

Lab 3: 汉诺塔

在Lab 3中，你需要设计并实现一个游戏：汉诺塔。

1. 汉诺塔问题

汉诺塔是一个著名的数学问题。它由三根杆子和若干不同大小的盘子组成。开始时，所有的盘子都在第一根杆子上，并按照从上到下大小升序排列（也就是说，最小的在最上面）。这个问题的目标是将所有盘子移到另一根杆子上，并遵守以下简单的规则：

1. 每次只能移动一个盘子。
2. 每次移动都是将其中一根杆子的最上面的盘子取出，放到另一根杆子上。
3. 任何较大的盘子都不能放在较小的盘子上面。

解决这个问题的经典方法是递归。该算法可以描述为以下伪代码：

```
function hanoi(n, A, B, C) { // move n disks from rod A to rod B, use rod C as a buffer
    hanoi(n - 1, A, C, B);
    move(n, A, B); // move the nth disk from rod A to rod B
    hanoi(n - 1, C, B, A);
}
```

2. 实验描述

在本实验中，杆子的数量总是等于3，盘子的数量可以是1~5。其中，第1根杆子为初始杆，第2根为目标杆。

本实验的任务包括以下内容：

- 完成一个交互式的汉诺塔游戏程序，根据用户输入的指令移动相应的盘子，并在用户胜利时打印提示；
- 通过命令行界面，将汉诺塔游戏的状态绘制出来，包括3根杆子和若干盘子；
- 根据汉诺塔问题的递归算法，提供一个自动求解程序，能够从任一状态出发，通过若干步移动达到目标状态；
- 通过判断当前的盘子排列状态是否属于递归算法途经的各状态组成的集合，提示当前状态是否处于递归路径上（将递归算法途经的状态集定义为递归路径）。

具体而言，程序的流程如下：

1. 首先，程序打印 `How many disks do you want? (1 ~ 5)`，要求输入盘子的数量（要求为1~5）。如果输入 `Q`，则退出程序。不合法的输入应当忽略。
2. 接下来程序将打印汉诺塔的状态，随后打印 `Move a disk. Format: x y (or 'H' for a hint)`，要求用户给出指令。指令的形式可以有两种，一种是 `from to`（例如，`2 3`的意思是将杆2最上面的盘子移动到杆3上），另一种是 `H`（将判断当前状态是否处于递归路径上），不合法的输入或是不可执行的指令应该忽略。在这之后，无论指令是否合法，程序总是重新打印一遍当前状态，并重新要求用户输入。
3. 如果输入的指令为 `0 0`，则进入自动模式。程序需要首先将用户已经执行的指令反过来执行一遍，复原到初始状态，然后再按照递归算法执行。每次执行时，程序通过输出 `Auto moving:x->y` 告知用户所执行的指令。注意：即使有其他方法从当前状态直接到达目标状态，也请按照先复原后执行的方式进行。这是因为自动评测的时候会直接比对输出内容。

4. 如果输入的指令为 `H`，则会判断当前的状态（状态只与各个盘子当前所在的位置与大小有关，与历史移动无关，因此即使过去的某个状态偏移了递归路径，后续仍可能回到该路径上）是否是递归路径上的状态集中的某个状态，如果是，则输出 `You are on the optimal path!`，如果不是，则输出 `Sorry. You are not on the optimal path.`。（注意，在这之后仍需要打印一遍当前状态）
5. 无论是通过用户指令或是自动模式，只要达成目标状态（即所有盘子都移到杆2上），就打印游戏胜利的提示信息，然后重新回到第1步。

打印汉诺塔状态的要求：我们用 `|` 表示杆子，`-` 表示底座，一排 `*` 表示盘子。每个盘子从小到大分别用3、5、7、9、11个 `*` 表示（最多5个盘子）。无论盘子数量多少，输出的整个画布的大小固定为11x41。

