29 | Ranges：无迭代器的迭代和更方便的组合

2020-02-07 吴咏炜

你好，我是吴咏炜。

今天，我们继续上一讲开始的话题，讨论 ranges（范围）。

Ranges 简介

像下面这样的代码：


```
#include <algorithm>
#include <iostream>
#include <iterator>

```

```
int main()
{
  using namespace std;
  int a[] = {1, 7, 3, 6,
               5, 2, 4, 8};
  copy(begin(a), end(a),
       ostream_iterator<int>(
         std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
  sort(begin(a), end(a));
  copy(begin(a), end(a),
       ostream_iterator<int>(
         std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
}
```

你应该已经见到过好多次了。有没有觉得这个代码有点重复、有点无聊呢？尤其是里面的 begin 和 end？

很多人都留意到了迭代器虽然灵活，但不是一个足够高级的抽象——尤其是我们已经对 C 数组都可以进行基于“范围”的循环之后。如果我们把数组看作一个抽象的“范围”，我们就可以得到下面的代码：

复制代码

```
#include <experimental/ranges/algorithm>
#include <experimental/ranges/iterator>
#include <iostream>

int main()
{
  using namespace std::
    experimental::ranges;
  int a[] = {1, 7, 3, 6,
               5, 2, 4, 8};
  copy(a, ostream_iterator<int>(
             std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
  sort(a);
  copy(a, ostream_iterator<int>(
             std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
}
```

这是真正可以编译的代码，用我们上一讲讲过的环境——最新版的 MSVC（编译命令行上需要额外加 /permissive- 选项）或 GCC 7+——都可以。不过，这一次即使最新版的 MSVC 也不能靠编译器本身支持 ranges 库的所有特性了：在两种环境下我们都必须使用 CMCSTL2 [1]，也只能（在 C++20 之前临时）使用 std::experimental::ranges 而不是 std::ranges。注意我只引入了 ranges 名空间，而没有引入 std 名空间，这是因为 copy、sort 等名称同时出现在了这两个名空间里，同时引入两个名空间会在使用 sort 等名字时导致冲突。

这个程序的输出，当然是毫不意外的：

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

下面我们看“视图”。比如下面的代码展示了一个反转的视图：

复制代码

```
#include <experimental/ranges/algorithm>
#include <experimental/ranges/iterator>
#include <experimental/ranges/ranges>
#include <iostream>

int main()
{
  using namespace std::
    experimental::ranges;
  int a[] = {1, 7, 3, 6,
             5, 2, 4, 8};
  copy(a, ostream_iterator<int>(
            std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
  auto r = reverse_view(a);
  copy(r, ostream_iterator<int>(
            std::cout, " "));
  std::cout << std::endl;
}
```

这个程序的输出是：

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

为什么 r 是视图，而不是反向复制出的内容？我们可以在输出 r 之前（15 行之后，16 行之前）插入下面这行：


```
a[0] = 9;
```

我们可以看到最后那行输出变成了：

> 8 4 2 5 6 3 7 9

这就证明了，r 没有复制 a 的内容。

视图的大小也不一定跟原先的“范围”一样。下面是我们在 [第 17 讲] 讨论过的过滤视图在 ranges 里的实现的用法：


```
auto r =
  filter_view(a, [](int i) {
    return i % 2 == 0;
  });
```

拿这个来替换上面用到 `reverse_view` 的那行，我们就能得到：

> 6 2 4 8

这些视图还能进行组合：我们可以写 `reverse_view(filter_view(…))`。不过，在组合的情况下，下面这样的写法（使用 | 和视图适配器）可能更清晰些：


```
auto r = a |
         views::filter([](int i) {
           return i % 2 == 0;
         }) |
         views::reverse;
```

