

Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

B0B36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

- Část 1 – Spojové struktury
 - Spojové struktury
 - Spojový seznam
 - Spojový seznam s odkazem na konec seznamu
 - Vložení/odebrání prvku
 - Kruhový spojový seznam
 - Obousměrný seznam
- Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW08)

Část I

Část 1 – Spojové struktury

Kolekce prvků (položek)

- V programech je velmi běžný požadavek na uchování seznamu (množiny) prvků (proměnných/struktur).
- Základní kolekce je pole. *Definované jménem typu a [], například `double[]`.*
 - Jedná se o kolekci položek (proměnných) stejného typu.
 - + Umožňuje jednoduchý přístup k položkám indexací prvku.
Položky jsou stejného typu (velikosti), kompilátor tak může vytvořit kód, ve kterém se adresa prvku spočítá z indexu a velikosti prvku.
 - Velikost pole je určena při vytvoření pole.
 - Velikost (maximální velikost) musí být známa v době vytváření.
 - Změna velikost není přímo možná.
Nutné nové vytvoření (alokace paměti), voláním `realloc()` může dojít k rozšíření, které závisí na aktuálním stavu paměti.
 - Využití pouze malé části pole (s objemnými prvky) může být plýtváním paměti.
 - V případě řazení pole přesouváme jednotlivé položky pole.
 - Vložení prvku a vyjmutí prvku vyžaduje kopírování (zachování souvislosti dat).
Kopírování objemných prvků lze případně řešit ukládáním ukazatelů.

Seznam – list

- Seznam (proměnných nebo objektů) patří mezi základní datové struktury.
 - Základní **ADT** – Abstract Data Type.
- Seznam zpravidla nabízí sadu základních operací:
 - Vložení prvku (**insert**);
 - Odebrání prvku (**remove**);
 - Vyhledání prvku (**indexOf**);
 - Aktuální počet prvku v seznamu (**size**).
- Implementace seznamu může být založena na poli nebo spojové struktuře.
 - Pole
 - Indexování je velmi rychlé.
 - Vložení prvku na konkrétní pozici může být pomalé. *Nová alokace a kopírování.*
 - Spojové seznamy**
 - Položky seznamu jsou sekvencně propojeny, přímý náhodný přístup není jednoduše možný.
 - Vložení nebo odebrání prvku může být velmi rychlé.

Základní operace se spojovým seznamem

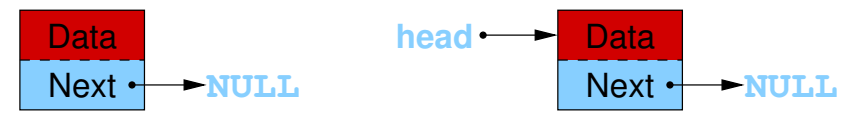
- Vložení prvku:
 - Předchozí prvek odkazuje na nový prvek;
 - Nový prvek může odkazovat na předchozí prvek, který na něj odkazuje. *Tzv. obousměrný spojový seznam.*
- Odebrání prvku:
 - Předchozí prvek aktualizuje hodnotu odkazu na následující prvek;
 - Předchozí prvek nově odkazuje na následující prvek, na který odkazoval odebíraný prvek.
- Základní implementací spojového seznamu je **jednosměrný spojový seznam**.

Spojové seznamy

- Datová struktura realizující seznam dynamické délky.
- Každý prvek seznamu obsahuje:
 - Datovou část (hodnota proměnné / objekt / ukazatel na data);
 - Odkaz (ukazatel) na další prvek v seznamu.

NULL v případě posledního prvku seznamu (zarážka).
- První prvek seznamu se zpravidla označuje jako **head** nebo **start**.

Realizujeme jej jako ukazatel odkazující na první prvek seznamu.



Jednosměrný spojový seznam

- Příklad spojového seznamu pro uložení číselných hodnot.
- Přidání nové hodnoty 50 je přidání nového prvku na konec seznamu.
- Odebrání prvku s hodnotou 79.
 - Nejdříve sekvencně najdeme prvek s hodnotou 79.
 - Následně vyjmeme prvek s hodnotou a propojíme prvek 93 s prvkem 50.

Položku next prvku 93 nastavíme na hodnotu next odebíraného prvku, tj. na následující prvek s hodnotou 50.

Spojový seznam

- Seznam tvoří struktura prvku s dvěma základními položkami:
 - Data prvku (může být ukazatel);
 - Odkaz (ukazatel) na další prvek.
- Seznam je pak:
 - Ukazatel na první prvek `head`;
 - nebo vlastní struktura pro seznam.

Vhodné pro uložení dalších informací, počet prvků, poslední prvek.

- Příklad struktur pro uložení spojového seznamu celých čísel.

```

1 typedef struct entry {           1 typedef struct {
2     int value;                   2     entry_t *head;
3     struct entry *next;          3     entry_t *tail;
4 } entry_t;                       4     int counter; // pocet prvku
                                   5 } linked_list_t;
6 entry_t *head = NULL;

```

- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé číslo.

Obecně mohou obsahovat libovolná data (ukazatel na strukturu).

