АЛГОРИТМЫ

Введение в алгоритмы стандартной библиотеки и обобщённое программирование

К. Владимиров, Intel, 2022
mail-to: konstantin.vladimirov@gmail.com

- Функторы и состояние
- Алгоритмы
- No raw loops
- Case study: группы перестановок

Обсуждение: for each

- У нас есть метод `equal_range` в `unordered_multimap`, который возвращает диапазон пар ключ-значение с одинаковым ключом.

```
std::unordered_multimap<int, int> m;
....
auto [begin, end] = m.equal_range(i);
```

- Вы можете как-то проитерироваться и что-то сделать с каждым значением.

```
for (auto it = begin; it != end; ++it) f(*it); // 1
std::for_each(begin, end, f);                  // 2
```

- Какой из двух вариантов вы выберете и почему?

Обсуждение

- Выбирать всегда следует алгоритм стандартной библиотеки
- Аргумент от тела цикла

```
for (auto elt : cont) {
  // позволяет неконтролируемо вставить массу кода
}
```

- Аргумент от распараллеливания (C++17)

```
for_each(std::execution::par, cont.begin(), cont.end(), func);
```

- В общем случае абстракция циклов повышает и читаемость и эффективность
- Такие абстракции называются абстракциями с отрицательной стоимостью

Sequenced vs Parallel

Обсуждение

- Представим, что нам надо как-то использовать внешнее значение.
- Например пусть нам надо умножить value на некое число.

```
int mult = get_my_mult(); // очень долгая функция
for (auto it = begin; it != end; ++it) {
  it->second = it->second * mult;
}
```

- Кажется тут нет способа сделать вызов `std::for_each`?

```
std::for_each(std::execution::par, begin, end, [](auto &&elt){
  elt.second = elt.second * mult; // ошибка
});
```

Идея функтора

- Допустим мы написали класс с состоянием и оператором вызова.

```
struct Multer {
  int m;
  Multer(mult) : m(mult) {}
  void operator()(auto &&elt) { elt.second = elt.second * m; }
}
```

- Тогда это становится возможным.

```
std::for_each(std::execution::par, begin, end, Multer{mult});
```

- Но на каждый чих не наздравствуешься. Неудобно каждый раз писать функтор.

Hello, lambda world

- Давайте посмотрим на лямбды в их блеске и славе.

```
int main(int argc, const char **argv) {
  return [argv] () -> int {
    std::cout << "Hello from "<< argv[0] << std::endl;
    return 0;
  } ();
}
```

- Мы можем это упростить, выкинув пустое тело и выводимый тип.

```
auto hi = [argv] { std::cout << argv[0] << "\n"; return 0; };

hi();
```


https://godbolt.org/z/hT8WcT1rf

```
([]()){}()();
```

is now legal C++

Обсуждение

- λ-выражения это не функции

```
auto t = [z](auto x, auto y) { return x < y * z; };
```

- Это скорее классы с перегруженным operator()

```
struct __closure_type_for_t {
  int __k;
  auto operator()(auto x, auto y) const {
    return x < y * __k;
  }
} t{z};
```


https://godbolt.org/z/Woe4hx5b5

Убираем const

- Если мы хотим изменять захваченный по значению контекст мы должны сделать нашу лямбду в явном виде mutable

```
auto t = [z](auto x, auto y) mutable { z += 1; return x < y * z; };
```

- Обратите внимание, что z изменяется в пределах замыкания.

```
auto s = t;

t(1, 2); // z изменилось внутри t, но не внутри s
```

- Замыкания по умолчанию копируемые (если не захвачено ничего со стёртым copy ctor).
- Глобальные и статические переменные захватывать не надо, они доступны и так.

Виды захвата

- Захват по значению (по ссылке)

```
auto fval = [a, b](int x) { return a + b * x; };
auto fvalm = [a, b](int x) mutable { a += b * x; return a; };
auto fref = [&a, &b](int x) { a += b * x; return a; };
```

- Захват по ссылке всегда mutable и отслеживает состояние переменной.

```
a = 42;

fval(x); // тот же
fref(x); // использует новое a
```

- Разумеется можно смешивать: `[&a, b, &c, d]`

Виды захвата

- Захват всего контекста по значению (по ссылке)

```
auto faval = [=](int x) { return a + b*x; };
auto faref = [&](int x) { a += b*x; return a; };
```

- Захват всего по значению и частично по ссылке и наоборот

```
auto favalb = [=, &b](int x) { return a + b*x; };
auto farefa = [&, a](int x) { b += a*x; return b; };
```

- Захват с переименованием

```
auto freval = [la = a](int x) { return la + x; };
auto freref = [&la = a](int x) { la += x; return la; };
```


https://godbolt.org/z/hb5E4b5a6

Виды захвата

- Переименование позволяет захватить с перемещением.

```
std::ostream_iterator<int> os{std::cout, " "};
std::vector v = {1, 2, 3};

auto out = [w = std::move(v), os] {
  std::copy(w.begin(), w.end(), os);
};
```

- Теперь вектор передан в состояние замыкания.
- Передача осуществляется в конструкторе замыкания, т.е. в момент создания функции, а не в момент её вызова.

https://godbolt.org/z/9Yd3fEKe8

Захват в теле класса

```
struct Foo {
  int x;
  void func() {
    [x] mutable { x += 3; } (); // FAIL
    [&x] { x += 3; } (); // FAIL

    [=] { x_ += 3; } (); // OK
    [&] { x_ += 3; } (); // OK

    [this] { x_ += 3; } (); // OK
```

- Это работает, поскольку полный захват захватывает `this`

https://godbolt.org/z/ar46ax95P

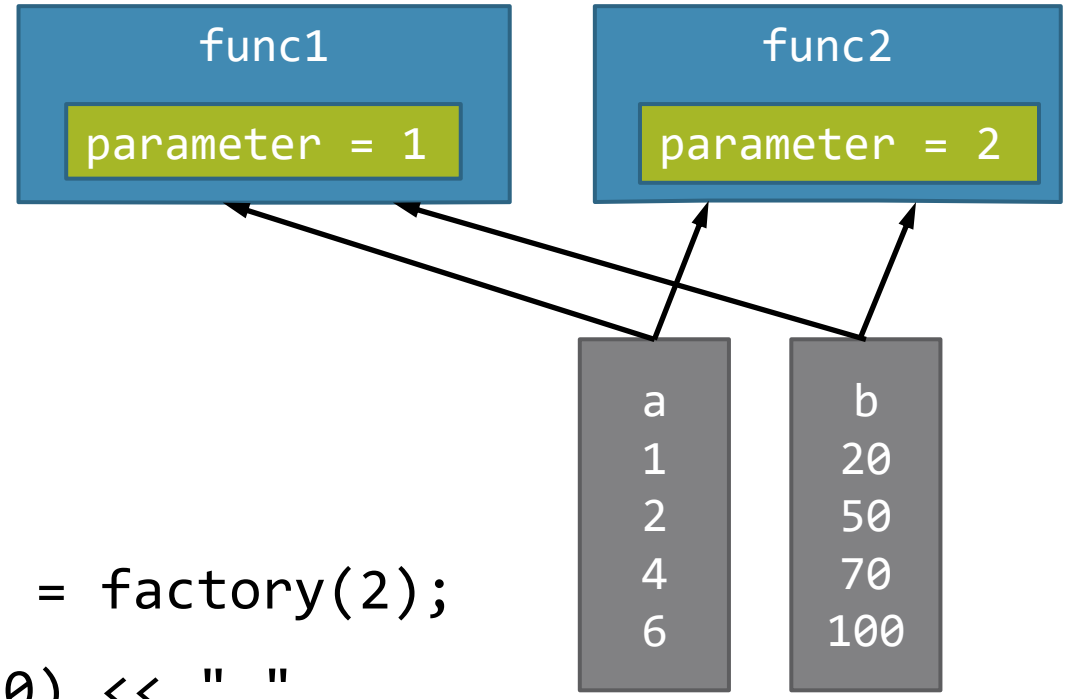
Задача: локальный контекст

```
auto factory (int parameter) {
  static int a = 0;
  return [=] (int argument) {
    static int b = 0;
    a += parameter; b += argument;
    return a + b;
  }
}

auto func1 = factory(1); auto func2 = factory(2);

cout << func1(20) << " " << func1(30) << " "
     << func2(20) << " " << func2(30) << endl;
```


