784
1785
1786
1787
1788
1789
1790
1791
1792
1793
1794
1795
1796
1797
1798
1799
1800
1801
1802
1803
1804
1805
1806
1807
1808
1809
1810
1811
1812
1813
1814
1815
1816
1817
1818
1819
1820
1821
1822
1823
1824
1825
1826
1827
1828
1829
1830
1831
1832
1833
1834
1835
1836
1837
1838
1839
1840
1841
1842
1843
1844
1845
1846
1847
1848
1849
1850
1851
1852
1853
1854
1855
1856
1857
1858
1859
1860
1861
1862
1863
1864
1865
1866
1867
1868
1869
1870
1871
1872
1873
1874
1875
1876
1877
1878
1879
1880
1881
1882
1883
1884
1885
1886
1887
1888
1889
1890
1891
1892
1893
1894
1895
1896
1897
1898
1899
1900
1901
1902
1903
1904
1905
1906
1907
1908
1909
1910
1911
1912
1913
1914
1915
1916
1917
1918
1919
1920
1921
1922
1923
1924
1925
1926
1927
1928
1929
1930
1931
1932
1933
1934
1935
1936
1937
1938
1939
1940
1941
1942
1943
1944
1945
1946
1947
1948
1949
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960
1961
1962
1963
1964
1965
1966
1967
1968
1969
1970
1971
1972
1973
1974
1975
1976
1977
1978
1979
1980
1981
1982
1983
1984
1985
1986
1987
1988
1989
1990
1991
1992
1993
1994
1995
1996
1997
1998
1999
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
2033
2034
2035
2036
2037
2038
2039
2040
2041
2042
2043
2044
2045
2046
2047
2048
2049
2050
2051
2052
2053
2054
2055
2056
2057
2058
2059
2060
2061
2062
2063
2064
2065
2066
2067
2068
2069
2070
2071
2072
2073
2074
2075
2076
2077
2078
2079
2080
2081
2082
2083
2084
2085
2086
2087
2088
2089
2090
2091
2092
2093
2094
2095
2096
2097
2098
2099
2100
2101
2102
2103
2104
2105
2106
2107
2108
2109
2110
2111
2112
2113
2114
2115
2116
2117
2118
2119
2120
2121
2122
2123
2124
2125
2126
2127
2128
2129
2130
2131
2132
2133
2134
2135
2136
2137
2138
2139
2140
2141
2142
2143
2144
2145
2146
2147
2148
2149
2150
2151
2152
2153
2154
2155
2156
2157
2158
2159
2160
2161
2162
2163
2164
2165
2166
2167
2168
2169
2170
2171
2172
2173
2174
2175
2176
2177
2178
2179
2180
2181
2182
2183
2184
2185
2186
2187
2188
2189
2190
2191
2192
2193
2194
2195
2196
2197
2198
2199
2200
2201
2202
2203
2204
2205
2206
2207
2208
2209
2210
2211
2212
2213
2214
2215
2216
2217
2218
2219
2220
2221
2222
2223
2224
2225
2226
2227
2228
2229
2230
2231
2232
2233
2234
2235
2236
2237
2238
2239
2240
2241
2242
2243
2244
2245
2246
2247
2248
2249
2250
2251
2252
2253
2254
2255
2256
2257
2258
2259
2260
2261
2262
2263
2264
2265
2266
2267
2268
2269
2270
2271
2272
2273
2274
2275
2276
2277
2278
2279
2280
2281
2282
2283
2284
2285
2286
2287
2288
2289
2290
2291
2292
2293
2294
2295
2296
2297
2298
2299
2300
2301
2302
2303
2304
2305
2306
2307
2308
2309
2310
2311
2312
2313
2314
2315
2316
2317
2318
2319
2320
2321
2322
2323
2324
2325
2326
2327
2328
2329
2330
2331
2332
2333
2334
2335
2336
2337
2338
2339
2340
2341
2342
2343
2344
2345
2346
2347
2348
2349
2350
2351
2352
2353
2354
2355
2356
2357
2358
2359
2360
2361
2362
2363
2364
2365
2366
2367
2368
2369
2370
2371
2372
2373
2374
2375
2376
2377
2378
2379
2380
2381
2382
2383
2384
2385
2386
2387
2388
2389
2390
2391
2392
2393
2394
2395
2396
2397
2398
2399
2400
2401
240
```

Shrnutí přednášky

Část III Appendix

Diskutovaná témata

- Abstraktní datový typ
- ADT typu zásobník (stack)
- ADT typu fronta (queue)
- Příklady implementací zásobníku a fronty
 - polem
 - rozšířitelným polem
 - a spojovým seznamem
- Příklady rozhraní a implementace ADT s prvky ukazatel a řešení uvolňování paměti
- Prioritní fronta.

Prioritní fronta polem – rozhraní

- V případě implementace prioritní fronty polem můžeme využít jedno pole pro hodnoty a druhé pole pro uložení priority daného prvku.

Implementace vychází z lec09/queue/queue_array.h a lec09/queue/queue_array.c

