

Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 09

B0B36PRP – Procedurální programování

Přehled témat

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

Část I

Část 1 – Spojové struktury

Kolekce prvků (položek)

- V programech je velmi běžný požadavek na uchování seznamu (množiny) prvků (proměnných/struktur).
- Základní kolekce je pole. *Definované jménem typu a [], například double[]*
 - Jedná se o kolekci položek (proměnných) stejného typu.
 - + Umožňuje jednoduchý přístup k položkám indexací prvku. *Položky jsou stejného typu (velikosti)*
- 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 plýtváním paměti.
- V případě řazení pole přesouváme položky.
 - Vložení prvku a vyjmutí prvku vyžaduje kopírování. *Kopírování objemných prvků lze případně řešit ukazatelem.*

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 prvku na konkrétní pozici 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 / ukazatel na data);
 - 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 odebraný 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. Nejříve sekvencně najdeme prvek s hodnotou 79.
 2. Následně vyjmeme a napojíme prvek 93 na prvek 50.
- Hodnotu next prvku 93 nastavíme na hodnotu next odebraného 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 struktur pro uložení spojového seznamu celých čísel.

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

entry_t *head = NULL;
int counter; // pocet prvku
entry_t *linked_list_t;
```
- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé čísla. *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;
```

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;
}
```

lec09/my_malloc.h
lec09/my_malloc.c

- 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 aktualizaci 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 = myMalloc(sizeof(entry_t));
    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
}
```

Alternativně můžeme push() implementovat také například 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.

```
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; // will be set to NULL if
    // the last item is popped
    free(prev_head); // relase memory of the popped entry
    return ret;
}
```

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, tj. položka next je NULL.

- Proměnnou cur používáme jako „kurzor“ pro procházení seznamu.

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

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

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

Lineární složitost operace size() – O(n).

Spojový seznam – back()

- Vracení hodnoty posledního prvku ze seznamu – back().

```
int back(const entry_t *const 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 vracení 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
lec09/simple_linked_list.h
lec09/simple_linked_list.c
lec09/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 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.

```
typedef struct {
    entry_t *head;
    entry_t *tail;
    int counter;
} 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 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 pro zjednodušení použijeme proměnnou list

```
typedef struct {
    entry_t *head;
    int counter;
} linked_list_t;
int size(const linked_list_t *list)
{
    assert(list);
    return list->counter;
}
linked_list_t *list = &linked_list;
Pro urychlení funkce size() stačí inkrementovat a dekrementovat 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

```
void push(int value, linked_list_t *list)
{ // add new entry at front
  assert(list);
  entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
  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->tail = new_entry; //1st entry is the tail
  }
  list->head = new_entry; //update the head
  list->counter += 1; // keep counter up to date
}
```

Hodnotu ukazatele tail 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->counter -= 1; // keep counter up to date
  int ret = prev_head->value;
  free(prev_head); // relase the memory
  if (list->head == NULL) { // end has been popped
    list->tail = NULL;
  }
  return ret;
}
```

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

Spojový seznam – back() s odkazem na konec seznamu

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

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

- 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.

```
void pushEnd(int value, linked_list_t *list)
{
  assert(list);
  entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
  new_entry->value = value; // set data
  new_entry->next = NULL; // set the next
  if (list->tail == NULL) { //adding the 1st entry
    list->head = list->tail = new_entry;
  } else {
    list->tail->next = new_entry; //update the current tail
    list->tail = new_entry;
  }
  list->counter += 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->tail; // save the end
  if (list->head == list->tail) { // the last entry is
    list->head = list->tail = 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->tail = cur;
    list->tail->next = NULL; //the tail does not have next
  }
  int ret = end->value;
  free(end);
  list->counter -= 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 };
push(10, list); push(5, list); pushEnd(17, list);
push(7, list); pushEnd(21, list);
printf("Pop 1st entry: %i\n", pop(list));
printf("Lst: "); print(list);
printf("Back of the list: %i\n", back(list));
printf("Pop from the end: %i\n", popEnd(list));
printf("Lst: "); print(list);
free_list(list); // 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
```

Spojový seznam – Vložení prvku do seznamu

- Vložení do seznamu:

- na začátek – modifikujeme proměnnou head (funkce push());
- na konec – modifikujeme proměnnou posledního prvku a nastavujeme nový konec tail (funkce pushEnd());
- obecně – potřebujeme prvek (entry), za který chceme nový prvek (new_entry) vložit.

```
entry_t *new_entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
new_entry->value = value; // nastavení hodnoty
new_entry->next = entry->next; //propojení s následujícím
entry->next = new_entry; //propojení entry
```

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

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

Spojový seznam – insertAt()

- Vložení nového prvku na pozici index v seznamu.

```
void insertAt(int value, int index, linked_list_t *list)
{
  if (index < 0) { return; } // only positive position
  if (index == 0) { // handle the 1st position
    push(value, list);
    return;
  }
  assert(list); // list != NULL
  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 lec09/linked_list.c

Příklad vložení prvků do seznamu – insertAt()

- Příklad vložení do seznam čísel
- Výstup programu

```

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

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

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

insertAt(0, 0, list);
print(list);

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

free_list(list); // cleanup!!!

```

```

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

lec09/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()**
- Výstup programu

```

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

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

free_list(list); // cleanup!!!

```

```

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

lec09/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->next->next;
    }
    if (entry == list->tail) {
      list->tail = entry_prev;
    }
    free(entry);
    list->count -= 1;
  }
}

```

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

Příklad použití removeAt(int index)

- Výstup programu

```

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

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

```

```

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

lec09/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()

- Výstup programu

```

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

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

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

free_list(list); // cleanup !!!

```

```

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

lec09/demo-indexof.c

```

Odebrání prvku ze seznamu podle jeho obsahu – remove()

- 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) {
  while ((idx = indexOf(value, list)) >= 0) {
    removeAt(idx, list);
  }
}

```

Odebíráme všechny výskyt hodnoty value v seznamu.

Příklad indexOf() pro spojový seznamu textových řetězců

- Porovnání hodnot textových řetězců—**strcmp()** – knihovna **<string.h>**.
- Je nutné zvolit přístup pro alokaci hodnot textových řetězců.
- Příklad použití

```

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

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

lec09/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\"", pop(lst)); */
/* Note, using this will cause memory leakage since we lost the address value to
   free the memory!!! */
char *str = pop(lst);
printf("Popped value \"%s\"", str);
free(str); /* str must be deallocated */

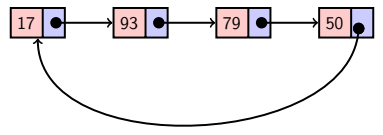
```

- Při práci s dynamickou pamětí a datovými strukturami je nutné zvolit vhodný model (např. kopírování dat) a zajistit správné uvolnění paměti.*
- Podobně jako textové řetězce se bude chovat ukazatel na nějakou komplexnější strukturu.
 - Projděte si přiložené příklady, zkuste si naimplementovat vlastní řešení a otestovat správnou alokaci a uvolnění paměti!

lec09/linked_list-str.h, lec09/linked_list-str.c, lec09/demo-indexof-str.c

Kruhový spojový seznam

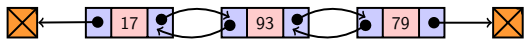
- Položka `next` posledního prvku může odkazovat na první prvek.
- Tak vznikne kruhový spojový seznam.



- 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 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;
}

```

lec09/doubly_linked_list.h, lec09/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;
}

```

lec09/doubly_linked_list.c

Obousměrný spojový seznam – tisk seznamu `print_dll()` a `printReverse()`

```

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;
        }
    }
}

```

lec09/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

```

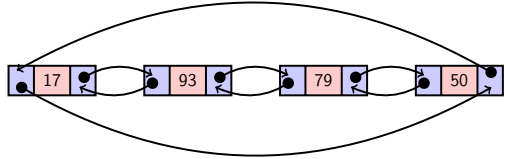
clang doubly_linked_list.c demo-double_linked_list.c
./a.out
Regular print: 11 79 93 17
Revert print: 17 93 79 11

```

lec09/doubly_linked_list.c
lec09/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: Kruhá fronta v poli

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

- **Motivace:** Práce s pamětí a datovými strukturami.
- **Cíl:** Prohloubit si znalost paměťové reprezentace a dynamické alokace paměti s uvolňováním.
- **Zadání:** <https://cw.fe1.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:** **12.12.2020, 23:59:59 PST.**

Shrnutí přednášky

Diskutovaná témata

- Spojivé 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: Stromy.**