Přidání prvku – příklad

- Vytvoříme nový prvek (10) seznamu a uložíme odkaz v `head`.

```

head = myMalloc(sizeof(entry_t));
head->value = 10;
head->next = NULL;

```

Kontrola dynamické alokace

```

#include <stdlib.h>

void* myMalloc(size_t size)
{
    void *ret = malloc(size);
    if (!ret) {
        fprintf(stderr, "Malloc
failed!\n");
        exit(-1);
    }
    return ret;
}

```

- Další prvek (13) přidáme propojením s aktuálně 1. prvkem.

```

entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
new_entry->value = 13;
new_entry->next = head;

```

- a aktualizací proměnné `head`.

```
head = new_entry;
```

- Stále máme přístup na všechny prvky přes `head` a `head->next`.
- Inicializace položek prvku je důležitá.**
 - Hodnota `head == NULL` indikuje prázdný seznam.
 - Hodnota `entry->next == NULL` indikuje poslední prvek seznamu.

lec08/my_malloc.h, lec08/my_malloc.c

Spojový seznam – push()

- Přidání prvku na začátek implementujeme ve funkci `push()`.
- Předáváme adresu, kde je uložen odkaz na start seznamu.

head je ukazatel, proto předáváme adresu proměnné, tj. &head a parametr je ukazatel na ukazatel.

```

1 void push(int value, entry_t **head)
2 { // add new entry at front of the list
3     entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
4
5     new_entry->value = value; // set data
6     if (*head == NULL) { // first entry in the list
7         new_entry->next = NULL; // reset the next
8     } else {
9         new_entry->next = *head;
10    }
11    *head = new_entry; //update the head
12 }

```

- Přidání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu.

Konstantní složitost operace push() – O(1).

Spojový seznam – pop()

- Odebrání prvního prvku ze seznamu

Kdy použijeme assert() a kdy myAssert()?

```

1 int pop(entry_t **head)
2 { // linked list must be non-empty
3     assert(head != NULL && *head != NULL);
4     entry_t *prev_head = *head; // save the current head
5     int ret = prev_head->value; // retrieve data from the current head
6     *head = prev_head->next; // set to NULL if the last item is popped
7     free(prev_head); // release memory of the popped entry
8     return ret;
9 }

```

*Alternativně například také jako int pop(entry_t *head), ale nenastaví head na NULL v případě vyjmutí posledního prvku.*

- Odebrání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu.

Konstantní složitost operace pop() – O(1).

Spojový seznam – size()

- Zjištění počtu prvků v seznamu vyžaduje projít seznam až k zarážce `NULL`.
Poslední položka je taková, pro kterou platí `next == NULL`, nebo je seznam prázdný a `head == NULL`.
 - Proměnnou `cur` používáme jako „kurzor“ pro procházení seznamu.
- ```

1 int size(const entry_t *const head)
2 { // const - we do not attempt to modify the list
3 int counter = 0;
4 const entry_t *cur = head;
5 while (cur) { // or cur != NULL
6 cur = cur->next;
7 counter += 1;
8 }
9 return counter;
10 }
```
- Použijeme konstantní ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. Z hlavičky funkce je tak zřejmé, že vstupní strukturu ve funkci nemodifikujeme.*
- Procházení kompletní seznam ( $n$  prvků), abychom spočítali počet prvků seznamu.
- Lineární složitost operace `size()` –  $O(n)$ .*

## Spojový seznam – procházení seznamu

- Procházení seznamu demonstrujeme na funkci `print()`.
- ```

1 void print(const entry_t *const head)
2 {
3     const entry_t *cur = head; // set the cursor to head
4     while (cur != NULL) {
5         printf("%i%s", cur->value, cur->next ? " " : "\n");
6         cur = cur->next; // move in the linked list
7     }
8 }
```
- Použijeme konstantní ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. *Z hlavičky funkce je zřejmé, že vstupní strukturu nemodifikujeme.*
 - Prvky seznamu tiskneme za sebou oddělené mezerou a poslední prvek je zakončen znakem nového řádku.

Spojový seznam – back()

- Vrácení hodnoty posledního prvku ze seznamu – `back()`.
- ```

1 int back(const entry_t *const head)
2 {
3 const entry_t *end = head;
4 while (end && end->next) { // 1st test list is not empty
5 end = end->next;
6 }
7 assert(end); //do not allow calling back on empty list
8 return end->value;
9 }
```
- Kontrolou `assert()` vynucujeme, že při implementaci programu ladíme, že volání `back()` nebudeme provádět pro prázdný seznam. To musíme zajistit programově.*
- Musíme projít všechny prvky seznamu.
- Lineární složitost operace `back()` –  $O(n)$ .*

## Příklad – Spojový seznam celých čísel

```

entry_t *head;
head = NULL; // initialization is important

push(17, &head);
push(7, &head);
printf("List: ");
print(head);
push(5, &head);
printf("\nList size: %i\n", size(head));
printf("Last entry: %i\n\n", back(head));
printf("List: ");
print(head);
push(13, &head);
push(11, &head);
pop(&head);
printf("List:r");
print(head);
printf("\nPop until head is not empty\n");
while (head != NULL) {
 const int value = pop(&head);
 printf("Popped value %i\n", value);
}
printf("List size: %i\n", size(head));
printf("Last entry value %i\n", back(head));
```

```

$ clang -g demo-linked_list-int.c
linked_list.c
$./a.out
List: 7 17
List size: 3
Last entry: 17
List: 5 7 17
List: 13 5 7 17
Clean up using pop until head is not
empty
Popped value 13
Popped value 5
Popped value 7
Popped value 17
List size: 0
lec08/linked_list-int.h
lec08/linked_list-int.c
lec08/demo-linked_list-int.c
```

## Spojový seznam – zrychlení operací `size()` and `back()`

- Operace `size()` a `back()` procházejí kompletní seznam.
- Operaci `size()` můžeme urychlit udržováním aktuálního počtu prvku v seznamu.
  - Zavedeme datovou položku `int counter`.
  - Počet prvků inkrementujeme při každém přidání prvku a dekrementujeme při každém odebrání prvku.
- Operaci `back()` můžeme urychlit proměnou odkazující na poslední prvek.
- Zavedeme strukturu pro vlastní spojový seznam s položkami `head`, `counter`, and `tail`.

```
1 typedef struct {
2 entry_t *head;
3 entry_t *tail;
4 int counter;
5 } linked_list_t;

 V případě přidání prvku na začátek, aktualizujeme tail pouze pokud byl seznam doposud prázdný.
 Proměnnou tail aktualizujeme při přidání prvku na konec nebo vyjmutí posledního prvku.
```

