2022 年 秋 季学期研究生课程考核

实验报告（二）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 考核科目: | 算法设计与分析 | | |
| 学生所在院（系）: | 计算机科学与技术学院 | | |
| 学生所在学科: | 电子信息 | | |
| 学 生 姓 名: | 兰江浩 | | |
| 学 号: | 22S130487 | | |
| 学 生 类 别: | 应用型 | | |
| 考核结果: |  | 阅卷人 |  |

（共 11 页）

**实验二 搜索算法**

1. 实验目的

（1）掌握搜索算法的基本设计思想与方法。

（2）掌握A\*算法的设计思想与方法。

（3）熟练使用高级编程语言实现搜索算法。

（4）利用实验测试给出的搜索算法的正确性。

1. 实验学时

4学时。

1. 实验问题

寻路问题。以图2-1为例，输入一个方格表示的地图，要求用A\*算法找到并输出从起点（在方格中标示字母S）到终点（在方格中标示字母T）的代价最小的路径。有如下条件及要求：

（1）每一步都落在方格中，而不是横竖线的交叉点。

（2）灰色格子表示障碍，无法通行。

（3）在每个格子处，若无障碍，下一步可以达到八个相邻的格子，并且只可以到达无障碍的相邻格子。其中，向上、下、左、右四个方向移动的代价为1，向四个斜角方向移动的代价为。

（4）在一些特殊格子上行走要花费额外的地形代价。比如，黄色格子代表沙漠，经过它的代价为 4；蓝色格子代表溪流，经过它的代价为 2；白色格子为普通地形，经过它的代价为 0。

（5）经过一条路径总的代价为移动代价+地形代价。其中移动代价是路径上所做的所有移动代价的总和；地形代价为路径上除起点外所有格子的地形代价的总和。比如，在下图的示例中，路径 A→B→C的代价为(移动)+0(地形)，而路径 D→E→F的代价为 的代价为 2( 移动 ) +6( 地形 )。



图1 示例

1. 实验步骤

## 4.1 实现单向与双向的A\*搜索算法

以图1为样例，实现单向和双向A\*算法并测试输出。输出的路径应该与下图中以圆点标示的路径一致，或者略有不同但是有一样的代价。规则和条件如第3节所述。

双向A\*算法应当从S点和T点同时行A\*搜索。



### 单向A\*算法介绍

A\*算法使用启发式的代价函数进行代价估计。每一次扩展，A\*会优先从待扩展结点中选择预估其所在路径从起点到终点预估的总代价最小的结点前进。预估代价的计算公式为：

其中，为待扩展的结点，是从起点到的实际代价，，是一个启发函数，用来预估从结点到目标结点的代价。根据问题的不同，有不同的计算方式，例如，定义横向移动的代价为1，斜向移动的代价为。另外，还可以规定地形代价，比如为平地移动和水面移动定义不同的代价。也可以有多种选择，比如使用欧氏距离。当成功到达终点或没有可扩展结点时，A\*搜索终止。

要实现A\*搜索，需要两个辅助表：OPEN表和CLOSE表。OPEN表的作用是保存待扩展的结点，算法每次从OPEN表里面选择最小的结点进行扩展，因此在具体实现中，应该使用优先队列来实现OPEN表。CLOSE表的作用是记录已经扩展的结点，被放到CLOSE表中的结点不会被再次扩展，故所有结点只能被扩展一次。

A\*算法描述如下：搜索开始前，CLOSE表为空，OPEN表只有起始结点，然后开始迭代。每次迭代，算法从OPEN中取出最小的结点作为当前结点，然后将当前结点的邻接结点按照一定规则放到OPEN表中。最后，将当前结点放到CLOSE表中，表示该结点已经扩展。如此往复。

将邻接节点放到OPEN表中的具体规则如下：（1）当邻接结点超出地图边界，不放入OPEN表；（2）当邻接邻接结点是障碍物，不放入OPEN表；（3）当邻接结点在CLOSE表中，不放入OPEN表；（4）当邻接结点不在OPEN表中，加入OPEN表；（5）当邻接结点在OPEN表中，且OPEN表中该结点的值>当前结点的值+当前结点到该结点的代价，则更新OPEN表中的该结点，将其父节点修改为当前结点，修改其值为新的当前代价。

在结点的具体的实现中，除了其坐标外，还需要保存其值和值，因为在迭代时需要和其它结点进行比较；另外，由于最后需要回溯路径，每个结点还需要保存其父节点的指针。起始结点无父结点。

算法伪代码如下：

输入：地图, 起始位置, 目标位置

输出：从到的路径

1. OPEN=[], CLOSE=[]

2. 添加到OPEN

3. While OPEN非空:

4. ←出队OPEN中最小的结点

5. 添加n到CLOSE

6. If 在位置:

7. Then 结束

8. For ∈的邻接结点:

9. If 不在上 or 是障碍物 or 在CLOSE中:

10. Then continue

11. If 不在OPEN中:

12. Then 添加到OPEN

13. If 在OPEN中 and >+从到的代价

14. Then 添加到OPEN

**4.1.2 单向A\*算法的Java实现**

**坐标和结点数据结构**

坐标数据结构保存x值和y值，实现代码如下：

public class Coord {

public int x;

public int y;

//methods...

}

结点数据结构保存坐标、父节点坐标、值和值，实现代码如下：

public class Node implements Comparable<Node> {

private Coord coord;

private Coord parent;

private double G;

private double H;

//methods...

}

和的定义

定义为移动代价和地形代价的和。其中，移动代价定义为，每次横向移动为1，斜向移动为；对于地形代价，定义地图上会有3种地形：平地、水面和沙漠，平地的地形代价为0，水面的地形代价为2，沙漠的地形代价为4。

定义为从当前结点到终点可能的最小移动代价，即：

通俗理解为，假设从当前结点到终点无障碍，则先尽可能走斜线，走到和终点在同一x轴或y轴上时，再走直线，使得到终点的移动代价最小。不考虑地形代价，因为理论上来说从当前结点到终点之间的地形在探索之前是不可见的。

OPEN表和CLOSE表实现

OPEN表实现。OPEN表需要具备的功能有：添加新结点、出队结点、删除结点、获取某个坐标处的结点、判断某个坐标处是否存在结点、判断表是否为空。由于每次迭代需要从OPEN表中取出f(n)最小的结点，因此为了算法的效率，使用优先队列来实现。另外，在扩展当前结点时需要判断邻接结点是否已经在OPEN表中，在队列中查找的复杂度为O(n)。为了使查找的效率提高到O(1)，另外使用一个**结点图**——和地图一样大小的二维数组来保存对应坐标处的结点信息。当添加或出队新结点的时候，除了在优先队列中插入或出队之外，还要在结点图上相应地更新标记。OPEN表的实现代码如下：

class OpenList{

Queue<Node> openQueue; // 优先队列(升序)

Node[][] openMap;

public OpenList(int height, int width) {

this.openQueue = new PriorityQueue<>();

this.openMap = new Node[height][width];

}

void add(Node node) {

if (this.contains(node.getCoord())){

System.out.println("[OpenList.add()] Node in this coord is already in openList!");

return;

}

openQueue.add(node);

this.openMap[node.getCoord().y][node.getCoord().x] = node;

}

Node poll(){

cleanQueueHead();

Node node = openQueue.poll();

assert(openMap[node.getCoord().y][node.getCoord().x] != null);

openMap[node.getCoord().y][node.getCoord().x] = null;

return node;

}

Node peek(){

cleanQueueHead();

return openQueue.peek();

}

Node get(Coord coord){

return openMap[coord.y][coord.x];

}

boolean contains(Coord coord){

return this.openMap[coord.y][coord.x] != null;

}

void remove(Coord coord){

//在openQueue上remove的复杂度为O(n)，因此仅在openMap上作标记，poll()或isEmpty()时会在openMap上检查是否存在

assert(openMap[coord.y][coord.x] != null);

openMap[coord.y][coord.x] = null;

}

boolean isEmpty(){

//除掉队列头实际已经被删除的元素

cleanQueueHead();

return this.openQueue.isEmpty();

