Spojové struktury

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 08

BAB36PRGA – Programování v C

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 (HW8)

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.

Data | Next → NULL   head → Data | Next → NULL

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.
  17 → 93 → 79 → ☒
- Přidání nové hodnoty 50 je přidání nového prvku na konec seznamu.
  17 → 93 → 79 → 50 → ☒
- Odebrání prvku s hodnotou 79.
  17 → 93 → 50 → ☒
  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

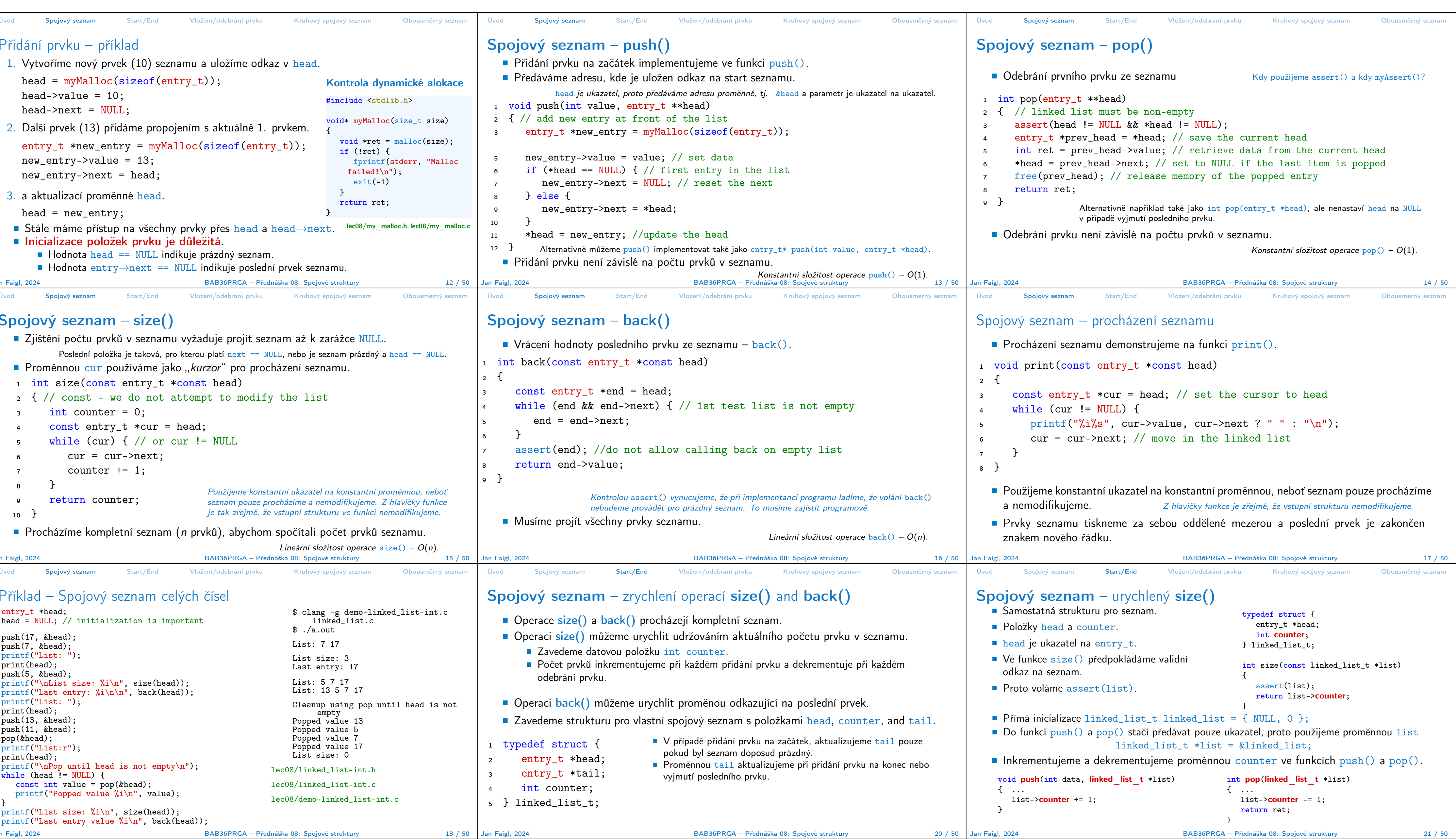
- Seznam tvoří struktura prvku s dvěma základními položkami:
  - Data prvku (může být ukazatel);
  - Odkaz (ukazatel) na další prvek.
- Seznam je pak:
  1. Ukazatel na první prvek `head`;
  2. nebo vlastní struktura pro seznam.
     Vhodné pro uložení dalších informací, počet prvků, poslední prvek.
- Příklad struktur pro uložení spojového seznamu celých čísel.