https://godbolt.org/z/xr5Ma8c7Y

Решение: локальный контекст

```
auto factory (int parameter) {
  static int a = 0;
  return [=] (int argument) {
    static int b = 0;
    a += parameter; b += argument;
    return a + b;
  };
}

auto func1 = factory(1); auto func2 = factory(2);

cout << func1(20) << " " << func1(30) << " "
     << func2(20) << " " << func2(30) << endl;
```



Единая типизация замыканий

```
auto t = [&x, &y] { return x + y; };
```

- Тут не вполне ясно что такое auto.
- Мало того, так нельзя делать в теле класса.

```
struct Foo {
  auto t = [&x, &y] { return x + y; }; // ошибка
};
```

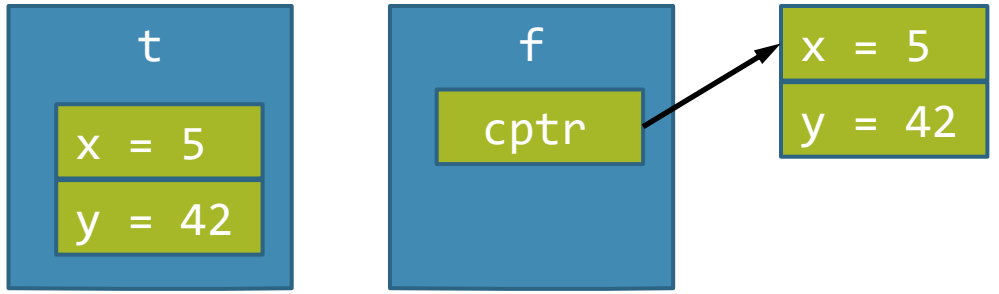
- Мы понимаем, что это closure type но не можем записать его явно.
- В этом случае мы можем частично стереть тип.

Единая типизация замыканий

```
auto t = [&x, &y] { return x + y; }; // closure

function<int()> f = [&x, &y] { return x + y; }; // function
```

- `std::function<сигнатура>` это единый тип к которому приводятся все замыкания с данной сигнатурой.
- Ключевое слово "приводятся".

```
t = [] { return 42; } // FAIL

f = [] { return 42; } // ok
```



- Тип функции теряет информацию о захвате контекста. Значение имеет только сигнатура.

Снова захват в теле класса

```
using VVTy = std::function<void(void)>;

struct Foo {
  int x;

  VVTy xplus1 = [&] { x += 3; }; // OK, but hmmm....
  VVTy xplus2 = [this] { x += 3; }; // OK
```

- Это вдвойне интересно, так как такие лямбды-члены ведут себя как методы.

```
struct Foo f;

f.xplus1(); // OK
```


https://godbolt.org/z/YqWGTraze

Информация о конкретном типе

- Механизм `std::function` унифицирует типы замыканий
- Информация о реальном типе возвращается через target_type

```
int f(int);

function<int(int)> fn1 = f,
                   fn2 = [](int a) {return -a;},
                   fn3 = [x](int a) {return x - a;};
  cout << fn1.target_type().name() << endl
       << fn2.target_type().name() << endl
       << fn3.target_type().name() << endl;
```


https://godbolt.org/z/5KxMo4hnY

Case study: finally

- Допустим у нас есть очень простой класс:

```
struct Finally {
  std::function<void()> action_;
  explicit Finally(std::function<void()> action):
     action_(std::move(action)){}
  ~Finally() { action_(); }
};
```

- Теперь мы можем вот такие фокусы

```
FILE *f = fopen("myfile.dat", "r"); assert(f);
Finally close_f([&f]{ fclose(f); });
```


https://www.youtube.com/watch?v=eG5suWcHI8M

Обсуждение: heap indirection

- Есть некоторая проблема с таким подходом к finally, а именно производительность. Гораздо эффективней иметь closure.

```
template <typename ActTy> inline auto Finally(ActTy fn) {
  struct Finally_impl {
    ActTy act;
    explicit Finally_impl(ActTy action): act(std::move(action)){}
    ~Finally() { act(); }
  };

  return Finally_impl(std::move(fn)); // bingo
}
```

- Функция нужна для вывода типов (можно ли сделать deduction hint?)

https://godbolt.org/z/c6ooWPThq

Предостережение

- У вас может возникнуть соблазн сделать функтор с изменяемым состоянием.

```
auto [begin, end] = m.equal_range(i);

int max = 0;
std::for_each(begin, end, [&max](auto &&elt) {
  int n = f(elt.second);
  if (n > max) max = n;
});

std::cout << "Answer is: " << max << std::endl;
```

- Это не ошибка, но это дурной тон. Чем опасен такой подход?

- Функторы и состояние
  - Алгоритмы
- No raw loops
- Case study: группы перестановок

Алгоритмы

- Алгоритм стандартной библиотеки это функция, выполняющая действие над интервалами, заданными с помощью итераторов.

```
template<class InputIt, class OutputIt>
OutputIt copy(InputIt fst, InputIt last, OutputIt res);
```

- Имя алгоритма может иметь суффиксы и префиксы
  - if (например copy_if) – выполнить действие при выполнении предиката
  - n (например copy_n) – выполнить действие ограниченное количество раз
  - copy (например reverse_copy) – разместить результат в новом контейнере
  - stable (например stable_partition) – алгоритм работает стабильно
- Вопрос должен ли copy_n существовать в языке – дискуссионный.

Несколько примеров copy_x

```
int arr[] = {2, 3, 5, 7, 11, 13, 17};

std::vector<int> v(7);

std::copy_n(arr, 7, v.begin());

std::copy(v.begin(), v.end(),
          std::ostream_iterator<int>(std::cout, "\n"));

std::fill(v.begin(), v.end(), 0);

std::copy_if(arr, arr + 7, v.begin(),
             [](int i){ return (i % 3) == 1; });
```

- Контрольный вопрос: что на экране, что в векторе?

https://godbolt.org/z/xqf4hx9d1

Обсуждение: специализации циклов

- Есть довольно серьёзное заблуждение, что все алгоритмы это `for_each`
- Общее правило: более специализированный алгоритм лучше менее специализированного.
- Алгоритм в этом смысле можно рассматривать как специализацию цикла.
  - Обычный for это что угодно, компилятор и библиотека ничего не знают и соптимизируют как угодно.
  - Но тот же copy это именно копирование и ничто иное.
- Важнейший навык – выбирать правильные алгоритмы.
- Для этого надо видеть паттерны в коде.

