

# Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů  
Fakulta elektrotechnická  
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

BOB36PRP – 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.

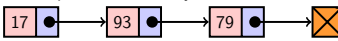
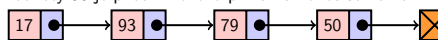

## Základní operace se spojovým seznamem

- 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 odebraný prvek.
- Základní implementací spojového seznamu je **jednosměrný spojový seznam**.

## 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.

## 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 vyjme prvek s hodnotou a propojíme prvek 93 s prvkem 50.
    - Položku `next` prvku 93 nastavíme na hodnotu `next` odebraného prvku, tj. na následující prvek s hodnotou 50.

## 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.



## 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 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; // počet prvku
6 entry_t *head = NULL; 5 } linked_list_t;
```
- 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;
```
- 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.

**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;
}
```

### 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 }
```
- Alternativně můžeme `push()` implementovat také jako `entry_t* push(int value, entry_t *head)`.
- 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;
```
- Použijeme konstantní ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. Z hlavičky funkce je tak zřejmé, že vstupní strukturu ve funkci nemodifikujeme.*
- Procházejíme kompletní seznam ( $n$  prvků), abychom spočítali počet prvků seznamu.
- Lineární složitost operace size() – O(n).*

### 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).*

### 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.

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

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

### 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 – 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); // release the memory
10  if (list->head == NULL) { // end has been popped
11    list->tail = NULL;
12  }
13  return ret;
14 }
```

*V našem konkrétním případě můžeme také zajistit programové použití assert() a podmínit volání pop(), např. if (!is\_empty(list)).*

```
1 #ifndef MY_ASSERT_H...
2 #define MY_ASSERT_H...
3
4 #include <stdio.h> //printf()
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
14 #endif
```

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

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

### 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
4     assured programmatically
5   assert(list && list->tail);
6   return list->tail->value;
7 }
```
- 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 – 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.

### 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 = end->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.

### Příklad použití

- Příklad použití na seznam hodnot typu int.
- Výstup programu

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

\$ 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

### 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; // nastavení hodnoty
new_entry->next = entry->next; //propojení s následujícím
entry->next = new_entry; //propojení 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 – 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().

### 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.

### 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!!!

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

■ Výstup programu

```

### 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 nejnepríznivějším případě O(n) (v případě pole je to O(1)).

```

### Příklad použití getAt(int index)

```

■ Příklad vypsání obsahu seznamu funkcí getAt()
v cyklu.

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!!!

$ clang linked_list.c demo-getat.c && ./a.out
21 7 17 5 10
Lst[0]: 21
Lst[1]: 7
Lst[2]: 17
Lst[3]: 5
Lst[4]: 10
Lst[5]: NULL
Lst[6]: NULL

■ Výstup programu

```

### 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->next->next;
        }
        if (entry == list->tail) {
            list->tail = entry_prev;
        }
        free(entry);
        list->count -= 1;
    }
}

Složitost v nejnepríznivějším případě O(n), protože nejdříve musíme prvek najít.

```

### Příklad použití removeAt(int index)

```

void removeAndPrint(int index, linked_list_t *list)
{
    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!!!

■ Výstup programu
1 $ clang linked_list.c demo-removeat.c && ./a.out
2 21 7 17 5 10
3 Remove entry at 3 (5)
4 21 7 17 10
5 Remove entry at 3 (10)
6 21 7 17
7 Remove entry at 0 (21)
8 7 17

lec08/demo-removeat.c

```

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

```

■ Vrátí 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;
}

```

### 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
21 7 17 5 10
Index of ( 5) is 3
Index of (17) is 2
Index of ( 3) is -1

lec08/demo-indexof.c

```

### 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.

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 indexOf() pro spojový seznam textových řetězců

```

■ Porovnání hodnot textových řetězců—strcmp() – knihovna <string.h>.
■ Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců. Literály vs. proměnné.
■ Příklad použití.

#include "linked_list-str.h"
linked_list_t list = { NULL }; // initialization is important
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], list));
}
free_list(lst); // cleanup !!!

$ 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\"\n", pop(lst)); */
/* Note, using this will cause memory leakage since we lost the address value to free the memory!!! */
```

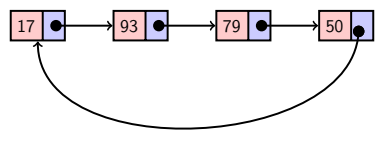
```
char *str = pop(lst);
printf("Popped value \"%s\"\n", str);
free(str); /* str must be deallocated */

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.
- Projdete si příložené příklady, zkuste si naimplementovat vlastní řešení a otestovat správnou alokaci a uvolnění paměti!

### Kruhový spojový seznam

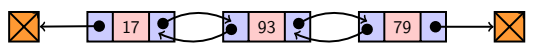
- Položka `next` posledního prvku může odkazovat na první prvek.
- Tak vznikne kruhový spojový seznam.



