STL: standardní knihovna šablon

Karel Richta a kol.

katedra počítačů FEL ČVUT v Praze

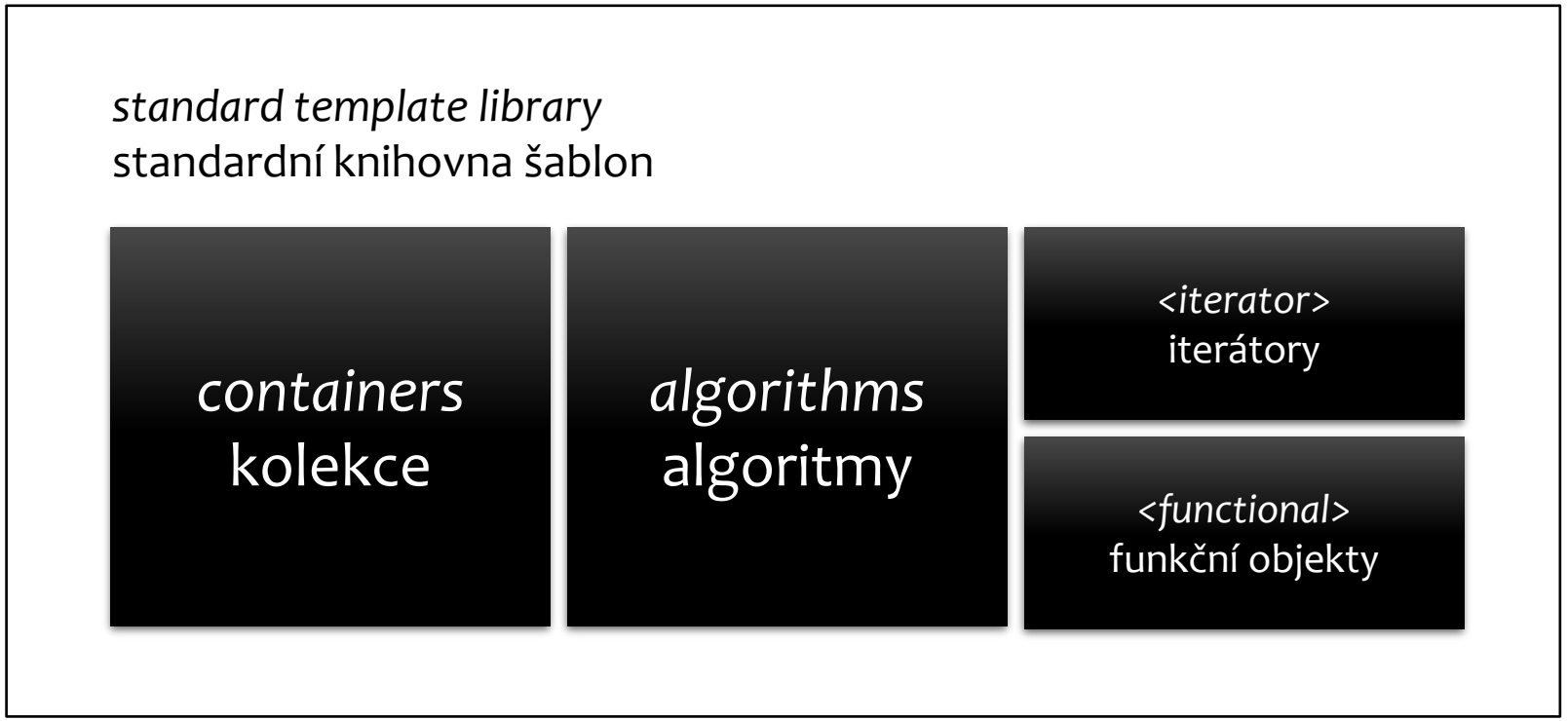
© Karel Richta, Martin Hořeňovský, Aleš Hrabalík