}

void cleanQueueHead(){

//除掉队列头实际已经被删除的元素

while(!openQueue.isEmpty() && !contains(openQueue.peek().getCoord())){

openQueue.remove();

}

}

}

CLOSE表实现。CLOSE表需要具备的功能有：添加新结点、获取某个坐标处的结点、得到结点的父节点。CLOSE表用一个结点图实现，和OPEN表的结点图同理，它是一个和地图同样大小的二维数组。CLOSE表的实现代码如下：

class CloseList{

Node[][] closeMap;

CloseList(int height, int width){

closeMap = new Node[height][width];

}

boolean contains(Coord coord){

return closeMap[coord.y][coord.x] != null;

}

void add(Node node){

Coord coord = node.getCoord();

closeMap[coord.y][coord.x] = node;

}

Node get(Coord coord){

return closeMap[coord.y][coord.x];

}

Node getParent(Node node) {

Coord parentCoord = node.getParent();

return closeMap[parentCoord.y][parentCoord.x];

}

}

1. 单向A\*算法实现

单向A\*算法的代码实现如下：

public class AStarImpl implements AStar {

OpenList openList;

CloseList closeList;

public AStarSearchResult search(MapInfo mapInfo) {

if (mapInfo == null) return null;

createOpenCloseList(mapInfo.getHeight(), mapInfo.getWidth());

openList.add(new Node(mapInfo.getStartCoord(), null, 0.0, getH(mapInfo.getStartCoord(), mapInfo.getEndCoord())));

AStarSearchResult aStarSearchResult = new AStarSearchResult();

while(!openList.isEmpty()){

AStarSingleStep stepInfo = new AStarSingleStep();

boolean success = step(mapInfo, stepInfo);

aStarSearchResult.addStep(stepInfo);

if(success){

aStarSearchResult.isSuccess = true;

aStarSearchResult.finalCost = getFinalCost(closeList.get(mapInfo.getEndCoord()));

aStarSearchResult.setPath(getPath(mapInfo));

return aStarSearchResult;

}

}

//未找到终点

return aStarSearchResult;

}

/\*\*

\* 执行一步搜索

\* @param mapInfo mapInfo

\* @param stepInfo 将该步信息记录在此对象上

\* @return 是否成功

\*/

boolean step(MapInfo mapInfo, AStarSingleStep stepInfo){

Node current = openList.poll();

closeList.add(current);

stepInfo.setCurrentNode(current);

if(current.getCoord().equals(mapInfo.getEndCoord())){

//成功找到终点

stepInfo.setNeighbors(new ArrayList<Node>(0));

return true;

}

List<Node> neighborNodes = extendNeighbors(mapInfo, current);

stepInfo.setNeighbors(neighborNodes);

stepInfo.setNext(openList.peek());

if(openList.peek().getCoord().equals(current.getCoord())){

System.out.println("Error!");

}

return false;

}

static class NeighborInfo {

Coord coord;

double moveCost;

NeighborInfo(Coord coord, double cost) { this.coord = coord; this.moveCost = cost; }

}

List<Node> extendNeighbors(MapInfo mapInfo, Node current) {

List<Node> extended = new ArrayList<>();

for(NeighborInfo neighborInfo: getNeighborInfos(current.getCoord())) {

Coord neighbor = neighborInfo.coord;

if (!isCoordOnMap(mapInfo, neighbor)) continue;

if (mapInfo.isBarrier(neighbor)) continue;

if (closeList.contains(neighbor)) continue;

//G=父节点G+移动代价+地形代价

double G = current.getG() + neighborInfo.moveCost + mapInfo.getTerrainCost(neighbor);

Node node = extendNeighbor(mapInfo, current, neighborInfo.coord, G);

if(node != null) extended.add(node);

}

return extended;

}

private ArrayList<NeighborInfo> getNeighborInfos(Coord coord){

ArrayList<NeighborInfo> neighbors = new ArrayList<>(8);

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x - 1, coord.y - 1), OBLIQUE\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x - 1, coord.y + 1), OBLIQUE\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x + 1, coord.y - 1), OBLIQUE\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x + 1, coord.y + 1), OBLIQUE\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x - 1, coord.y), DIRECT\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x + 1, coord.y), DIRECT\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x, coord.y - 1), DIRECT\_MOVE\_COST));

neighbors.add(new NeighborInfo(new Coord(coord.x, coord.y + 1), DIRECT\_MOVE\_COST));

return neighbors;

}

private Node extendNeighbor(MapInfo mapInfo, Node current, Coord neighbor, double g) {

if (openList.contains(neighbor)){

Node neighborNodeInOpen = openList.get(neighbor);

if(g < neighborNodeInOpen.getG()){

openList.remove(neighbor);

Node node = new Node(neighbor, current.getCoord(), g, getH(neighbor, mapInfo.getEndCoord()));

openList.add(node);

return node;

}

return null;

}

else {

Node node = new Node(neighbor, current.getCoord(), g, getH(neighbor, mapInfo.getEndCoord()));

openList.add(node);

return node;

}

}

static double getH (Coord coord1, Coord coord2){

int xDiff = Math.abs(coord1.x - coord2.x);

int yDiff = Math.abs(coord1.y - coord2.y);

return OBLIQUE\_MOVE\_COST \* Math.min(xDiff, yDiff) +

DIRECT\_MOVE\_COST \* (Math.max(xDiff, yDiff) - Math.min(xDiff, yDiff));

}

private boolean isCoordOnMap(MapInfo mapInfo, Coord coord){

return coord.x >= 0 && coord.x < mapInfo.getWidth()

&& coord.y >= 0 && coord.y < mapInfo.getHeight();

}

private List<Node> getPath(MapInfo mapInfo){

List<Node> path = new ArrayList<>();

Coord coord = mapInfo.getEndCoord();

Node node = closeList.get(coord);

path.add(node);

while (!node.getCoord().equals(mapInfo.getStartCoord())){

node = closeList.getParent(node);

path.add(node);

}

Collections.reverse(path);

return path;

}

private static double getFinalCost(Node endNode){

return endNode.getG();

}

void createOpenCloseList(int height, int width){

openList = new OpenList(height, width);

closeList = new CloseList(height, width);

}

@Override

public AStarType getCode() {

return AStarType.UNIDIRECTIONAL;

}

}

**4.1.3 双向A\*算法实现**

1. 思路

双向A*算法就是使用两个单向A*算法，从起点和终点同时往对方方向进行搜索，即起点以终点为目标、终点以起点为目标。在单向A\*的基础上，需要作以下修改：

* 使用两个单向A\*算法，从起点和终点同时往对方方向进行搜索
* 终止条件改为两个A\*的OPEN列表有一个为空（说明起点和终点不可达），或某一方的当前结点位置正好是对方的CLOSE结点（说明找到了对方的“脚印”，沿着脚印就可以到达终点）。

1. 细谈终止条件

网上有很多介绍双向A*搜索的文章，但关于双向A*搜索成功找到路径的条件，网上的说法大多数都比较模糊。有些谈到细节的博主认为成功终止条件是两个OPEN表重叠（某一方要放入OPEN表的邻接结点正好也是另一方的OPEN结点）。但我个人认为，终止条件应该设置为两个CLOSE表重叠更为合理。因为OPEN表只是表示搜索下一步可以扩展的结点，但还没有扩展，结点的情况还未确定，有可能之后被更新；而CLOSE表表示搜索已经走过的结点，结点的情况已经确定。在具体实现中，我采用CLOSE表重叠的方案，采用另一种方式也可以，具体的结果应该差别不大。

1. 实现

双向A\*搜索的代码实现如下：

public class BidirectionalAStarImpl implements AStar {

private AStarImpl forwardAStar;

private AStarImpl backwardAStar;

public AStarSearchResult search(MapInfo mapInfo){

if (mapInfo == null) return null;

forwardAStar = new AStarImpl();

backwardAStar = new AStarImpl();

forwardAStar.createOpenCloseList(mapInfo.getHeight(), mapInfo.getWidth());

backwardAStar.createOpenCloseList(mapInfo.getHeight(), mapInfo.getWidth());

forwardAStar.openList.add(new Node(mapInfo.getStartCoord(),

null, 0.0, AStarImpl.getH(mapInfo.getStartCoord(), mapInfo.getEndCoord())));

backwardAStar.openList.add(new Node(mapInfo.getEndCoord(),

null, 0.0, AStarImpl.getH(mapInfo.getEndCoord(), mapInfo.getStartCoord())));

