Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

B0B36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

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).

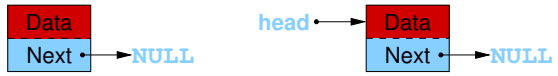
Kopírování objemných prvků lze případně řešit ukládáním ukazatelů.

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 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.



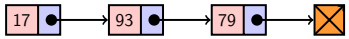
Základní operace se spojovým seznamem

- 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

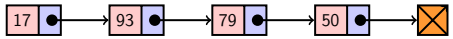
  jednosměrný spojový seznam.

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.*

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;
5
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`.

```
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;
```

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;
}
```

lec08/my_malloc.h, lec08/my_malloc.c

- 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.

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 implementanci 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

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 dekrementuje 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 strukturu pro seznam.
- Položky `head` a `counter`.
- `head` je ukazatel na `entry_t`.
- Ve funkce `size()` předpokládáme validní odkaz na seznam.
- Proto voláme `assert(list)`.

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

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

- 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, ukončujeme 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  #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,
         line: %d, file %s\n", line, file);\
10       exit(-1);\
11       }
12 #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);
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`.

```
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!!!
```

- 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 konkretní pozici, tj. podle indexu v seznamu.

Případně můžeme také požadovat vložení podle hodnoty prvku, tj. vložit před prvek s příslušnou hodnotu. Např. vložením 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!!!
```

lec08/demo-insertat.c

- 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
```


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 nejnepříznivějším 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!!!
```

lec08/demo-getat.c

- 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
```

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 nejnepříznivějším 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!!!
```

lec08/demo-removeat.c

- 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
```


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 !!!
```

lec08/demo-indexof.c

- 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
```


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 */
```

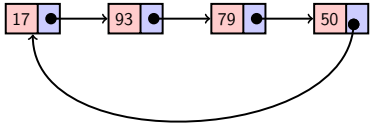
Při práci s dynamickou pamětí a datovými strukturami je nutné zvolit vhodný model (např. kopírování dat) a zajistit správné uvolnění paměti.

- Podobně jako textové řetězce se bude chovat ukazatel na nějakou komplexnější strukturu.
- **Projděte si přiložené 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

Kruhový spojový seznam

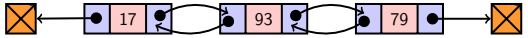
- Položka `next` posledního prvku může odkazovat na první prvek.
- Tak vznikne kruhový spojový seznam.



- 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 nastavenu položku `prev` na hodnotu `NULL`.
- Poslední prvek má `next` nastavenu na `NULL`.
- Příklad obousměrného seznamu celých čísel.



Příklad – **Obousměrný spojový seznam**

- Prvek listu má hodnotu (`value`) a dva odkazy (`prev` a `next`).

```
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;
```

- Alokaci prvku provedeme funkcí s inicializací na základní hodnoty.

```
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

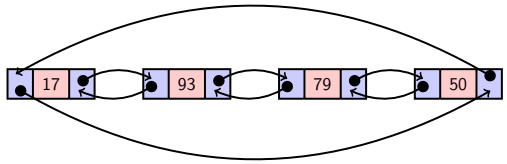
```
$ clang doubly_linked_list.c
    demo-double_linked_list.c
$ ./a.out

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: **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: 14.12.2024, 23:59:59 PST.

PST – Pacific Standard Time

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Spojové struktury
  - Jednosměrný spojový seznam;
  - Obousměrný spojový seznam;
  - Kruhový obousměrný spojový seznam.
- Implentace 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

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

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` součást 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       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 `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 }
```

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).

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

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <string.h>

#include "list.h"

bool isLess(const void *a, const void *b);

int main(void)
{
   int ret = EXIT_SUCCESS;
   char *line = NULL; // musí být NULL, alokace v getline()
   size_t linecap = 0; // délka alokované paměti v getline()
   ssize_t ln = 0; // délka načteného řetězce
   void *list = create(); // vytvoření seznamu z list.h

   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()`.

```c
   while ( (ln = getline(&line, &linecap, stdin)) > 0) {
      if (line[ln-1] == '\n') { // ln vždy alespoň 1!
         line[ln-1] = '\0'; // ignorujeme konec řádku
      }
      fprintf(stderr, "DEBUG: read \"%s\"\n", line);
      push(list, line); // přidáme do seznamu
      linecap = 0;
      line = NULL; // vynucujeme novou alokaci
   }
   while ( (line = pop(list)) ) {
      printf("Popped value is \"%s\"\n", line);
      free(line); // uvolňujeme řádek z paměti
   }
   release(&list);
   return ret;
}

bool isLess(const void *a, const void *b)
{
   return strcmp(a, b) < 0; // lexikografické porovnání
}
```
demo.c

- Přidáním řádku do seznamu delegujeme zoodpovědnost 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`.

```
cat in.txt
4
2
16
13
6
1
3
5
9
15

./demo <in.txt 2>&1 | head -n 12
DEBUG: read " 4"
DEBUG: read " 2"
DEBUG: read " 16"
DEBUG: read " 13"
DEBUG: read " 6"
DEBUG: read " 1"
DEBUG: read " 3"
DEBUG: read " 5"
DEBUG: read " 9"
DEBUG: read " 15"
Popped value is " 15"
Popped value is " 9"
```


Kódovací příklad – Volání rozhraní seznamu 3/3

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

```
$ 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"
```

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

```
$ 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"
```