```
typedef struct {
    void **queue; // Pole ukazatelů na jednotlivé prvky
    int *priorities; // Pole hodnot priorit jednotlivých prvků
    int count; // Uvažujeme pouze MAX_INT prvků, zpravidla 2147483647
    int head;
    int tail;
} queue_t;
```

- Další rozhraní (jména a argumenty funkcí) mohou zůstat identické jako u implementace spojovým seznamem.

```
void queue_init(queue_t **queue);
void queue_delete(queue_t **queue);
void queue_free(queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);

int queue_push(void *value, int priority,
               queue_t *queue);
void* queue_pop(queue_t *queue);
void* queue_peek(const queue_t *queue);
```

Prioritní fronta polem 1/3 – push()

- Funkce `push()` je až na uložení priority identická s verzí bez priorit.

```

46 int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
47 {
48     int ret = QUEUE_OK; // by default we assume push will be OK
49     if (queue->count < MAX_QUEUE_SIZE) {
50         queue->queue[queue->tail] = value;
51         queue->priorities[queue->tail] = priority; // store priority of the new value entry
52         queue->tail = (queue->tail + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
53         queue->count += 1;
54     } else {
55         ret = QUEUE_MEMFAIL;
56     }
57     return ret;
58 }

```

lec09/priority_queue-array/priority_queue-array.c

- Funkce `peek()` a `pop()` potřebují prvek s nejnižší (nejvyšší) prioritou.
 - Nalezení prvku z „čela“ fronty realizujeme funkcí `getEntry()`, kterou následně využijeme jak v `peek()`, tak v `pop()`.

Prioritní fronta polem 2/3 – getEntry()

- Nalezení nejmenšího (největšího) prvku provedeme lineárním prohledáním aktuálních prvků uložených ve frontě (poli).

```

61 static int getEntry(const queue_t *const queue)
62 {
63     int ret = -1; // return -1 if queue is empty.
64     if (queue->count > 0) {
65         for (int cur = queue->head, i = 0; i < queue->count; ++i) {
66             if (
67                 ret == -1 ||
68                 (queue->priorities[ret] > queue->priorities[cur])
69             ) {
70                 ret = cur;
71             }
72             cur = (cur + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
73         }
74     }
75     return ret;
76 }

```

lec09/priority_queue-array/priority_queue-array.c

Prioritní fronta polem 3/3 – peek() a pop()

- Funkce `peek()` využívá lokální (static) funkce `getEntry()`.

```

101 void* queue_peek(const queue_t *queue)
102 {
103     return queue_is_empty(queue) ? NULL : queue->queue[getEntry(queue)];
104 }

```

- Ve funkci `pop()` zaplníme položku vyjmutého prvku prvkem ze startu.

```

77 void* queue_pop(queue_t *queue) Tím zajistíme, že prvky tvoří souvislý blok v rámci kruhové fronty.
78 {
79     void *ret = NULL;
80     int bestEntry = getEntry(queue);
81     if (bestEntry >= 0) { // entry has been found
82         ret = queue->queue[bestEntry];
83         if (bestEntry != queue->head) { //replace the bestEntry by head
84             queue->queue[bestEntry] = queue->queue[queue->head];
85             queue->priorities[bestEntry] = queue->priorities[queue->head];
86         }
87         queue->head = (queue->head + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
88         queue->count -= 1;
89     }
90     return ret;
91 }

```

Prioritní fronta polem – příklad použití

- Použití je identické s implementací spojovým seznamem.

```

$ make && ./demo-priority_queue-array
ccache clang -c priority_queue-array.c -O2 -o priority_queue-array.o
ccache clang priority_queue-array.o demo-priority_queue-array.o -o demo-priority_queue-array
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue
Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th

```

lec09/priority_queue-array/priority_queue-array.h

lec09/priority_queue-array/priority_queue-array.c

lec09/priority_queue-array/demo-priority_queue-array.c

Prioritní fronta – příklad rozhraní

- V implementaci spojového seznamu upravíme funkce `peek()` a `pop()`.

Využijeme přímo kód `lec09/queue/queue_linked_list.h`, `lec09/queue/queue_linked_list.c`.

- Prvek fronty `queue_entry_t` rozšíříme o položku určující prioritu.