MapInfo backwardMapInfo = getBackwardMapInfo(mapInfo);

AStarSearchResult aStarSearchResult = new AStarSearchResult(true);

while(!forwardAStar.openList.isEmpty() && !forwardAStar.openList.isEmpty()){

AStarSingleStep[] stepInfo = new AStarSingleStep[]{new AStarSingleStep(), new AStarSingleStep()};

Coord meetCoord = step(forwardAStar, backwardAStar, mapInfo, stepInfo[0]);

if(meetCoord != null){

aStarSearchResult.addBidirectionalStep(stepInfo);

aStarSearchResult.isSuccess = true;

aStarSearchResult.finalCost = getFinalCost(meetCoord);

aStarSearchResult.setBidirectionalPath(getPath(mapInfo, meetCoord, forwardAStar));

return aStarSearchResult;

}

meetCoord = step(backwardAStar, forwardAStar, backwardMapInfo, stepInfo[1]);

aStarSearchResult.addBidirectionalStep(stepInfo);

if(meetCoord != null){

aStarSearchResult.isSuccess = true;

aStarSearchResult.finalCost = getFinalCost(meetCoord);

aStarSearchResult.setBidirectionalPath(getPath(backwardMapInfo, meetCoord, backwardAStar));

return aStarSearchResult;

}

}

//未找到终点

return aStarSearchResult;

}

/\*\*

\* 执行一步搜索

\* @param currentAStar 当前AStar

\* @param anotherAStar 对面AStar

\* @param mapInfo

\* @param stepInfo 将该步信息记录在此对象上

\* @return 成功找到解则返回相遇坐标，否则返回null

\*/

private Coord step(AStarImpl currentAStar, AStarImpl anotherAStar, MapInfo mapInfo, AStarSingleStep stepInfo){

Node current = currentAStar.openList.poll();

currentAStar.closeList.add(current);

stepInfo.setCurrentNode(current);

//如果当前结点在对面的close表中，成功找到解

if(anotherAStar.closeList.contains(current.getCoord())){

stepInfo.setNeighbors(new ArrayList<Node>(0));

return current.getCoord();

}

List<Node> neighborNodes = currentAStar.extendNeighbors(mapInfo, current);

stepInfo.setNeighbors(neighborNodes);

stepInfo.setNext(currentAStar.openList.peek());

return null;

}

private List<List<Node>> getPath(MapInfo mapInfo, Coord meetCoord, AStarImpl whoMetTheOtherFirst){

List<Node> pathFromStart = new ArrayList<>();

List<Node> pathFromEnd = new ArrayList<>();

Node node = forwardAStar.closeList.get(meetCoord);

if(whoMetTheOtherFirst == forwardAStar) pathFromStart.add(node);

while (!node.getCoord().equals(mapInfo.getStartCoord())){

node = forwardAStar.closeList.getParent(node);

pathFromStart.add(node);

}

node = backwardAStar.closeList.get(meetCoord);

if(whoMetTheOtherFirst == backwardAStar) pathFromStart.add(node);

pathFromEnd.add(node);

while (!node.getCoord().equals(mapInfo.getEndCoord())){

node = backwardAStar.closeList.getParent(node);

pathFromEnd.add(node);

}

Collections.reverse(pathFromStart);

List<List<Node>> path = new ArrayList<>(2);

path.add(pathFromStart);

path.add(pathFromEnd);

return path;

}

private static MapInfo getBackwardMapInfo(MapInfo mapInfo){

return new MapInfo(mapInfo.getLabels(), mapInfo.getWidth(), mapInfo.getHeight(),

mapInfo.getEndCoord(), mapInfo.getStartCoord(), mapInfo.getLabelsInfo());

}

@Override

public AStarType getCode() {

return AStarType.BIDIRECTIONAL;

}

private double getFinalCost(Coord meetCoord) {

Node forwardNode = forwardAStar.closeList.get(meetCoord);

Node backwardNode = backwardAStar.closeList.get(meetCoord);

return forwardNode.getG() + backwardNode.getG();

}

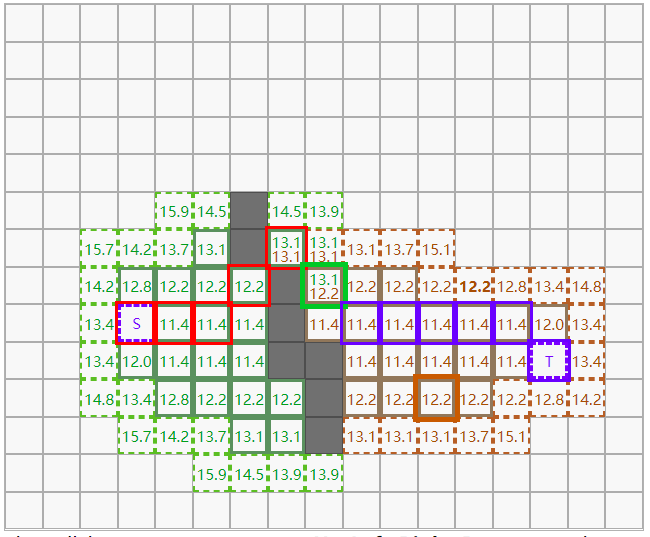
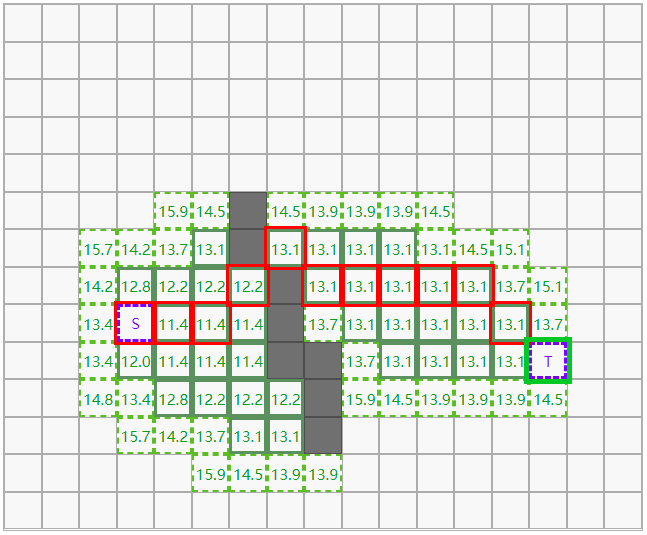
}

**4.1.4 输出测试**

测试地图如下：



单向A*算法和双向A*算法的输出分别如下：



**4.2 A\*算法可视化**

**4.2.1 可视化实现目标**

本次实验计划实现的A\*可视化系统，除了能展示地图和最终路径，还要能以可交互动画形式展示搜索的整个过程，是本次实验的难点。具体来说，可视化实现的目标为：

* 展示地图，能以不同颜色区分各种地形信息
* 显示最终路径
* 展示搜索过程，显示搜索中每次迭代的状态
* 动画可交互，用户能随意操作前进和后退

**4.2.2 系统概览**

使用HTML页面来实现可视化。整个项目采用前后端分离的形式，分为前端和后端两个项目。前端通过接口往后端发送地图数据，请求结果；后端计算得到A\*搜索的结果和单步信息，一次性返回给前端；前端收到数据后以可交互动画的形式展示给用户。