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

### 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.



### 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`:
  - Napojení vloženého prvku do seznamu, hodnoty `prev` a `next`;
  - Aktualizace `next` předchozí prvku k prvku `cur`;
  - 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;
}

lec08/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
}

lec08/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;
        }
    }
}

lec08/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(list);

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

free_dll(lst);

lec08/doubly_linked_list.c
lec08/demo-doubly_linked_list.c
```

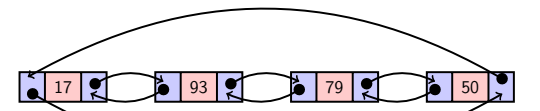
- Výstup programu
 

```
$ 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.



## Část II

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

## Zadání 8. domácího úkolu HW08

### Téma: Kruhová 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

Diskutovaná témata

## Shrnutí přednášky

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 52 / 55

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 53 / 55

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 54 / 55

Diskutovaná témata

## Diskutovaná témata

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

Kódovací příklad – Dynamická knihovna

## Část IV Appendix

Kódovací příklad – Dynamická knihovna

## Kódovací příklad – Dynamická knihovna

- Knihovna s implementací (spojivého) seznamu pro ukládání dynamicky alokovaných položek.
- Pro jednoduchost při chybě dynamické alokace program ukončíme s výstupem na `stderr`.
- Implementujeme funkci `push()`, která nepřídá 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
13
14 list.h
```

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 55 / 55

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 56 / 55

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 58 / 55

Kódovací příklad – Dynamická knihovna

## 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 };
18
19 list.c
```

```
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         return;
36     }
37     struct list *l = (*list);
38     struct item *cur = l->root;
39     while (cur) {
40         struct item *n = cur->next;
41         free(cur->value); //Případně specifická funkce
42         free(cur); // pro složený typ s ukazateli
43     }
44     free(l);
45     *list = NULL;
46 }
47
48 list.c
```

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

## Kódovací příklad – list.c 2/3

```
47 void setLess(void *list, bool (*isLess)(const void *a, const void *b))
48 {
49     if (!list) {
50         return;
51     }
52     struct list *l = (struct list*)list;
53     l->isLess = isLess;
54 }
55
56 static void* allocate_item(void* value)
57 {
58     struct item *ret = malloc(sizeof(struct item));
59     if (!ret) {
60         fprintf(stderr, "ERROR: cannot allocate memory for list item!\n");
61         exit(ERROR_MEM);
62     }
63     ret->value = value;
64     ret->next = NULL;
65     return ret;
66 }
67
68 list.c
```

```
100 void* pop(void *list)
101 {
102     void* ret = NULL;
103     struct list *l = (struct list*)list;
104     if (!l || !l->root) {
105         return NULL;
106     }
107     struct item *p = l->root;
108     l->root = l->root->next;
109     free(p);
110     return ret;
111 }
112
113 list.c
```

- 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).

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 60 / 55

Kódovací příklad – Dynamická knihovna

## Kódovací příklad – list.c 3/3

```
100 static void pushLess(struct list *list, struct item *item)
101 {
102     if (!list->root || list->isLess(item->value, list->root->
103     value)) {
104         item->next = list->root; // ok i pro root == NULL
105         list->root = item;
106         return;
107     }
108     struct item *prev = list->root;
109     struct item *cur = prev->next; // list->root není NULL
110     while (cur && list->isLess(item->value, cur->value)) {
111         prev = cur;
112         cur = cur->next;
113     }
114     item->next = cur; //item bude poslední if cur == NULL
115     prev->next = item;
116 }
117
118 list.c
```

```
100 void push(void *list, void *value)
101 {
102     struct list *l = (struct list*)list;
103     if (!l || !l->value) { // ukládání hodnot NULL
104         return; // není podporováno (ignorujeme)
105     }
106     struct item *n = allocate_item(value);
107     #ifdef WITH_LESS // isLess pouze pokud WITH_LESS
108         pushLess(l, n);
109     #else
110         if (!l->root) {
111             n->next = list->root;
112             list->root = n;
113         }
114     #endif
115 }
116
117 list.c
```

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

Jan Faigl, 2023 BOB36PRP – Přednáška 08: Spojivé struktury 61 / 55

## 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

```

```

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; // vymocujeme novou alokaci
27     line = NULL; // vymocujeme novou alokaci
28 }
29 while ((line = pop(list))) {
30     printf("Popped value is \"%s\"\n", line);
31     free(line); // uvolňujeme řádek z paměti
32     release(&list);
33     return ret;
34 }
35
36 bool isLess(const void *a, const void *b)
37 {
38     return strcmp(a, b) < 0; // lexiografické porovnání
39 }
40
41 // 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()`.

- 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.o
$ clang -g -DWITH_LESS -fPIC -c list.c
$ clang -shared -o liblist.so.2 list.o
$ ln -s liblist.so.1 liblist.so
$ clang -g -L. -Wl,-rpath=. -llist -o demo.demo.c
$ ldd demo
demo:
liblist.so => ./liblist.so (0x800244000)
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.

## 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 " 4"
DEBUG: read " 2"
DEBUG: read " 16"
DEBUG: read " 13"
DEBUG: read " 6"
Popped value is " 1"
Popped value is " 6"
Popped value is " 13"
Popped value is " 2"
Popped value is " 15"
Popped value is " 9"

```

```

$ 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"

```