例如，一共5个盘子，均按照从小到大放在杆1上，此时输出的结果应该如下：

```

      |
      |
    ***
      |
    *****
      |
    *****
      |
    *****
      |
    *****
      |
    *****
-----|-----|-----|-----
```

而如果只有3个盘子，输出如下（注意画布的大小不变）：

```

      |
      |
      |
      |
    ***
      |
    *****
      |
    *****
      |
    *****
-----|-----|-----|-----
```

3. 样例输入输出

这里给出两个样例，分别使用自动模式和手动模式。这里行首的 `>` `<` 代表是程序的输入还是输出。

样例1：

```

< How many disks do you want? (1 ~ 5)
> 2
<
<
<
<
```



```
< How many disks do you want? (1 ~ 5)
> 2

<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<    ***          |           |
<      |           |           |
<    *****     |           |
< -----|-----|-----|-----
< Move a disk. Format: x y (or 'H' for a hint)
> H
< You are on the optimal path!

<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<    ***          |           |
<      |           |           |
<    *****     |           |
< -----|-----|-----|-----
< Move a disk. Format: x y (or 'H' for a hint)
> 1 2

<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<      |           |           |
<    *****       ***         |
< -----|-----|-----|-----
< Move a disk. Format: x y (or 'H' for a hint)
> H
< Sorry. You are not on the optimal path.
```

[illegible]

```
<      |               |
<      |               |
<          *****            ***
< -----|-----|-----|-----
< Move a disk. Format: x y (or 'H' for a hint)
> 3 2
<      |               |
<      |               |
<      |               |
<      |               |
<      |               |
<      |               |
<      |               |
<          ***              |
<          |                |
<          *****         |
< -----|-----|-----|-----
< Congratulations! You win!
< How many disks do you want? (1 ~ 5)
> Q
```

4. 面向对象和数据结构

要完成这个实验，你需要了解C++面向对象编程以及基本的数据结构知识（如栈和队列）。在本实验中，你需要根据我们的设计来实现对应的数据结构。

4.1 UniquePtr

本实验中，实现的栈和队列是由链表的方式实现的，并且链表节点 `node.h` 已经为你实现好了。与你常见的实现不同，我们为你实现的链表有自己特殊的属性——所有权机制。所有权是程序设计中一种常见的设计方法，表达某个数据属于某个变量的概念。在我们实现的链表节点中，一块数据只能被一个所有者拥有，即数据是独占的。下面是一个简单的例子：

```
int *p = new int(2);    // p申请了一块新内存
int *p2 = p;            // p2复制p的值，也指向同一块内存
*p += 1;
assert(*p2, 3);          // p的修改会影响到p2
```

上面这个例子中，`p` 和 `p2` 两个指针都指向同一个内存块，即 `p` 和 `p2` 共享了内存块的所有权。下面我们使用封装指针的类型——`UniquePtr`，来演示如何使用独占所有权：

```
// p是指向内存块的指针，内存块的值为1
UniquePtr<int> p = MakeUnique<int>(1);

// p2也想要指向指针p所指向的内存块，引发编译错误
UniquePtr<int> p2 = p; // compile error

// p将自己所有的内存块移动给p3，p变成nullptr，p3成为内存块的所有者
UniquePtr<int> p3 = std::move(p);

assert(p, nullptr);
assert(*p3, 1);
```

除了独占所有权这一特性之外，`UniquePtr` 还使用了C++的RAII来保障内存安全。Resource acquisition is initialization (RAII)是C++的特性，通过构造函数和析构函数的配套使用，`UniquePtr` 可以在构造函数中申请内存，在析构函数中释放内存，从而避免手动的 `new` 和 `delete`。

```
{
    UniquePtr<int> p = MakeUnique<int>(1);
    fn(p); // 对p及指向的内存进行操作
}
// p的生命周期结束，内存自动被释放
```

