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

- 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)
  - – Velikost pole je určena při vytvoření pole
    - Velikost (maximální velikost) musí být známa v době vytváření
    - Změna velikost v podstatě není přímo možná

      Nutné nové vytvoření (alokace paměti), resp. realloc
    - Využití pouze malé části pole je mrháním paměti
  - V případě řazení pole přesouváme položky
    - Vložení prvku a především mazání prvku vyžaduje kopírování

      Kopírování objemných prvků lze řešit ukazatelem, neřeší však problem přesunu

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 různá:
  - Pole
    - Indexování je velmi rychlé
    - Vložení prvků může být pomalé (nová alokace a kopírování)
  - Spojové seznamy

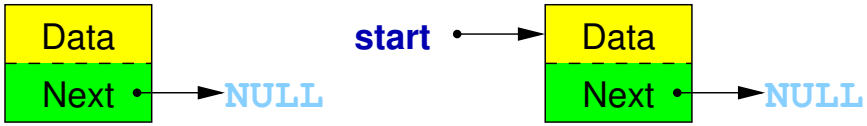
Spojové seznamy

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

`NULL` *v případě posledního prvku seznamu.*

- První prvek seznamu se zpravidla označuje jako *head* nebo *start*

Realizujeme jej jako ukazatel odkazující na první prvek seznamu



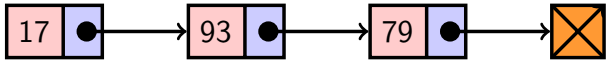
Základní operace se spojovým seznamem

- 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 tak nově odkazuje na následující hodnotu, na kterou odkazoval odebíraný prvek
- Základní implementací spojového seznamu je tzv.

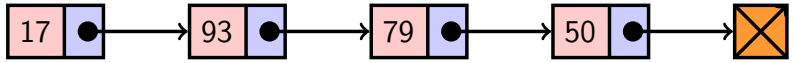
jednosměrný spojový seznam

Jednosměrný spojový seznam

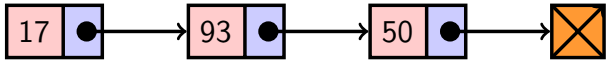
- Příklad spojového seznamu pro uložení číselných hodnot



- Přidání prvku 50 na konec seznamu



- Odebrání prvku 79



1. Nejdříve sekvenčně najdeme prvek s hodnotou 79
2. Následně vyjmeme a napojíme prvek 93 na prvek 50

Hodnotu reference next prvku 93 nastavíme na hodnotu reference next odebíraného prvku, tj. na prvek 50

Spojový seznam

- Seznam tvoří struktura prvku
  - Vlastní data prvku
  - Odkaz (ukazatel) na další prvek
- Vlastní seznam
  1. Ukazatel na první prvek `head`
  2. nebo vlastní struktura pro seznam

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

- Příklad tříd pro uložení spojového seznamu celých čísel

```
typedef struct entry {
   int value;
   struct entry *next;
} entry_t;

entry_t *head = NULL;
```

Vlastní struktura, například

```
typedef struct {
   entry_t *head;
   entry_t *end;
   int count; // pocet
    prvku
} 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 = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
head->value = 10;
head->next = NULL;
```

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

```
entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(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

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.

```
void push(int value, entry_t **head)
{ // add new entry at front
   entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));

   assert(new_entry); // malloc may eventually fail

   new_entry->value = value; // set data
   if (*head == NULL) { // first entry in the list
      new_entry->next = NULL; // reset the next
   } else {
      new_entry->next = *head;
   }
   *head = new_entry; //update the head
}
```

- Přidání prvku není závislé na počtu prvků v seznamu

Konstantní složitost operace `push()` – $O(1)$

Spojový seznam – pop()

- Odebrání prvního prvku ze seznamu

```
int pop(entry_t **head)
{  // linked list must be non-empty
   assert(head != NULL && *head != NULL);
   entry_t *prev_head = *head; // save the current head
   int ret = prev_head->value;
   *head = prev_head->next;
   free(prev_head); // relase memory of the popped entry
   return ret;
}
```

- 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`, tj. položka **next** je `NULL`
- Proměnnou `cur` používáme jako „*kurzor*" pro procházení seznamu