前端采用的技术包括：

* HTML展示静态界面
* CSS美化界面
* Vue实现交互式可视化
* Node.js部署

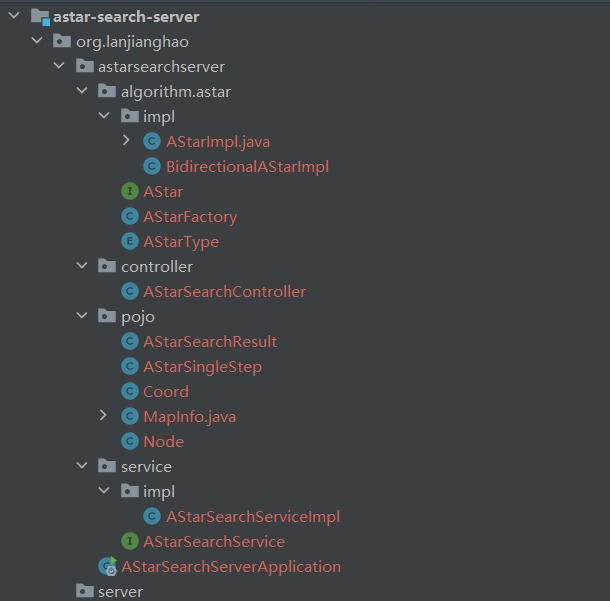
后端采用的技术包括：

* Maven包管理
* Spring MVC开发Web项目
* Spring Boot简化配置和部署

**4.2.3 后端架构及实现**

代码组织：

代码目录组织如下：



**服务流程**

前端发送请求到服务器，服务器将请求交给AStarSearchController处理，AStarSearchController使用AStarSearchService来提供服务，AStarSearchService又通过AStar接口调用具体的A\*算法。AStarSearchController得到结果后，最后以Json形式返回给前端。

**结果数据**

结果数据结构中包含以下信息：

public class AStarSearchResult {

//是否为双向搜索

public boolean bidirectional;

//是否找到路径

public boolean isSuccess;

//最终代价

public double finalCost;

//最终路径

public List<List<Node>> path;

//单步信息

public List<AStarSingleStep[]> steps;

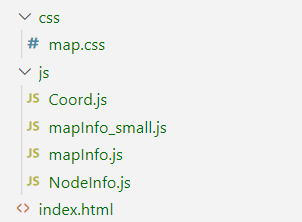
}

除了包括是否成功、最终代价、最终路径等信息外，还包括单步信息。单步信息是一个列表，列表中每一项保存着一步迭代的当前结点、扩展的邻接结点和下一次迭代要扩展的结点，这使得前端的交互式动画成为可能。

**4.2.4 前端架构及实现**

代码组织

由于我不擅长写前端，因此代码组织欠佳。代码目录如下：



index为前端界面，包括了HTML静态界面和vue交互代码；css文件夹下存放css样式表，为静态界面提供美化；js文件夹下定义了一些常用的类和地图信息。

可视化界面实现

用一个HTML表格来显示地图：

<table id="map" border="1">

<tr v-for="(row, y) in mapInfo.labels">

<td v-for="(label, x) in row" :class="getCoordClasses(x, y, label)">

<!-- {{getContent(x, y)}} -->

<span v-if="isStart(x, y)" class="start-flag">S</span>

<span v-else-if="isEnd(x, y)" class="end-flag">T</span>

<span v-else>

<div class="forward-f" v-if="isInForwardClose(x, y) || isInForwardOpen(x, y)">

{{getForwardF(x, y).toFixed(1)}}

</div>

<div class="backward-f" v-if="isInBackwardClose(x, y) || isInBackwardOpen(x, y)">

{{this.getBackwardF(x, y).toFixed(1)}}

</div>

</span>

</td>

</tr>

</table>

表格大量使用Vue的强大特性进行渲染，使得最终的界面有很强的逻辑表现力。

在地图下方，显示结果和一些操作按钮：

<div>

Result status:

<span v-if="result === null">(not start yet)</span>

<span v-else-if="result.isSuccess === false"><b>fail</b></span>

<span v-else><b>success</b>, final cost is <span>{{ getFinalCost().toFixed(2) }}</span></span>

</div>

<div>Current step: <b>{{ currentStepIdx }}</b></div>

<!-- <br/> -->

<button @click="initialize" :disabled="result === null">Initialize</button>

<button @click="getResult">Search</button>

<br />

<button @click="toBegining" :disabled="!hasPrevStep()">&lt;&lt;</button>

<button @click="decrementStep" :disabled="!hasPrevStep()">&lt;</button>

<button @click="incrementStep" :disabled="!hasNextStep()">&gt;</button>

<button @click="toEnd" :disabled="!hasNextStep()">&gt;&gt;</button>

结点的不同状态要显示为不同的样式。例如，不同的地形有不同的背景色、当前结点会显示一个外框线、OPEN结点会显示虚线边框等。实现方式为，为多种状态定义不同的class属性，并为每种class属性设置不同的样式。之后，通过Vue动态地改变结点的class属性，就可以修改其样式。比如，为不同的地形设置不同的背景色：

#map td.ground{

background-color: #F8F8F8;

}

#map td.barrier{

background-color: #707070;

color: white;

}

#map td.river{

background-color: rgba(47, 151, 255, 0.547);

color: white;

}

#map td.desert{

background-color: #F0E68C;

}

可视化逻辑实现

**初始地图显示**

初始地图用一张二维数组来表示，数组中每一个元素是一个整数标签，用来表示不同的地形。地图数据结构还包括起点和终点，分别用一个坐标来表示。初始地图数据结构代码如下：

var mapInfo = {

labels: labels, //an 2d array

width: 40,

height: 20,

startCoord: new Coord(4, 10),

endCoord: new Coord(35, 0),

labelInfos:

{

1: new LabelInfo('ground', false, 0),

0: new LabelInfo('barrier', true, 0),

2: new LabelInfo('river', false, 2),

3: new LabelInfo('desert', false, 4),

}

}

**获取结果数据**

用axios向后端发送异步请求，获取结果数据。发送请求、获取结果的代码如下：

getResult() {

if (this.result !== null) this.initialize()

let that = this

axios({

method: 'post',

url: '<http://localhost:8080/astar/unidirectional/search>',

// url: '<http://localhost:8080/astar/bidirectional/search>',

data: mapInfo

}).then(function (response) {

that.result = response.data

that.initNodeInfoMap(that.mapInfo.height, that.mapInfo.width)

that.renderCurrent(0)

that.setPathNodes()

})

},

**可交互式动画**

获取结果后，前端可以展示算法每一次迭代的状态，由用户任意操作前进和后退。为实现这个功能，先在Vue中声明一个整数类型的响应式状态currentStepIdx，代表当前步数。当用户点击前进按钮或按下键盘Right键时，currentStepIdx加1；当用户点击后退按钮或按下键盘Left键时，currentStepIdx减1：

data() {

return {

currentStepIdx: 0,

//...

}

},

methods: {

incrementStep() {

if (this.hasNextStep()) this.currentStepIdx++

},

decrementStep() {

if (this.hasPrevStep()) this.currentStepIdx--

},

toBegining() {

this.currentStepIdx = 0

},

toEnd() {

if (this.result !== null) {

this.currentStepIdx = this.result.steps.length - 1

}

else {

this.currentStepIdx = 0

}

},

//...

}

实现了步数currentStepIdx的更新后，再通过一个监听器来监听currentStepIdx的状态变化。当currentStepIdx变化时，更新地图状态：

watch: {

// 每当 currentStepIdx 改变时，这个函数就会执行

currentStepIdx(newIdx, oldIdx) {

if (this.result === null) return

if (newIdx != 0) {

this.renderStepUpdate(newIdx, oldIdx)

}

else {

this.initNodeInfoMap(this.mapInfo.height, this.mapInfo.width)

this.renderCurrent(0)

this.setPathNodes()