Programování v C++, B6B36PCC
11/2024, Lekce 10b

https://cw.fel.cvut.cz/wiki/courses/b6b36pcc/start

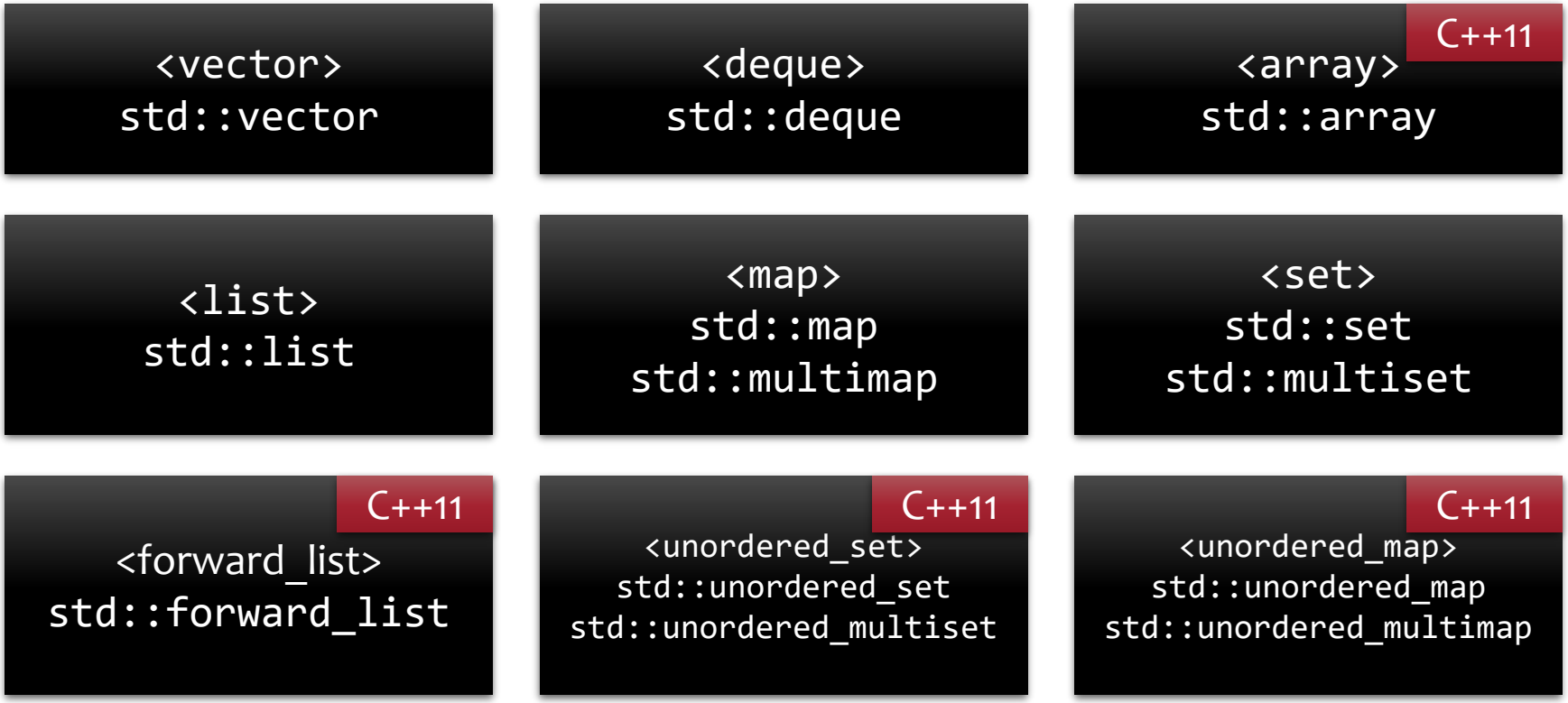
STL je...

- Standard template library. Knihovna šablon, která je součástí standardní knihovny C++.
- Skládá se především z *kolekcí* a *algoritmů*.