在实验中，我们为你定义好了 `UniquePtr` 的原型，你需要完成具体的实现。请注意，实现 `UniquePtr` 很容易产生错误，包括意外的空指针、不经意的内存泄漏。实验中有一个使用googletest编写的测试框架（`lab3_test.cpp`），我们会通过详细的单元测试来确保你的 `UniquePtr` 是正确的。我们也鼓励你自己对 `UniquePtr` 进行测试，具体测试的编写方式可以参考 `lab3_test.cpp`。

4.2 链表、栈、队列

实验在 `UniquePtr` 的基础上，构建其他的数据结构。我们为你定义好了 `Stack` 和 `Queue` 的原型，你需要完成具体的实现。

请注意，你只需要构建单向链表的栈和队列。每个数据结构都分为 `xxx.h` 和 `xxx_impl.h`，`xxx.h` 是我们为你实现好的原型，你需要实现的是 `xxx_impl.h` 里的逻辑。

在其他的地方使用这些数据结构，只需要包含 `xxx.h` 即可。

5. 提示

我们已经准备了本实验的代码框架。其中每个文件的用途说明如下：

- `hanoi.cpp` 中含有main函数，请从这里开始编写程序的整体逻辑。
- `board.cpp` 和 `board.h` 中实现了Board类，这个类用来表示汉诺塔游戏的状态。Board类主要的成员函数分别解释如下：
 - `move` 函数用于执行移动指令，其中第三个参数 `log` 代表该操作是否为用户手动执行，如果是则需要记录至历史；
 - `win` 函数用于判断游戏是否胜利；
 - `draw` 函数向控制台打印当前状态（按照上面所说的格式）；

- `autoplay` 函数可以开始自动模式。
- `hint` 函数可以提示当前状态是否处于递归路径上。
- `toString` 函数用于序列化当前状态，以便与递归路径上的状态比较。
- `canvas.h` 是提供的画布工具。该文件实现了 `Canvas` 类，该类可以创建一个 11x41 的缓冲区，允许你先在这个缓冲区上绘画，然后再一起输出。你可以在 `Board::draw` 函数中使用该 `Canvas` 类。
- `rod.h` 和 `rod.cpp` 是提供的工具类，其中包含了修改柱子的逻辑代码，通过与 `Canvas` 类交互起到修改画布信息的作用。
- `disk.h` 和 `disk.cpp` 是提供的工具类，其中包含了修改盘子的逻辑代码，通过与 `Canvas` 类交互起到修改画布信息的作用。
- `queue.h` `stack.h` 分别实现栈和队列，他们都使用了 `node.h` 和 `unique_ptr.h` 的逻辑。这些文件是接口定义和为我们提供好的一部分功能实现，每个容器都对应有 `xxx_impl.h` 的头文件，内部包含了真正的函数实现，需要你来完成。

请你按照前面对程序功能的描述，补全代码中的 TODO 注释，实现汉诺塔游戏程序。

你需要注意以下事情：

1. 请不要在代码中使用某些 STL 容器和智能指针。禁止的容器类包括：`std::vector` `std::stack` `std::queue` `std::list` `std::unique_ptr`，其他类（如 `std::pair`）的使用不受影响。不使用 STL 容器会在评分中占 10 分。该项分数会通过评测程序自动检查，如果评分有误请及时联系负责的助教进行人工检查。
2. 你需要完全按照给出的代码框架来编写，并且只修改需要你修改的文件，提交的压缩包中只包含你所完成的文件。请注意，测试时，不需要你修改的文件会被我们用原始文件覆盖，如果你也修改了这些文件，最终可能会导致平台无法编译你的代码。
3. `UniquePtr` 只能通过 `std::move` 来移动所有权，不能直接拷贝赋值/构造。你的实现不需要考虑如何做到这一点，只需要编写移动赋值和移动构造函数即可。
4. 你可以调用 `MakeUnique` 得到一个任意类型 `T` 的 `UniquePtr`，直接传入构造 `T` 所需要的参数即可。下面是一个更详细的例子：

```
struct A {
    int a;
    int b;
    A(int a, int b): a(a), b(b) {}
}

UniquePtr<A> p = MakeUnique<A>(1, 2); // a = 1, b = 2
```