The Square Hole

Паттерны в коде: find_if

- Классический паттерн: for, внутри if, внутри break

```
for (auto&& elt : v)
  if (check(elt)) {
    action(elt);
    break;
  }
```

- Разумеется это `std::find_if`

```
auto it = std::find_if(v.begin(), v.end(),
                       [](auto &&elt) { return check(elt); });

if (it != v.end()) action(elt);
```

Иногда и find_if много

- Допустим вам принесли код, который использует find_if

```
if (std::find_if(v.begin(), v.end(), p) != v.end())
  action();
```

- Его можно и даже нужно упростить далее

```
if (std::any_of(v.begin(), v.end(), p)) // есть ли элемент?
  action();
```

- Аналогично `std::all_of` и `std::none_of`
- Мы всегда должны стремиться к выбору самого специализированного алгоритма из существующих.

Обсуждение: и это частая проблема

- На самом деле это частая ситуация. Если вы видите как кто-то пишет:

```
auto [ita, itb] =
  std::mismatch(a.begin(), a.end(), b.begin());

if (ita != a.end() && itb != b.end())
  action();
```

- То такому человеку надо вежливо объяснить, что он просто забыл про то, что существует более специализированный способ.

```
if (!std::equal(a.begin(), a.end(), b.begin()))
  action();
```


https://godbolt.org/z/69szPb59b

Паттерны в коде: копирование

- Допустим мы хотим скопировать диапазон $[1, 6)$ начиная с позиции перед элементом 4.
- Все ли понимают почему обычный `std::copy` не подходит?
- Как бы вы выкрутились?

- В примере по ссылке обратите внимание что мы указываем конец. Как вы думаете что будет если мы укажем начало?

https://godbolt.org/z/8GnbqsP8c

Паттерны в коде: transform

- То, что в функциональных языках называется map, в C++ это transform

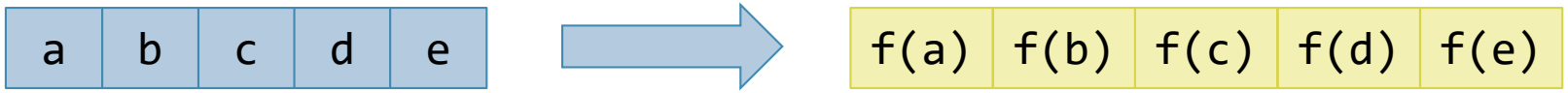
```
vector<int> v = {2, 3, 5, 7, 11, 13};
```

- Неправильно: `for_each` тут пытается что-то делать над текущим элементом.

```
std::for_each(v.begin(), v.end(), [](auto& i) { i = -i; } );
```

- Обратите внимание: при использовании правильного алгоритма легко заменить выходной итератор.

```
auto negate = [](auto&& i) { return -i; }
std::transform(v.begin(), v.end(), v.begin(), negate);
```



Обсуждение: функция как предикат

- Предположим хочется использовать функцию `std::toupper`. Как написать вызов алгоритма с этим предикатом?

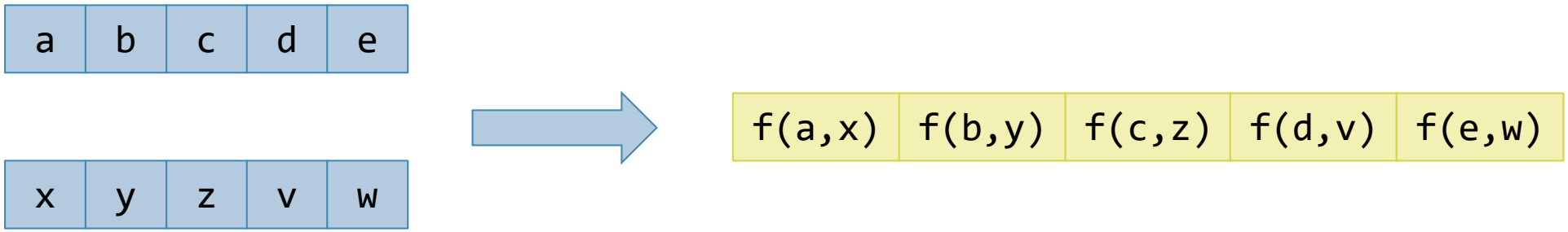
```
std::string s = "hello";

// увы, это не будет работать
std::transform(s.begin(), s.end(), s.begin(), std::toupper);
```

- Причина банальная: `std::toupper` это множество перегрузки. Компилятор не понимает какую из перегруженных функций взять.
- Как бы вы выкрутились?

https://godbolt.org/z/r4zf9hMd9

Второй смысл transform

- У этого алгоритма есть форма, где он работает как своего рода zip.



- Дополнение к нему `std::transform_reduce` позволяет аккумулировать бинарную операцию над ними.
- Интересно, что то же самое делает `std::inner_product`, но делает это **иначе**.

https://godbolt.org/z/KGWahv57x

Отличия в гарантиях

- Есть такие пары функций, которые существуют с разными гарантиями на исполнение.
- Например reduce и accumulate
  - Обе берут бинарную операцию и считают результат, но
  - accumulate гарантированно сделает это in-order
  - reduce сделает это как угодно
- Ещё пример это inclusive_scan и partial_sum
- Также transform_reduce и inner_product
- Мы должны внимательно читать документацию чтобы осознавать такие вещи

https://godbolt.org/z/Y3qr7aK5b

Задача: кстати о чтении документации

- Как вы думаете, что такое all_of, any_of и none_of на пустых диапазонах?

```
std::vector<int> v; // пустой вектор

if (std::all_of(v.begin(), v.end(), p)) // ?
  action_all();

if (std::any_of(v.begin(), v.end(), p)) // ?
  action_any();

if (std::none_of(v.begin(), v.end(), p)) // ?
  action_none();
```


https://godbolt.org/z/7snvzqbj6

Паттерны в коде: remove

- Как бы вы написали функцию remove?
- Идея функции: удалить из диапазона все значения val

```
template <typename Iter, typename T>
Iter remove (Iter first, Iter last, const T& val) {
  // что здесь?
}
```

Некоторая засада с remove

- Как бы вы написали функцию remove?
- Идея функции: удалить из диапазона все значения val

```
template <typename Iter, typename T>
Iter remove (Iter first, Iter last, const T& val) {
  // что здесь?
}
```

- Правильный ответ: никак. По итератору нечто можно удалить из контейнера только используя `Cont.erase(it)`

Идиома erase-remove

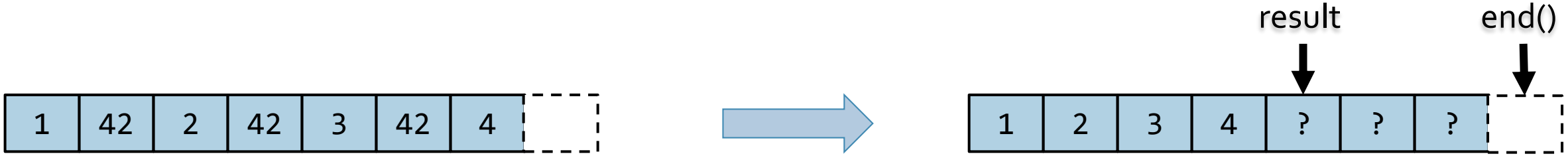
- Как же по настоящему работает remove?

```
std::vector<int> v = {1, 42, 2, 42, 3, 42, 4};

auto result = std::remove(v.begin(), v.end(), 42);
v.erase(result, v.end());
```

