

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



Obsah

Spojové struktury

Spojový seznam

Spojový seznam s odkazem na konec seznamu

Vložení/odebrání prvku

Kruhový spojový seznam

Obousměrný seznam



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 sekvenčně propojeny, přímý náhodný přístup není jednoduše možný.
- Vložení nebo odebrání prvku může být velmi rychlé.



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.*



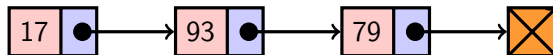
Základní operace se spojovým seznamem

- 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.

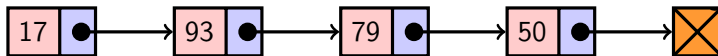


Jednosměrný spojový seznam

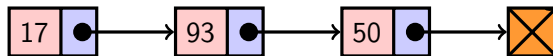
- Příklad spojového seznamu pro uložení číselných hodnot.



- Přidání nové hodnoty 50 je přidání nového prvku na konec seznamu.



- Odebrání prvku s hodnotou 79.



1. Nejdříve sekvenčně najdeme prvek s hodnotou 79.
2. 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.



Obsah

[Spojové struktury](#)

[Spojový seznam](#)

[Spojový seznam s odkazem na konec seznamu](#)

[Vložení/odebrání prvku](#)

[Kruhový spojový seznam](#)

[Obousměrný seznam](#)



Spojový seznam

- Seznam tvoří struktura prvku s dvěma základními položkami:
 - Data prvku (může být ukazatel);
 - Odkaz (ukazatel) na další prvek.
- Seznam je pak:
 1. Ukazatel na první prvek `head`;
 2. 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 {  
2     int value;  
3     struct entry *next;  
4 } entry_t;  
6 entry_t *head = NULL;
```

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

- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé číslo.

Obecně mohou obsahovat libovolná data (ukazatel na strukturu).



Přidání prvku – příklad

1. Vytvoříme nový prvek (10) seznamu a uložíme odkaz v `head`. **Kontrola dynamické alokace**

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

2. 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;
```

3. 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.

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

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 }
```

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;
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.

- Procházíme 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\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



Obsah

[Spojové struktury](#)

[Spojový seznam](#)

[Spojový seznam s odkazem na konec seznamu](#)

[Vložení/odebrání prvku](#)

[Kruhový spojový seznam](#)

[Obousměrný seznam](#)



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()`.

```
typedef struct {  
    entry_t *head;  
    int counter;  
} linked_list_t;  
  
int size(const linked_list_t *list)  
{  
    assert(list);  
    return list->counter;  
}
```

```
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.

V našem konkrétním případě můžeme také zajistit programově použitím `assert()` a podmínit volání `pop()`, např. `if (!is_empty(list))`.

```
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
3
4 #include <stdio.h> //fprintf()
5 #include <stdlib.h> //exit() and
6
7 #define myAssert(x, line, file)
8     \
9     if (!(x)) {\
10         fprintf(stderr, "my_assert
11         fail, line: %d, file %s\n",
12         line, file);\
13         exit(-1);\
14     }
15 #endif
```

Výpis 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 – 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); // structure test not runtime
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.



Příklad použití

■ Příklad použití na seznam hodnot typu `int`.

■ Výstup programu

```
1  #include "linked_list.h"
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);
9  printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(lst));
10 printf("Lst: "); print(lst);
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);
16 free_list(lst); // 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
```

lec08/linked_list.h

lec08/linked_list.c

lec08/demo-linked_list.c



Obsah

Spojové struktury

Spojový seznam

Spojový seznam s odkazem na konec seznamu

Vložení/odebrání prvku

Kruhový spojový seznam

Obousměrný seznam



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 hodnotu. 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**.

Viz **lec08/linked_list.c**



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 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!!!
```

- Výstup programu

```
$ 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
```

lec08/demo-getat.c

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



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 nejnejpříznivějším případě $O(n)$, protože nejdříve musíme prvek najít.



Příklad použití `removeAt(int index)`

```
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!!!
```

■ 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.

*Odebíráme všechny výskyty 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 velká části dovednost („řemeslo“), kreativní činnost je spíše návrh struktury programu, definování chování funkcí a definování jmen proměnných a funkcí (identifikátorů).



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\"\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.
- **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`



Obsah

Spojové struktury

Spojový seznam

Spojový seznam s odkazem na konec seznamu

Vložení/odebrání prvku

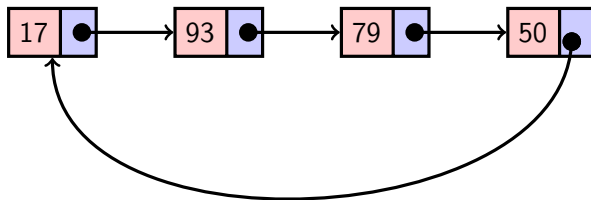
Kruhový spojový seznam

Obousměrný seznam



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.



Obsah

Spojové struktury

Spojový seznam

Spojový seznam s odkazem na konec seznamu

Vložení/odebrání prvku

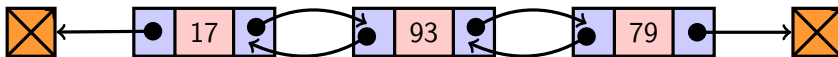
Kruhový spojový seznam

Obousměrný seznam



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`:

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;
}
```

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

■ 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
```

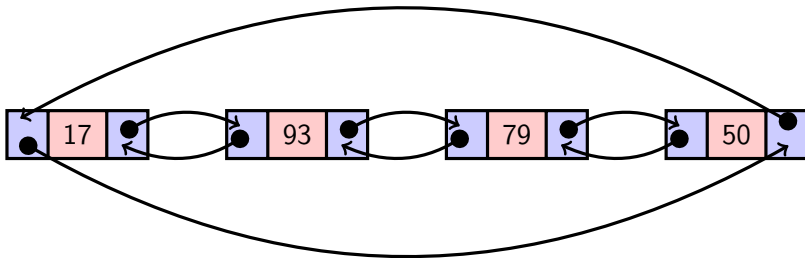
lec08/doubly_linked_list.c

lec08/demo-doubly_linked_list.c



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: **není**; 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**: **09.01.2026, 23:59:59 PST**.

PST – Pacific Standard Time



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



Obsah

Kódovací příklad – Dynamická knihovna



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__
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()!
7  void setLess(void *list, bool (*isLess)(const void *a, const void *b));
9  void push(void *list, void *value);
10 void* pop(void *list);
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.
- Definici 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 for
24         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     }
46 }

```

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 }

```

list.c

- Funkce `setLess()` nastavuje ukazatel na funkci.
- Funkce `allocate_item()` nastavuje `next` na `NUL`.
- 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 }

```

list.c

- Funkce `pop()` vrací `NUL` 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->value)) {
69         item->next = list->root; // ok i pro root == NULL
70         list->root = item;
71         return;
72     }
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 }

```

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()`).

```

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
91     struct item *n = allocate_item(value);
92     #ifdef WITH_LESS // isLess pouze pokud WITH_LESS
93     if (lst->isLess) {
94         pushLess(lst, n);
95         return;
96     }
97     #endif
98     if (lst->root) {
99         n->next = lst->root;
100     }
101     lst->root = n;
102 }

```

list.c

- 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     setLess(list, isLess); // nastavení funkce isLess()
18 }

```

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 }

```

demo.c

- 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 (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.

- Vytvoříme vstupní soubor `in.txt` a přesměrujeme `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
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"
```