}

if (newIdx === this.result.steps.length - 1 && this.result.isSuccess) {

this.showPath = true

}

else {

this.showPath = false

}

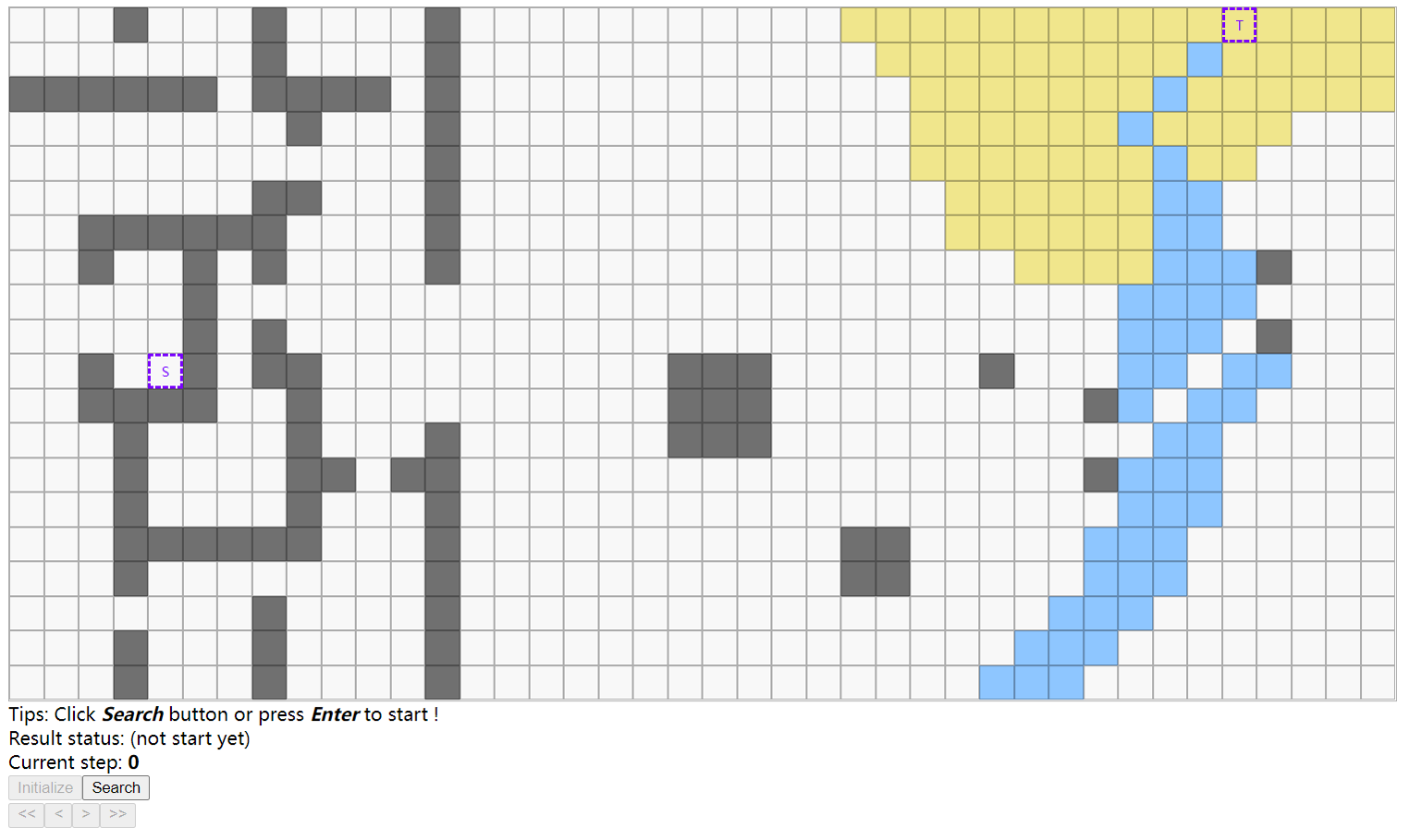
}

},

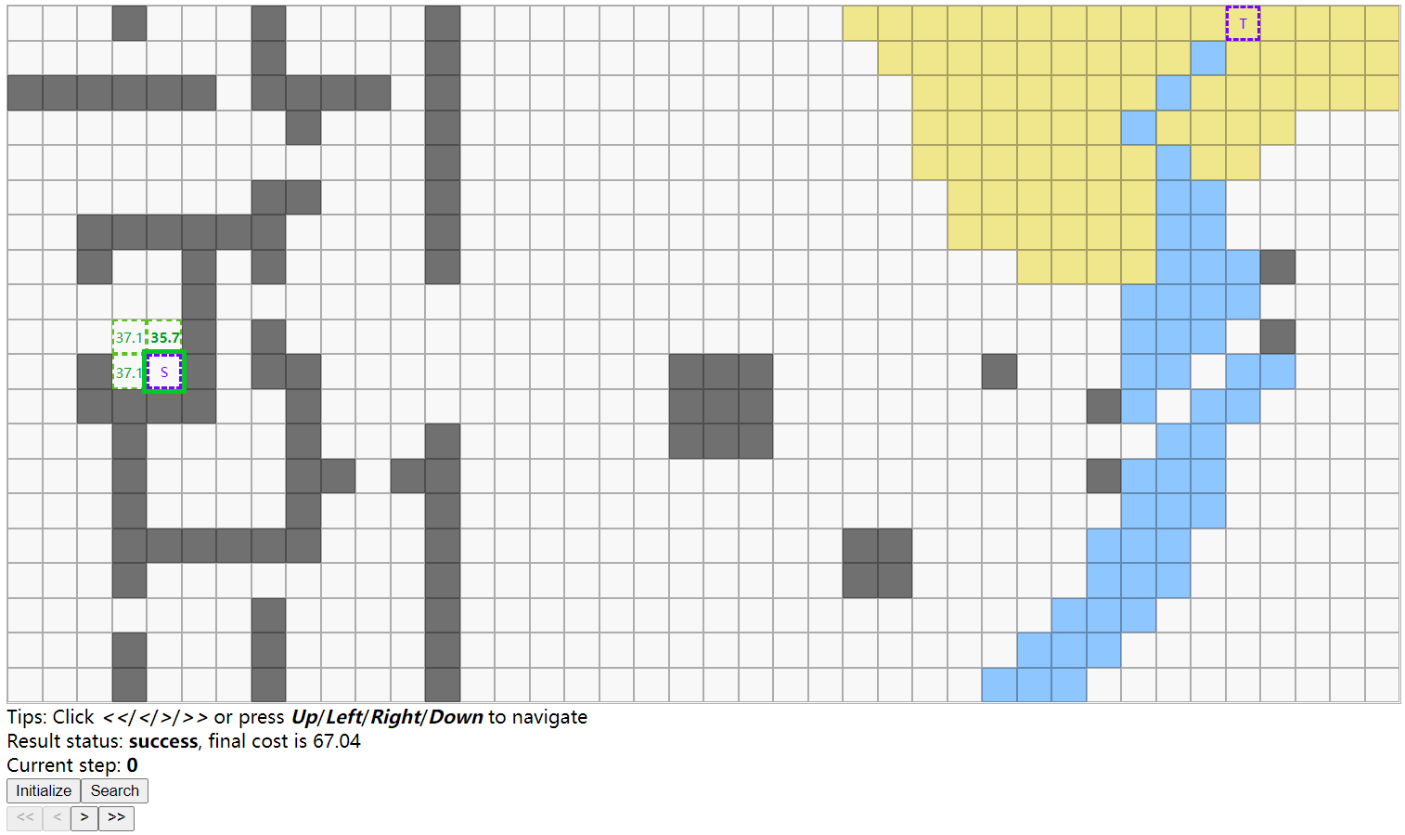
关于前端和后端的更多实现细节请看代码，正文中将不再介绍。