- Или, группируя это в одну фразу:

```
v.erase(std::remove(v.begin(), v.end(), 42), v.end());
```

- Эта техника называется "идиома erase-remove"



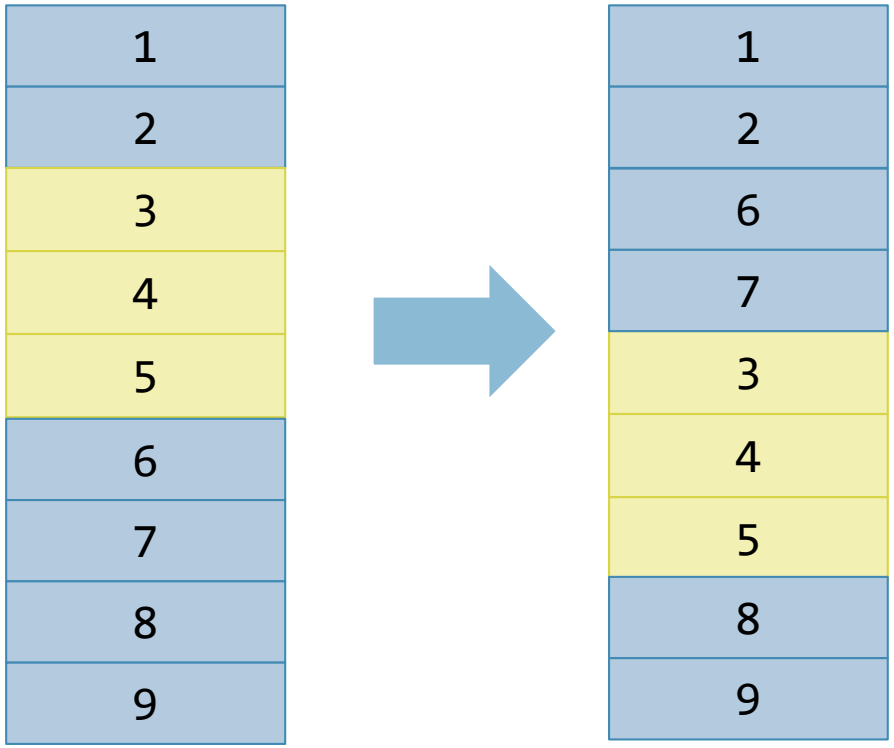
Обсуждение: не только remove

- Среди алгоритмов не только remove "удаляет" элементы
- Например unique

```
vector v = {1, 1, 2, 2, 3, 3, 4};

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

v.erase(std::unique(v.begin(), v.end()), v.end());
```

- Это тоже идиома erase-remove только без remove
- К счастью пока что в стандарте C++ только три таких алгоритма: `remove`, `remove_if` и `unique`. Но в пользовательском коде может попасться всякое.

Паттерны в коде: перемещение группы



- Три параметра:
  - начало группы **`f, *f == 3`**
  - конец группы **`l, *l == 6`**
  - позиция **`p`** куда группа должна быть перемещена, **`*p == 8`**
- Как бы вы написали такое перемещение?

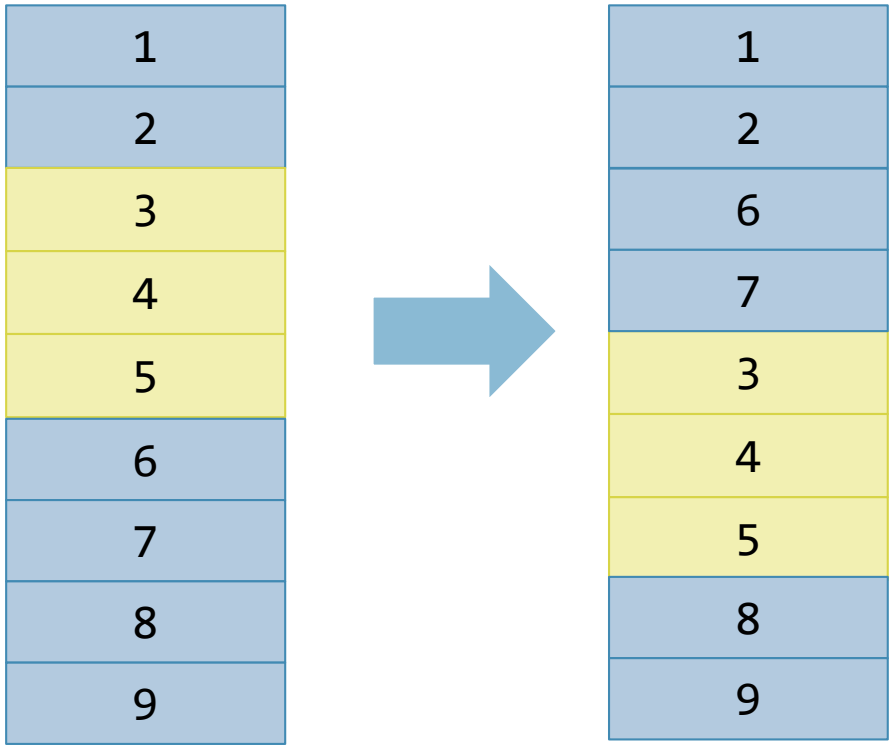
Внезапно rotate

- rotate работает следующим образом:

```
void rotate(FwIt first, FwIt n_first, FwIt last );
```

- Диапазон от `first` до `last` проворачивается так, чтобы первым элементом стал `n_first`
- Ментальная модель `rotate(f, l, p)` это перенос группы `[f, l)` в позицию перед `p`.

Групповое перемещение это rotate



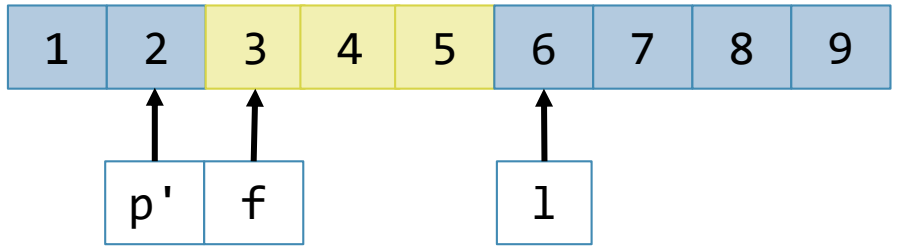
- Три параметра:
  - начало группы **`f, *f == 3`**
  - конец группы **`l, *l == 6`**
  - позиция **`p`** куда группа должна быть перемещена, **`*p == 8`**
- `rotate(f, l, p)` это перенос группы `[f, l)` в позицию перед `p`.
- Итак, вы бы написали `rotate`?