Kolekce

- `std::vector` je příklad kolekce z STL.
- STL obsahuje celkem 13 druhů kolekcí v 9 hlavičkových souborech.



std::vector

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>

int main() {
    std::vector<int> container;
    container.push_back(1);
    container.push_back(2);
    container.push_back(3);

    std::cout << "c[1]: " << container[1] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
c[1]: 2
size: 3
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

std::deque

```cpp
#include <iostream>
#include <deque>

int main() {
    std::deque<int> container;
    container.push_back(2);
    container.push_back(3);
    container.push_front(1);

    std::cout << "c[1]: " << container[1] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
c[1]: 2
size: 3
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

std::array

C++11

```
#include <iostream>
#include <array>

int main() {
    std::array<int, 3> container;
    container[0] = 1;
    container[1] = 2;
    container[2] = 3;

    std::cout << "c[1]: " << container[1] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
c[1]: 2
size: 3
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

std::list

```cpp
#include <iostream>
#include <list>

int main() {
    std::list<int> container;
    container.push_back(2);
    container.push_back(3);
    container.push_front(1);

    std::cout << "c[1]: " << container[1] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
c[1]: 2
size: 3
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

std::forward_list

C++11

```
#include <iostream>
#include <forward_list>

int main() {
    std::forward_list<int> container;
    container.push_front(3);
    container.push_front(2);
    container.push_front(1);

    std::cout << "c[1]: " << container[1] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
c[1]: 2
size: 3
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

Sekvenční kolekce (*sequence containers*)

- `std::vector` podporuje změnu velikosti na konci, tj. metody `push_back` a `pop_back`, a operaci `[]`.
- `std::deque` navíc podporuje změnu velikosti na začátku, tj. metody `push_front` a `pop_front`.
- `std::array` má pevně určenou velikost, proto jsou zakázány operace `push` a `pop`, lze ale používat operaci `[]`. (C++11)
- `std::list` je obousměrně zřetězený spojový seznam, je zakázána operace `[]`.
- `std::forward_list` je jednosměrně zřetězený spojový seznam. Je zakázána operace `[]`, metoda `push_back`, dokonce i metoda `size`. (C++11)
- Pokud jsou k dispozici, asymptotická složitost operací `[]`, `push`, `pop` a `size` je O(1).

std::set

```cpp
#include <iostream>
#include <set>

int main() {
    std::set<int> container;
    container.insert(3);
    container.insert(1);
    container.insert(2);
    container.insert(3);


    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";
    std::cout << "cnt3: " << container.count(3) << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
size: 3
cnt3: 1
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

std::multiset

```cpp
#include <iostream>
#include <set>

int main() {
    std::multiset<int> container;
    container.insert(3);
    container.insert(1);
    container.insert(2);
    container.insert(3);


    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";
    std::cout << "cnt3: " << container.count(3) << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem << "\n";
    }
}
```

```
size: 4
cnt3: 2
elem: 1
elem: 2
elem: 3
elem: 3
```

std::map

```cpp
#include <iostream>
#include <map>

int main() {
    std::map<int, std::string> container;
    container.insert(std::make_pair(3, "abc"));
    container.insert(std::make_pair(1, "def"));
    container.insert(std::make_pair(2, "ghi"));
    container.insert(std::make_pair(3, "jkl"));

    std::cout << "c[3]: " << container[3] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";
    std::cout << "cnt3: " << container.count(3) << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem.first;
        std::cout << " " << elem.second << "\n";
    }
}
```

```cpp
// namespace std
template<typename U, typename V>
struct pair { U first; V second; };
```

```
c[3]: abc
size: 3
cnt3: 1
elem: 1 def
elem: 2 ghi
elem: 3 abc
```

std::map

```cpp
#include <iostream>
#include <map>

int main() {
    std::map<int, std::string> container;
    container[3] = "abc";
    container[1] = "def";
    container[2] = "ghi";
    container[3] = "jkl";

    std::cout << "c[3]: " << container[3] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";
    std::cout << "cnt3: " << container.count(3) << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem.first;
        std::cout << " " << elem.second << "\n";
    }
}
```

```cpp
// namespace std
template<typename U, typename V>
struct pair { U first; V second; };
```

```
c[3]: jkl
size: 3
cnt3: 1
elem: 1 def
elem: 2 ghi
elem: 3 jkl
```

std::multimap