```
int size(const entry_t *head)
{ // we do not attempt to modify the list
   int count = 0;
   const entry_t *cur = head;
   while (cur) { // or cur != NULL
      cur = cur->next;
      count += 1;
   }
   return count;
}
```

Použijeme ukazatel na konstantní proměnnou, neboť seznam pouze procházíme a nemodifikujeme. Z hlavičky funkce je tak zřejmé, že vstupní strukturu ve funkci nemodifikujeme.

- Pro zjištění počtu prvků v seznamu musíme projít kompletní seznam, tj. n položek

Lineární složitost operace `size()` – $O(n)$

Spojový seznam – back()

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

```
int back(const entry_t *head)
{
   const entry_t *end = head;
   while (end && end->next) { // 1st test list is not empty
      end = end->next;
   }
   assert(end); //do not allow calling back on empty list
   return end->value;
}
```

- Pro vrácení hodnoty posledního prvku v seznamu musíme projít všechny položky seznamu

Lineární složitost operace `back()` – $O(n)$

Spojový seznam – procházení seznamu

- Procházení seznamu demonstrujeme na funkci `print()`

```
void print(const entry_t *const head)
{
   const entry_t *cur = head; // set the cursor to head
   while (cur != NULL) {
      printf("%i%s", cur->value, cur->next ? " " : "\n");
      cur = cur->next; // move in the linked list
   }
}
```

- 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 – jednoduchý spojový seznam

```
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-
    simple_linked_list.c
    simple_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/simple_linked_list.h`

`lec08/simple_linked_list.c`

`lec08/demo-simple_linked_list.c`

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

- Operace size() a back() procházejí kompletní seznam
- Operaci size() můžeme urychlit pokud budeme udržovat aktuální počet položek v seznamu
  - Zavedeme datovou položku **int count**
  - Počet prvků inkrementujeme při každém přidání prvku a dekrementuje při každém odebrání prvku
- Operaci back() můžeme urychlit referenční proměnou odkazující na poslední prvek
- Zavedeme strukturu pro vlastní spojový seznam s položkami head, count, and end

```
typedef struct {
   entry_t *head;
   entry_t *end;
   int count;
} linked_list_t;
```

- V případě přidání prvku na začátek, aktualizujeme pouze pokud byl seznam doposud prázdný
- Aktualizujeme v případě přidání prvku na konec
- Nebo při vyjmutí posledního prvku

Spojový seznam – urychlený size()

- Samostatná strukturu pro seznam
- Položky head a count
- head je ukazatel na entry_t
- Ve funkce size() předpokládáme validní odkaz na seznam
- Proto voláme assert(list)

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

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

- Přímá inicializace `linked_list_t linked_list = { NULL, 0 };`
- Do funkcí push() a pop() stačí předávat pouze ukazatel, proto pro zjednodušení použijeme proměnnou list

  `linked_list_t *list = &linked_list;`
- Pro urychlení funkce size() stačí inkrementovat a dekrementovat proměnnou count ve funkcích push() a pop()

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

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


Spojový seznam – push() s odkazem na konec seznamu

```
void push(int value, linked_list_t *list)
{ // add new entry at front
   entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
   assert(list && new_entry);
   new_entry->value = value; // set data
   if (list->head) { // an entry already in the list
      new_entry->next = list->head;
   } else { //list is empty
      new_entry->next = NULL; // reset the next
      list->end = new_entry; //1st entry is the end
   }
   list->head = new_entry; //update the head
   list->count += 1; // keep count up to date
}
```

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

Spojový seznam – pop() s odkazem na konec seznamu

```
int pop(linked_list_t *list)
{
   assert(list && list->head); // non-empty list
   entry_t *prev_head = list->head; // save head
   list->head = prev_head->next;
   list->count -= 1; // keep count up to date
   int ret = prev_head->value;
   free(prev_head); // relase the memory
   if (list->head == NULL) { //end has been popped
      list->end = NULL;
   }
   return ret;
}
```

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

Spojový seznamu – back() s odkazem na konec seznamu

- Proměnná **end** je buď `NULL` nebo odkazuje na poslední prvek seznamu

```
int back(const linked_list_t *list)
{
  // we do not allow to call back on empty list
  assert(list && list->end);
  return list->end->value;
}
```

- Udržováním hodnoty proměnné **end** jsme snížili časovou náročnost operace **back()** z lineární složitosti na počtu prvků v seznamu $O(n)$ na konstantní složitost $O(1)$