5. `UniquePtr` 的定义中包含了 `reset` 和 `release` 函数，注释中描述了这两个函数具体的语义。只使用 `reset` 和 `release` 的简单组合就可以实现移动构造和移动赋值，同时我们也会测试你的 `reset` 和 `release` 是否正确实现。
6. 在实现堆和栈的时候，多使用 `assert` 来检查指针是否为 `nullptr` 是一个很好的习惯，能够帮助你节省 debug 的时间。
7. 在实现自动模式时，请务必先将用户的所有操作一一复原，然后再按照标准的递归流程进行。

8. 遇到不合法的输入时，请直接忽略，重新请求用户输入。如果是在游戏进行时遇到不合法的输入，要当作执行一次无效操作，先输出一遍游戏状态，再请求用户输入。测试用例中会有1个用于测试程序面对非法输入的行为。不合法的输入可能包括：
- 需要输入数字时输入了其他字符；
 - 输入的数值过小或过大；
 - `from` 是空杆；
 - 试图将大盘放到小盘上；
 - 等等。
9. 你只需要在栈、队列的实现中使用 `UniquePtr`，在表达数组的时候，可以直接使用裸指针（我们为你提供的 `board`、`canvas`、`rod`、`disk` 也是使用裸指针的）。
10. 在比较两个状态的时候，你需要首先实现 `rod.cpp` 中的 `toString` 成员函数（`board.cpp` 中的 `toString` 已经提供了实现，该实现简单地使用 `+=` 来拼接字符串。如果感兴趣，你可以查阅直接使用string连接的弊端），将柱子中盘子的堆叠顺序与大小唯一对应地“翻译”为一个字符串（这里对具体的转化方案不作要求，只需要能区分每一个状态即可）。接下来，你会用到 `std::unordered_set<std::string> optimal_states` 这个数据结构。它使用哈希表作为底层实现，能够以常数复杂度判断某个元素（这里是 `std::string`）是否已经存在于集合中。你在本次实验可能需要用到的 `std::unordered_set` 的成员函数有 `empty`、`insert`、`find`（或 `count`）。感兴趣的同学可以上网搜索，了解其设计与实现。
11. 注意提交的应当是一个7z压缩包，且压缩包内首先有一个 `lab3` 文件夹，文件夹内再包含源代码，错误的文件结构会导致测试失败。
12. 如果你在编译的时候遇到提示网络问题，可能是由于依赖中会拉取 `googletest` 的源代码，而你的网络无法访问github导致的。你可以将 `CMakeList.txt` 的 `googletest` 网址改成 `gitee` 的镜像源：

```
FetchContent_Declare(  
    googletest  
    # 指定googletest的仓库URL  
-    GIT_REPOSITORY https://github.com/google/googletest.git  
+    GIT_REPOSITORY https://gitee.com/mirrors/googletest.git  
    # 你可以指定一个特定的提交、分支或标签  
    GIT_TAG v1.14.x  
)
```

5. 提交和评分

你需要提交的文件包括：

```
hanoi.cpp  
board.cpp  
rod.cpp  
queue_impl.h  
stack_impl.h  
unique_ptr_impl.h
```

请将你的源代码打包成 `lab3-xxx.7z`（其中 `xxx` 是你的学号），然后上传到canvas上。7z文件的文件夹结构应当如下：

```
lab3-xxx.7z
|--- lab3
|    |--- xxx.h
|    |--- xxx.cpp
|    |--- ...
```

评分标准：编译通过20分，6个测试用例每个10分，不使用STL容器和智能指针10分，`UniquePtr` 的单元测试10分，总分100分。