```
#include <iostream>
#include <map>

int main() {
    std::multimap<int, std::string> container;
    container.insert(std::make_pair(3, "abc"));
    container.insert(std::make_pair(1, "def"));
    container.insert(std::make_pair(2, "ghi"));
    container.insert(std::make_pair(3, "jkl"));

    std::cout << "c[3]: " << container[3] << "\n";
    std::cout << "size: " << container.size() << "\n";
    std::cout << "cnt3: " << container.count(3) << "\n";

    for (const auto& elem : container) {
        std::cout << "elem: " << elem.first;
        std::cout << " " << elem.second << "\n";
    }
}
```

```
// namespace std
template<typename U, typename V>
struct pair { U first; V second; };
```

```
c[3]: ---
size: 4
cnt3: 2
elem: 1 def
elem: 2 ghi
elem: 3 abc
elem: 3 jkl
```

Asociativní kolekce (*associative containers*)

- `std::set<T>` reprezentuje množinu s *prvky* typu `T`.
- `std::map<K, V>` ukládá *hodnoty* typu `V` s *klíči* typu `K`. Klíč s hodnotou je reprezentován objektem typu `std::pair<K, V>`.
- `std::multiset` umožňuje, aby se v kolekci opakovaly prvky.
- `std::multimap` umožňuje, aby se v kolekci opakovaly klíče.
- Metoda `count` určí, kolikrát se v kolekci vyskytuje daný prvek nebo klíč.
- Metoda `insert` vloží prvek nebo klíč s hodnotou do kolekce.
- Metoda `find` nalezne daný prvek nebo klíč.
- Prvky v `set`, `multiset` a klíče v `map`, `multimap` musí podporovat operaci `<`.
- Metody `count`, `insert` a `find` mají asymptotickou složitost O(log n), kde n je momentální velikost kolekce.

Procházení kolekcí

- Pracujeme-li postupně s každým prvkem, říkáme, že kolekci *procházíme*, nebo že přes kolekci *iterujeme*.

```
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

```
for (auto& elem : container) {                                  // C++11
      std::cout << "elem: " << elem << "\n";
}

for (auto i = begin(container); i != end(container); ++i) {     // C++11
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (auto i = container.begin(); i != container.end(); ++i) {   // C++11
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (std::vector<int>::iterator i = container.begin();          // C++03
            i != container.end(); ++i) {
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}
```

Procházení kolekcí

- Pokud prvky potřebujeme jenom číst, ne měnit, můžeme použít `const`, `cbegin` a `cend`, `const_iterator`.

```
elem: 1
elem: 2
elem: 3
```

```
for (const auto& elem : container) {                                    // C++11
      std::cout << "elem: " << elem << "\n";
}

for (auto i = cbegin(container); i != cend(container); ++i) {           // C++14
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (auto i = container.cbegin(); i != container.cend(); ++i) {         // C++11
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (std::vector<int>::const_iterator i = container.begin();            // C++03
            i != container.end(); ++i) {
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}
```

Procházení kolekcí

- Pokud prvky potřebujeme v opačném pořadí, použijeme `rbegin` a `rend`, případně `reverse_iterator`.

```
elem: 3
elem: 2
elem: 1
```

```
for (auto i = rbegin(container); i != rend(container); ++i) {   // C++14
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (auto i = container.rbegin(); i != container.rend(); ++i) { // C++11
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}

for (std::vector<int>::reverse_iterator i = container.rbegin(); // C++03
             i != container.rend(); ++i) {
      std::cout << "elem: " << *i << "\n";
}
```

Algoritmy

- Algoritmy v STL pracují s daty prostřednictvím *iterátorů*.
- Jak získat iterátory?
  - Z kolekcí, jako návratovou hodnotu metod `begin`, `end`, `cbegin`, `cend`, `rbegin`, `rend`, `crbegin`, `crend`, `find`, `insert`, `lower_bound`, `upper_bound`, `equal_range`
  - Jinak, viz. `std::back_inserter`, `std::front_inserter`, `std::inserter`, `std::istream_iterator`, `std::ostream_iterator`
- Sekvence dat se reprezentuje pomocí dvou iterátorů, počátečního a konečného.
  - Počáteční iterátor ukazuje **na první** prvek.
  - Konečný iterátor ukazuje **za poslední** prvek.