## Spojový seznam – `push()` s odkazem na konec seznamu

```
1 void push(int value, linked_list_t *list)
2 { // add new entry at front
3 assert(list);
4 entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
5 new_entry->value = value; // set data; exit is called if myMalloc fails
6 if (list->head) { // an entry already in the list
7 new_entry->next = list->head;
8 } else { //list is empty
9 new_entry->next = NULL; // reset the next
10 list->tail = new_entry; //1st entry is the tail
11 }
12 list->head = new_entry; //update the head
13 list->counter += 1; // keep counter up to date
14 }
```

*Hodnotu ukazatele `tail` nastavujeme pouze pokud byl seznam prázdný, protože prvky přidáváme na začátek.*

## Spojový seznam – urychlený `size()`

- Samostatná struktura pro seznam.
- Položky `head` a `counter`.
- `head` je ukazatel na `entry_t`.
- Ve funkci `size()` předpokládáme validní odkaz na seznam.
- Proto voláme `assert(list)`.
- Přímá inicializace `linked_list_t linked_list = { NULL, 0 }`;
- Do funkcí `push()` a `pop()` stačí předávat pouze ukazatel, proto použijeme proměnnou `list`

```
linked_list_t *list = &linked_list;
```
- Inkrementujeme a dekrementujeme proměnnou `counter` ve funkcích `push()` a `pop()`.

```
typedef struct {
 entry_t *head;
 int counter;
} linked_list_t;

int size(const linked_list_t *list)
{
 assert(list);
 return list->counter;
}

linked_list_t linked_list = { NULL, 0 };

void push(int data, linked_list_t *list)
{
 ...
 list->counter += 1;
}

int pop(linked_list_t *list)
{
 ...
 list->counter -= 1;
 return ret;
}
```

## Spojový seznam – `pop()` s odkazem na konec seznamu

- Při volání musí být odkaz na spojový seznam platný (nikoliv `NULL`).
- `assert()` testujeme správnost volání, že jsme ve struktuře programu neudělali chybu. Po odladění můžeme test vypustit, např. `NDEBUG`.
- `myAssert()` testuje, že data jsou za běhu programu správně. Pokud ne, ukončíme program a reportujeme.

```
1 int pop(linked_list_t *list)
2 {
3 assert(list);
4 myAssert(list->head, __LINE__, __FILE__); // non-empty list
5 entry_t *prev_head = list->head; // save head
6 list->head = prev_head->next;
7 list->counter -= 1; // keep counter up to date
8 int ret = prev_head->value;
9 free(prev_head); // relase the memory
10 if (list->head == NULL) { // end has been popped
11 list->tail = NULL;
12 }
13 return ret;
14 }
```

*Hodnotu proměnné `tail` nastavujeme pouze pokud byl odebrán poslední prvek, protože prvky odebíráme ze začátku.*

```
myAssert()
1 #ifndef __MY_ASSERT_H__
2 #define __MY_ASSERT_H__
3
4 #include <stdio.h> //fprintf()
5 #include <stdlib.h> //exit() and malloc()
6
7 #define myAssert(x, line, file) \
8 if (!(x)) {\
9 fprintf(stderr, "my_assert fail,\
10 line: %d, file %s\n", line, file);\
11 exit(-1);\
12 }
13 #endif
```

Vypis chyby s číslem řádku a jménem zdrojového souboru pro rychlejší nalezení kontextu a případnou opravu.

## Spojový seznam – back() s odkazem na konec seznamu

- Proměnná `tail` je buď `NULL` nebo odkazuje na poslední prvek seznamu.
 

```

1 int back(const linked_list_t *const list)
2 { // const - we do not modify the linked list
3 // we do not allow to call back on empty list that has to be
 assured programmatically
4 assert(list && list->tail);
5 return list->tail->value;
6 }
```
- Udržováním hodnoty proměnné `tail` (ve funkcích `push()` a `pop()`) jsme snížili časovou náročnost operace `back()` z lineární složitosti na počtu prvků ( $n$ ) v seznamu  $O(n)$  na konstantní složitost  $O(1)$ .

## Spojový seznamu – popEnd()

- Odebrání prvku z konce seznamu.
 

```

1 int popEnd(linked_list_t *list)
2 {
3 assert(list && list->head);
4 entry_t *end = list->tail; // save the end
5 if (list->head == list->tail) { // the last entry is
6 list->head = list->tail = NULL; // removed
7 } else { // there is also penultimate entry
8 entry_t *cur = list->head; // that needs to be
9 while (cur->next != end) { // updated (its next
10 cur = cur->next; // pointer to the next entry
11 }
12 list->tail = cur;
13 list->tail->next = NULL; //the tail does not have next
14 }
15 int ret = tail->value;
16 free(end);
17 list->counter -= 1;
18 return ret;
19 }
```

*Složitost je  $O(n)$ , protože musíme aktualizovat předposlední prvek. Alternativně lze řešit obousměrným spojovým seznamem.*

## Spojový seznamu – pushEnd()

- Přidání prvku na konec seznamu.
 

```

1 void pushEnd(int value, linked_list_t *list)
2 {
3 assert(list);
4 entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
5 new_entry->value = value; // set data
6 new_entry->next = NULL; // set the next
7 if (list->tail == NULL) { //adding the 1st entry
8 list->head = list->tail = new_entry;
9 } else {
10 list->tail->next = new_entry; //update the current tail
11 list->tail = new_entry;
12 }
13 list->counter += 1;
14 }
```
- Na asymptotické složitost metody přidání dalšího prvku (na konec seznamu) se nic nemění, je nezávislé na aktuálním počtu prvků v seznamu.