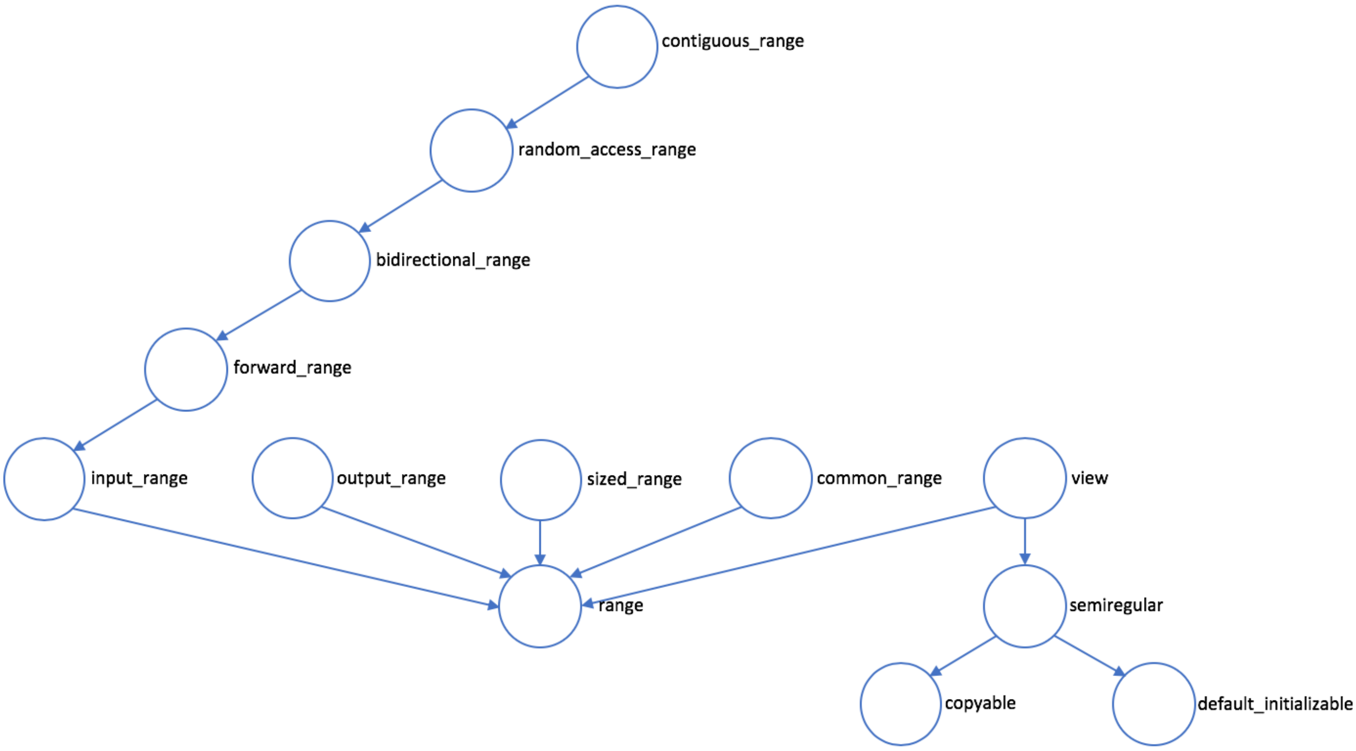
这个程序的执行结果是：

> 8 4 2 6

如果你用过 Unix 的管道符，你一定会觉得这种写法非常自然、容易组合吧……

范围相关的概念

整个 ranges 库是基于概念来定义的。下面这张图展示了 range 相关的概念：



从图的右下角，我们可以看到上一讲讨论过的几个概念，包括 copyable 和 semiregular。再往上，我们看到了 view——视图——也看到了视图是一个 range。现在我们就先来看一下 range 和 view 的定义。

在 CMCSTL2 里，range 是这样定义的：

复制代码

```
template <class T>
concept _RangeImpl =
  requires(T&& t) {
    begin(static_cast<T&&>(t));
    end(static_cast<T&&>(t));
  };
```

```
template<class T>
concept range = _RangeImpl<T&>;