std::sort (std::stable_sort)

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v));

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
```

std::accumulate

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    auto r = std::accumulate(begin(v), end(v), 0);

    std::cout << "soucet: " << r << "\n";
}
```

```
soucet: 45
```

std::rotate

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
    });

    std::rotate(begin(v), begin(v) + 5, end(v));

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
5 6 7 8 9 0 1 2 3 4
```

std::unique

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        1, 5, 3, 3, 4, 0, 2, 1, 2, 4
    });

    std::sort(begin(v), end(v));                // 0 1 1 2 2 3 3 4 4 5
    auto u = std::unique(begin(v), end(v)); // 0 1 2 3 4 5 3 4 4 5
    v.erase(u, end(v));                         // 0 1 2 3 4 5

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
0 1 2 3 4 5
```

std::shuffle

C++11

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <random>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
    });

    std::random_device rd;
    std::mt19937 re(rd());
    std::shuffle(begin(v), end(v), re);

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
6 5 3 9 7 4 0 2 8 1
```

Úprava funkcionality `std::sort`

- Algoritmus `std::sort` určuje správné pořadí prvků pomocí operace <. Prvky kolekce jsou seřazeny v *neklesajícím* pořadí.
- Co když je ale chceme naopak v *nerostoucím* pořadí? Potřebujeme, aby `std::sort` používal místo operace < operaci >.
- Pomocí třetího, nepovinného parametru můžeme poskytnout vlastní operaci, kterou `std::sort` použije.
- Operaci můžeme předat čtyřmi způsoby:
  - Předáme ukazatel na funkci.
  - Předáme funkční objekt.
  - Předáme jiné iterátory.
  - Předáme lambda funkci.

- Jak seřadit prvky v nerostoucím pořadí?
- Možnost 1: Předáme *ukazatel na funkci* comp.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

bool comp(int a, int b) {
    return a > b;
}

int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v), &comp);

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
```

- Jak seřadit prvky v nerostoucím pořadí?
- Možnost 2a: Předáme *instanci funkčního objektu* Comp.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

struct Comp {
    bool operator()(int a, int b) { return a > b; }
};

int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v), Comp());

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
```

- Jak seřadit prvky v nerostoucím pořadí?
- Možnost 2b: Předáme *instanci funkčního objektu* `std::greater`.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <functional>



int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v), std::greater<int>());

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
```

- Jak seřadit prvky v nerostoucím pořadí?
- Možnost 3: Předáme jiné iterátory.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
```

```
int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(rbegin(v), rend(v));

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
```

- Jak seřadit prvky v nerostoucím pořadí?
- Možnost 4: Předáme *lambda funkci*.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
```

```
int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v), [](int a, int b){ return a > b; });

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
```

- Jiný příklad: Uspořádej kolekci tak, aby se v ní nacházely nejdříve liché, potom sudé prvky.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>



int main() {
    std::vector<int> v ({
        6, 5, 3, 9, 7, 4, 0, 2, 8, 1
    });

    std::sort(begin(v), end(v), [](int a, int b){
        return (a & 1) > (b & 1);
    });

    for (const auto& elem : v) {
        std::cout << elem << " ";
    }
}
```

```
5 3 9 7 1 6 4 0 2 8
```

Lambda funkce

C++11

- Speciální syntaxe, která umožňuje vytvořit funkční objekt.
- Do lambda funkce vstupují data dvěma způsoby:
  - Standardními parametry. Uvádíme je klasicky v kulatých závorkách a s typem.
  - Proměnné, které jsou k dispozici v místě vytvoření lambda funkce, můžeme použít uvnitř těla. Mechanismus, který to umožňuje, se nazývá *zachycení* (capture). Zachycené proměnné uvádíme v hranatých závorkách a bez typu.

