

Prioritní fronta a příklad použití v úloze hledání nejkratších cest

Jan Faigl

Katedra počítačů
Fakulta elektrotechnická
České vysoké učení technické v Praze

Přednáška 11

B0B36PRP – Procedurální programování

Část I

Část 1 – Prioritní fronta (Halda)

Přehled témat

- Část 1 – Prioritní fronta (Halda)
 - Popis
 - Prioritní fronta spojovým seznamem
 - Prioritní fronta polem
 - Halda
- Část 2 – Příklad využití prioritní fronty v úloze hledání nejkratší cesty v grafu
 - Popis úlohy
 - Přístup řešení
 - Základní implementace (s lineárním vyhledáváním)
 - Urychlení hledání prioritní frontou (haldou)
- Část 3 – Zadání 10. domácího úkolu (HW10)

Prioritní fronta

- Fronta
 - První vložený prvek je první odebraný prvek *FIFO*
- Prioritní fronta
 - Některé prvky jsou při vyjmutí z fronty preferovány
 - Některé vložené objekty je potřeba obsloužit naléhavěji, např. fronta pacientů u lékaře.*
 - Operace **pop** odebírá z fronty prvek s nejvyšší prioritou
 - Vrchol fronty je prvek s nejvyšší prioritou.*
 - Alternativně též prvek s nejnižší hodnotou*
- Rozhraní prioritní fronty může být identické jako u běžné fronty, avšak specifikace upřesňuje chování dílčích metod

Prioritní fronta – specifikace rozhraní

- Prioritní frontu můžeme implementovat různě složitě a také s různými výpočetními nároky, např.
 - Polem nebo spojovým seznamem s modifikací funkcí **push()** nebo **pop()** a **peek()**

Základní implementace fronty viz předchozí přednáška.
 - S využitím pokročilé datové struktury pro efektivní vyhledání prioritního prvku (halda)
- Prioritní prvek může být ten s nejmenší hodnotou, pak
 - Metody **pop()** a **peek()** vrací nejmenší prvek dosud vložený do fronty
 - Prvky potřebujeme porovnávat, proto potřebujeme funkci pro porovnávání prvků

Můžeme realizovat například ukazatelem na funkci.

Prioritní fronta spojovým seznamem 1/4

- Ve funkci **push()** přidáme pouze nastavení priority

```
int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
{
    ...
    if (new_entry) { // fill the new_entry
        new_entry->value = value;
        new_entry->priority = priority;
    }
    ...
}

```

lec11/priority_queue.c

Prioritní fronta – příklad rozhraní

- Prioritní frontu můžeme realizovat spojovým seznamem, ve kterém upravíme funkce **peek()** a **pop()**

*Implementace vychází z lec10/queue_linked_list.h,
a lec10/queue_linked_list.c*

- Prvek fronty **queue_entry_t** rozšíříme o položku určující priority

Alternativně můžeme specifikovat funkce porovnání datových položek

```
typedef struct entry {
    void *value;
    int priority;
    struct entry *next;
} queue_entry_t;

typedef struct {
    queue_entry_t *head;
    queue_entry_t *end;
} queue_t;

void queue_init(queue_t **queue);
void queue_delete(queue_t **queue);
void queue_free(queue_t *queue);

int queue_push(void *value, int priority,
               queue_t *queue);
void* queue_pop(queue_t *queue);
_Bool queue_is_empty(const queue_t *queue);
void* queue_peek(const queue_t *queue);

```

lec11/priority_queue.h

- Rozhraní funkcí je identické frontě až na specifikaci priority při vložení prvku do fronty

Prioritní fronta spojovým seznamem 2/4

- **peek()** lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou

```
void* queue_peek(const queue_t *queue)
{
    void *ret = NULL;
    if (queue && queue->head) {
        ret = queue->head->value;
        int lowestPriority = queue->head->priority;
        queue_entry_t *cur = queue->head->next;
        while (cur != NULL) {
            if (lowestPriority > cur->priority) {
                lowestPriority = cur->priority;
                ret = cur->value;
            }
            cur = cur->next;
        }
    }
    return ret;
}

