(Średnio) zaawansowane programowanie w C++ (ZPR)

Wykład 10 - szablony, trejty, STL

Robert Nowak

23Z

Szablon (powtórzenie) - pojęcia niezależnie od typu

- polimorfizm: statyczny (szablony), dynamiczny (f. wirtualne)
- kod nie jest kompilowany, jeżeli nie został użyty
- brak narzutów czasowych w czasie wykonania
- obsługuje typy wbudowane
- definicja (a nie deklaracja) ma być widoczna w miejscu użycia

nagłówek
`nazwa.hpp`
	`template<typename T> class Foo {`
	`  /* Definicja klasy i metod inline */`
	`};`
	`#include "kontener.tpp"`

impl. szablonu
`nazwa.tpp`
	`template<typename T> T& Foo<T>::get(int index) {`
	`  /* kod szablonu */`
	`}`

implementacja `nazwa.cpp`	`/* kod, który nie jest szablonem */`

Listy inicjujące (C++11) - przykład szablonu

```
int tab[] = { 2, 3, 5, 8 }; //poprawne w C++03
struct X {string s; int i; };
X tabX[] = { { "A", 2}, {"B", 3} }; //poprawne w C++03

struct Foo {
  Foo(std::initializer_list<int> val);
};
Foo f = { 2, 3, 5, 8 }; //obiekt inicjowany listą wartości

void fun(std::initializer_list<double> val) {
  for (double x : val)
    std::cout << x << std::endl; //print all values
}
fun({2.8, 4.7, 9.12}); //przekazanie listy wartości do funkcji
```

TMP - template metaprogramming

Konkretyzacja i specjalizacja szablonu równoważna Maszynie Turinga

```
/* Przykład - funkcja obliczająca silnię w TMP */
template<unsigned n>
struct Silnia {
  static const int value = n*Silnia<n-1>::value;
};
template<> struct Silnia<0> {
  static const int value = 1;
};
cout << Silnia<0>::value << endl; //1
cout << Silnia<5>::value << endl; //120
```

TMP - template metaprogramming (2)

```
//szablon oblicza potęgę o wykładniku całkowitym
template <unsigned n> double int_power(double x) {
  return int_power<2>( int_power<n/2>(x) )*int_power<n%2>(x);
}
//specjalizacja dla kwadratu
template <> double int_power<2>(double x) { return x*x; }

template <> double int_power<1>(double x) { return x; }

template <> double int_power<0>(double x) { return 1.0; }
```

Przykład:

$$x^{35} = x^{32+2+1} = ((((x^2)^2)^2)^2)^2 * (x^2) * x$$

Szablony kontra hierarchia klas

Używaj szablonów (a nie hierarchii klas) gdy:

- nie można utworzyć wspólnej klasy bazowej, ważne są typy wbudowane
- bardzo ważna jest efektywność
- akceptowalna powtórna kompilacja przy nowym typie

W przeciwnym wypadku: hierarchia klas (funkcje wirtualne)

Szablon czy hierarchia klas (2)

- szablony: typ obiektu nie modyfikuje działania klasy
- funkcje wirtualne: typ obiektu modyfikuje działanie klasy

Działanie stosu nie jest zależne od typu

```
template<typename T> class Stack {
  void push(const T& t);
  T pop();
  /* ...  */
};
```

```
class Stack {
  void push(Base* b);
  Base* pop();
  /* ...  */
};
```

Szablon czy hierarchia klas (3)

- szablony: typ obiektu nie modyfikuje działania klasy
- funkcje wirtualne: typ obiektu modyfikuje działanie klasy

Działanie figury jest zależne od jej typu

```
template<class T> class Figure {
  double getArea();
  /* ...  */
};
template<> class Figure<Rect> {
  double getArea() {
    return t.getW()*t.getH();
  }
  /* ...  */
};
```

```
class Figure {
  virtual double getArea() = 0;
  /* ...  */
};

class Rect : public Figure {
  virtual double getArea() {
    return getW() * getH();
  }
};
```