## Příklad použití

- Příklad použití na seznam hodnot typu `int`.
 

```

1 #include "linked_list.h"
2
3 linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
4 linked_list_t *lst = &list;
5 push(10, lst); push(5, lst); pushEnd(17, lst);
6 push(7, lst); pushEnd(21, lst);
7 print(lst);
8
9 printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(lst));
10 printf("Lst: "); print(lst);
11
12 printf("Back of the list: %i\n", back(lst));
13 printf("Pop from the end: %i\n", popEnd(lst));
14 printf("Lst: "); print(lst);
15
16 free_list(lst); // cleanup!!!
```
- Výstup programu
 

```

$ clang linked_list.c demo-linked_list.c &&
./a.out
7 5 10 17 21
Pop 1st entry: 7
Lst: 5 10 17 21
Back of the list: 21
Pop from the end: 21
Lst: 5 10 17
```

[lec08/linked\\_list.h](#)  
[lec08/linked\\_list.c](#)  
[lec08/demo-linked\\_list.c](#)

## Spojový seznam – Vložení prvku do seznamu

- Vložení do seznamu:
  - na začátek – modifikujeme proměnnou **head** (funkce `push()`);
  - na konec – modifikujeme proměnnou posledního prvku a nastavujeme nový konec **tail** (funkce `pushEnd()`);
  - obecně – potřebujeme prvek (**entry**), za který chceme nový prvek (**new\_entry**) vložit.

```
entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
new_entry->value = value; // nastaveni hodnoty
new_entry->next = entry->next; //propojeni s nasledujicim
entry->next = new_entry; //propojeni entry
```

- Do seznamu můžeme chtít prvek vložit na konkrétní pozici, tj. podle indexu v seznamu.
 

*Případně můžeme také požadovat vložení podle hodnoty prvku, tj. vložit před prvek s příslušnou hodnotou. Např. vložení prvku vždy před první prvek, který je větší vytvoříme uspořádaný seznam – realizujeme tak řazení vkládáním (insert sort).*

## Spojový seznam – getEntry()

- Nalezení prvku na pozici **index**.
- Pokud je **index** větší než počet prvků v poli, návrat posledního prvku.

```
static entry_t* getEntry(int index, const linked_list_t *list)
{ // here, we assume index >= 0
 entry_t *cur = list->head;
 int i = 0;
 while (i < index && cur != NULL && cur->next != NULL) {
 cur = cur->next;
 i += 1;
 }
 return cur; //return entry at the index or the last entry
}
```

*Pokud je seznam prázdný vrátí NULL, tj. list->head == NULL.*

- Funkci `getEntry()` chceme používat privátně pouze v rámci jednoho modulu (`linked_list.c`).
  - Proto ji definujeme s modifikátorem `static`.
- Viz `lec08/linked_list.c`

## Spojový seznam – insertAt()

- Vložení nového prvku na pozici **index** v seznamu.

```
void insertAt(int value, int index, linked_list_t *list)
{
 assert(list); // list != NULL
 if (index < 0) { return; } // only positive position
 if (index == 0) { // handle the 1st position
 push(value, list);
 return;
 }
 entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
 new_entry->value = value; // set data
 entry_t *entry = getEntry(index - 1, list);
 if (entry != NULL) { // entry can be NULL for the 1st
 new_entry->next = entry->next; // entry (empty list)
 entry->next = new_entry;
 }
 if (entry == list->tail) {
 list->tail = new_entry; // update the tail
 }
 list->counter += 1; // Pro napojení spojového seznamu potřebuje položku next, proto hledáme prvek
 // na pozici (index - 1) — getEntry().
}
```

## Příklad vložení prvků do seznamu – insertAt()

- Příklad vložení do seznam čísel

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst);
push(7, lst); push(21, lst);
print(lst);

insertAt(55, 2, lst);
print(lst);

insertAt(0, 0, lst);
print(lst);

insertAt(100, 10, lst);
print(lst);

free_list(lst); // cleanup!!!
```

- Výstup programu

```
$ clang linked_list.c demo-insertat.c
 && ./a.out
21 7 17 5 10
21 7 55 17 5 10
0 7 55 17 5 10
0 7 55 17 5 10 100
```

`lec08/demo-insertat.c`



## Spojový seznam – getAt(int index)

- Nalezení prvků v seznamu podle pozice v seznamu.
- V případě „adresace“ mimo rozsah seznamu vrátí `NULL`.

```
entry_t* getAt(int index, const linked_list_t *const list)
{
 if (index < 0 || list == NULL || list->head == NULL) {
 return NULL; // check the arguments first
 }
 entry_t* cur = list->head;
 int i = 0;
 while (i < index && cur != NULL && cur->next != NULL) {
 cur = cur->next;
 i++;
 }
 return (cur != NULL && i == index) ? cur : NULL;
}
```

*Složitost operace je v nejneprůzračnějším případě  $O(n)$  (v případě pole je to  $O(1)$ ).*

## Spojový seznam – removeAt(int index)

- Odebrání prvku na pozici `int index` a navázání seznamu.
- Pokud `index > size - 1`, smaže poslední prvek, viz `getEntry()`.
- Pro navázání seznamu potřebujeme prvek na pozici `index - 1`.