```

lec11/priority_queue.c

Prioritní fronta spojovým seznamem 3/4

- `pop()` lineárně prochází seznam a vybere prvek s nejnižší prioritou

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
    void *ret = NULL;
    if (queue->head) { // having at least one entry
        queue_entry_t* cur = queue->head->next;
        queue_entry_t* prev = queue->head;
        queue_entry_t* best = queue->head;
        queue_entry_t* bestPrev = NULL;
        while (cur) {
            if (cur->priority < best->priority) {
                best = cur; // update the entry with
                bestPrev = prev; // the lowest priority
            }
            prev = cur;
            cur = cur->next;
        }
        ...
    }
}
```

lec11/priority_queue.c

Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 1/2

- Inicializaci fronty provedeme polem textových řetězců a priorit

```
queue_t *queue;
queue_init(&queue);
char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
const int n = sizeof(priorities) / sizeof(int);
for (int i = 0; i < n; ++i) {
    int r = queue_push(values[i], priorities[i], queue);
    printf("Add %2i entry '%s' with priority '%i' to the queue\n",
        i, values[i], priorities[i]);
    if (r != QUEUE_OK) {
        fprintf(stderr, "Errro: Queue is full!\n");
        break;
    }
}
printf("\nPop the entries from the queue\n");
while(!queue_is_empty(queue)) {
    char* pv = (char*)queue_pop(queue);
    printf("%s\n", pv);
    // Do not call free(pv);
}
queue_delete(&queue);
```

lec11/demo-priority_queue.c

Prioritní fronta spojovým seznamem 4/4

- Navíc je nutné zajistit propojení seznamu po vyjmutí prvku

```
void* queue_pop(queue_t *queue)
{
    ...
    while (cur) {
        ...
    }
    if (bestPrev) { // linked the list after
        bestPrev->next = best->next; // best removal
    } else { // selected is the head
        queue->head = queue->head->next;
    }
    ret = best->value; //retrive the value
    if (queue->end == best) { //update the list end
        queue->end = bestPrev;
    }
    free(best); // release queue_entry_t
    if (queue->head == NULL) { // update end if last
        queue->end = NULL; // entry has been
        // popped
    }
}
return ret;
```

lec11/priority_queue.c

Prioritní fronta spojovým seznamem – příklad použití 2/2

- Hodnoty jsou neuspořádané a očekáváme jejich uspořádaný výpis při odebírání funkcí `pop()`

```
char *values[] = { "2nd", "4th", "1st", "5th", "3rd" };
int priorities[] = { 2, 4, 1, 5, 3 };
...
while(!queue_is_empty(queue)) {
    // Do not call free(pv);
}
```

- V tomto případě nevoláme `free()` neboť vložené textové řetězce jsou textovými literály *Narozdíl od příkladu v 11. přednášce!*

- Příklad výstupu (v tomto případě preferujeme nižší hodnoty):

```
make && ./demo-priority_queue
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue

Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th
```

lec11/priority_queue.h, lec11/priority_queue.c
lec11/demo-priority_queue.c

Prioritní fronta polem – rozhraní

- V případě implementace prioritní fronty polem můžeme využít jedno pole pro hodnoty a druhé pole pro uložení priority daného prvku

*Implementace vychází z `lec10/queue_array.h`,
`a lec10/queue_array.c`*

```
typedef struct {
    void **queue;    // Pole ukazatelů na jednotlivé prvky
    int *priorities; // Pole hodnot priorit jednotlivých prvků
    int count;
    int start;
    int end;
} queue_t;
```

- Další rozhraní (jména a argumenty funkcí) mohou zůstat identické s implementací spojovým seznamem

Viz snímek 8

Prioritní fronta polem 2/2

- Funkce `peek()` využívá lokální (static) funkce `getEntry()`

```
void* queue_peek(const queue_t *queue)
{
    return queue_is_empty(queue) ? NULL :
           queue->queue[getEntry(queue)];
}
```

- Ve funkci `pop()` musíme zajistit zaplnění místa, pokud je odebírán prvek z prostředka fronty (pole).