Problemy przy stosowaniu szablonów

Implementacja i testowanie: kod nie jest kompilowany

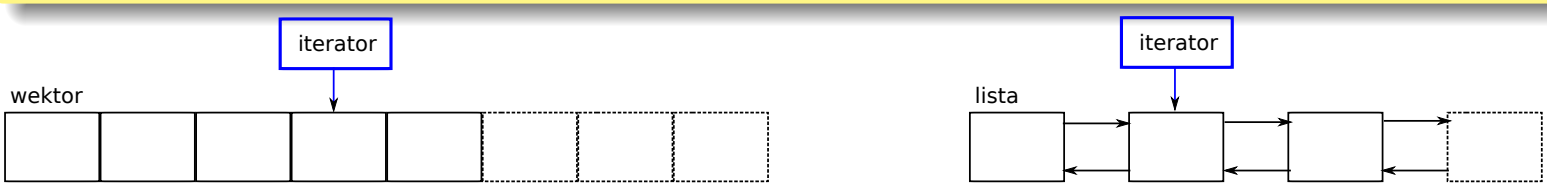
- utworzyć algorytm lub kontener dla konkretnego typu (np. int)
- przetestować go
- przekształcić go w szablon
- wygenerować i przetestować kilka różnych typów

Używanie:

- brak mechanizmów rozróżniania typu w szablonach
- nieczytelne komunikaty o błędach

Iterator (powtórzenie), STL kategorie interatorów

Iterator - wzorzec projektowy, obiekt pośredniczy przy dostępie do elementów kolekcji.



- input_iterator, output_iterator
  - przesuwanie się do przodu o jeden element (inkrementacja)
  - jednokrotny odczyt (`input_iterator`) lub zapis (`output_iterator`) wartości wskazywanej
- forward_iterator
  - przesuwanie się do przodu o jeden element
  - wielokrotny odczyt i zapis wartości wskazywanej przez iterator
- bidirectional_iterator
  - j.w oraz przesuwanie się do tyłu o jeden element
- random_access_iterator
  - j.w oraz przesuwanie się do przodu i do tyłu o 'n' elementów

Wykorzystanie „trejtów” (trait) do informacji o typie

```
//Przykład funkcji, która wykorzystuje informację o typie
template<typename I> void advance(I& iter, int d) {
  if(/* iter jest typu random_access */)
    iter += d;
  else {
    if( d >= 0) { while (d--) ++iter; }
    else { while (d++) --iter; }
  }
}
//Klasy do rozróżniania kategorii iteratora
struct input_iterator_tag {};
struct output_iterator_tag {};
struct forward_iterator_tag : public input_iterator_tag {};
struct bidirectional_iterator_tag : public forward_iterator_tag {};
struct random_access_iterator_tag : public bidirectional_iterator_tag {};
```

Wykorzystanie „trejtów” (trait) do informacji o typie (2)

```
template</* ...  */> class vector {
public:
  class iterator {
  public:
    using iterator_category = random_access_iterator_tag; //istotne!
};
template</* ...  */> class list {
public:
  class iterator {
  public:
    using iterator_category = bidirectional_iterator_tag;
};
//odczyt kategorii
template<typename I> struct iterator_traits {
  using iterator_category = I::iterator_category;
};
```

Wykorzystanie „trejtów” (trait) do informacji o typie (3)

```
template<typename I>
inline void doAdvance(I& it, int d, random_access_iterator_tag) {
  it += d;
}
template<typename I>
inline void doAdvance(I& iter, int d, bidirectinal_iterator_tag) {
  if( d >= 0) { while (d--) ++it; }
  else { while (d++) --it; }
}
template<typename I>
inline void doAdvance(I& it, Dist d, input_iterator_tag) {
  if(d < 0) throw out_of_range(/* ...  */);
  while (d--) ++it;
}
//Implementacja - dodatkowy parametr określa typ iteratora
template<typename I> void advance(I& it, int d) {
  doAdvance(it, d, iterator_traits<I>::iterator_category() )
}
```

Trejty dostarczane przez bibliotekę standardową

iterator_traits	
char_traits	eq, lt, int_type
numeric_limits	min, max, quiet_NaN, infinity, is_signed, is_integer, digits, digits10, has_infinity, has_quiet_NaN

```
std::numeric_limits<double>::min() //Zamiast __DBL_MIN__
std::numeric_limits<int>::min() //Zamiast INT_MIN
!(x == x); //badanie czy liczba jest nan
x == std::numeric_limits<double>::quiet_NaN(); //ŹLE!

template<typename T> T findMax(const T const * data, const size_t num) {
  T largest = std::numeric_limits< T >::min(); //inicjacja
  for (unsigned int i=0; i < num; ++i)
    if (data[i] > largest) largest = data[i];
  return largest;
}
```