**4.2.5 可视化结果**

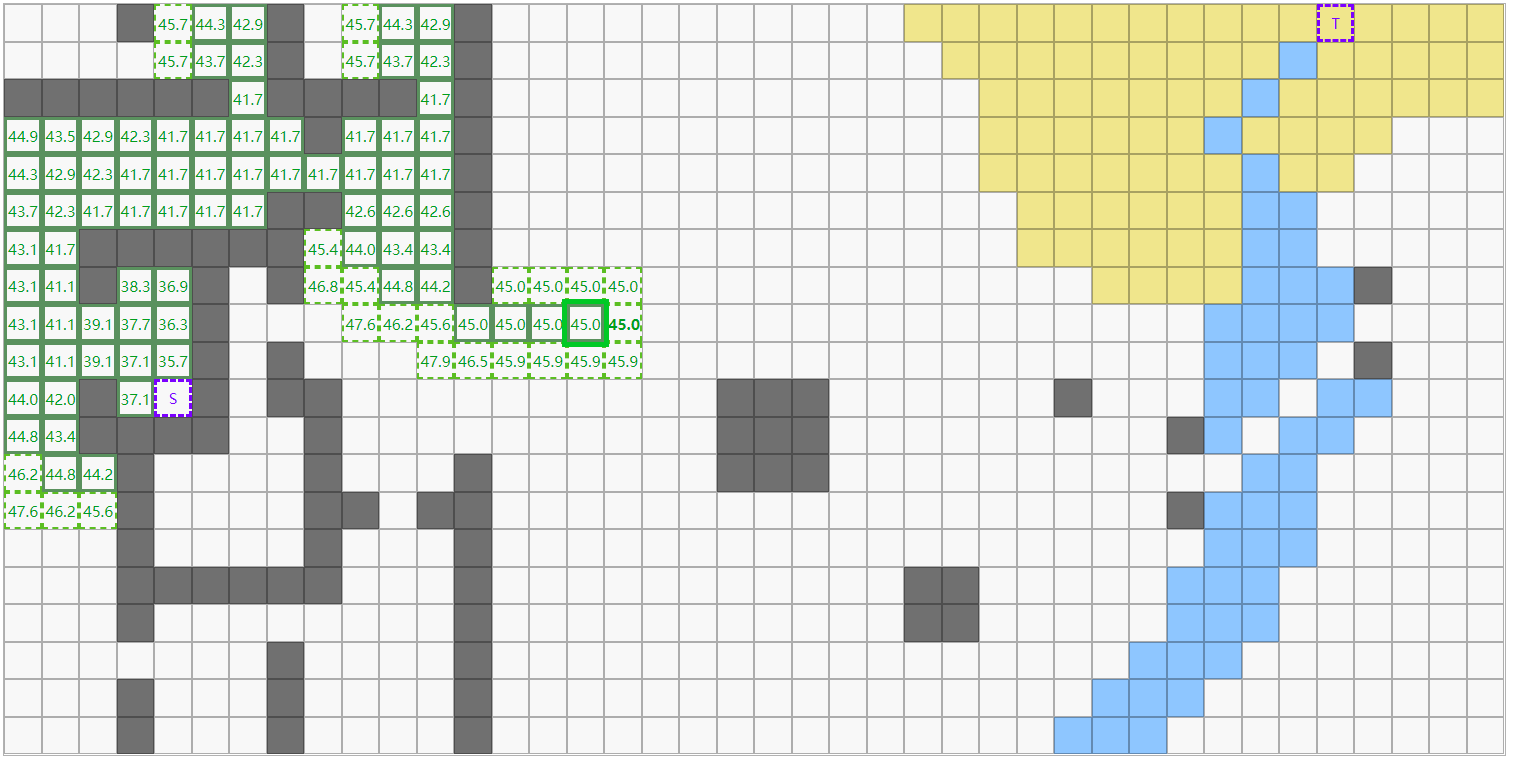
初始界面：



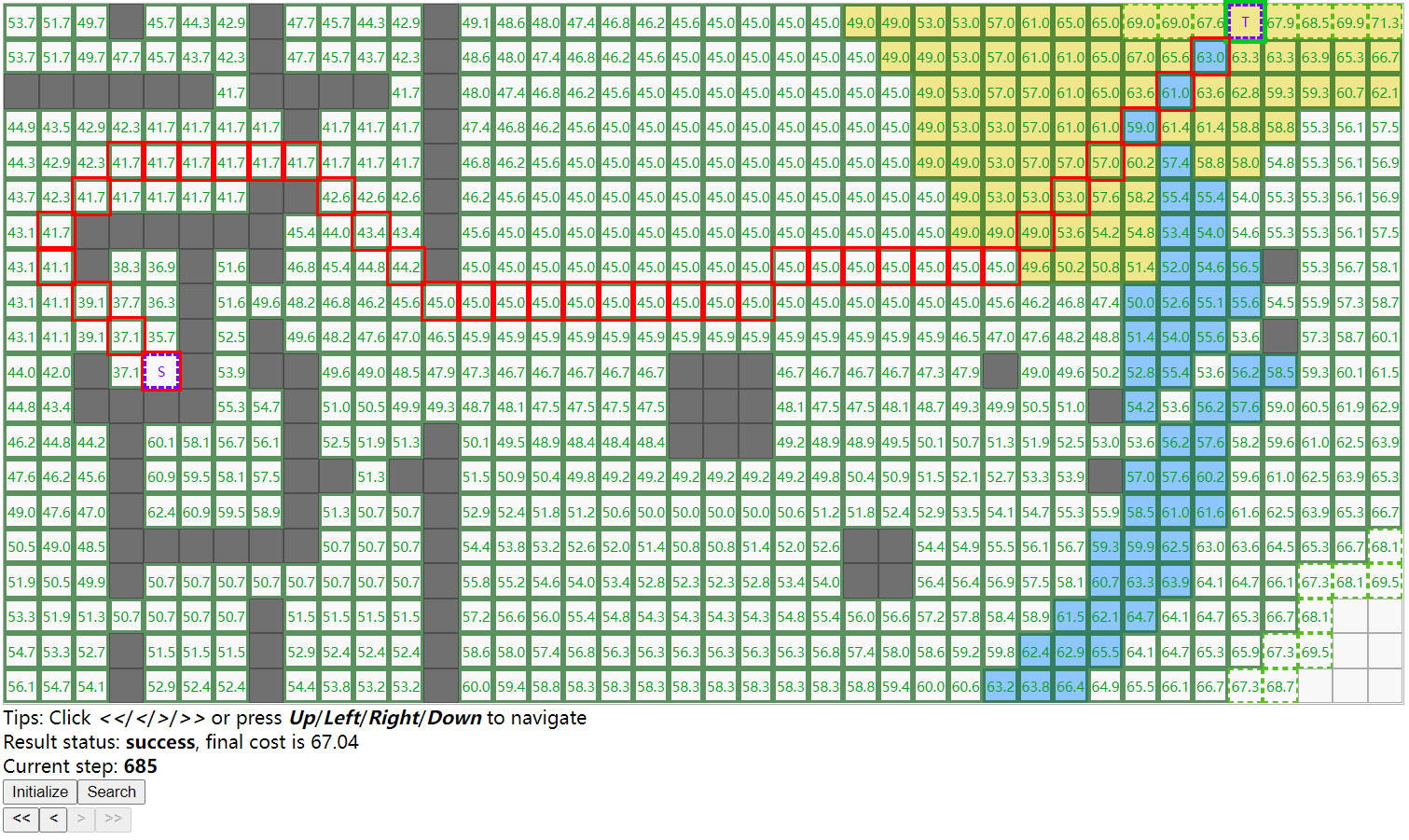
点击Search按钮或按下键盘Enter键得到结果：



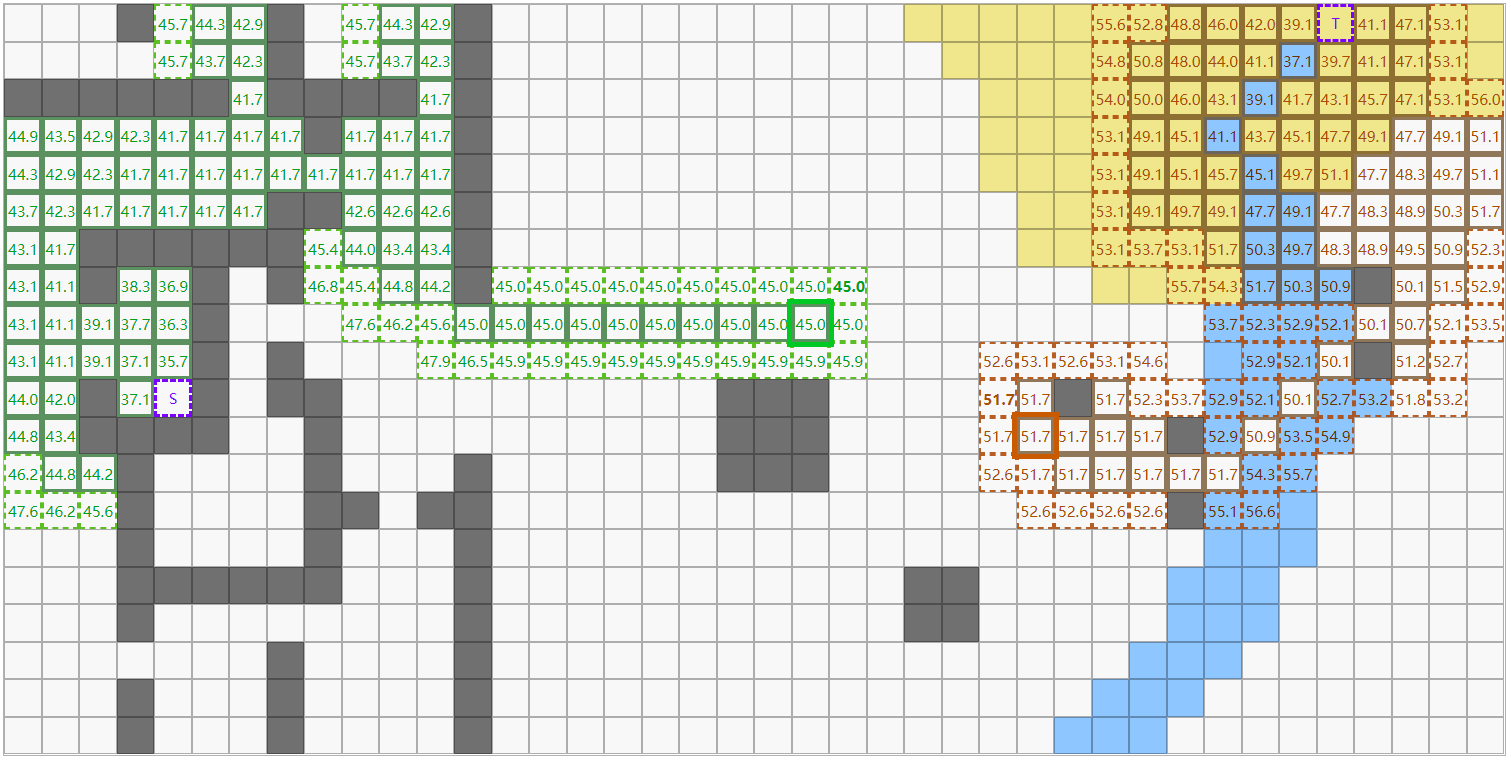
点击下方的四个按钮或键盘的四个方向键，可以调整前进或后退步骤，实现了步骤级别的精细的可视化：