```

换句话说，一个 range 允许执行 `begin` 和 end 操作（注意这是在 `ranges` 名空间下的 `begin` 和 end，和 std 下的有些小区别）。所以，一个数组，一个容器，通常也能当作一个 range。

我们已经提到了视图，我们接下来就看一下 view 的定义：

复制代码

```
template <class T>
concept view =
  range<T> &&
  semiregular<T> &&
  enable_view<__uncvref<T>>;
```

可以看到，view 首先是一个 range，其次它是 semiregular，也就是，可以被移动和复制（对 range 没有这个要求）。然后 `enable_view` 是个实现提供的概念，它的实际要求就是，视图应该不是一个容器，可以在 O(1) 复杂度完成拷贝或移动操作。我们常用的 `string` 满足 range，不满足 view；而 `string_view` 则同时满足 range 和 view。

下面，我们看 common_range，它的意思是这是个普通的 range，对其应用 `begin()` 和 `end()`，结果是同一类型：

复制代码

```
template <class T>
concept common_range =
  range<T> &&
  same_as<iterator_t<T>,
          sentinel_t<T>>;
```

然后，sized_range 的意思就是这个 range 是有大小的，可以取出其大小（注意我们刚才的 `filter_view` 就是没有大小的）：

复制代码

```
template <class T>
```

```
concept sized_range =
  range<T> &&
  requires(T& r) { size(r); };
```

自然，output_range 的意思是这个 range 的迭代器满足输出迭代器的条件：

复制代码

```
template <class R, class T>
concept output_range =
  range<R> &&
  output_iterator<iterator_t<R>, T>;
```

当然，input_range 的意思是这个 range 的迭代器满足输入迭代器的条件：

复制代码

```
template <class T>
concept input_range =
  range<T> &&
  input_iterator<iterator_t<T>>;
```

再往上的这些概念，我想我就不用再啰嗦了……

Sentinel

我估计其他概念你理解起来应该问题不大，但 common_range 也许会让有些人迷糊：什么样的 range 会**不**是 common_range 呢？

答案是，有些 range 的结束点，不是固定的位置，而是某个条件：如遇到 0，或者某个谓词满足了 10 次之后……从 C++17 开始，基于范围的 for 循环也接受 `begin` 和 `end` 的结果不是同一类型了——我们把前者返回的结果类型叫 iterator（迭代器），而把后者返回的结果类型叫 sentinel（标记）。

下面展示了一个实际的例子：

复制代码

```
#include <experimental/ranges/algorithm>
```

```
#include <experimental/ranges/iterator>
#include <iostream>

using namespace std::experimental::
  ranges;

struct null_sentinel {};

template <input_iterator I>
bool operator==(I i, null_sentinel)
{
  return *i == 0;
}

template <input_iterator I>
bool operator==(null_sentinel, I i)
{
  return *i == 0;
}

template <input_iterator I>
bool operator!=(I i, null_sentinel)
{
  return *i != 0;
}

template <input_iterator I>
bool operator!=(null_sentinel, I i)
{
  return *i != 0;
}

int main(int argc, char* argv[])
{
  if (argc != 2) {
    std::cout << "Please provide "
                 "an argument!"
              << std::endl;
    return 1;
  }
  for_each(argv[1], null_sentinel(),
           [](char ch) {
             std::cout << ch;
           });
  std::cout << std::endl;
}
```

在这个程序里，`null_sentinel` 就是一个“空值标记”。这个类型存在的唯一意义，就是允许 == 和 != 根据重载规则做一些特殊的事情：在这里，就是判断当前迭代器指向的位