Небольшая проблема

- rotate работает следующим образом:

```
void rotate(FwIt first, FwIt n_first, FwIt last );
```

- Но что, если позиция куда нужно переместить лежит выше f?
- Тогда `rotate(f, l, p')` не будет работать, так как `[f, p')` не образует диапазон

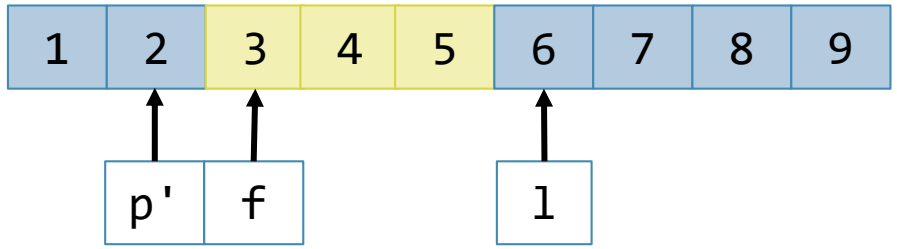


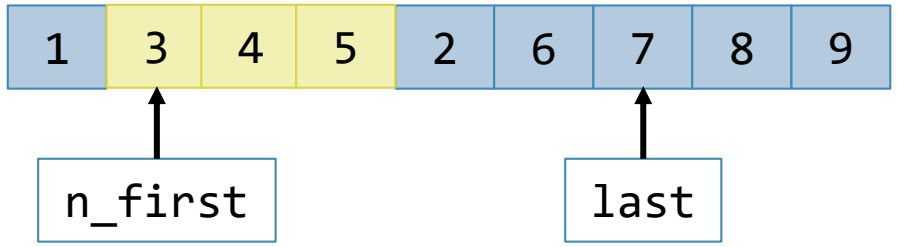
Решение

- rotate работает следующим образом:

```
void rotate(FwIt first, FwIt n_first, FwIt last );
```

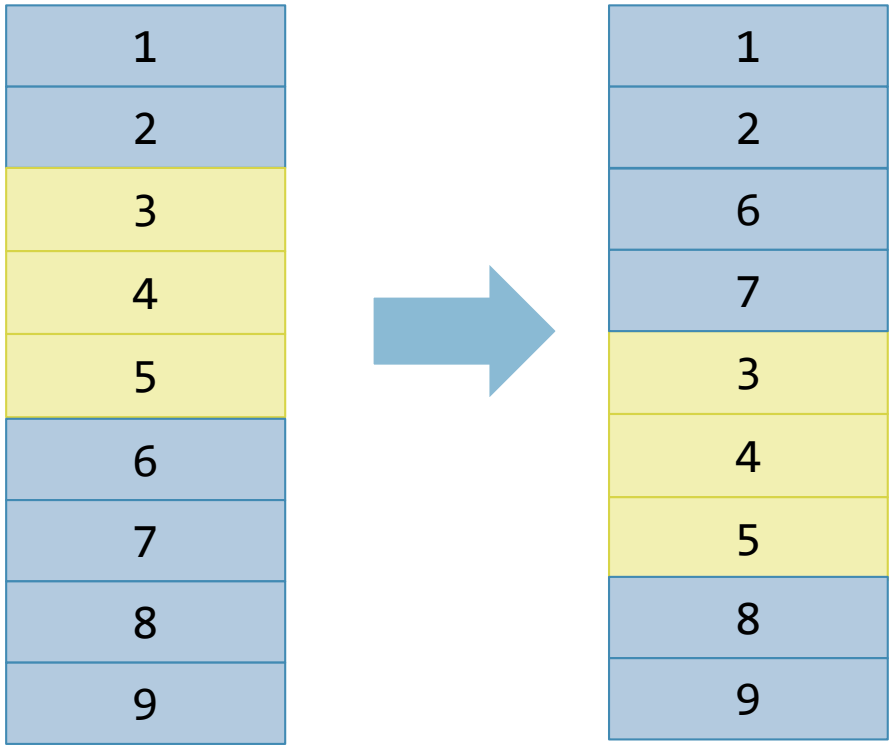
- Но что, если позиция куда нужно переместить лежит выше f?
- Тогда `rotate(f, l, p')` не будет работать, так как `[f, p')` не образует диапазон
- Зато будет работать `rotate(p', f, l)`





https://godbolt.org/z/czqc6G3a9

Групповое перемещение элементов



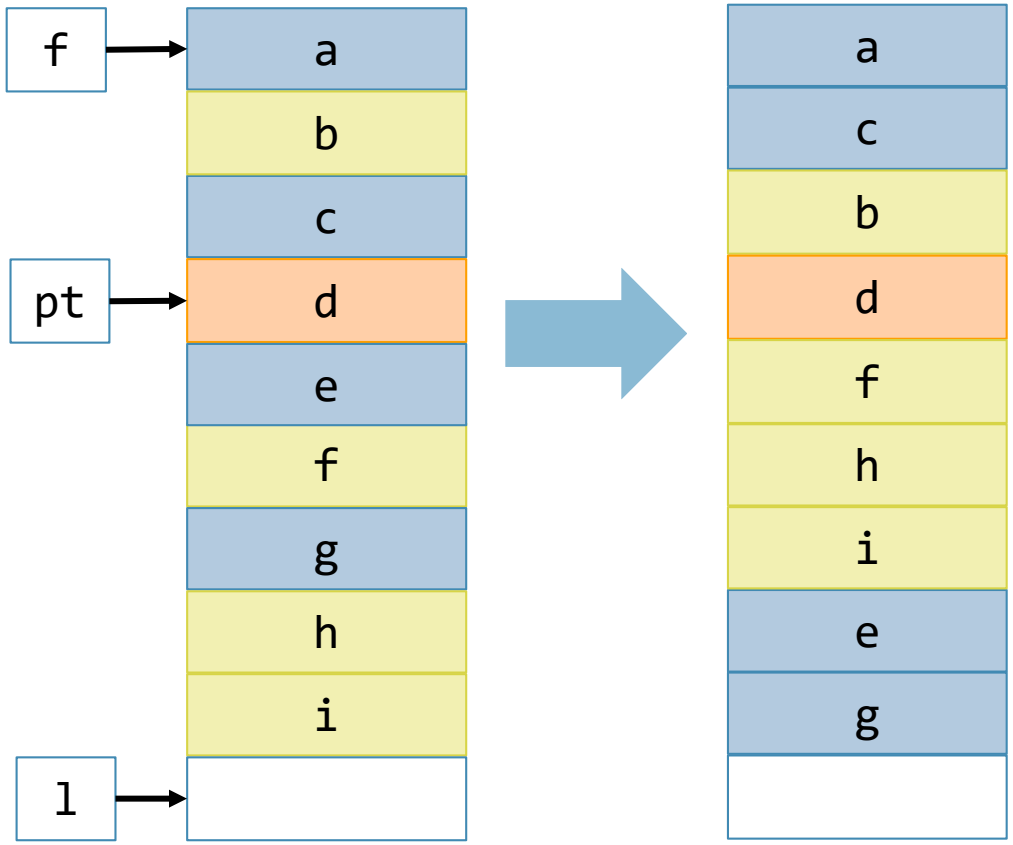
- Три параметра:
  - начало группы **`f`, где угодно**
  - конец группы **`l` , где угодно**
  - позиция **`p`** куда группа должна быть перемещена**, где угодно**
- Итого мы хотим сделать так

```
if (p < f) rotate(p, f, l);
else if (l < p) rotate(f, l, p);
```