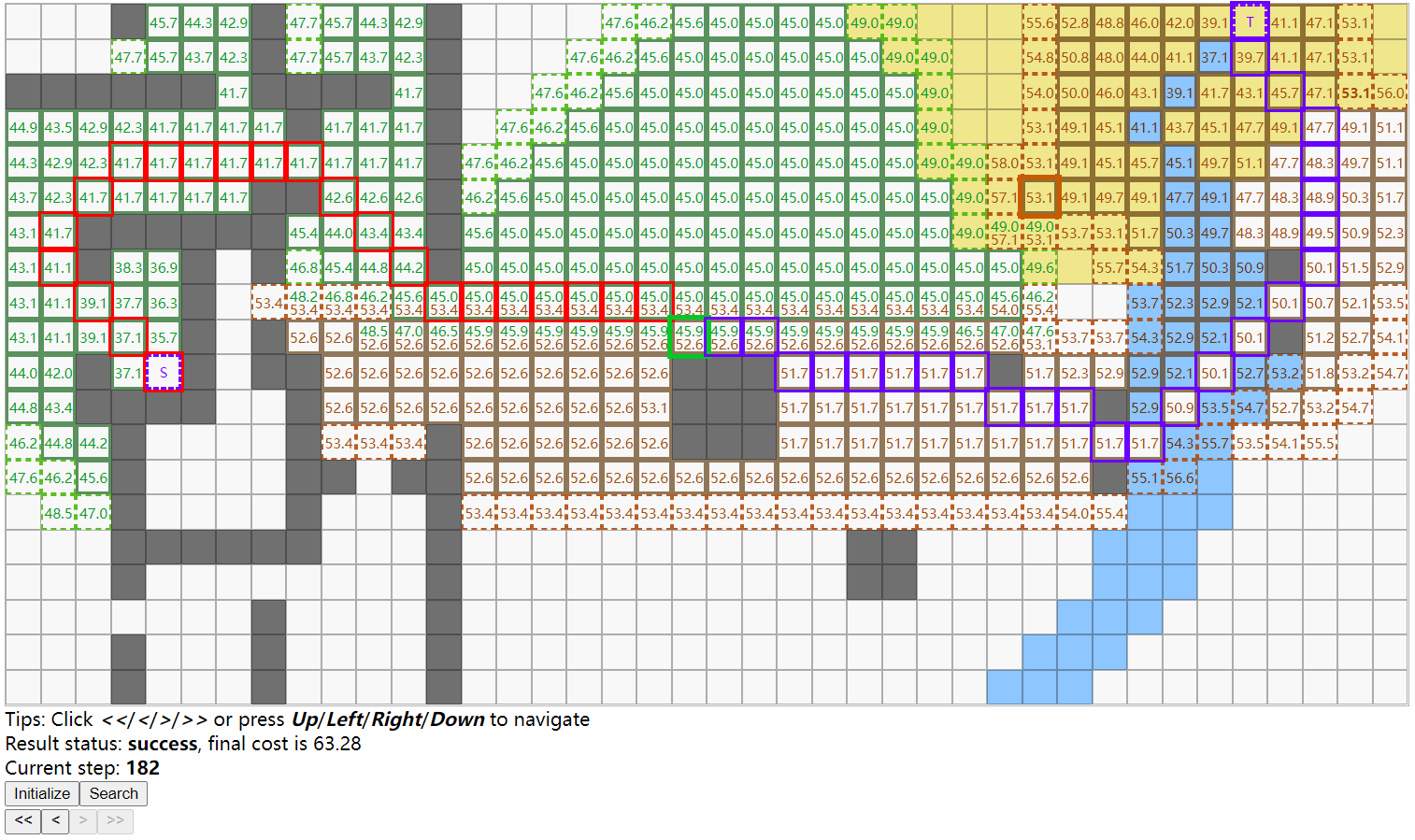
到达最后一步时，会显示最终路径：



双向A\*搜索的单步可视化：



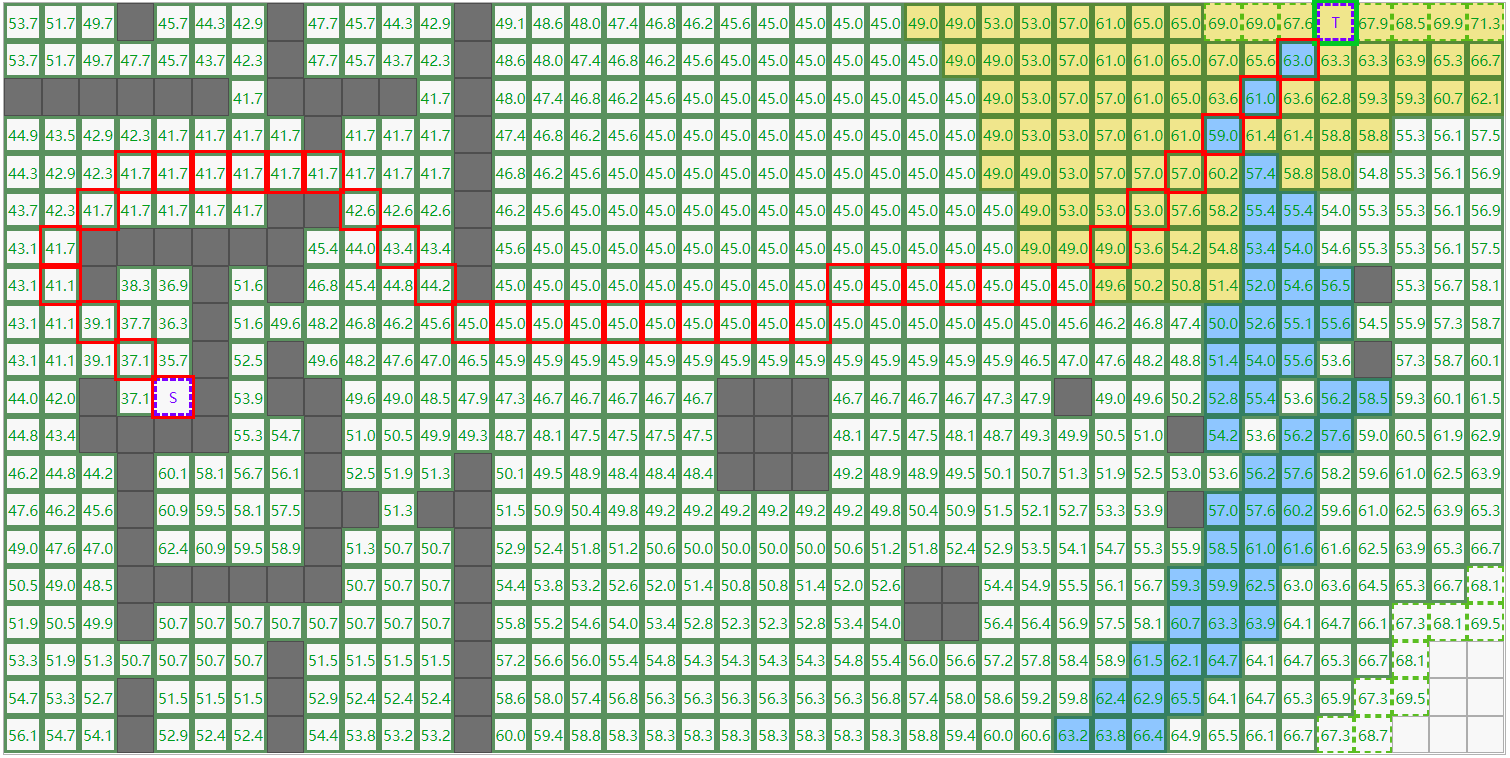
双向A\*搜索的最终路径：



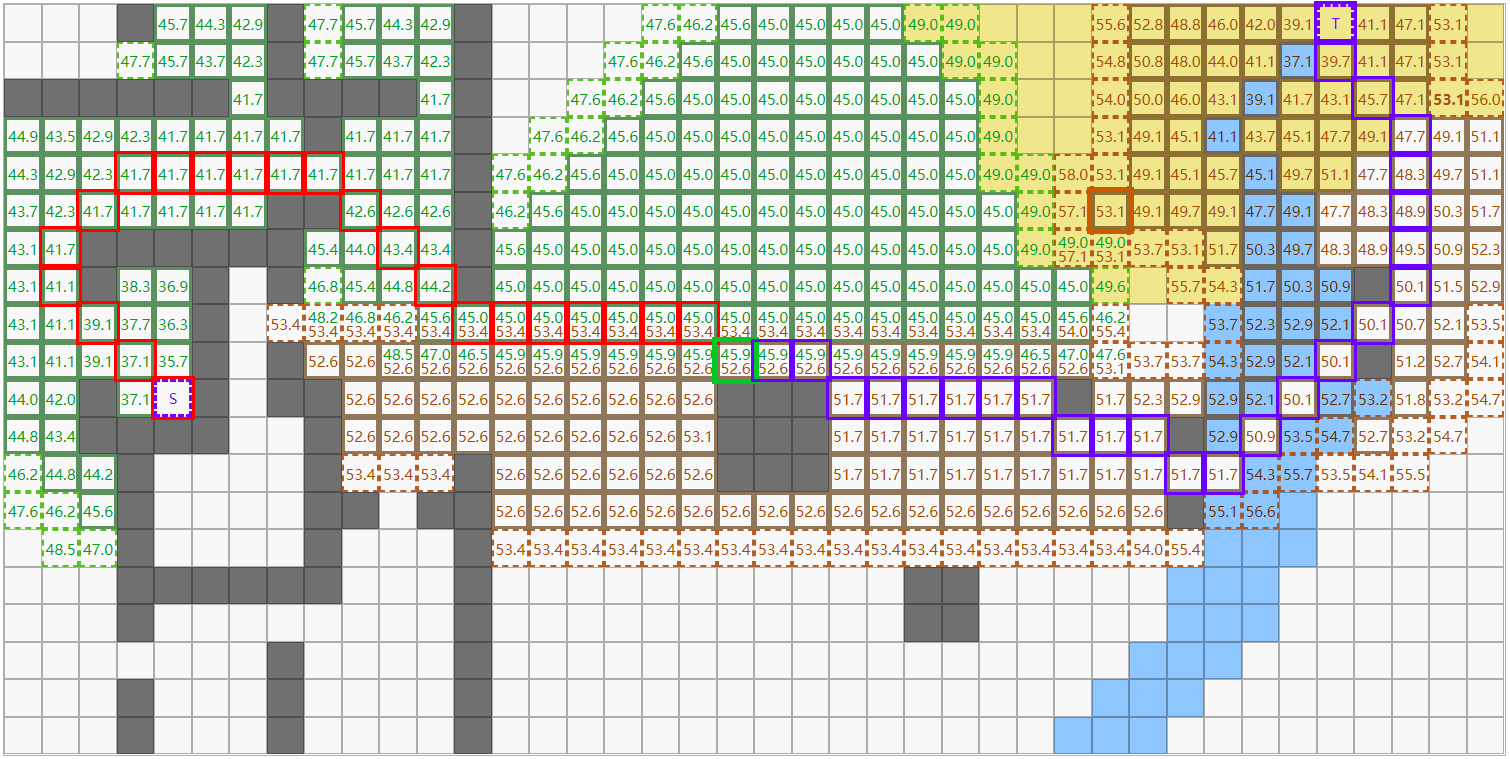
**4.3 结果与分析**

**4.3.1 结果**

单向A\*搜索最终代价为67.04，迭代次数为686，路径如下：



双向A\*搜索最终代价为63.28，迭代次数为183，结果如下：



**4.3.2 结果分析**

从可视化图中可以看到，单向A搜索几乎走遍了整张地图。虽然使用了启发函数，但其对地形代价无法有效地估计，因此在前期，搜索近乎径直向终点前进。但到了沙漠和水面附近，由于代价瞬间增大，A\*不再径直前进，而是往其它的方向继续探索，几乎成为广度遍历。最后，算法找到的路径也比双向搜索稍差。

双向A搜索从起点和终点同时开始搜索，有效地降低了搜索空间。从搜索图中可以看到，走过的路径相比单向搜索减少了很多，迭代次数从686降低到183。因此，双向A\*搜索能有效地提高效率。而且，最后也得到了比单向搜索更优的路径。