置是否为 0。上面程序的执行结果是把命令行上传入的第一个参数输出到终端上。

概念测试

我们现在对概念来做一下检查，看看常用的一些容器和视图满足哪些 ranges 里的概念。

	`vector<int>`	`const vector<int>`
range	✓	✓
view	×	×
sized_range	✓	✓
common_range	✓	✓
output_range	✓	×
input_range	✓	✓
forward_range	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓
random_access_range	✓	✓
contiguous_range	✓	✓

这张表里没有什么意外的东西。除了 view，`vector<int>` 满足所有的 range 概念。另外，`const vector<int>` 不能满足 output_range，不能往里写内容，也一切正常。

	`list<int>`	`const list<int>`
range	✓	✓
view	×	×
sized_range	✓	✓
common_range	✓	✓
output_range	✓	×
input_range	✓	✓
forward_range	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓
random_access_range	×	×
contiguous_range	×	×

这张表，同样表达了我们已知的事实：`list` 不满足 random_access_range 和 contiguous_range。

	`int [8]`	`int const [8]`
range	✓	✓
view	×	×
sized_range	✓	✓
common_range	✓	✓
output_range	✓	×
input_range	✓	✓
forward_range	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓
random_access_range	✓	✓
contiguous_range	✓	✓

这张表，说明了从 range 的角度，C 数组和 `vector` 是没啥区别的。

	`reverse_view<int [8]>`	`reverse_view<int const [8]>`
range	✓	✓
view	✓	✓
sized_range	✓	✓
common_range	✓	✓
output_range	✓	×
input_range	✓	✓
forward_range	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓
random_access_range	✓	✓
contiguous_range	×	×

这张就有点意思了，展示了反转视图的特点。我们可以看到它几乎和原始容器可满足的概念一样，就多了 view，少了 contiguous_range。应该没有让你感到意外的内容吧。

	`filter_view<int [8]>`	`filter_view<int const [8]>`
range	✓	✓
view	✓	✓
sized_range	×	×
common_range	✓	✓
output_range	✓	×
input_range	✓	✓
forward_range	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓
random_access_range	×	×
contiguous_range	×	×

但过滤视图就不一样了：我们不能预知元素的数量，所以它不能满足 sized_range。

	`istream_line_reader`	`take_view<istream_line_reader>`
range	✓	✓
view	✓	✓
sized_range	×	×
common_range	✓	×
output_range	×	×
input_range	✓	✓
forward_range	×	×
bidirectional_range	×	×
random_access_range	×	×
contiguous_range	×	×

我们前面说过，istream_line_reader 的迭代器是输入迭代器，所以它也只能是个 input_range。我们在设计上对 `begin()` 和 `end` 的返回值采用了相同的类型，因此它仍是个 common_range。用 take_view 可以取一个范围的前若干项，它就不是一个 commom_range 了。因为输入可能在到达预定项数之前结束，所以它也不是 sized_range。

	iota_view(0)	iota_view(0, 5)	iota_view(0)|take(5)
range	✓	✓	✓
view	✓	✓	✓
sized_range	×	✓	×
common_range	×	✓	×
output_range	×	×	×
input_range	✓	✓	✓
forward_range	✓	✓	✓
bidirectional_range	✓	✓	✓
random_access_range	✓	✓	✓
contiguous_range	×	×	×

我们再来介绍一个新的视图，`iota_view`。它代表一个从某个数开始的递增序列。单参数的 `iota_view` 是无穷序列，双参数的是有限序列，从它们能满足的概念上就能看出来。这儿比较有趣的事实是，虽然 `iota_view(0, 5)` 和 `iota_view(0) | take(5)` 的结果相同，都是序列 {0, 1, 2, 3, 4}，但编译器看起来，前者比后者要多满足两个概念。这应该也不难理解。

抽象和性能

说了这么多，你可能还是有点好奇，那 ranges 的用途是什么呢？为了少写 `begin()` 和 `end()`？为了方便函数式编程？

当然，上面的说法都对，但最基本的目的，还是为了抽象和表达能力。我们可以看一眼下面的 Python 代码：

复制代码

```
reduce(lambda x, y: x + y,
       map(lambda x: x * x, range(1, 101)))
```