Spojový seznamu – pushEnd()

- Přidání prvku na konec seznamu

```
void pushEnd(int value, linked_list_t *list)
{
   assert(list);
   entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
   assert(list && new_entry);
   new_entry->value = value; // set data
   new_entry->next = NULL; // set the next
   if (list->end == NULL) { //adding the 1st entry
      list->head = list->end = new_entry;
   } else {
      list->end->next = new_entry; //update the current end
      list->end = new_entry;
   }
   list->count += 1;
}
```

- 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

```
int popEnd(linked_list_t *list)
{
   assert(list && list->head);
   entry_t *end= list->end; // save the end
   if (list->head == list->end) { // the last entry is
      list->head = list->end = NULL; // removed
   } else { // there is also penultimate entry
      entry_t *cur = list->head; // that needs to be
      while (cur->next != end) { // updated (its next
         cur = cur->next; // pointer to the next entry
      }
      list->end = cur;
      list->end->next = NULL; //the end does not have next
   }
   int ret = end->value;
   free(end);
   list->count -= 1;
   return ret;
}
```

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

Příklad použití

- Příklad použití na seznam hodnot typu `int`

```
#include "linked_list.h"

linked_list_t list = { NULL, NULL, 0 };
linked_list_t *lst = &list;
push(10, lst); push(5, lst); pushEnd(17, lst);
push(7, lst); pushEnd(21, lst);
print(lst);

printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(lst));
printf("Lst: "); print(lst);

printf("Back of the list: %i\n", back(lst));
printf("Pop from the end: %i\n", popEnd(lst));
printf("Lst: "); print(lst);

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 **end** (funkce `pushEnd()`)
  - obecně – potřebujeme prvek (**entry**), za který chceme nový prvek (**new_entry**) vložit

```
entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(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 příslušné pořadí, tj. podle indexu v seznamu

Případně můžeme také požadovat vložení podle hodnoty prvku, tj. vložit před prvek s příslušnou hodnotou.

Spojový seznam – insertAt()

- Vložení nového prvku na pozici *index* v seznamu

```
void insertAt(int value, int index, linked_list_t *list)
{
   if (index < 0) { return; } // only positive position
   if (index == 0) { // handle the 1st position
      push(value, list);
      return;
   }
   entry_t *new_entry = (entry_t*)malloc(sizeof(entry_t));
   assert(list && new_entry);
   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->end) {
      list->end = new_entry; // update end
   }
   list->count += 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** vyšší 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**.*

- Funkci `getEntry()` chceme používat privátně pouze v rámci jednoho modulu (`linked_list.c`)
- Proto ji deklarujeme 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 *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!!!
```

- 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 seznamu – removeAt(int index)

- Odebrání prvku na pozici **int index** a navážeme seznam
- 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->end) {
         list->end = entry_prev;
      }
      free(entry);
      list->count -= 1;
   }
}
```

Složitost v nejnepříznivější případě $O(n)$ (nejdříve musíme najít prvek).

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

```
clang linked_list.c demo-removeat.c && ./a.out
21 7 17 5 10
Remove entry at 3 (5)
21 7 17 10
Remove entry at 3 (10)
21 7 17
Remove entry at 0 (21)
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 *list)
{
   int count = 0;
   const entry_t *cur = list->head;
   bool found = false;
   while (cur && !found) {
      found = cur->value == value;
      cur = cur->next;
      count += 1;
   }
   return found ? count - 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 obsah

- Podobně jako vyhledání prvku podle obsahu můžeme prvky odebrat
- Můžeme implementovat přímo nebo s využitím již existujících metod indexOf() a removeAt()
- Příklad implementace

```
void remove(int value, linked_list_t *list) {
   int idx = indexOf(value, list);
   while(idx != -1) {
      removeAt(idx, list);
      idx = indexOf(value);
   }
}
```

Odebíráme všechny výskyty hodnoty `value` *v seznamu.*

Příklad indexOf() pro spojový seznamu textových řetězců

- Porovnání hodnot textových řetězců—strcmp()
- Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců
  V lec08/linked_list-str.c je zvolena alokace paměti a kopírování hodnoty
- Příklad použití

```
#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("Lecture07", 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
Lecture07 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 náročnější
- V případě volání `pop()` je nutné následně dealokovat paměť

V C++ lze řešit tzv. „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 */
```

