1 修改后 remove 函数实现的阐述

首先，若对象是空树，则直接 return 其次，若对象比当前节点小，则继续向左找，比当前大，向右找。找到对象后，如果该待删除对象只有一侧子树甚至没有子树，都很容易实现，按照原版代码即可。我们只关心当待删除对象的左右子树均非空时的情况。

此时，需要先把它的继任者找出来，这个找继任者的操作就在 detachMin 里完成。

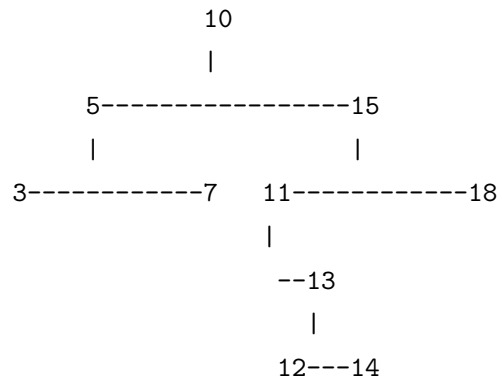
detachMin 负责传回将继任者找到并且无痕地取出来，由于继任者要求是右子树的最小者，一路往左就行。找到继任者后，要将继任者从树上剥离下来，但继任者可能也有子辈，于是将其子辈接回断的那根枝，即：继任者子辈和继任者父辈相接，别忘了先要弄个指针盯着这个继任者（否则就弄丢了），该指针值也作为参数传出去，被 remove 函数中的变量接收。

现在 remove 函数拿到了剥离下来的继任者，只需要做善后工作：把删除对象的左枝右枝告诉继任者，把指向删除对象的指针改成指向继任者，然后把删除对象 delete 即可。

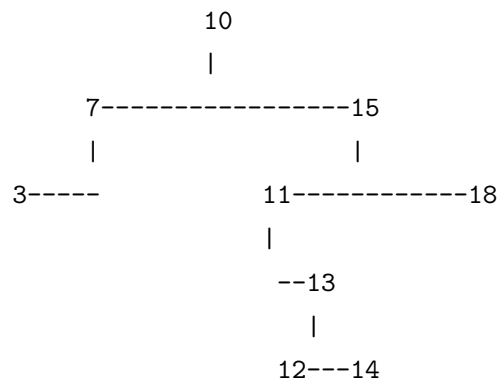
2 测试程序的设计思路

先测试正常的情况（即用户的使用不会触发抛出异常警告），为了验证 remove 正确操作，需要验证这些情况：1 删除对象不存在 2 删除对象恰好是叶节点 3 删除对象的继任者恰好是叶节点 4 删除对象的继任者还有后继 5 对一个空树进行删除

1. 我首先 insert 了一些更加多的元素，使得树变得更加复杂，最终，形成的 BST 树如下：

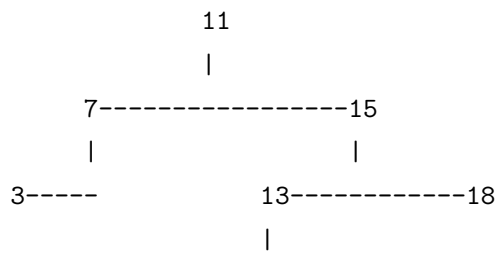


2. 接着，进行 remove 操作，首先测试普通的 remove(5)，对应的是：“接替删除对象的那个节点”恰好是叶子的情况，理想结果是成为树：

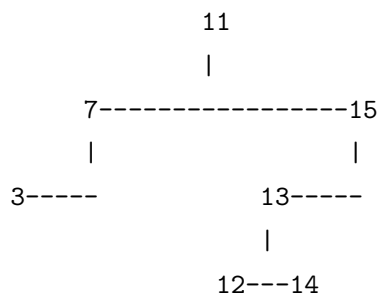


3. 接着，测试 remove 一个不存在的数据 6，希望的结果是什么都不发生。

4. 然后，测试 remove 根节点 10，预期的结果是，由右子树的最小者（11）来接替成为根节点，然后 11 的子辈被 11 的父辈接管，即：



5. 再测试被删除对象恰好就是叶节点的情况，remove(18)：



6. 最后测试对一棵空树进行 remove，是否会出问题。理想情况是什么都不做，打印该树，仍然输出 “empty tree”

3 测试的结果

在工作空间下使用命令 `make run`，输出将会打印到 terminal 中，如下

```
Initial Tree:
3
5
7
10
11
12
13
14
15
18
Minimum element: 3
Maximum element: 18
Contains 7? Yes
Contains 20? No
```

```
Tree after removing 5:
3
7
10
11
12
13
14
15
18
Tree after removing 6:
3
7
10
11
12
13
14
15
18
Tree after removing 10:
3
7
11
12
13
14
15
18
Tree after removing 18:
3
7
11
12
13
14
15
Treeddddd after making empty:
Empty tree
Is tree empty? Yes
Empty Tree after removing 7:
Empty tree
Copied Tree (bst3):
1
```

```
2
3
Assigned Tree (bst4):
1
2
3
Moved Tree (bst5):
1
2
3
Move Assigned Tree (bst6):
1
2
3
```

我用 valgrind –leak-check=full ./test_BST 进行测试，发现没有发生内存泄露： ERROR SUMMARY: 0 errors from 0 contexts (suppressed: 0 from 0)

以上输出，请参见测试 remove 程序的思路一节，我已经把生成的期望的树阐述了，由于测试代码中是“左中右”顺序打印的树，可以验证，和我设计思路中期望的相同，达到了效果。

4 异常测试报告

将最后一行代码解注释，即测试对一棵空树进行 bst7.findMax(); 测试，将会触发 throw UnderflowException{ }，输出的确会如此，产生 1 error。