你应该不难看出，这个表达式做的是 $1^2 + 2^2 + 3^2 + \cdots + 100^2$。C++ 里我们该怎么做呢？

当然，手工循环是可以的：


```
auto square = [](int x) {
  return x * x;
};

int sum = 0;
for (int i = 1; i < 101; ++i) {
  sum += square(i);
}
```

比起 Python 的代码来，似乎上面这个写法有点啰嗦？我们试试使用 ranges：


```
int sum = nvwa::reduce(
  std::plus<int>(),
  views::iota(1, 101) |
    views::transform(
      [](int x) { return x * x; }));
```

我不知道你喜不喜欢上面这个表达方式，但它至少能在单个表达式里完成同样的功能。唯一遗憾的是，标准算法 `accumulate` 或 `reduce` 在上面不可用（没有针对 ranges 的改造），我只好拿我的非标 `reduce` [2] 来凑凑数了。

同样重要的是，上面的代码性能很高……多高呢？看下面这行汇编输出的代码就知道了：


```
movl  $338350, -4(%rbp)
```

ranges 名空间

我们现在再来看一下 ranges 名空间（我们目前代码里的 std::experimental::ranges，C++20 的 std::ranges）。这个名空间有 ranges 特有的内容：

- 视图（如 reverse_view）和视图适配器（如 views::reverse）
- ranges 相关的概念（如 range、view 等）

但也有些名称是从 std 名空间“复制”过来的，包括：

- 标准算法（如 copy、transform、sort、all_of、for_each 等；但是，如前面所说，没有 accumulate 或 reduce）
- begin 和 end

std::copy 接受的是迭代器，而 ranges::copy 接受的是范围，似乎还有点道理。那 begin 和 end 呢？本来接受的参数就是一个范围啊……

Eric Niebler（Ranges TS 的作者）引入 ranges::begin 的目的是解决下面的代码可能产生的问题（他的例子 [3]）：

复制代码

```
extern std::vector<int> get_data();
auto it = std::begin(get_data());
int i = *it; // BOOM
```

注意在读取 *it 的时候，get_data() 返回的 vector 已经被销毁了——所以这个读取操作是未定义行为（undefined behavior）。

Eric Niebler 和 Casey Carter（CMCSTL2 的主要作者）使用了一个特殊的技巧，把 begin 和 end 实现成了有特殊约束的函数对象，使得下面这样的代码无法通过编译：