<type_traits> (boost::type_traits), ok. 50 trejtów

```
std::cout << std::is_void<void>::value; //true
std::cout << std::is_void<int>::value; //false
```

podstawowe	is_void, is_null_pointer, is_integral, is_floating_point, is_array, is_enum, is_union, is_class, is_function, is_pointer, is_lvalue_reference, is_rvalue_reference, ...
kompozycja	is_fundamental, is_arithmetic, is_object, ...
właściwości	is_const, is_volatile, is_pod, is_empty, ...
relacje	is_base_of, is_convertible, is_same
pomocnicze	is_constructible, is_default_constructible, ...

nieczytelne komunikaty o błędach

```
std::set<Foo> s;//Klasa Foo nie dostarcza operatora '<'
s.insert( Foo(3) ); //ta linia jest oznaczana jako błędna
```

```
/usr/include/c++/4.2/bits/stl_function.h:
In member function 'bool std::less<_Tp>::operator()(const _Tp&, const _Tp&) const
[with _Tp = Foo']:
/usr/include/c++/4.2/bits/stl_tree.h:980: instantiated from'
std::pair<typename std::_Rb_tree<_Key, _Val, _KeyOfValue, _Compare, _Alloc>::iterator, bool>
std::_Rb_tree<_Key, _Val, _KeyOfValue, _Compare,_Alloc>::_M_insert_unique(const _Val&)
[with _Key = Foo, _Val = Foo, _KeyOfValue = std::_Identity<Foo>, _Compare = std::less<Foo>,
     _Alloc = std::allocator<Foo'>]
/usr/include/c++/4.2/bits/stl_set.h:307: instantiated from'
std::pair<typename std::_Rb_tree<_Key, _Key, std::_Identity<_Key>, _Compare,
typename _Alloc::rebind<_Key>::other>::const_iterator, bool>
std::set<_Key, _Compare, _Alloc>::insert(const _Key&)
[with _Key = Foo, _Compare = std::less<Foo>, _Alloc = std::allocator<Foo'>]
/usr/include/c++/4.2/bits/stl_function.h:227: error:
no match for 'operator'< in '__x < '__y
```

Rozwiązanie: asercja czasu kompilacji (od C++11)

```
static_assert( predicate, message );
static_assert( predicate );
```

pozwala poprawnie wskazywać błędny kod

Koncepty (dawniej Boost.ConceptCheck)

concepts (od C++20) - rozwinięcie warunków dla szablonów

```
BOOST_CONCEPT_ASSERT(( koncepcja )); //podwójne nawiasy
```

podstawowe	ConvertibleConcept AssignableConcept EqualityComparableConcept LessThanComparableConcept ...
iteratory	BidirectionalIteratorConcept RandomAccessIteratorConcept ...
funktory	GeneratorConcept UnaryFunctionConcept ...
kontenery	ForwardContainerConcept RandomAccessContainerConcept ...

```
//Przykład - typ musi dostarczać operatora porównania
template<typename T>
void funkcja(T t) {
  BOOST_CONCEPT_ASSERT(( LessThanComparableConcept<T>));
  /* ...  */
}
```

Boost.ConceptCheck - definiowanie własnych wymagań

```
//przykład, wymagany operator== i metody get i set
template<typename T> struct MyConcept : boost::EqualityComparable<T> {
  BOOST_CONCEPT_USAGE(MyConcept) {
    t.get(); //musi mieć metodę get
    t.set(1); //musi mieć metodę set z argumentem int
  }
  T t;
};
template<typename T> void fxx(T t) { //Przykład użycia
  BOOST_CONCEPT_ASSERT((MyConcept<T>)); //przykład użycia
}
fxx(3);//linia 48, użycie szablonu dla typu, który nie spełnia wymagań
pr.cpp: In member function ‘void MyConcept<T>::constraints() [wi ...
...
pr.cpp:48: instantiated from ‘void fxx(T) [with T = int’]
pr.cpp:40: error: request for member ‘’get in ‘((MyConcept<int>*)...
pr.cpp:41: error: request for member ‘’set in ‘((MyConcept<int>*)...
```