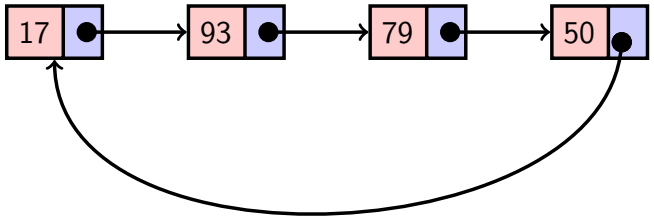
Při práci s dynamickou pamětí a datovými strukturami je nutné si zvolit vhodný model (např. kopírování dat) a zajistit jejich (např. kopírování dat) a zajistit jejich (např. kopírování dat) a zajistit jejich (např. kopírování dat) a zajistit správné uvolnění paměti.

- Podobně jako textové řetězce se budu chovat ukazatel na nějakou komplexnější strukturu
- **Projděte si přiložené příklad, 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

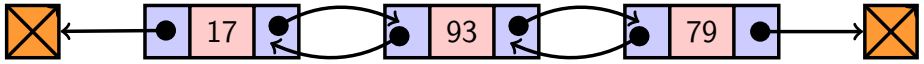
- Položka **next** posledního prvku může odkazovat na první prvek
- Tak vznikne kruhový spojový seznam



- Při přidání prvku na začátek je nutné aktualizovat hodnotu položky **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 dcll_entry {
   int value;
   struct dcll_entry *prev;
   struct dcll_entry *next;
} dcll_entry_t;

typedef struct {
   dcll_entry_t *head;
   dcll_entry_t *end;
} dc_linked_list_t;
```

- Alokaci prvku provedeme funkcí s inicializací na základní hodnoty

```
dcll_entry_t*
    allocate_dcl_entry(int
    value)
{
   dcll_entry_t *new_entry =
    (dcll_entry_t*)malloc(
    sizeof(dcll_entry_t));
   assert(new_entry);

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

   return new_entry;
}
```

`lec08/double_connected_linked_list.h`

`lec08/double_connected_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_dcll(int value, dcll_entry_t *cur)
{
   assert(cur);
   dcll_entry_t *new_entry = allocate_dcl_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/double_connected_linked_list.c

Obousměrný spojový seznam– přidání prvku na začátek seznamu push()

```
void push_dcll(int value, dc_linked_list_t *list)
{
   assert(list);
   dcll_entry_t *new_entry = allocate_dcl_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->end = new_entry;
   }
   list->head = new_entry; //update the head
}
```

lec08/double_connected_linked_list.c

Obousměrný spojový seznam – tisk seznamu print_dcll() a printReverse()

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

void printReverse(const dc_linked_list_t *list)
{
   if (list && list->end) {
      dcll_entry_t *cur = list->end;
      while (cur) {
         printf("%i%s", cur->value, cur->prev? " " : "\n");
         cur = cur->prev;
      }
   }
}
```

lec08/double_connected_linked_list.c

Příklad použití

```
#include "double_connected_linked_list.h"

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

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

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

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

free_dcll(lst);
```

- Výstup programu

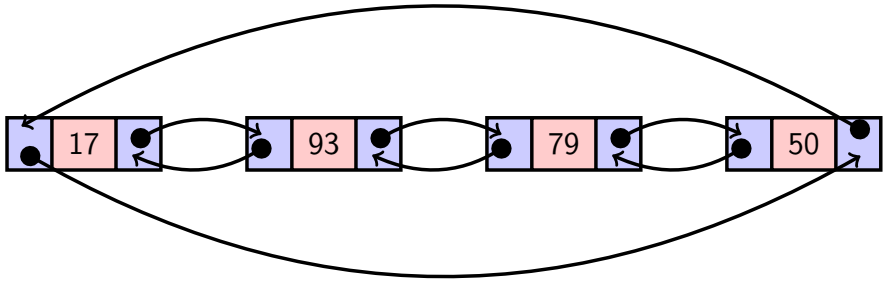
```
clang double_connected_linked_list.c demo-double_connected_linked_list.c
./a.out

Regular print: 11 79 93 17
Revert print: 17 93 79 11
```

lec08/double_connected_linked_list.c

lec08/demo-double_connected_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

-
- Termín odevzdání: 17.12.2016, 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: Stromy.