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

entry_t *head = NULL;
```

```c
typedef struct {
   entry_t *head;
   entry_t *tail;
   int counter; // pocet prvku
} linked_list_t;
```

- Pro jednoduchost prvky seznamu obsahují celé číslo.
  Obecně mohou obsahovat libovolná data (ukazatel na strukturu).


Úvod Spojový seznam Start/End Vložení/odebrání prvku Kruhový spojový seznam Obousměrný seznam
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.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 12 / 50
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));
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).
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 13 / 50
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).
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 14 / 50
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).
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 15 / 50
Spojový seznam – back()
Vrácení hodnoty posledního prvku ze seznamu – back().
1 int back(const entry_t *const head)
2 {
3 const entry_t *end = head;
4 while (end && end->next) { // 1st test list is not empty
5 end = end->next;
6 }
7 assert(end); //do not allow calling back on empty list
8 return end->value;
9 }
Kontrolou assert() vynucujeme, že při implementaci programu ladíme, že volání back() nebudeme provádět pro prázdný seznam. To musíme zajistit programově.
Musíme projít všechny prvky seznamu.
Lineární složitost operace back() – O(n).
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 16 / 50
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.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 17 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 18 / 50
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.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 20 / 50
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;
}
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 21 / 50

Spojový seznam – push() s odkazem na konec seznamu

```c
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))`.

```c
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()`

```c
1  #ifndef __MY_ASSERT_H__
2  #define __MY_ASSERT_H__

4  #include <stdio.h>  //fprintf()
5  #include <stdlib.h> //exit() and malloc()

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.

```c
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.

```c
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.

```c
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`.

```c
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.

```c
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 hodnotou. Např. vložením prvku vždy před první prvek, který je větší vytvoříme uspořádaný seznam – realizujeme tak řazení vkládáním (`insert sort`).

- Nalezení první implementujeme „*privátní*“ (`static`) funkcí `getEntry()`.

Spojový seznam – getEntry()

- Nalezení prvku na pozici `index`.
- Pokud je `index` větší než počet prvků v poli, návrat posledního prvku.

```c
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`.