Curiously recurring template pattern - efekt jak f. wirtualne

```
template<typename T> struct base {
  //wybór w czasie kompilacji!
  int calc { return static_cast<T*>(this)->doCalc(); }
};
struct derived : base<derived> { //dziedziczy i jest parametrem
  int doCalc() { /* implementacja */ }
};
//Przykład użycia (Barton-Nackman trick)
template<typename T> struct less_comparable {
  friend bool operator>=(const T& a, const T& b) { return !(a<b); }
  friend bool operator>(const T& a, const T& b) { return b<a; }
  friend bool operator<=(const T& a, const T& b) { return !(b<a); }
};
class value_type : less_comparable<value_type> { //ma:  <, <=, >, >=
public:
  bool operator<(const value_type& v) { /* ...  */ }
};
value_type a, b;
a > b; //szablon klasy bazowej generuje odpowiednie funkcje
```

szablony jako parametry szablonów

```
template<typename T, typename Contener = std::deque<T> > class Stack {
public:
  class EmptyStackException : public std::exception {};
  bool empty() const { return c.empty(); }
  T pop() {
    if( empty() ) throw EmptyStackException();
    T ret = c.back();
    c.pop_back();
    return ret;
  }
  void push(const T& t) { c.push_back(t); }
private:
  Contener c;
};
Stack<int> s; //wykorzystuje std::queue
Stack<int, std::list<int> > s2; //wykorzystuje std::list
Stack<int, std::list<std::string> > s2; //Błąd!
```

szablony jako parametry szablonów (2)

```
template<typename T,
         template <typename E, typename A> class Contener = std::deque>
class Stack {
public:
  class EmptyStackException : public std::exception {};
  bool empty() const { return c.empty(); }
  T pop() {
    if( empty() ) throw EmptyStackException();
    T ret = c.back();
    c.pop_back();
    return ret;
  }
  void push(const T& t) { c.push_back(t); }
private:
  Contener<T, std::allocator<T> > c;
};
Stack<int> s; //wykorzystuje std::queue
Stack<int, std::list > s2; //wykorzystuje std::list
```

Biblioteka STL (standardowa w C++ od 1997)

Skład:

- kontenery
- iteratory
- algorytmy
- funktory
- adaptery
- alokatory

Cechy:

- wykorzystuje mechanizm szablonów
  - kod wielokrotnego użycia
  - można stosować do typów wbudowanych
- wykorzystuje wzorzec iteratora (zmniejsza liczbę algorytmów)
- bezpieczna w aplikacjach wielowątkowych
- bardzo efektywna

Omówiona wcześniej na ZPR

Kontenery - lista kolekcji standardowych

sekwencyjne	**basic_string**	jednowymiarowa tablica
	vector	jednowymiarowa tablica
	list	lista dwukierunkowa
	deque	kolejka o dwu końcach
asocjacyjne	**set**	usuwa elementy równoważne
	map	tablica asocjacyjna (słownik)
	multiset	nie usuwa el. równoważnych
	multimap	klucz może wyst. wielokrotnie
haszujące	**unordered_set**	zbiór
	unordered_map	słownik
	...multiset	wielozbiór
	...multimap	wielosłownik

Adaptery

adaptery	
queue<T>	kolejka
priority_queue<T>	kolejka priorytetowa
stack<T>	stos

Inny podział kontenerów:

bazujące na tablicach: vector, basic_string, deque

bazujące na węzłach: list, set, map, multiset, multimap, unorderd_set, unorderd_map, unorderd_multiset, unorderd_multimap

Podstawowe cechy kontenerów

operuje na kopiach, kontener przechowuje kopie elementów
obiekty przechowywane w kontenerach:

- powinny mieć publiczny konstruktor kopiujący
- powinny mieć publiczny operator przypisania

gdy kopiowanie kosztowne: przechowywanie wskaźników, std::unique_ptr, std::shared_ptr, std::ref