- Обсуждение: что мы хотим сделать при неправильной позиции?

https://godbolt.org/z/MYr95jhEn

Паттерны в коде: gather

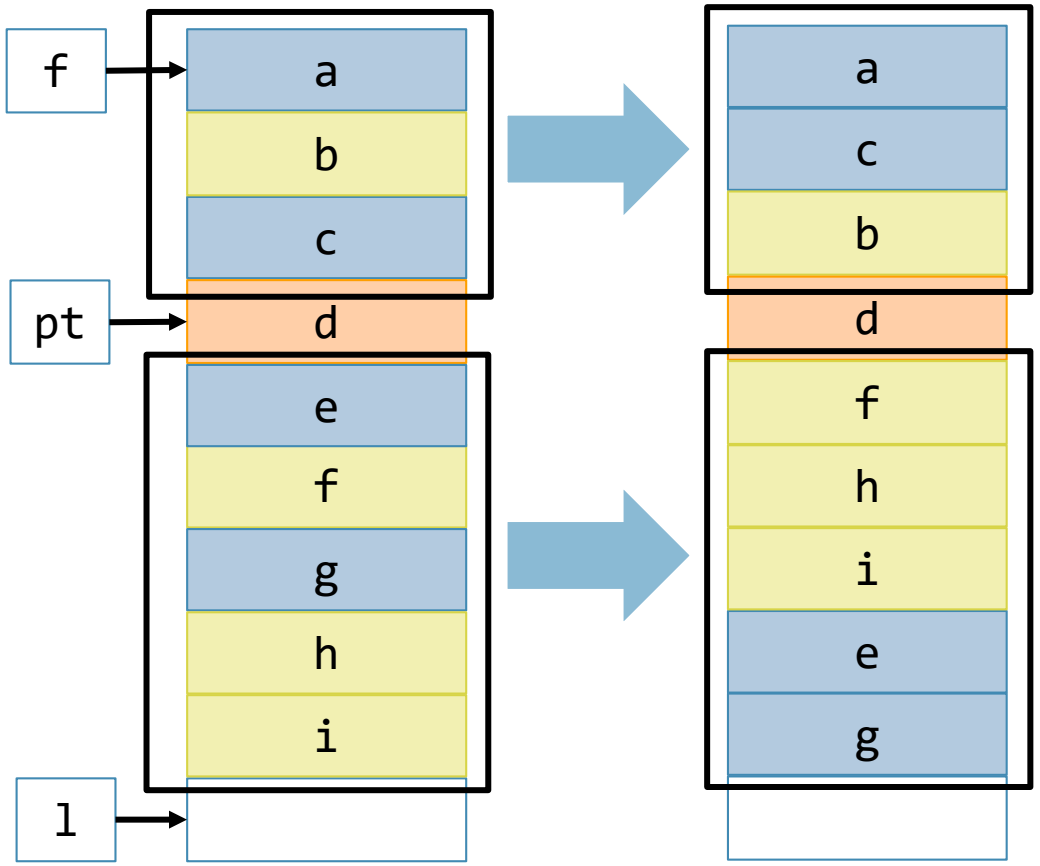


- Ментальная модель такая: по щелчку мыши на панели d мы собираем по некоему предикату панели.
- После чего не меняя их относительного порядка собираем их около d.
- Как бы вы написали этот алгоритм?

```
gather(It f, It l, It pt, F pred);
```

- Подсказка: здесь есть очень красивое и почти очевидное решение.

Внезапно stable_partition




```
gather(f, l, pt, p) ::=
  stable_partition(f, pt, not(p));
  stable_partition(pt, l, p);
```

- Это просто открывающая глаза штука.
- Было замечено Шоном Парентом (Principal Scientist в Adobe) на ревью у Маршала Клоу (libc++ maintainer в QualComm).
- К вопросу о пользе code review даже у людей такого уровня.

Общий обзор

- **Не модифицирующие**
  - all_of, any_of, none_of
  - for_each (n)
  - find (if), count (if)
  - search, find_end, find_first_of
  - mismatch
  - adjacent_find
  - min (element), max (element)
  - clamp
  - equal, lexicographical_compare
- **Слияния и кучи**
  - merge, inplace_merge
  - is_heap (until)
  - make_heap, push_heap, etc….
  - set_union, set_intersection, etc….
- **Модифицирующие**
  - copy (if | n | backward)
  - move (backward)
  - swap, swap_ranges
  - iter_swap
  - transform
  - replace (copy)(if)
  - fill (n), generate (n)
  - reverse
  - rotate (copy)
  - shuffle, sample
  - shift_left (shift_right)
- **Структурные**
  - remove (copy)(if)
  - unique (copy)
- **Сортировка и поиск**
  - partition, stable_partition, partition_point
  - sort, partial_sort, stable_sort
  - nth_element
  - lower_bound, upper_bound, equal_range
  - binary_search
- **Численные**
  - accumulate, reduce, transform_reduce
  - iota
  - adjacent_difference
  - partial_sum, inclusive_scan, exclusive_scan
  - transform_(inclusive | exclusive)_scan
  - inner_product
  - is_permutation
  - next_permutation, prev_permutation

- Функторы и состояние
- Алгоритмы
  - No raw loops
- Case study: группы перестановок

Программа Шона Парента

- Если вы видите необходимость написать в вашей программе цикл, посмотрите есть ли возможность использовать стандартный алгоритм.
- Если нет стандартного, придумайте свой, предложите в стандартную библиотеку, опубликуйте статью, прославьтесь.
- В пределах программы Шона Парента, лучшее, что вы можете сделать для кода это убрать вспомогательные циклы.
- Вспомогательный цикл внутри функции это любой цикл, который делает нечто, не полностью совпадающее с основным предназначением функции.

Пример вспомогательных циклов

- Следующий фрагмент кода это часть реального кода Chrome OS

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  // check if panel has moved to the other side or another panel
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center() || i == expanded_panels_.size() - 1) {
      if (panel != fixed_panel) {
        ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
        expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
        if (i < expanded_panels_.size())
          expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
        else
          expanded_panels_.push_back(ref);
      }
      break;

  // .... далее ещё много кода в этой функции ....
```

Пример вспомогательных циклов

- Он содержит бессмысленный комментарий, странные проверки и он похоже квадратичный.

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  // check if panel has moved to the other side or another panel
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center() || i == expanded_panels_.size() - 1) {
      if (panel != fixed_panel) {
        ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
        expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
        if (i < expanded_panels_.size())
          expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
        else
          expanded_panels_.push_back(ref);
      }
      break;

  // .... далее ещё много кода в этой функции ....
```

Пример вспомогательных циклов

- Первый шаг упрощения: push_back не лучше чем insert в конец контейнера

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  // check if panel has moved to the other side or another panel
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center() || i == expanded_panels_.size() - 1) {
      if (panel != fixed_panel) {
        ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
        expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
        expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
      }
      break;
    }
  }
// .... далее ещё много кода в этой функции ....
```

Пример вспомогательных циклов

- Второй шаг упрощения: условие которое выполняется единожды можно вынести вниз из цикла

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center() || i == expanded_panels_.size() - 1)
      break;
  }

 // Fix this code: panel is panel found above
 if (panel != fixed_panel) {
   ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
   expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
   expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
 }

.... далее ещё много кода в этой функции ....
```

Пример вспомогательных циклов

- Третий шаг: убираем бессмысленную проверку

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center())
      break;
  }

 // Fix this code: panel is panel found above
 if (panel != fixed_panel) {
   ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
   expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
   expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
 }
```

- Теперь подсвеченное это стандартный алгоритм. Кто узнает какой?

Пример вспомогательных циклов

- Разумеется это find_if (что делает четвёртый шаг)

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  auto p = std::find_if(begin(expanded_panels_), end(expanded_panels_),
     [&](const ref_ptr<Panel> &e) { return center_x <= e->cur_panel_center(); });

  // Fix this code: panel is panel found above
  if (panel != fixed_panel) {
   ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
   expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
   expanded_panels_.insert(p, ref);
 }

.... далее ещё много кода в этой функции ....
```

- Код уже выглядит гораздо лучше, но мешанина с erase и insert внизу всё ещё цепляет глаз. Кто-нибудь предложит исправление?