```
int dniVMesici = 31;

auto prictiMesic = [dniVMesici] (int cisloDne) {
    return cisloDne + dniVMesici;
};

dniVMesici = 40;
nejakeCisloDne = prictiMesic(nejakeCisloDne); // přičte 31
```

Zachycení referencí

C++11

- Výchozí způsob zachycení je hodnotou; zachycená proměnná je zkopírována.
  - Takováto proměnná se také nesmí uvnitř lambdy měnit, pokud neurčíme, že chceme lambdu s proměnným stavem (`mutable`).
- Pokud chceme změnit hodnotu zachycené proměnné, musíme ji *zachytit referencí*. Před její název přidáme symbol &.

```
int i = 0; int j = 0;

auto foo = [i, &j](int add) mutable {
    i += add; // neovlivní vnější i, toto i je kopie
    j += add; // ovlivní vnější j, toto j je reference
};

i = 2; j = 2;
foo(3);
std::cout << i << ", " << j << "\n"; // 2, 5
```

Úprava funkcionality `std::accumulate`

- Algoritmus `std::accumulate` provádí nad prvky součet (operaci +).
- Tuto operaci můžeme změnit čtvrtým, nepovinným parametrem. Nabízí se např. upravit funkcionalitu tak, aby se provedl součin, příp. zřetězení kolekce řetězců.
- Nesmíme ale zapomenout na třetí parametr, který slouží jako první mezivýsledek. Když mezivýsledek nemáme, musíme použít tzv. neutrální hodnotu pro danou operaci.
  - Neutrální hodnota pro součet je `0`.
  - Neutrální hodnota pro součin je `1`.
  - Neutrální hodnota pro zřetězení je `""`.

- Příklad: Zjisti součin prvků v kolekci.

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main() {
    std::vector<int> v ({
        9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1
    });

    auto r = std::accumulate(begin(v), end(v), 1, [](int a, int b){
        return a * b;
    });

    std::cout << "soucin: " << r << "\n";
}
```

Pozor, neutrální hodnota pro součin je 1, ne 0.

```
soucin: 362880
```

Další algoritmy

`std::count`	spočti počet výskytů
`std::mismatch`	najdi první prvek, kde se dvě posloupnosti liší
`std::equal`	zjisti, zda mají dvě posloupnosti shodné prvky
`std::find`	najdi prvek
`std::copy`	zkopíruj posloupnost
`std::fill`	vyplň posloupnost daným prvkem
`std::transform`	proveď operaci nad posloupností
`std::generate`	ulož výsledky opakovaného volání funkce do posloupnosti
`std::reverse`	obrať posloupnost
`std::nth_element`	na n-tou pozici umísti prvek, který by tam byl po seřazení
`std::lower_bound*`	najdi první prvek, který je větší, nebo roven hodnotě
`std::upper_bound*`	najdi první prvek, který je větší, než hodnota
`std::equal_range*`	najdi podposloupnost, jejíž prvky jsou rovny hodnotě

více informací: http://en.cppreference.com/w/cpp/algorithm *pole musí být seřazené

Děkuji za pozornost.

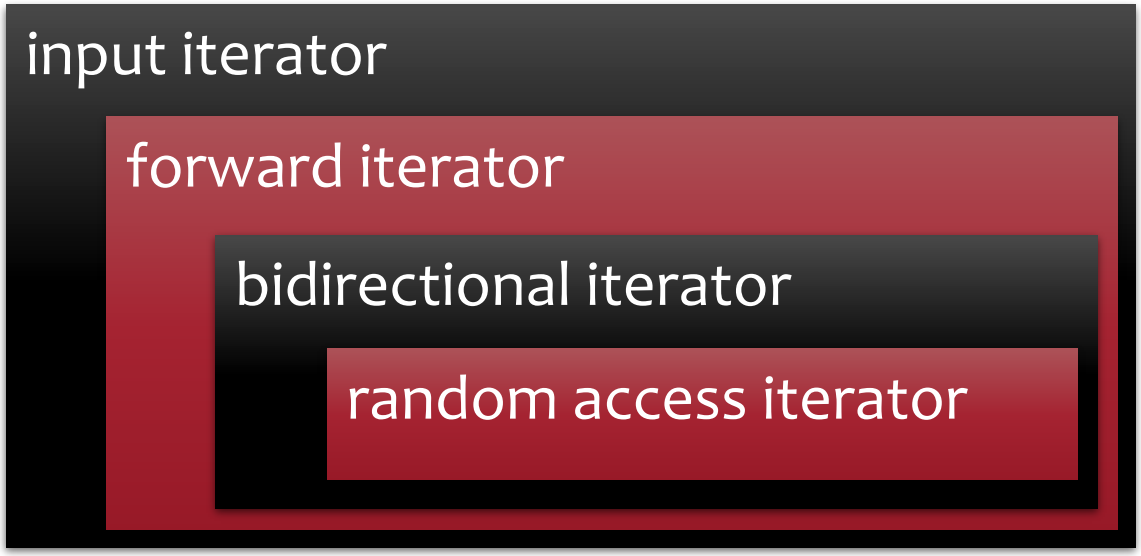
Hashující kolekce (*unordered containers*)