```
void* queue_pop(queue_t *queue)    Případnou mezeru zaplníme prvkem ze startu
{
    void *ret = NULL;
    int bestEntry = getEntry(queue);
    if (bestEntry >= 0) { // entry has been found
        ret = queue->queue[bestEntry];
        if (bestEntry != queue->start) { //replace the bestEntry by start
            queue->queue[bestEntry] = queue->queue[queue->start];
            queue->priorities[bestEntry] = queue->priorities[queue->start];
        }
        queue->start = (queue->start + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
        queue->count -= 1;
    }
    return ret;
}
```

Prioritní fronta polem 1/2

- Funkce `push()` je až na uložení priority identická s verzí bez priorit
- ```
int queue_push(void *value, int priority, queue_t *queue)
{
 ...
 queue->queue[queue->end] = value;
 queue->priorities[queue->end] = priority;
 ...
}
```

- Funkce `peek()` a `pop()` potřebují prvek s nejnižší prioritou, který nalezneme lineárním procházením pole priorit

```
static int getEntry(const queue_t *queue)
{
 int ret = -1;
 if (queue->count > 0) {
 for (int cur = queue->start, i = 0; i < queue->count; ++i) {
 if (ret == -1 ||
 (queue->priorities[ret] > queue->priorities[cur])) {
 ret = cur;
 }
 cur = (cur + 1) % MAX_QUEUE_SIZE;
 }
 }
 return ret;
}
```

*lec11/priority\_queue\_array.c*

## Prioritní fronta polem – příklad použití

- Použití je identické s implementací spojovým seznamem

```
make && ./demo-priority_queue_array
ccache clang -c priority_queue_array.c -O2 -o priority_queue_array.o
ccache clang priority_queue_array.o demo-priority_queue_array.o
-o demo-priority_queue_array
Add 0 entry '2nd' with priority '2' to the queue
Add 1 entry '4th' with priority '4' to the queue
Add 2 entry '1st' with priority '1' to the queue
Add 3 entry '5th' with priority '5' to the queue
Add 4 entry '3rd' with priority '3' to the queue
```