Пример вспомогательных циклов

- Шаг пятый: rotate

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  auto p = std::find_if(begin(expanded_panels_), end(expanded_panels_),
     [&](const ref_ptr<Panel> &e) {
       return center_x <= e->cur_panel_center(); });

  // Fix this code: panel is panel found above
  if (panel != fixed_panel) {
    auto f = std::begin(expanded_panels_) + fixed_index;
    std::rotate(p, f, f + 1);
  }
.... далее ещё много кода в этой функции ....
```

- Ещё идеи? Может наконец сделаем код рабочим, заменив `panel` на `*p`?

Пример вспомогательных циклов

- Шаг шестой: проверка вообще не нужна, rotate хорошо отрабатывает на пустом диапазоне

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  auto p = std::find_if(begin(expanded_panels_), end(expanded_panels_),
    [&](const ref_ptr<Panel> &e) {
      return center_x <= e->cur_panel_center();
    });
  auto f = begin(expanded_panels_) + fixed_index;
  std::rotate(p, f, f + 1);

.... далее ещё много кода в этой функции ....
```

- Это невероятно лучше, чем то, что было. И это эффективнее.
- Но это может стать ещё эффективнее, если мы уверены, что исходные панели отсортированы по индексу.

Сортировки и недосортировки

- Задача: получить первые N по величине элементов контейнера cont всё равно в каком порядке. После этого вывести их на экран.

1. `sort(cont.begin(), cont.end());`
2. `partial_sort(cont.begin(), cont.begin() + N, cont.end());`
3. `nth_element(cont.begin(), cont.begin() + N, cont.end());`

- Все три алгоритма решают задачу. Но понятно, что третий вариант требует для этого меньше времени.

Обсуждение

- У нас есть заведомо сортированные контейнеры, такие как std::set и есть возможность создать сортированный диапазон на последовательном контейнере.
- Можем ли мы это как-то использовать?

Бинарный поиск

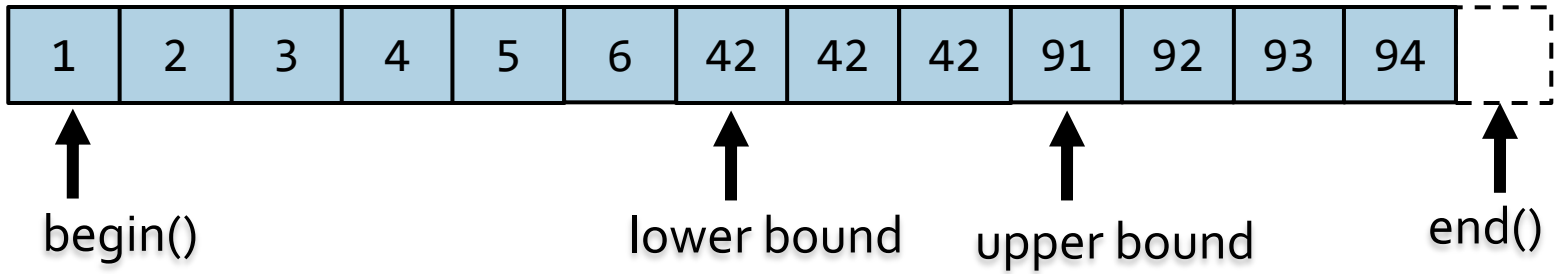
- Неявное ограничение всего семейства таких алгоритмов: они работают только на сортированных интервалах

```
vector<int> v = {81, 9, 54, 36, 27, 63, 18, 72, 45};

sort(v.begin(), v.end());

if (binary_search(v.begin(), v.end(), 37)) {
    // сюда мы не попадём?
}
```

- Надо добавить: мы туда в лучшем случае не попадём.

Поисковые алгоритмы

- **`binary_search`** – есть элемент или его нет
- **`lower_bound`** – где мог бы быть элемент, если бы он был (слева)
- **`upper_bound`** – где мог бы быть элемент, если бы он был (справа)
- **`equal_range`** – есть ли элемент и если да, то где
- Сложность каждого из них логарифмическая.



https://godbolt.org/z/MTGh7sx16

Вернёмся к панелям

- Вам предлагают использовать изначальную сортированность панелей в следующем коде…

```
void PanelBar::RepositionExpandedPanels(Panel* fixed_panel, int fixed_index) {
  // check if panel has moved to the other side or another panel
  const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
  for (size_t i = 0; i < expanded_panels_.size(); ++i) {
    Panel *panel = expanded_panels_[i].get();
    if (center_x <= panel->cur_panel_center() ||
        i == expanded_panels_.size() - 1) {
      if (panel != fixed_panel) {
        ref_ptr<Panel> ref = expanded_panels_[fixed_index];
        expanded_panels_.erase(expanded_panels_.begin() + fixed_index);
        if (i < expanded_panels_.size()) {
          expanded_panels_.insert(expanded_panels_.begin() + i, ref);
        } else {
          expanded_panels_.push_back(ref)
        }
      } break;
    }
  } // .... далее ещё много кода в этой функции ....
```

Немного более человечно

- Ну ладно, допустим вот в этом коде (оптимистичней, правда?)

```
const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
auto p = find_if(begin(expanded_panels_), end(expanded_panels_),
                 [&](auto *e) {
                   return center_x <= e->cur_panel_center();
                 });

auto f = begin(expanded_panels_) + fixed_index;
rotate(p, f, f + 1);
```

- Кажется, если панели изначально сортированы, то find_if делает чересчур много…

Внезапное переобувание

- Ну ладно, допустим вот в этом коде (оптимистичней, правда?)

```
const int center_x = fixed_panel->cur_panel_center();
auto p = lower_bound(begin(expanded_panels_), end(expanded_panels_),
                     center_x, [](auto *e, int x) {
                                  return e->cur_panel_center() < x;
                               });

auto f = begin(expanded_panels_) + fixed_index;
rotate(p, f, f + 1);
```

- Это очень важное наблюдение: переход к алгоритмам позволяет делать такие изменения "в одну строчку"

Обсуждение

- Алгоритм find затрачивает O(N)
- Алгоритм equal_range затрачивает O(log(N)) но требует сортированного интервала
- Проверка сортированности интервала выполняется через is_sorted, который работает за O(N)
- Есть ли способы как-то гарантировать сортированность?