C++11

- Kolekce `std::unordered_set`, `std::unordered_multiset`, `std::unordered_map` a `std::unordered_multimap` používají *hashování*.
- Jejich metody `count`, `insert` a `find` mají průměrnou asymptotickou složitost O(1).
- Prvky nebo klíče musí podporovat hashování, tj. musí existovat odpovídající specializace šablony `std::hash`. Specializace šablon je nad rámec této přednášky. Více informací a příklady: http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/hash
- Vestavěné typy (`int`, `double`, apod.) a typy ze standardní knihovny (např. `std::string`) lze jako prvky nebo klíče používat bez problémů, odpovídající specializace `std::hash` jsou součástí standardní knihovny.

Co je to iterátor?

- Aby byl nějaký objekt považován za iterátor, musí podporovat jisté operace. Iterátor je *koncept*.
- STL rozeznává více druhů iterátorů. Nejmocnější je *random access iterator*, *iterátor s náhodným přístupem*.



Co je to iterátor? (podrobněji)

- Aby byl nějaký objekt považován za iterátor, musí podporovat jisté operace. Iterátor je *koncept*.
- STL rozeznává více druhů iterátorů. Používá pojmy *input iterator*, *output iterator*, *forward iterator*, *bidirectional iterator*, *random access iterator*. Pro představu (a velmi zhruba):
  - Objekt `i`, který umí `++i` a číst `*i`, je *input iterator*.
  - Objekt `i`, který umí `++i` a zapsat `*i`, je *output iterator*.
  - Input iterator `i`, který také umí `i++` a inkrementací nezpůsobí zneplatnění předešlých dat, je *forward iterator*.
  - Forward iterator `i`, který také umí `--i` a `i--` je *bidirectional iterator*.
  - Bidirectional iterator `i`, který také umí `i += N`, je *random access iterator*.
  - Input iterator, který je také output iterator, se nazývá *mutable*.

Iterátory s náhodným přístupem

- Objekt `i` odpovídá konceptu *iterátor s náhodným přístupem*, pokud:
  - Podporuje operace `++i`, `--i`, `i++`, `i--`, `*i`, `i->`
  - Podporuje operace `i[N]`, `i+=N`, `i-=N`, `i+N`, `i-N`, `N+i`, kde `N` je celé číslo
  - Podporuje operace `==`, `!=`, `<`, `>`, `<=`, `>=`
  - Všechny tyto operace se chovají rozumně, viz. http://en.cppreference.com/w/cpp/iterator
- Všimněte si vztahu mezi iterátory a ukazateli:
  - Pokud lze nějaká operace provést s ukazatelem, tak lze také provést s iterátorem s náhodným přístupem a bude fungovat dle očekávání.
  - **Iterátor s náhodným přístupem** tedy můžeme považovat za **zobecněný ukazatel.** Můžeme mluvit o tom, že iterátor na něco ukazuje.
  - Navíc, **ukazatele jsou iterátory s náhodným přístupem.** Objekty typu `int*`, `char**`, atd., splňují všechny požadavky.