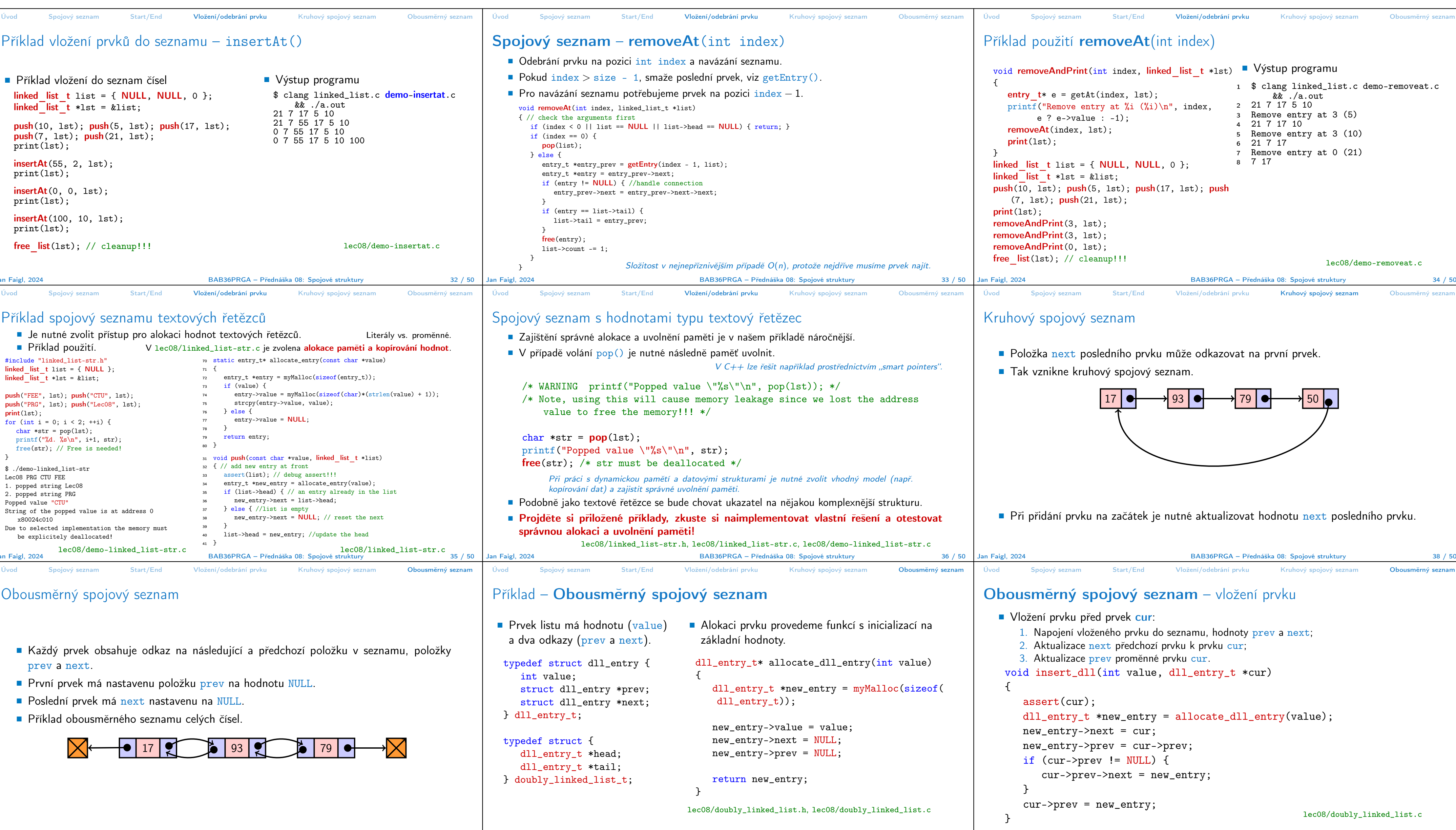
Viz `lec08/linked_list.c`

Spojový seznam – insertAt()