- ❑ Функторы и состояние
- ❑ Алгоритмы
- ❑ No raw loops
- ➢ Case study: группы перестановок

Циклические перестановки

- Мы можем кодировать перестановки любых объектов как циклические перестановки.
- Простейший цикл это `(1 2)` означает $1 \to 2, 2 \to 1$
- `(2 3 1)` означает $2 \to 3, 3 \to 1, 1 \to 2$
- Очевидно, что `(2 3 1) == (1 2 3) == (3 1 2)`

Циклические перестановки

- Мы можем кодировать перестановки любых объектов как циклические перестановки.
- Простейший цикл это (1 2) означает $1 \to 2,\ 2 \to 1$
- (2 3 1) означает $2 \to 3,\ 3 \to 1,\ 1 \to 2$
- Очевидно, что (2 3 1) == (1 2 3) == (3 1 2)
- Нормальной формой называется цикл с минимальным элементом впереди
- Нормальная форма для (4 2 1 3)?
- Есть ли разница между (4 2 1 3) и "(4 2), а потом (1 3)"?

Циклические перестановки

- Мы можем кодировать перестановки любых объектов как циклические перестановки.
- Простейший цикл это `(1 2)` означает $1 \to 2, 2 \to 1$
- `(2 3 1)` означает $2 \to 3, 3 \to 1, 1 \to 2$
- Очевидно, что `(2 3 1) == (1 2 3) == (3 1 2)`
- Нормальной формой называется цикл с минимальным элементом впереди
- Нормальная форма для `(4 2 1 3)` это `(1 3 4 2)`
- Да, рассмотрим `[3 1 4 2]`. `(4 2 1 3)` изменяет её в `[3 1 4 2]`, тогда как `(4 2)(1 3)` в `[3 4 1 2]`

От перестановок к циклической записи

- Обычная перестановка: пишется в два столбика

1 2 3 4 5 6 7 8 9 – исходный

9 2 3 1 7 6 8 5 4 – результирующий

- Ей соответствует циклическая форма

(1 9 4)(3)(5 7 8)(6)

- Необходимо написать функцию:

[9 2 3 1 7 6 8 5 4] $\rightarrow$ (1 9 4)(2)(3)(5 7 8)(6)

- Для начала: какая сигнатура должна быть у этой функции?

От перестановок к циклической записи

- Предлагамая сигнатура

```
// creates an array of loops from permutation given by table
// say: a, g, [d, c, e, g, b, f, a]
// gives: [(a, d, g), (b, c, e), (f)]

template <typename T>
void create_loops(T start, T fin, const vector<T>& table,
                  vector<PermLoop<T>>& out);
```

- Ваша критика?

Области определения

- Кодирование области определения как (`T start, T fin`) крайне неуместно
- Вместо этого можно взять класс вроде такого

```
template <typename T, T start_, T fin_> struct Idom {
  T val_;
  Idom(T val) : val_(val) {} // range check possible
  operator T() const { return val_; }
  using type = T;
  static const T start = start_;
  static const T fin = fin_;
};
```

От перестановок к циклической записи

- Предлагамая сигнатура

```
// creates an array of loops from permutation given by table
// say: [d, c, e, g, b, f, a]
// gives: [(a, d, g), (b, c, e), (f)]

template <typename T>
void create_loops(const vector<T>& table, vector<PermLoop<T>>& out);
```

- Теперь параметр это domain, предполагаем, что есть `T::start, T::fin`
- Ещё критика?

От перестановок к циклической записи

- Предлагамая сигнатура

```
// creates an array of loops from permutation given by table
// say: [d, c, e, g, b, f, a]
// gives: [(a, d, g), (b, c, e), (f)]

template <typename RandIt, typename OutIt>
void create_loops(RandIt tbeg, RandIt tend, OutIt lbeg);
```

- Теперь функция это обобщённый алгоритм

Применение перестановок

- Перестановка может быть применена
- Применим `(1 2)` к числу 1, получаем 2

```
template <typename T> T PermLoop<T>::apply (T x) const {
  auto it = find(loop_.begin(), loop_.end(), x);
  if (it == loop_.end()) return x;
  auto nxt = next(it);
  if (nxt == loop_.end()) return *loop_.begin();
  return *nxt;
}
```

- Применим `(1 3)` к `[1 2 3 4 5 6]`, имеем `[3 2 1 4 5 6]`
- Какую сигнатуру должен иметь метод `PermLoop<T>::apply` для таблицы?

Применение перестановок

- Перестановка может быть применена
- Применим `(1 2)` к числу 1, получаем 2

```
template <typename T> T PermLoop<T>::apply (T x) const;
```

- Применим `(1 3)` к `[1 2 3 4 5 6]`, имеем `[3 2 1 4 5 6]`
- Какую сигнатуру должен иметь метод `PermLoop<T>::apply` для таблицы?

```
template <typename T>
template <typename RandIt>
void PermLoop<T>::apply(RandIt tbeg, RandIt tend) const;
```

Перемножение перестановок

- Перестановки можно комбинировать не только когда они независимы, но и когда они содержат общие элементы
- Пример: (1 2)(2 3)
- Это означает 1 → 2, 2 → 1 и далее 2 → 3, 3 → 2
- Следовательно 1 → 3, 2 → 1, 3 → 2
- В циклической записи: (1 2)(2 3) = (1 3 2)
- Более сложный пример: (1 3 2)(1 2 4)(1 4 3 2) = (1 2)(3)(4)
- Какую сигнатуру должна иметь функция перемножения (упрощения заданного массива) перестановок?

Перемножение перестановок

- Неправильный, но соблазнительный вариант

```
template <typename T>
void simplify_loops (vector<PermLoop<T>> &input);
```

- Правильный вариант (STL-way)

```
template <typename RandIt, typename OutIt>
void simplify_loops (RandIt tbeg, RandIt tend, OutIt lbeg);
```

Перемножение перестановок

- Можно немного помедитировать над реализацией

```
template <typename RandIt, typename OutIt>
void simplify_loops (RandIt tbeg, RandIt tend, OutIt lbeg) {
  using T = std::decay_t<decltype(*tbeg)>::value_type;
  vector<T> table(T::fin - T::start + 1, T::start);
  iota(table.begin(), table.end(), T::start);
  for (auto loopit = make_reverse_iterator(tend);
       loopit != make_reverse_iterator(tbeg);
       ++loopit)
    loopit->apply(table.begin(), table.end());
  create_loops(table.begin(), table.end(), lbeg);
}
```

Обсуждение

- Это STL-подобные алгоритмы в максимально далёкой от STL предметной области. Тем не менее видно, как основные концепции упорядочивают и улучшают код

Литература

- Information technology – Programming languages – C++, ISO/IEC 14882, 2017
- Bjarne Stroustrup – The C++ Programming Language (4th Edition)
- Scott Meyers – Effective STL, 50 specific ways to improve your use of the standard template library, Addison-Wesley, 2001
- Sean Parent – C++ Seasoning, GoingNative'2013
- Sean Parent – Better Code: Data Structures, CppCon'2015
- Marshall Clow – STL Algorithms - why you should use them, and how to write your own, CppCon'2016
- Jonathan Boccara – 105 STL Algorithms in Less Than an Hour, CppCon'2018
- Ben Dean – Constructing Generic Algorithms: Principles and Practice - Ben Deane, CppCon'2020
- Sean Parent – Warning: std::find() is Broken!, CppCon'2021