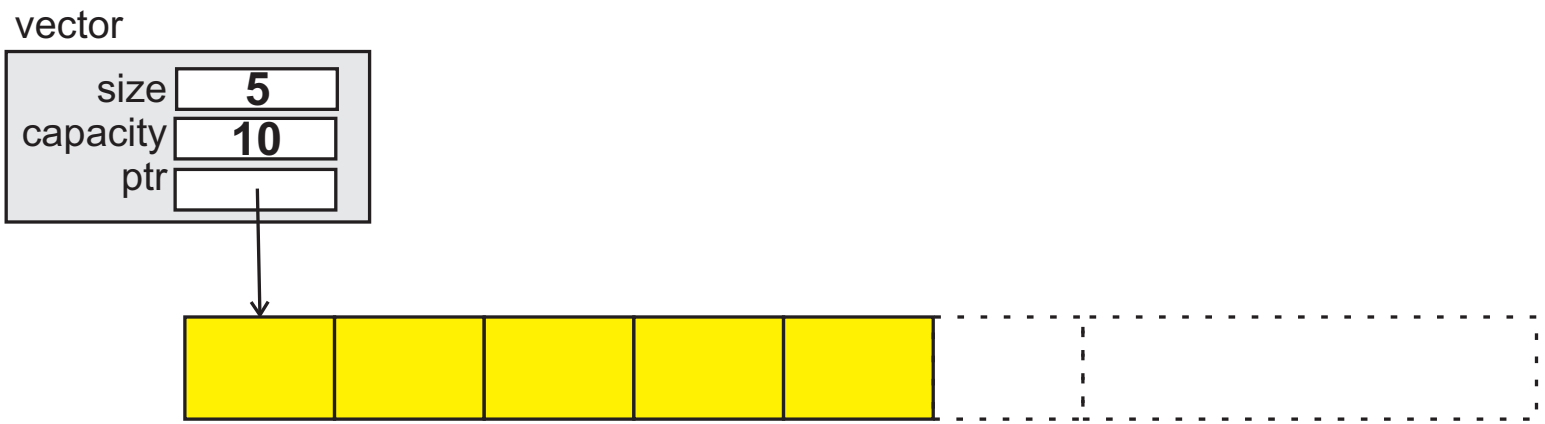
współbieżność:

bezpiecznie czytanie	wiele wątków może równocześnie czytać z kontenera
bezpieczne pisanie do różnych kontenerów	różne wątki mogą równocześnie pisać do różnych kontenerów

std::vector (#include <vector>) - omówiony wcześniej

```
 //Deklaracja
template<class T, class A=allocator<T> > class std::vector;
 //Najważniejsze metody dostępu
 reference operator[](size_type n);
 reference at(size_type n);
 front(); back();
 //Modyfikacja kolekcji
 void push_back(const&T);
 T pop_back();
```

```
//Ważne funkcje pomocnicze
bool operator==
bool operator<
//Specjalizacje
vector<bool>
```

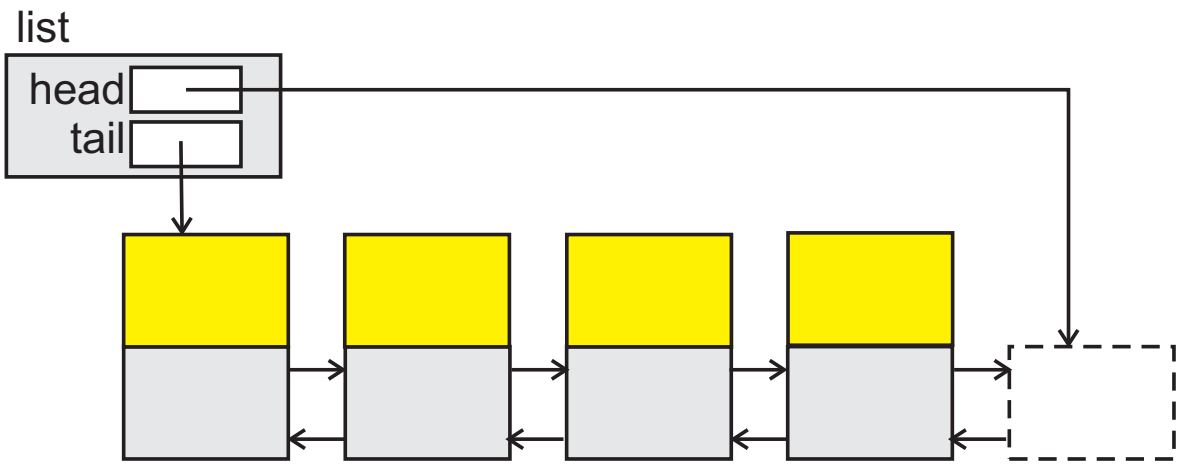


std::list (#include <list>)