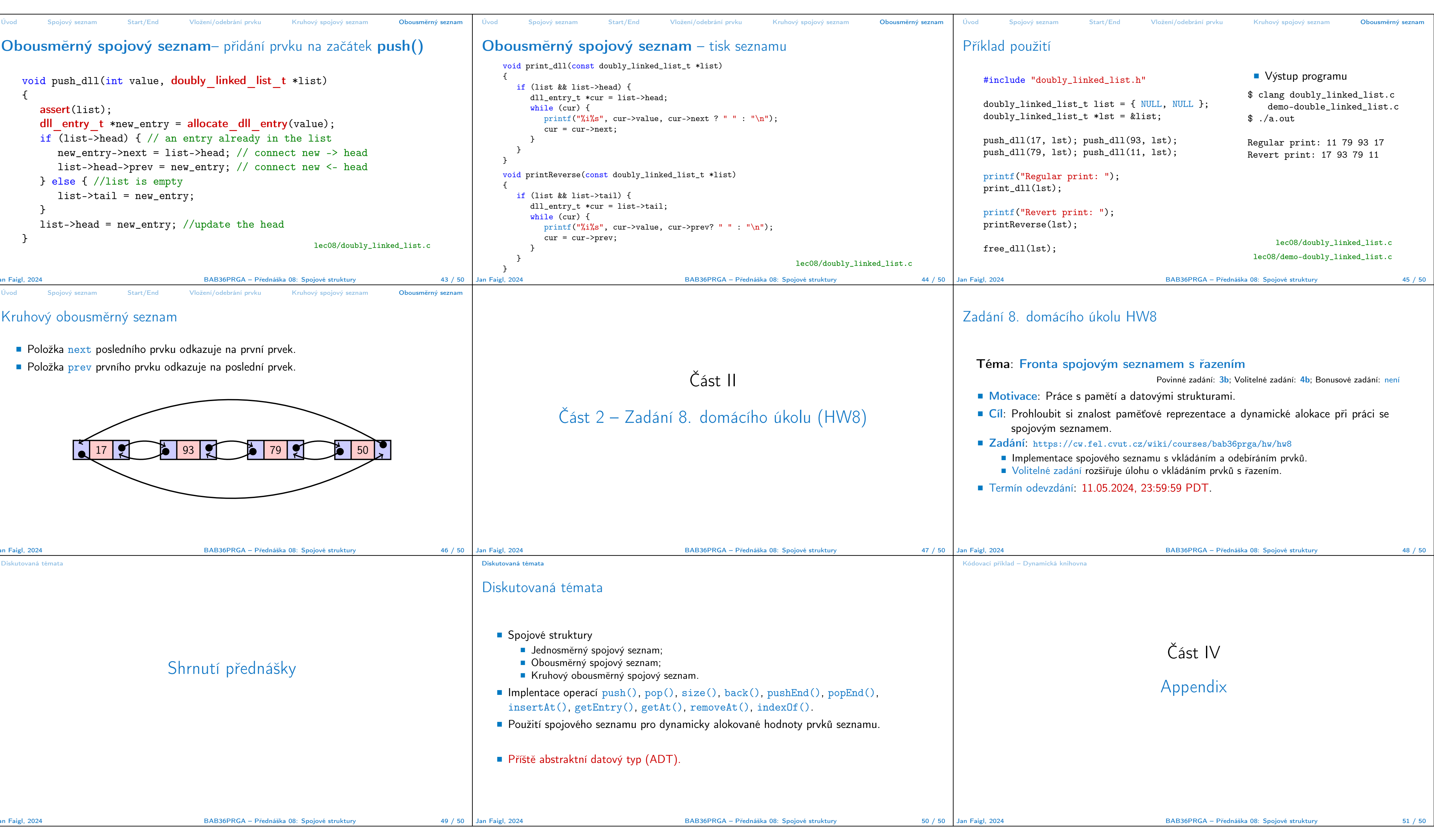
- Vložení nového prvku na pozici *index* v seznamu.

```c
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()`.*



Úvod Spojový seznam Start/End Vložení/odebrání prvku Kruhový spojový seznam Obousměrný seznam
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 32 / 50
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.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 33 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 34 / 50
Příklad spojový seznamu textových řetězců
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 };
linked_list_t *lst = &list;
push("FEE", lst); push("CTU", lst);
push("PRG", lst); push("Lec08", lst);
print(lst);
for (int i = 0; i < 2; ++i) {
char *str = pop(lst);
printf("%d. %s\n", i+1, str);
free(str); // Free is needed!
}
$ ./demo-linked_list-str
Lec08 PRG CTU FEE
1. popped string Lec08
2. popped string PRG
Popped value "CTU"
String of the popped value is at address 0
x80024c010
Due to selected implementation the memory must
be explicitely deallocated!
lec08/demo-linked_list-str.c
70 static entry_t* allocate_entry(const char *value)
71 {
72 entry_t *entry = myMalloc(sizeof(entry_t));
73 if (value) {
74 entry->value = myMalloc(sizeof(char)*(strlen(value) + 1));
75 strcpy(entry->value, value);
76 } else {
77 entry->value = NULL;
78 }
79 return entry;
80 }
31 void push(const char *value, linked_list_t *list)
32 { // add new entry at front
33 assert(list); // debug assert!!!
34 entry_t *new_entry = allocate_entry(value);
35 if (list->head) { // an entry already in the list
36 new_entry->next = list->head;
37 } else { //list is empty
38 new_entry->next = NULL; // reset the next
39 }
40 list->head = new_entry; //update the head
41 }
lec08/linked_list-str.c
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 35 / 50
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-linked_list-str.c
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 36 / 50
Kruhový spojový seznam
Položka next posledního prvku může odkazovat na první prvek.
Tak vznikne kruhový spojový seznam.
17
93
79
50
Při přidání prvku na začátek je nutné aktualizovat hodnotu next posledního prvku.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 38 / 50
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.
17
93
79
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 40 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 41 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 42 / 50



Úvod Spojový seznam Start/End Vložení/odebrání prvku Kruhový spojový seznam Obousměrný seznam
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 43 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 44 / 50
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
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 45 / 50
Kruhový obousměrný seznam
Položka next posledního prvku odkazuje na první prvek.
Položka prev prvního prvku odkazuje na poslední prvek.
17 93 79 50
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 46 / 50
Část II
Část 2 – Zadání 8. domácího úkolu (HW8)
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 47 / 50
Zadání 8. domácího úkolu HW8
Téma: Fronta spojovým seznamem s řazením
Povinné zadání: 3b; Volitelné zadání: 4b; Bonusové zadání: není
Motivace: Práce s pamětí a datovými strukturami.
Cíl: Prohloubit si znalost paměťové reprezentace a dynamické alokace při práci se spojovým seznamem.
Zadání: https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/bab36prga/hw/hw8
Implementace spojového seznamu s vkládáním a odebíráním prvků.
Volitelné zadání rozšiřuje úlohu o vkládáním prvků s řazením.
Termín odevzdání: 11.05.2024, 23:59:59 PDT.
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 48 / 50
Diskutovaná témata
Shrnutí přednášky
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 49 / 50
Diskutovaná témata
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).
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 50 / 50
Kódovací příklad – Dynamická knihovna
Část IV
Appendix
Jan Faigl, 2024 BAB36PRGA – Přednáška 08: Spojové struktury 51 / 50

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.