```
void removeAt(int index, linked_list_t *list)
{ // check the arguments first
 if (index < 0 || list == NULL || list->head == NULL) { return; }
 if (index == 0) {
 pop(list);
 } else {
 entry_t *entry_prev = getEntry(index - 1, list);
 entry_t *entry = entry_prev->next;
 if (entry != NULL) { //handle connection
 entry_prev->next = entry_prev->next->next;
 }
 if (entry == list->tail) {
 list->tail = entry_prev;
 }
 free(entry);
 list->count -= 1;
 }
}
```

*Složitost v nejneprůzračnějším případě  $O(n)$ , protože nejdříve musíme prvek najít.*

## Příklad použití getAt(int index)

- Příklad vypsání obsahu seznamu funkcí `getAt()` v cyklu.
- Výstup programu

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst); push(7,
lst); push(21, lst);
print(lst);
for (int i = 0; i < 7; ++i) {
 const entry_t* entry = getAt(i, lst);
 printf("Lst[%i]: ", i);
 (entry) ? printf("%2u\n", entry->value) : printf(
 "NULL\n");
}

free_list(lst); // cleanup!!!
```

`lec08/demo-getat.c`

*V tomto případě v každém běhu cyklu je složitost funkce `getAt()`  $O(n)$  a výpis obsahu seznamu má složitost  $O(n^2)$ !*

## Příklad použití removeAt(int index)

- Výstup programu

```
void removeAndPrint(int index, linked_list_t *lst)
{
 entry_t* e = getAt(index, lst);
 printf("Remove entry at %i (%i)\n", index,
 e ? e->value : -1);
 removeAt(index, lst);
 print(lst);
}

linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;
push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst); push
(7, lst); push(21, lst);
print(lst);
removeAndPrint(3, lst);
removeAndPrint(3, lst);
removeAndPrint(0, lst);
free_list(lst); // cleanup!!!
```

`lec08/demo-removeat.c`



## Vyhledání prvku v seznamu podle obsahu – `indexOf()`

- Vráť číslo pozice prvního výskytu prvku v seznamu.
- Pokud není prvek v seznamu nalezen vrátí funkce hodnotu `-1`.

```
int indexOf(int value, const linked_list_t *const list)
{
 int counter = 0;
 const entry_t *cur = list->head;
 bool found = false;
 while (cur && !found) {
 found = cur->value == value;
 cur = cur->next;
 counter += 1;
 }
 return found ? counter - 1 : -1;
}
```

## Odebrání prvku ze seznamu podle jeho obsahu – `remove()`

- Podobně jako vyhledání prvku podle obsahu můžeme prvky podle obsahu odebrat.
- Můžeme implementovat přímo nebo s využitím již existujících funkcí `indexOf()` a `removeAt()`.
- Příklad implementace. *Odebíráme všechny výskyt hodnoty `value` v seznamu.*

```
void remove(int value, linked_list_t *list) {
 while ((idx = indexOf(value, list)) >= 0) {
 removeAt(idx, list);
 }
}
```

*To co programátor/ka zpravidla řešení (má řešit), ve smyslu intelektuální náročnosti, není ani tak vlastní implementace, jako spíše návrh, jak se má funkce chovat, např. smazání prvního výskytu prvku vs. všech prvků s danou hodnotou. Implementace je do velké části dovednost („řemeslo“), kreativní činnost je spíše návrh struktury programu, definování chování funkcí a definování jmen proměnných a funkcí (identifikátorů).*

## Příklad použití `indexOf()`

```
linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;

push(10, lst); push(5, lst); push(17, lst);
push(7, lst); push(21, lst);
print(lst);

int values[] = { 5, 17, 3 };
for (int i = 0; i < 3; ++i) {
 printf("Index of (%2i) is %2i\n",
 values[i],
 indexOf(values[i], lst)
);
}

free_list(lst); // cleanup !!!
```

- Výstup programu

```
$ clang linked_list.c demo-indexof.c && ./a.out
out
21 7 17 5 10
Index of (5) is 3
Index of (17) is 2
Index of (3) is -1
```

lec08/demo-indexof.c

## Příklad `indexOf()` pro spojový seznamu textových řetězců

- Porovnání hodnot textových řetězců—`strcmp()` – knihovna `<string.h>`.
- Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců. *Literály vs. proměnné.*
- Příklad použití. *V `lec08/linked_list-str.c` je zvolena **alokace paměti a kopírování hodnot**.*

```
#include "linked_list-str.h"
linked_list_t list = { NULL }; // initialization is important
linked_list_t *lst = &list;
push("FEE", lst); push("CTU", lst); push("PRP", lst);
push("Lecture09", lst); print(lst);

char *values[] = { "PRP", "Fee" };
for (int i = 0; i < 2; ++i) {
 printf("Index of (%s) is %2i\n", values[i], indexOf(values[i], lst));
}

free_list(lst); // cleanup !!!
```

- Výstup programu.

```
$ clang linked_list-str.c demo-indexof-str.c && ./a.out
Lecture09 PRP CTU FEE
Index of (PRP) is 1
Index of (Fee) is -1
```

lec08/demo-indexof-str.c

## Spojový seznam s hodnotami typu textový řetězec

- Zajištění správné alokace a uvolnění paměti je v našem příkladě náročnější.
- V případě volání `pop()` je nutné následně paměť uvolnit.