**5 心得与总结**

本次实验是要实现单向和双向的A\*搜索算法，实际代价除了移动代价外，还有地形代价。在实现双向A\*算法时，终止条件是我思考了很久的一个问题。网上关于双向A\*的博客很多都介绍地比较模糊。有的指出OPEN结点重叠时，成功找到路径，算法终止；而我认为，应该让CLOSE重叠时才算成功，因为CLOSE才表示搜索真正到达的结点。当然，两种方式可能差别不是很大。

本次实验做的比较工程，在实现基础算法之后，我把重心放到了结果的可视化上。我的目标是不但要能展示地图和最终路径，还要能展示搜索的整个过程。为此，我复习和补充了前端和后端的相关知识，例如复习了Spring框架，学习了Vue。前端的逻辑比我最初想象的要复杂，由于前端代码管理能力较差，每添加一个新功能，都需要调试很久，这是我之后要锻炼的地方。相反，我的后端代码得益于良好的设计模式和不断地重构，能够进行方便地维护。比如，Service需要调用不同的A\*算法（单向和双向），我就把A\*算法定义为一个接口，然后分别编写两个实现类。为了能利用Spring对A\*算法的Bean进行管理，我实现了一个A\*工厂类，在Service中自动装配这个工厂对象，然后能够通过这个工厂对象调用不同的A\*示例。最后，我对可视化的期望目标得以成功实现。