```c
#ifndef __LIST_H__
#define __LIST_H__

void* create(void); // void* - konkrétní typ považujeme za vnitřní záležitost knihovny.
void release(void** list); // argument list musí odpovídat typu z volání create()!

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

void push(void *list, void *value);
void* pop(void *list);

#endif
```
list.h

Kódovací příklad – list.c 1/2

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

#include "list.h"

struct item {
   void *value;
   struct item *next;
};

struct list {
   struct item *root;
   bool (*isLess)(const void *a, const void *b);
};

enum { ERROR_MEM = 101 };
```
list.c

```c
void* create(void)
{
   struct list *ret = malloc(sizeof(struct list));
   if (!ret) {
      fprintf(stderr, "ERROR: cannot allocate memory
 for list!\n");
      exit(ERROR_MEM);
   }
   ret->root = NULL;
   ret->isLess = NULL;
   return ret;
}

void release(void** list)
{
   if (list && *list) {
      struct list *lst = (struct list*)*list;
      struct item *cur = lst->root;
      while (cur) {
         struct item *t = cur;
         cur = cur->next;
         free(t->value); //Případě specifická funkce
         free(t); // pro složený typ s ukazateli
      }
      free(*list);
      *list = NULL;
   }
}
```
list.c

- Při chybě alokace program končí voláním `exit()` s návratovou hodnout `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

```c
void setLess(void *list, bool (*isLess)(const void *a, const void *b))
{
   if (list) {
      struct list *lst = (struct list*)list;
      lst->isLess = isLess;
   }
}

static void* allocate_item(void* value)
{
   struct item *ret = malloc(sizeof(struct item));
   if (!ret) {
      fprintf(stderr, "ERROR: cannot allocate memory for list litem!\n");
      exit(ERROR_MEM);
   }
   ret->value = value;
   ret->next = NULL;
   return ret;
}
```
list.c

- Funkce `setLess()` nastavuje ukazatel na funkci.
- Funkce `allocate_item()` nastavuje `next` na `NULL`.
- Položka `value` je adresa dynamicky alokované paměti.

```c
void* pop(void *list)
{
   void *ret = NULL;
   struct list *lst = (struct list*)list;
   if (lst && lst->root) {
      ret = lst->root->value;
      struct item *p = lst->root;
      lst->root = lst->root->next;
      free(p);
   }
   return ret;
}
```
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

```c
static void pushLess(struct list *list, struct item *item)
{
   if (!list->root || list->isLess(item->value, list->root->
    value)) {
      item->next = list->root; // ok i pro root == NULL
      list->root = item;
      return;
   }

   struct item *prev = list->root;
   struct item *cur = prev->next; // list->root není NULL
   while (cur && !list->isLess(item->value, cur->value)) {
      prev = cur;
      cur = cur->next;
   }
   item->next = cur; //item bude poslední if cur == NULL
   prev->next = item;
}
```
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()`).

```c
void push(void *list, void *value)
{
   struct list *lst = (struct list*)list;
   if (!lst || !value) { // ukládání hodnot NULL
      return; // není podporováno (ignorujeme)
   }

   struct item *n = allocate_item(value);
#ifdef WITH_LESS // isLess pouze pokud WITH_LESS
   if (lst->isLess) {
      pushLess(lst, n);
      return;
   }
#endif
   if (lst->root) {
      n->next = lst->root;
   }
   lst->root = n;
}
```
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 zodpovědnost za správu paměti (smazání) seznamu, nebo následnému volání `pop()` a smazání řádku.
- Obsah seznamu vytiskneme voláním `pop()`.

Kódovací příklad – Volání rozhraní seznamu 2/3

```
$ clang -fPIC -c list.c
$ clang -shared -o liblist.so.1 list.o

$ clang -g -DWITH_LESS -fPIC -c list.c
$ clang -shared -o liblist.so.2 list.o

$ ln -s liblist.so.1 liblist.so

$ clang -g -L. -Wl,-rpath=. -llist -o demo demo.c

$ ldd demo
demo:
  liblist.so => ./liblist.so (0x80024d000)
  libc.so.7 => /lib/libc.so.7 (0x800251000)
```

- Vytvoříme dvě verze (bez/s `isLess()`) dynamicky linkované knihovny `liblist.so.1` a `liblist.so.2`.
- Konkrétní (aktuální verzi) odkážeme symbolickým odkazem (nebo jen nakopírujeme) jako soubor `liblist.so`.
- Program `demo.c` zkompilujeme s knihovnou `list`.
- Dynamicky linkované knihovny programu můžeme zobrazit, např. nástrojem `ldd`.

ldd – list dynamic object dependencies.

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

```
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"
```