*V C++ lze řešit například prostřednictvím „smart pointers“.*

```
/* WARNING printf("Popped value \"%s\"", pop(lst)); */
/* Note, using this will cause memory leakage since we lost the address
 value to free the memory!!! */
```

```
char *str = pop(lst);
printf("Popped value \"%s\"", str);
free(str); /* str must be deallocated */
```

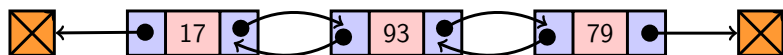
*Při práci s dynamickou pamětí a datovými strukturami je nutné zvolit vhodný model (např. kopírování dat) a zajistit správné uvolnění paměti.*

- Podobně jako textové řetězce se bude chovat ukazatel na nějakou komplexnější strukturu.
- Projděte si příložené příklady, zkuste si naimplementovat vlastní řešení a otestovat správnou alokaci a uvolnění paměti!**

`lec08/linked_list-str.h, lec08/linked_list-str.c, lec08/demo-indexof-str.c`

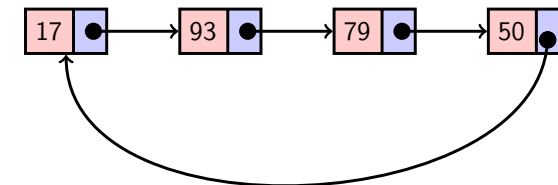
## Obousměrný spojový seznam

- Každý prvek obsahuje odkaz na následující a předchozí položku v seznamu, položky `prev` a `next`.
- První prvek má nastavenou položku `prev` na hodnotu `NULL`.
- Poslední prvek má `next` nastavenou na `NULL`.
- Příklad obousměrného seznamu celých čísel.



## Kruhový spojový seznam

- Položka `next` posledního prvku může odkazovat na první prvek.
- Tak vznikne kruhový spojový seznam.



- Při přidání prvku na začátek je nutné aktualizovat hodnotu `next` posledního prvku.

## Příklad – Obousměrný spojový seznam

- Prvek listu má hodnotu (`value`) a dva odkazy (`prev` a `next`).
- Alokaci prvku provedeme funkcí s inicializací na základní hodnoty.

```
typedef struct dll_entry {
 int value;
 struct dll_entry *prev;
 struct dll_entry *next;
} dll_entry_t;
```

```
typedef struct {
 dll_entry_t *head;
 dll_entry_t *tail;
} doubly_linked_list_t;
```

```
dll_entry_t* allocate_dll_entry(int value)
{
 dll_entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(
 dll_entry_t));

 new_entry->value = value;
 new_entry->next = NULL;
 new_entry->prev = NULL;

 return new_entry;
}
```

`lec08/doubly_linked_list.h, lec08/doubly_linked_list.c`

## Obousměrný spojový seznam – vložení prvku

- Vložení prvku před prvek `cur`:
  1. Napojení vloženého prvku do seznamu, hodnoty `prev` a `next`;
  2. Aktualizace `next` předchozí prvku k prvku `cur`;
  3. Aktualizace `prev` proměnné prvku `cur`.

```
void insert_dll(int value, dll_entry_t *cur)
{
 assert(cur);
 dll_entry_t *new_entry = allocate_dll_entry(value);
 new_entry->next = cur;
 new_entry->prev = cur->prev;
 if (cur->prev != NULL) {
 cur->prev->next = new_entry;
 }
 cur->prev = new_entry;
}
le08/doubly_linked_list.c
```

## Obousměrný spojový seznam – přidání prvku na začátek `push()`

```
void push_dll(int value, doubly_linked_list_t *list)
{
 assert(list);
 dll_entry_t *new_entry = allocate_dll_entry(value);
 if (list->head) { // an entry already in the list
 new_entry->next = list->head; // connect new -> head
 list->head->prev = new_entry; // connect new <- head
 } else { //list is empty
 list->tail = new_entry;
 }
 list->head = new_entry; //update the head
}
le08/doubly_linked_list.c
```

## Obousměrný spojový seznam – tisk seznamu

```
void print_dll(const doubly_linked_list_t *list)
{
 if (list && list->head) {
 dll_entry_t *cur = list->head;
 while (cur) {
 printf("%i%s", cur->value, cur->next ? " " : "\n");
 cur = cur->next;
 }
 }
}

void printReverse(const doubly_linked_list_t *list)
{
 if (list && list->tail) {
 dll_entry_t *cur = list->tail;
 while (cur) {
 printf("%i%s", cur->value, cur->prev? " " : "\n");
 cur = cur->prev;
 }
 }
}
le08/doubly_linked_list.c
```

## Příklad použití

```
#include "doubly_linked_list.h"

doubly_linked_list_t list = { NULL, NULL };
doubly_linked_list_t *lst = &list;

push_dll(17, lst); push_dll(93, lst);
push_dll(79, lst); push_dll(11, lst);

printf("Regular print: ");
print_dll(lst);

printf("Revert print: ");
printReverse(lst);

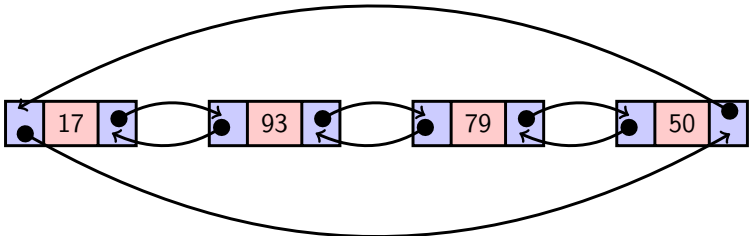
free_dll(lst);
le08/doubly_linked_list.c
le08/demo-doubly_linked_list.c
```

- Výstup programu
 

```
$ clang doubly_linked_list.c
demo-double_linked_list.c
$./a.out
Regular print: 11 79 93 17
Revert print: 17 93 79 11
```

### Kruhový obousměrný seznam

- Položka `next` posledního prvku odkazuje na první prvek.
- Položka `prev` prvního prvku odkazuje na poslední prvek.