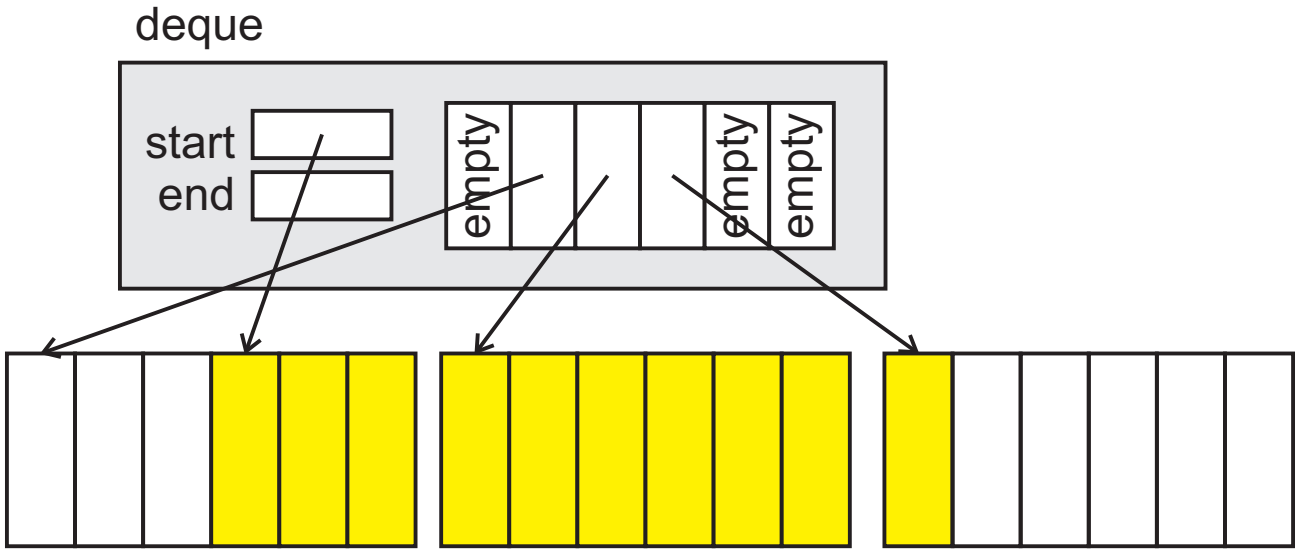
```
//Deklaracja
template<class T, class A=allocator<T> > class std::list;
```

```
//Metody dostępu - brak operatora[]
front() back()
//Modyfikacja kolekcji
push_front(), push_back()
pop_front(), pop_back()
insert
erase
```

```
//Inne metody
void remove(const T& val)
void reverse()
splice merge sort
```



std::deque - kolejka o dwu końcach (#include <deque>)



Operacje:

- takie jak dla wektora (za wyjątkiem capacity(), reserve())
- operacje z przodu ciągu (tak jak dla listy)

kontenery asocjacyjne

- przechowują elementy uporządkowane
- dostarczają metod wyszukiwania w czasie logarytmicznym
- **Alternatywa: posortowany wektor**

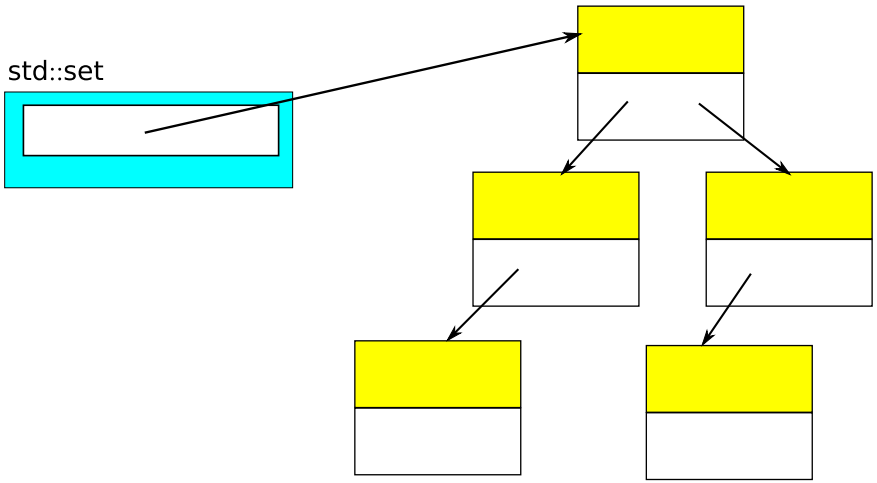
ale:

- porządek elementów inny niż kolejność wstawiania
- iterator typu `bidirectional`, algorytmy często wymagają `random_access`

std::set - zbiór

- eliminacja elementów równoważnych

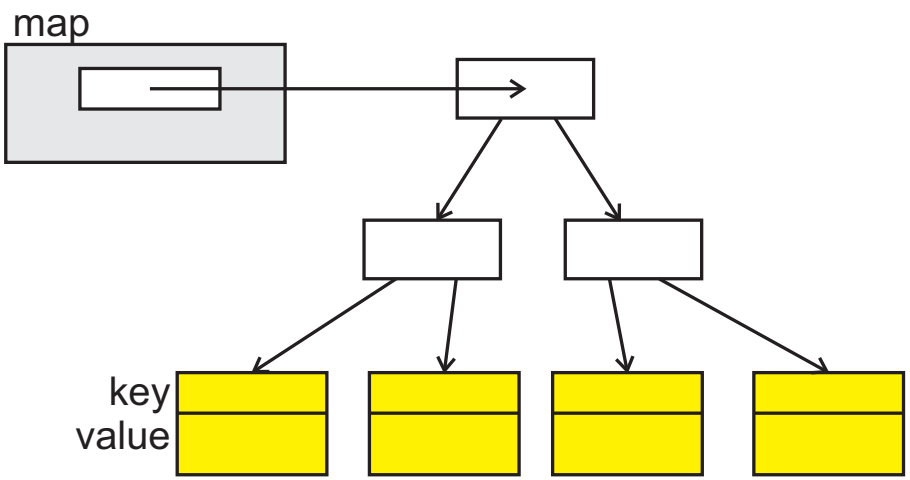
  a jest równoważne b, jeżeli `!(a < b) && !(b < a)`




```
set<int> s; //zbiór liczb całkowitych
s.insert(1); //dodaje elementy do kolekcji
s.insert(1); //ta operacja jest pusta (usuwa elementy równoważne)
s.insert(2);
assert( s.size() == 2); //bada liczbę elementów
assert( s.count(1) == 1 ); //zlicza liczbę wystąpień elementu
```

std::map - słownik (tablica asocjacyjna)

```
template<class K, class T, //typ klucza i wartości
    class Cmp = less<Key>, //Porządek dla klucza
    class A = allocator<Pair<const K, T> > > class std::map;
```

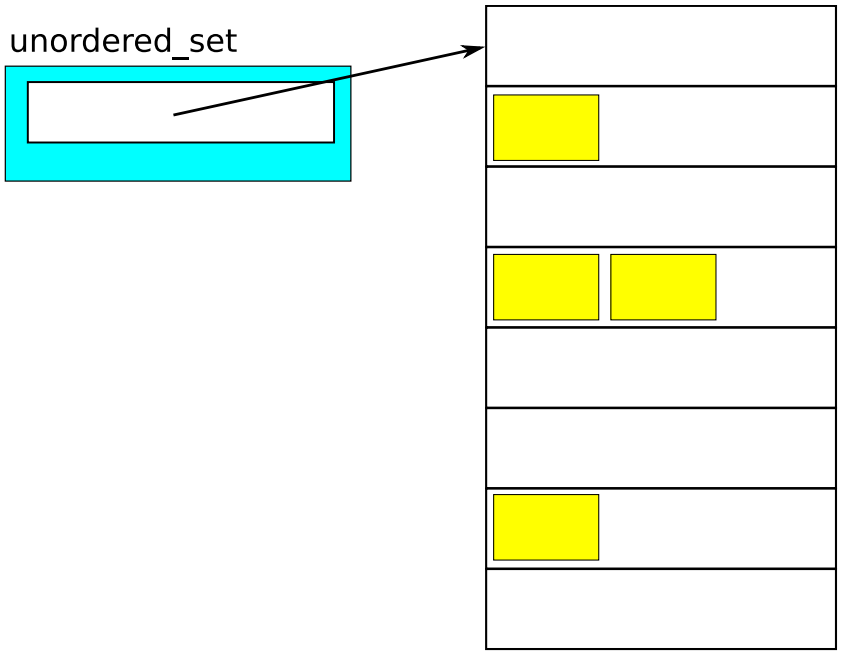



```
iterator find(const K& k);
size_type
count(const K& k) const;
pair<iter,iter>
  equal_range(const K& k);
```

std::unordered_set (C++11) lub boost::unordered_set

- nie zostały objęte standardem w 1999 roku
- dostawcy kompilatorów (własne rozwiązania): `hash_set`, `hash_map`, itd.
- standard C++11: `unordered_set` itd.