复制代码

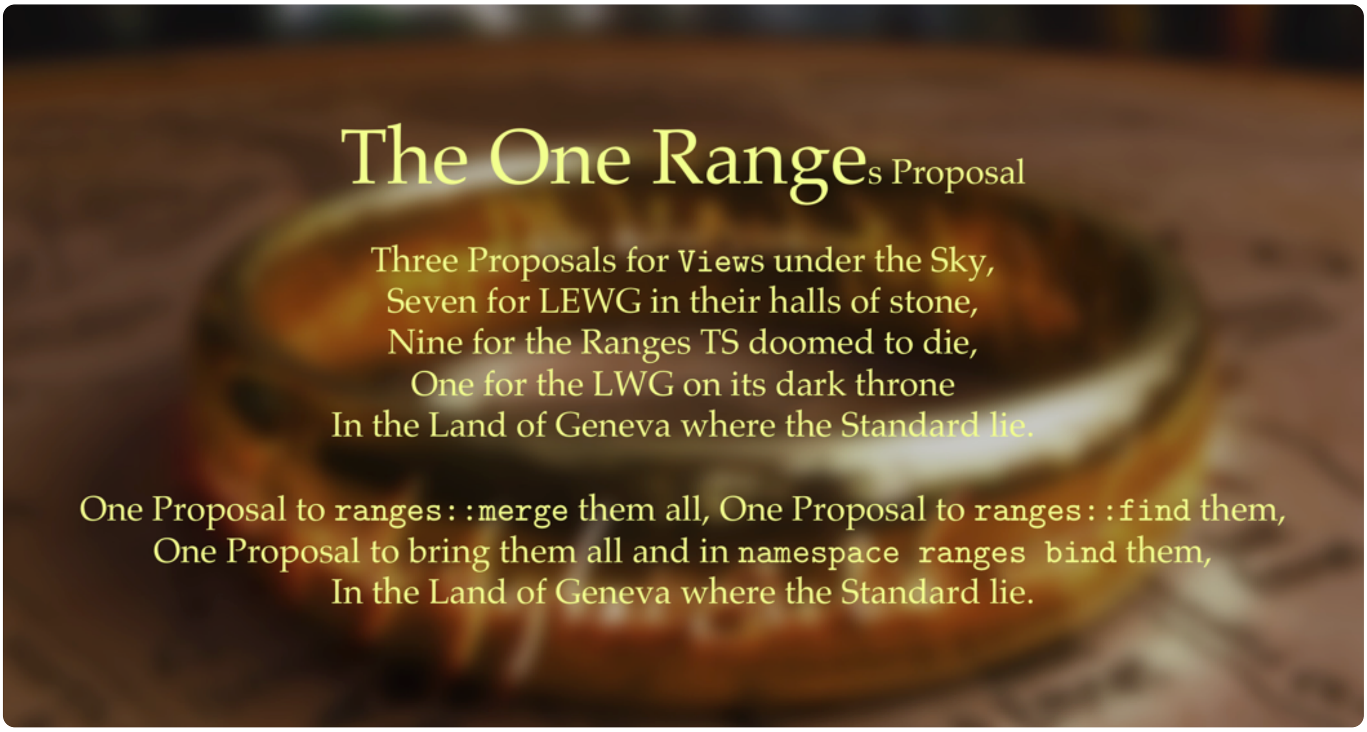
```
extern std::vector<int> get_data();
auto it = ranges::begin(get_data());
int i = *it; // BOOM
```

如果你对此有兴趣的话，可以看一下 CMCSTL2 里的 include/stl2/detail/range/access.hpp。

对一般的用户而言，记住 `ranges::begin` 和 `ranges::end` 是将来 `std::begin` 和 `std::end` 的更好的替代品就行了。

一点历史

对于标准算法里的迭代器的问题早就有人看到了，并且有不少人提出了改进的方案。最早在 2003 年，Boost.Range 就已经出现（但影响似乎不大）。Andrei Alexandresu 在 2009 年发了一篇很有影响力的文章，“Iterators must go” [4]，讨论迭代器的问题，及他在 D 语言里实现 ranges 的经验，但在 C++ 界没有开花结果。Eric Niebler 在 2013 年开始了 range-v3 [5] 的工作，这才是目前的 ranges 的基础。他把 ranges 写成了一个标准提案 [6]，并在 2017 年被 ISO 出版成为正式的 Ranges TS。2018 年末，好消息传来，C++ 委员会通过了决议，Ranges 正式被并入了 C++20 的草案！



谁说程序员都是无趣的？这篇内容申请把 Ranges 并入 C++ 标准草案的纯技术文档 The One Ranges Proposal [7]，开头绝对是激情四射啊。

批评和未来

如果我只说好的方面、问题一点不说，对于学习道路上的你，也不是件好事。最有名的对 C++ Ranges 的批评，就是 Unity 开发者 Aras Pranckevičius 发表的一篇文章 [8]。我不完全认同文中的观点，但我觉得读一下反面的意见也很重要。