### Zadání 8. domácího úkolu HW08

#### Téma: Kruhá fronta v poli

Povinné zadání: **3b**; Volitelné zadání: **2b**; Bonusové zadání: *není*

- **Motivace:** Práce s pamětí a datovými strukturami.
- **Cíl:** Prohloubit si znalost paměťové reprezentace a dynamické alokace paměti s uvolňováním.
- **Zadání:** <https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b0b36prp/hw/hw08>
  - Implementace kruhové fronty s využitím předalokovaného pole pro vkládané prvky.
  - **Volitelné zadání** rozšiřuje úlohu o dynamické zvětšování a zmenšování kapacity fronty podle aktuálních požadavků na počet vkládaných/odebíraných prvků.
- **Termín odevzdání:** **16.12.2023, 23:59:59 PST.**

*PST – Pacific Standard Time*

## Část II

### Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW08)

Diskutovaná témata

### Shrnutí přednášky

## Diskutovaná témata

- Spojové struktury
  - Jednosměrný spojový seznam;
  - Obousměrný spojový seznam;
  - Kruhový obousměrný spojový seznam.
- Implementace operací `push()`, `pop()`, `size()`, `back()`, `pushEnd()`, `popEnd()`, `insertAt()`, `getEntry()`, `getAt()`, `removeAt()`, `indexOf()`.
- Použití spojového seznamu pro dynamicky alokované hodnoty prvků seznamu.
- **Příště abstraktní datový typ (ADT).**

## Část IV

### Appendix

## Kódovací příklad – Dynamická knihovna

- Knihovna s implementací (spojového) seznamu pro ukládání dynamicky alokovaných položek.
- Pro jednoduchost při chybě dynamické alokace program ukončíme s výstupem na `stderr`.
- Implementujeme funkci `push()`, která nepřidá hodnoty `NULL`. Návrhová volba!
- Prázdný seznam je indikován návratovou hodnotou `NULL` funkce `pop()`.
- Implementujeme nastavení funkce porovnání položek `setLess()`, kterou využijeme při vkládání položek do seznamu. Uspořádání položek dojde při volání `push()`. Implementujeme `insert sort`.
- Vytvoříme dvě verze knihovny s/bez uspořádání položek, které budeme linkovat dynamicky.

```

1 #ifndef __LIST_H__
2 #define __LIST_H__
3
4 void* create(void); // void* - konkrétní typ považujeme za vnitřní záležitost knihovny.
5 void release(void** list); // argument list musí odpovídat typu z volání create()!
6
7 void setLess(void *list, bool (*isLess)(const void *a, const void *b));
8
9 void push(void *list, void *value);
10 void* pop(void *list);
11
12 #endif

```

list.h

## Kódovací příklad – list.c 1/2

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <stdbool.h>
4
5 #include "list.h"
6
7 struct item {
8 void *value;
9 struct item *next;
10 };
11
12 struct list {
13 struct item *root;
14 bool (*isLess)(const void *a, const void *b);
15 };
16
17 enum { ERROR_MEM = 101 };

```

list.c

- Při chybě alokace program končí voláním `exit()` s návratovou hodnotou `101`.
- Definicí složených typů implementujeme pouze v souboru `list.c`, může se případně v budoucnu měnit, proto není `struct item` součástí rozhraní v `list.h`.

```

19 void* create(void)
20 {
21 struct list *ret = malloc(sizeof(struct list));
22 if (!ret) {
23 fprintf(stderr, "ERROR: cannot allocate memory
24 for list!\n");
25 exit(ERROR_MEM);
26 }
27 ret->root = NULL;
28 ret->isLess = NULL;
29 return ret;
30 }
31
32 void release(void** list)
33 {
34 if (list && *list) {
35 struct list *lst = (struct list*)*list;
36 struct item *cur = lst->root;
37 while (cur) {
38 struct item *t = cur;
39 cur = cur->next;
40 free(t->value); //Případě specifická funkce
41 free(t); // pro složený typ s ukazateli
42 }
43 free(*list);
44 *list = NULL;
45 }

```

list.c

## Kódovací příklad – list.c 2/3

```

47 void setLess(void *list, bool (*isLess)(const void *a, const void *b))
48 {
49 if (list) {
50 struct list *lst = (struct list*)list;
51 lst->isLess = isLess;
52 }
53 }
54
55 static void* allocate_item(void* value)
56 {
57 struct item *ret = malloc(sizeof(struct item));
58 if (!ret) {
59 fprintf(stderr, "ERROR: cannot allocate memory for list item!\n");
60 exit(ERROR_MEM);
61 }
62 ret->value = value;
63 ret->next = NULL;
64 return ret;
65 }

```

- Funkce `setLess()` nastavuje ukazatel na funkci.
- Funkce `allocate_item()` nastavuje `next` na `NULL`.
- Položka `value` je adresa dynamicky alokované paměti.

```

104 void* pop(void *list)
105 {
106 void *ret = NULL;
107 struct list *lst = (struct list*)list;
108 if (lst && lst->root) {
109 ret = lst->root->value;
110 struct item *p = lst->root;
111 lst->root = lst->root->next;
112 free(p);
113 }
114 return ret;
115 }

```

- Funkce `pop()` vrací `NULL` v případě prázdného seznamu.
- Při práci se seznamem explicitně přetypujeme vstupní argument `list` na typ ukazatel na `struct list*`.
- Při vyjmutí delegujeme správu paměti alokované na adrese `value` volající funkci (adresa je návratová hodnota funkce).

## Kódovací příklad – list.c 3/3

```

66 static void pushLess(struct list *list, struct item *item)
67 {
68 if (!list->root || list->isLess(item->value, list->root->
69 value)) {
70 item->next = list->root; // ok i pro root == NULL
71 list->root = item;
72 return;
73 }
74 struct item *prev = list->root;
75 struct item *cur = prev->next; // list->root není NULL
76 while (cur && !list->isLess(item->value, cur->value)) {
77 prev = cur;
78 cur = cur->next;
79 }
80 item->next = cur; //item bude poslední if cur == NULL
81 prev->next = item;
82 }

```

- Privátní funkce `pushLess()` v rámci `list.c`.
- Funkce využívá nastavenou funkci `list->isLess`.
- Funkce vkládá `item` před první položku seznamu, která je větší (dle `isLess()`).