  - wykorzystują funkcję skrótu
  - w przybliżeniu jednostkowy czas dostępu do elementów
  - cena: zajętość pamięci (działa dobrze gdy wypełniony w ok. 25%)



std::array (C++11) lub boost::array

- Adapter dla tablic z C
- dostarcza iteratorów oraz metod `begin`, `end`, `rbegin`, `rend`
- dostarcza metody: `at`, `front`, `back` i in.
- dostarcza operator==, operator<

```
template<typename T, std::size_t N>
class array {
  public:
  //...
  T elems[N];
};
//Przykłady użycia
array<double, 4> tab = { 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 };
array<double, 4> tab2(tab);
cassert( tab == tab2 );
tab2.assign(0.0); //wszystkie elementy będą miały wartość 0
```

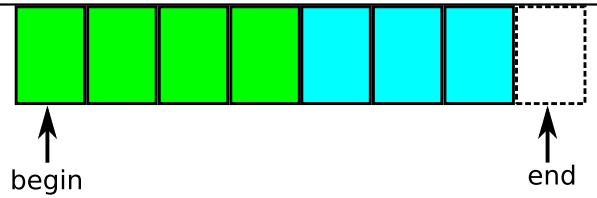
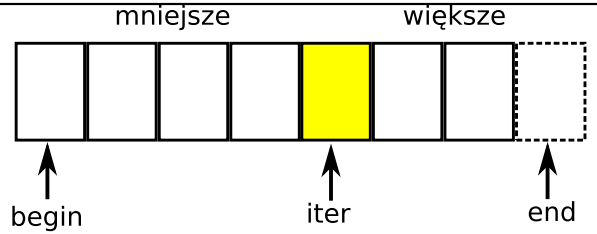
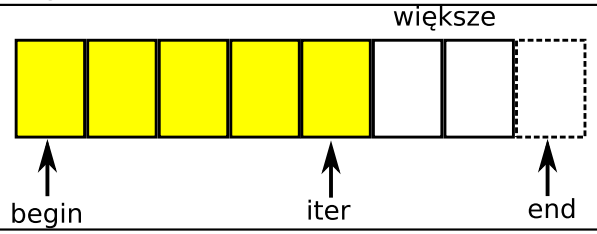
Porównanie kolekcji

cecha	**kontener**
element w ustalonej pozycji kontenera	vector, string, list, deque
dostęp przez indeks	vector, string, deque
ważna szybkość wyszukiwania	posortowane wektory, kontenery a cjacyjne, kontenery haszujące
iteratory, wskaźniki nie mogą być unie- ważniane	lista, asocjacyjne
j.w. dla operacji modyfikującej koniec kolekcji	j.w. oraz deque
brak elementów równoważnych	set, map
nieistotny porządek w jakim elementy są przechowywane	kontenery haszujące

algorytmy STL, omówione wcześniej

wzorzec iteratora, bardzo wydajne, wymagają funkcji lambda

przykład: algorytmy sortujące

partition	dzieli elementy używając predykatu	
stable_partiton	jak wyżej	
nth_element	znajduje pozycję danego elementu	
partial_sort	sortuje częściowo	
sort	sortuje	
stable_sort	j.w, zachowuje porządek dla el. równoważnych	

przykład użycia algorytmów: sortowanie

```
//Przykład
struct Prac {
  string nazw;
  int wiek;
  int pensja;
};
vector<Prac> p;

//Sortuje po wieku, bind do wiązania składowej
sort( p.begin(), p.end(),
      bind( less<int>(), bind(&Prac::wiek,_1), bind(&Prac::wiek,_2)) );
//Sortuje po wieku, lambda
sort( p.begin(), p.end(),
      [](const Prac& p, const Prac& r){ return p.wiek < r.wiek; });

//Sortowanie po pensji
sort( p.begin(), p.end(),
      [](const Prac& p, const Prac& r){ return p.pensja < r.pensja; });
```

Dziękuję