此外，C++20 里的 ranges 不是一个概念的终点。即便在 range-v3 库里，也有很多东西仍然没有进入 C++ 标准。比如，看一眼下面的代码：

复制代码

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <vector>
#include <range/v3/all.hpp>

int main()
{
  std::vector<int> vd{1, 7, 3, 6,
                      5, 2, 4, 8};
  std::vector<std::string> vs{
    "one",  "seven", "three",
    "six",  "five",  "two",
    "four", "eight"};
  auto v =
    ranges::views::zip(vd, vs);
  ranges::sort(v);
  for (auto i : vs) {
    std::cout << i << std::endl;
  }
}
```

上面的代码展示了标准 ranges 中还没有的 zip 视图，并且，zip 视图的结果还可以被排序，结果将使得原始的两个 `vector` 都重新排序。上述程序的运行结果是：

```
one
two
three
four
five
six
seven
eight
```

这个非标的 range-v3 库的另外一个好处是，它不依赖于概念的支持，因而可以用在更多的环境中，包括目前还不支持概念的 Clang。

如果你希望自己尝试一下这个代码的话，需要在命令行上使用 `-I` 选项来包含 range-v3 的 include 目录，此外 MSVC 还需要几个特殊选项：

> `cl /EHsc /std:c++latest /permissive- /experimental:preprocessor`
> …

内容小结

本讲讨论了 C++20 的又一重要特性 ranges。虽然这一特性比起 concepts 来争议要多，但无疑它展示了 C++ 语言的一些新的可能性，并可以产生非常紧凑的高性能代码。

课后思考

你怎么看待 ranges 和对它的批评？你会想用 ranges 吗？欢迎留言与我交流。

参考资料

[1] Casey Carter et al., cmcstl2. https://github.com/CaseyCarter/cmcstl2

[2] 吴咏炜, nvwa/functional.h. https://github.com/adah1972/nvwa/blob/master/nvwa/functional.h

[3] Eric Niebler, “Standard ranges” . http://ericniebler.com/2018/12/05/standard-ranges/

[4] Andrei Alexandrescu, “Iterators must go” , http://accu.org/content/conf2009/AndreiAlexandrescu_iterators-must-go.pdf

[5] Eric Niebler, range-v3. https://github.com/ericniebler/range-v3

[6] Eric Niebler and Casey Carter, “Working draft, C++ extensions for ranges” . http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2015/n4560.pdf

[7] Eric Niebler, Casey Carter, and Christopher Di Bella, “The one ranges proposal”. http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2018/p0896r4.pdf

[8] Aras Pranckevičius, “‘Modern’ C++ lamentations”. https://aras-p.info/blog/2018/12/28/Modern-C-Lamentations/；CSDN 的翻译见 https://blog.csdn.net/csdnnews/article/details/86386281

上一篇 28 | Concepts：如何对模板进行约束?

下一篇 30 | Coroutines：协作式的交叉调度执行

精选留言 (2)

写留言

Sochooligan
2020-02-08

一、看得云里雾里地，好的方面是所有例子都运行了。
二、发现两处分心的地方：
（1）我们可以在输出 r 之前插入下面这行：

我们可以在输出 r 之前（15行之后，16行之前）插入下面这行:
（2）除了 view，vector 满足所有的 range 概念。...

展开

作者回复: 多看两遍。ranges 和 concepts 对于一般的开发者来说应当是很新的东西，我自己也学习了很多遍，踩了很多坑。

二(1) 加行号说明是个好主意，我改一下吧。二(2) 两可之间的，就不动了。

1

pedro

2020-02-07

老师能讲一讲关于c++内存安全相关的编码规范和技巧吗，我觉得这个或许才是很多同学的刚需

作者回复: 这个我没想到很简单的讲法。

不过，真要从简的话，最基本的要求就是，不要用 new，不要用裸指针：使用智能指针来代替。

此外，在用到视图的时候，包括 ranges 里的视图和更简单的情况如 string_view，要确保使用视图时视图使用的对象一直存在，没有被意外销毁。视图不管理内存。