```

84 void push(void *list, void *value)
85 {
86 struct list *lst = (struct list*)list;
87 if (!lst || !value) { // ukládání hodnot NULL
88 return; // není podporováno (ignorujeme)
89 }
90 struct item *n = allocate_item(value);
91 #ifdef WITH_LESS // isLess pouze pokud WITH_LESS
92 if (lst->isLess) {
93 pushLess(lst, n);
94 return;
95 }
96 #endif
97 if (lst->root) {
98 n->next = lst->root;
99 }
100 lst->root = n;
101 }

```

- Výchozí implementace `push()` vkládá hodnoty na začátek seznamu.
- Pokud je `list.c` kompilován s `WITH_LESS`, dochází k využití `isLess()`.  
Např. `clang -DWITH_LESS list.c`

## Kódovací příklad – Volání rozhraní seznamu 1/3

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <stdbool.h>
4 #include <string.h>
5
6 #include "list.h"
7
8 bool isLess(const void *a, const void *b);
9
10 int main(void)
11 {
12 int ret = EXIT_SUCCESS;
13 char *line = NULL; // musí být NULL, alokace v getline()
14 size_t linecap = 0; // délka alokované paměti v getline()
15 ssize_t ln = 0; // délka načteného řetězce
16 void *list = create(); // vytvoření seznamu z list.h
17
18 setLess(list, isLess); // nastavení funkce isLess() demo.c

```

- Hodnoty textových řetězců jsou dynamicky alokovány.
- Načítání hodnot realizujeme funkcí `getline()`, která alokuje potřebnou paměť dynamicky.
- Seznam vytvoříme voláním funkce `create()`.
- Nastavíme funkce `isLess()`.

```

20 while ((ln = getline(&line, &linecap, stdin)) > 0) {
21 if (line[ln-1] == '\n') { // ln vždy alespoň 1!
22 line[ln-1] = '\0'; // ignorujeme konec řádku
23 }
24 fprintf(stderr, "DEBUG: read \"%s\"\n", line);
25 push(list, line); // přidáme do seznamu
26 linecap = 0;
27 line = NULL; // vynucujeme novou alokaci
28 }
29 while ((line = pop(list))) {
30 printf("Popped value is \"%s\"\n", line);
31 free(line); // uvolňujeme řádek z paměti
32 }
33 release(&list);
34 return ret;
35 }
36
37 bool isLess(const void *a, const void *b)
38 {
39 return strcmp(a, b) < 0; // lexikografické porovnání
40 }

```

- Přidáním řádku do seznamu delegujeme zodpovědnost za správu paměti (smazání) seznamu, nebo následnému volání `pop()` a smazání řádku.
- Obsah seznamu vytiskneme voláním `pop()`.

## Kódovací příklad – Volání rozhraní seznamu 2/3

```

$ clang -fPIC -c list.c
$ clang -shared -o liblist.so.1 list.c

$ clang -g -DWITH_LESS -fPIC -c list.c
$ clang -shared -o liblist.so.2 list.c

$ ln -s liblist.so.1 liblist.so

$ clang -g -L. -Wl,-rpath=. -llist -o demo demo.c

$ ldd demo
demo:
 liblist.so => ./liblist.so (0x80024d000)
 libc.so.7 => /lib/libc.so.7 (0x800251000)

```

- Vytvoříme dvě verze (bez/s `isLess()`) dynamicky linkované knihovny `liblist.so.1` a `liblist.so.2`.
- Konkrétní (aktuální verzi) odkážeme symbolickým odkazem (nebo jen nakopírujeme) jako soubor `liblist.so`.
- Program `demo.c` zkompilujeme s knihovnou `list`.
- Dynamicky linkované knihovny programu můžeme zobrazit, např. nástrojem `ldd`.

`ldd - list dynamic object dependencies.`

- Vyrovíme vstupní soubor `in.txt` a přeměrujeme `stdin`.

```

1 cat in.txt
2 4
3 2
4 16
5 13
6 6
7 1
8 3
9 5
10 9
11 15
12
13 ./demo <in.txt 2>&1 | head -n 12
14 DEBUG: read " 4"
15 DEBUG: read " 2"
16 DEBUG: read " 16"
17 DEBUG: read " 13"
18 DEBUG: read " 6"
19 DEBUG: read " 1"
20 DEBUG: read " 3"
21 DEBUG: read " 5"
22 DEBUG: read " 9"
23 DEBUG: read " 15"
24 Popped value is " 15"
25 Popped value is " 9"

```

## Kódovací příklad – Volání rozhraní seznamu 3/3

- Verze bez `isLess()`, knihovna `liblist.so.1`.
- Verze s `isLess()`, knihovna `liblist.so.2`.

```
$ rm -rf liblist.so
$ ln -s liblist.so.1 liblist.so
$ ls -l liblist.so
lrwxr-xr-x 1 liblist.so -> liblist.so.1
```

```
$./demo < in.txt 2>/dev/null
Popped value is " 15"
Popped value is " 9"
Popped value is " 5"
Popped value is " 3"
Popped value is " 1"
Popped value is " 6"
Popped value is " 13"
Popped value is " 16"
Popped value is " 2"
Popped value is " 4"
```

```
$ rm -rf liblist.so
$ ln -s liblist.so.2 liblist.so
$ ls -l liblist.so
lrwxr-xr-x 1 liblist.so -> liblist.so.2
```

```
$./demo < in.txt 2>/dev/null
Popped value is " 1"
Popped value is " 13"
Popped value is " 15"
Popped value is " 16"
Popped value is " 2"
Popped value is " 3"
Popped value is " 4"
Popped value is " 5"
Popped value is " 6"
Popped value is " 9"
```