```
Pop the entries from the queue
1st
2nd
3rd
4th
5th
```

*lec11/priority\_queue\_array.h, lec11/priority\_queue\_array.c  
lec11/demo-priority\_queue\_array.c*

## Prioritní fronta spojovým seznamem nebo polem a výpočetní náročnost

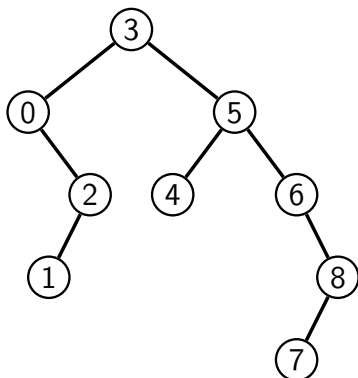
- V naivní implementaci prioritní fronty jsme zohlednění priority „odložili“ až do doby, kdy potřebujeme odebrat prvek z fronty
- Při odebrání (nebo vrácení) nejmenšího prvku v nejhorším případě musíme projít celý seznam
- To může být v řadě praktických aplikací nedostatečné a raději bychom chtěli „udržovat“ nejmenší prvek připravený
  - Můžeme to například udělat zavedením položky **head**, ve které bude aktuálně nejmenší vložený prvek do fronty
  - Prvek **head** aktualizujeme v metodě **push()** porovnáním hodnoty aktuálně vkládaného prvku
  - Tím zefektivníme operaci **peek()**
  - V případě odebrání nejmenšího prvku, však musíme frontu znovu projít a najít nový nejmenší prvek

Alternativně můžeme použít sofistikovanější datovou strukturu, která nám umožní efektivně udržovat hodnotu nejmenšího prvku a to jak při operaci vložení (**push()**) tak při operaci vyjmutí (**pop()**) prvku z prioritní fronty.

## Binární vyhledávací strom a halda

### Binární vyhledávací strom

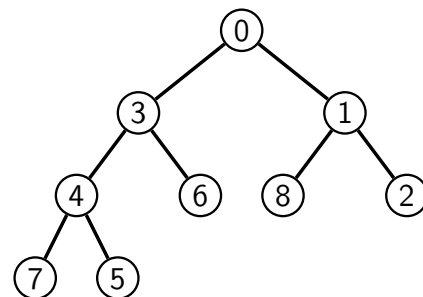
- Může obsahovat prázdná místa
- Hloubka stromu se může měnit
- Strom můžeme procházet



### Halda

- Lze využít binární plný strom  
*Hloubka stromu vždy  $\lfloor \log_2(n) \rfloor$*
- Kořen stromu je vždy prvek s nejmenší hodnotou
- Splňuje vlastnost haldy

*Heap property*



## Halda

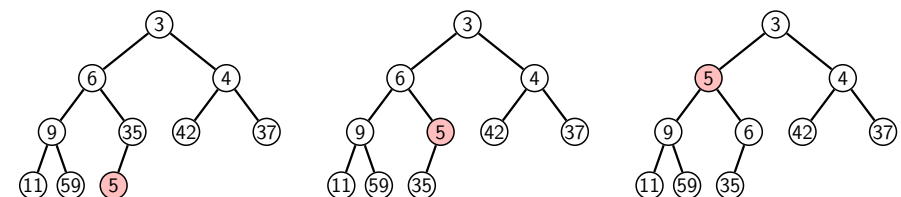
- Halda je dynamická datová struktura, která má „tvar“ binárního stromu a uspořádání prioritní fronty
- Každý prvek haldy obsahuje hodnotu a dva potomky, podobně jako binární strom
- Vlastnosti haldy:
  - Hodnota každého prvku je menší než hodnota libovolného potomka
  - Každá úroveň haldy je plná, kromě poslední úrovně, která je zaplněna zleva doprava
- Prvky mohou být odebrány pouze přes kořenový uzel
- Vlastnost haldy zajišťuje, že kořen je vždy nejmenší prvek
- Nejmenší prvek je tedy první hodnota, kterou z haldy odebereme

**Binární plný strom**

## Halda – přidání prvku **push()**

- Po každém provedení operace **push()** musí být splněny vlastnosti haldy
- Prvek přidáme na konec haldy, tj. na první volnou pozici (vlevo) na nejnižší úrovni haldy
- Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s nadřazeným prvkem (předkem)

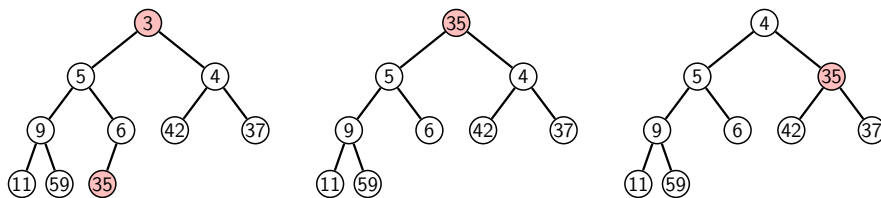
*V nejhorším případě prvek „probublá“ až do kořene stromu*



## Halda – odebrání prvku `pop()`

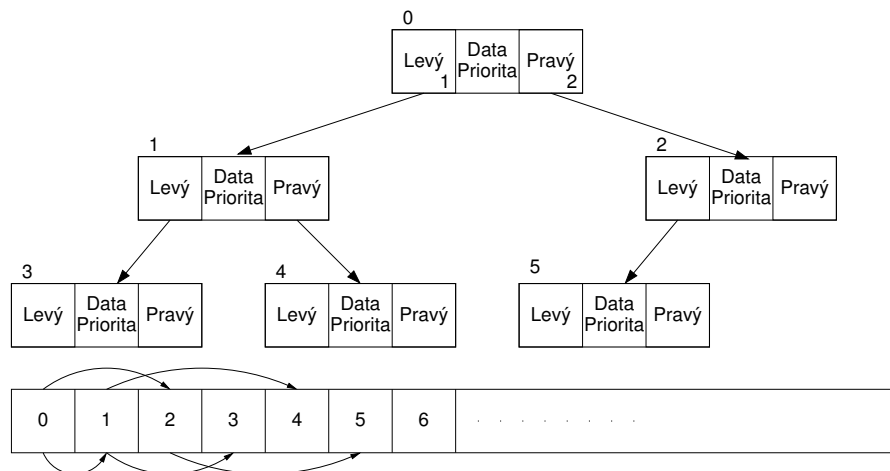
- Při operaci `pop()` odebereme kořen stromu
- Prázdné místo nahradíme nejpravějším listem (uzlem v poslední úrovni)
- Zkontrolujeme, zdali je splněna podmínka haldy, pokud ne, zaměníme prvek s potomkem a postup opakujeme