```
1 typedef struct entry {
2     void *value;
3     // Nová položka
4     int priority;
5     struct entry *next;
6 } queue_entry_t;
7 typedef struct {
8     queue_entry_t *head;
9     queue_entry_t *end;
10 } queue_t;
```

Alternativně můžeme specifikovat funkce porovnání datových položek.

- Rozhraní funkcí je identické frontě až na specifikaci priority při vložení prvku do fronty.

```
16 void queue_init(queue_t **queue);
17 void queue_delete(queue_t **queue);
18 void queue_free(queue_t *queue);
19 int queue_push(void *value, int priority, queue_t *
20     queue);
21 void* queue_pop(queue_t *queue);
22 _Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
23 void* queue_peek(const queue_t *queue);
```

Prioritní fronta spojovým seznamem 2/4

- `peek()` lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou.

```
38 void* queue_peek(const queue_t *queue)
39 {
40     void *ret = NULL;
41     if (queue && queue->head) {
42         ret = queue->head->value;
43         int lowestPriority = queue->head->priority;
44         queue_entry_t *cur = queue->head->next;
45         while (cur != NULL) {
46             if (lowestPriority > cur->priority) {
47                 lowestPriority = cur->priority;
48                 ret = cur->value;
49             }
50             cur = cur->next;
51         }
52     }
53     return ret;
54 }
```

`lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.c`

Prioritní fronta spojovým seznamem 1/4

- Ve funkci `push()` přidáme pouze nastavení priority.

```
int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
{
```

```
...
if (new_entry) { // fill the new_entry
    new_entry->value = value;
    new_entry->priority = priority;
...
}
```

`lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.c`

Prioritní fronta spojovým seznamem 3/4

- Podobně `pop()` lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou, je však nutné zajistit propojení seznamu po vyjmutí prvku.

```
59 void* queue_pop(queue_t *queue)
60 {
61     void *ret = NULL;
62     if (queue->head) { // having at least one entry
63         queue_entry_t* cur = queue->head->next;
64         queue_entry_t* prev = queue->head;
65         queue_entry_t* best = queue->head;
66         queue_entry_t* bestPrev = NULL;
67         while (cur) {
68             if (cur->priority < best->priority) {
69                 best = cur; // update the entry with
70                 bestPrev = prev; // the lowest priority
71             }
72             prev = cur;
73             cur = cur->next;
74         }
75         ...
76     }
77 }
```

`lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.c`

- Proto si při procházení pamatujeme předchozí prvek `bestPrev`.

Prioritní fronta spojovým seznamem 4/4

- Po nalezení nejmenšího (největšího) prvku a jeho vyjmutí seznamem propojíme.

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
    ...
    while (cur) { ... } // Finding the best entry
    if (bestPrev) { // linked the list after
        bestPrev->next = best->next; // best removal
    } else { // best is the head
        queue->head = queue->head->next;
    }
    ret = best->value; //retrive the value
    if (queue->end == best) { //update the list end
        queue->end = bestPrev;
    }
    free(best); // release queue_entry_t
    if (queue->head == NULL) { // update end if last
        queue->end = NULL; // entry has been
    } // popped
}
return ret;
}
lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.c
```

Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 2/2

- Hodnoty jsou neuspořádané a očekáváme jejich uspořádaný výpis při vyjmutí funkcí `pop()`.

```
17 char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
18 int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
19 ...
20 while (!queue_is_empty(queue)) {
21     // Do not call free(pv);
```

- V tomto případě nevoláme `free()` neboť vložené textové řetězce jsou textovými literály!

Narozdíl od příkladu lec09/demo-queue_linked_list.c!

- Příklad výstupu (v tomto případě preferujeme nižší hodnoty):

```
$ make && ./demo-priority_queue
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue
Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th
lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.h
lec09/priority_queue-linked_list/priority_queue.c
lec09/priority_queue-linked_list/demo-priority_queue.c
```

Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 1/2

- Inicializaci fronty provedeme polem textových řetězců a priorit.

```
14 queue_t *queue;
15 queue_init(&queue);
16 char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
17 int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
18 const int n = sizeof(priorities) / sizeof(int);
19 for (int i = 0; i < n; ++i) {
20     int r = queue_push(values[i], priorities[i], queue);
21     printf("Add %2i entry '%s' with priority '%i' to the queue\n", i, values[i], priorities[i]);
22     if (r != QUEUE_OK) {
23         fprintf(stderr, "Error: Queue is full!\n");
24         break;
25     }
26 }
27 printf("\nPop the entries from the queue\n");
28 while (!queue_is_empty(queue)) {
29     char* pv = (char*)queue_pop(queue);
30     printf("%s\n", pv);
31     // Do not call free(pv); We pushed text literals into the queue.
32 }
33 queue_delete(&queue);
lec09/priority_queue-linked_list/demo-priority_queue.c
```