V nejhorším případě prvek „probublá“ až do listu stromu



## Reprezentace binárního stromu polem

- Pokud dopředu víme jaký bude maximální počet prvku v haldě, můžeme haldu (jako binární strom) reprezentovat v poli



## Prioritní fronta haldou

- Prvky ukládáme do haldy a při každém vložení / odebrání zajišťujeme, aby platily vlastnosti **haldy**
- Operace `peek()` má konstantní složitost a nezáleží na počtu prvků ve frontě, nejmenší prvek je vždy kořen

Asymptotická složitost v notaci velké  $O$  je  $O(1)$ .

- Operace `push()` a `pop()` udržují vlastnost haldy záměnou prvků až do hloubky stromu

Pro binární plný strom je hloubka stromu  $\log_2(n)$ , kde  $n$  je aktuální počet prvků ve stromu, odtud složitost operace  $O(\log(n))$ .

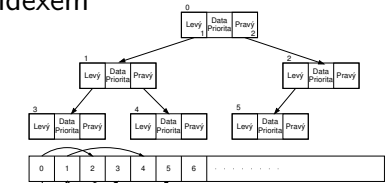
## Halda jako binárního strom reprezentovaný polem

- Pro definovaný maximální počet prvků v haldě, můžeme haldu (jako binární plný strom) reprezentovat polem
- Binární strom musí být tzv. **plný binární strom**, tj. všechny vrcholy na úrovni rovné hloubce stromu jsou co nejvíce vlevo
- Kořen stromu je první prvek s indexem 0, následníky prvku na pozici  $i$  lze v poli určit jako prvky s indexem

- levý následník:  $i_{lev} = 2i + 1$

- pravý následník:  $i_{prav} = 2i + 2$

Podobně lze odvodit vztah pro předchůdce



- Kořen stromu reprezentuje nejprioritnější prvek

(např. s nejmenší hodnotou nebo maximální prioritou)

## Operace vkládání a odebírání prvků

- I v případě reprezentace binárního stromu haldy polem pracují operace vkládání a odebírání identicky
  - Funkce `push()` přidá prvek jako poslední prvek zaplněného pole a následně propaguje prvek směrem nahoru až **je splněna vlastnost haldy**
  - Při odebrání prvku funkcí `pop()` je poslední prvek v poli umístěn na začátek pole (tj. kořen stromu) a propagován směrem dolů až **je splněna vlastnost haldy**
- Pouze dochází k vzájemnému zaměňování hodnot na pozicích v poli
- Hlavní výhodou reprezentace v poli je přístup do předem alokovaného bloku paměti
- Všechny prvky můžeme jednoduše projít v jedné smyčce
 

*Relativně jednoduše můžeme implementovat funkci ověřující, zdali naše implementace operací `push()` a `pop()` zachovávají podmínky haldy.*

- 

## Část II

### Část 2 – Příklad využití prioritní fronty v úloze hledání nejkratší cesty v grafu

## Část III

### Část 3 – Zadání 10. domácího úkolu (HW10)

## Zadání 10. domácího úkolu HW10

- 
- Termín odevzdání: 07.01.2017, 23:59:59 PST  
*PST – Pacific Standard Time*

## Shrnutí přednášky

## Diskutovaná témata

- Prioritní fronta
  - Příklad implementace spojovým seznamem  
`lec11/priority_queue-linked_list`
  - Příklad implementace polem  
`lec11/priority_queue-array`
- Halda - definice, vlastnosti a základní operace
- Repräsentace binárního plného stromu polem
- Prioritní fronta s haldou
- Hledání nejkratší cesty v grafu – využití prioritní fronty (resp. haldy)
- **Příště: Systémy pro správu verzí.**