1、实验目的

- 加深对深度优先、广度优先、代价一致搜索、A*搜索等搜索算法的理解
- 能独立实现这些算法完成Pacman中的任务。

2、实验介绍

Pac-Man（吃豆人）是1980推出的迷宫动作视频游戏，加州大学伯克利分校借鉴该游戏开发了开源的人工智能实验项目Pacman，通过编写AI策略引导Agent（智能体）走出迷宫，项目地址：https://inst.eecs.berkeley.edu/~cs188/fa23/projects/proj1/。

该实验项目要求编写吃豆人搜索策略解决：找到一个指定位置的豆子、到达四个角落、吃掉所有豆子三大类问题。

2.1 实验环境：Python

整个项目使用python3开发，要求Python3.6及以上版本，可运行在Windows和Linux操作系统，实验一可以任选Windows或者Linux完成。

Python开发IDE建议使用 VS Code，具体使用可查看官方教程：Python in Visual Studio Code。后续实验继续使用Python，需自主学习下基本的数据类型（list,dict,tuple）、函数、类、包的导入等基础，可参考：Python官方教程中文版。

实验室电脑Windows系统已经安装了Python，打开命令行窗口输入Python即可进入到交互界面，同时会输出Python版本信息，版本信息会因安装版本不同。若提示Python找不到可以尝试执行python3。

```
I:\>python
Python 3.8.10 (tags/v3.8.10:3d8993a, May  3 2021, 11:48:03) [MSC v.1928 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license" for more information.
>>>
>>>
>>>
>>>
>>> quit()
```

如果使用的Windows环境没有安装Python，可参考以下方式安装：

1. 下载对应版本安装包：https://www.python.org/downloads/
2. 按照官方的：python安装指引: 4.1.1安装步骤安装，再按照4.6节配置环境变量path。

注意事项！！！

- 实验室电脑的C盘重启后数据会被还原，请及时做好数据的备份。
- 实验室电脑的虚拟机、WSL都是安装在C盘，重启后相关的环境和数据都会被重置。

2.2 Pacman运行

在命令行中进入到search目录，运行`python pacman.py`命令，进入交互式的吃豆人游戏，通过方向键可以控制Agent移动躲避ghost，吃完所有的豆子就是胜利，结束后会在控制台输出以下信息。

```
I:\search>python pacman.py -l tinyMaze -p SearchAgent -a fn=tinyMazeSearch
[SearchAgent] using function tinyMazeSearch
[SearchAgent] using problem type PositionSearchProblem
Path found with total cost of 8 in 0.0 seconds
Search nodes expanded: 0
Pacman emerges victorious! Score: 502
Average Score: 502.0
Scores:        502.0
Win Rate:      1/1 (1.00)
Record:        Win

I:\search>
```

本实验只在非交互式模式下让智能体自动完成任务，无需方向键控制。如果运行过程中长时间卡住可按ctrl+c或者点击右上角的关闭按钮结束。

Pacman项目实现的功能比较多，不同的任务用了不同的迷宫和不同的Agent。Agent的实现在searchAgents.py文件中，最简单的Agent叫做GoWestAgent，该Agent只能一路向西移动，不能转弯，只有在最简单的测试迷宫上能吃到豆子，只作为测试用。以下是GoWestAgent在testMaze和tinyMaze两种迷宫上的测试：

1. 无转弯的简单迷宫testMaze，GoWestAgent一路向西能吃到豆子。

   ```
   python pacman.py --layout testMaze --pacman GoWestAgent
   ```

2. 有转弯的迷宫tinyMaze，GoWestAgent将吃不到豆子一直运行，通过CTRL-c来终止。

   ```
   python pacman.py --layout tinyMaze --pacman GoWestAgent
   ```

`python pacman.py` 命令后面可以跟选项，每个选项的含义和取值可通过运行`python pacman.py -h`查看。主要的选项说明如下:

> `--layout`，简写为`-l`，指定加载目录`layouts/`下的迷宫。
>
> `--pacman`，简写为`-p`，指定`agent`类型，默认是`KeyboardAgent`即通过键盘方向控制的智能体。
>
> `--zoom`，简写为`-z`，图形窗口的大小，默认是`1`，比`1`大则是放大，比`1`小则是缩小。
>
> `--agentArgs`，简写为`-a`，传递给`agent`的`args`取值，字符串的形式，如果有多个取值以逗号分隔，比如`"opt1=val1,opt2,opt3=val3"`。

2.3 search项目框架

pacman search项目有如下文件:

```
(base) $ ~/search »tree -F -L 1 --dirsfirst ./
./
├── layouts/
├── test_cases/
├── autograder.py
├── eightpuzzle.py
├── game.py
├── ghostAgents.py
├── grading.py
├── graphicsDisplay.py
├── graphicsUtils.py
├── keyboardAgents.py
├── layout.py
├── pacmanAgents.py
├── pacman.py
├── projectParams.py
├── searchAgents.py
├── search.py
├── searchTestClasses.py
├── testClasses.py
├── testParser.py
├── textDisplay.py
├── util.py
└── VERSION

2 directories, 20 files
```

完成实验只需要修改search.py和searchAgents.py两个文件，其他文件无需修改，需要补充代码的地方以注释`*** YOUR CODE HERE ***`或`util.raiseNotDefined()`做了提示。

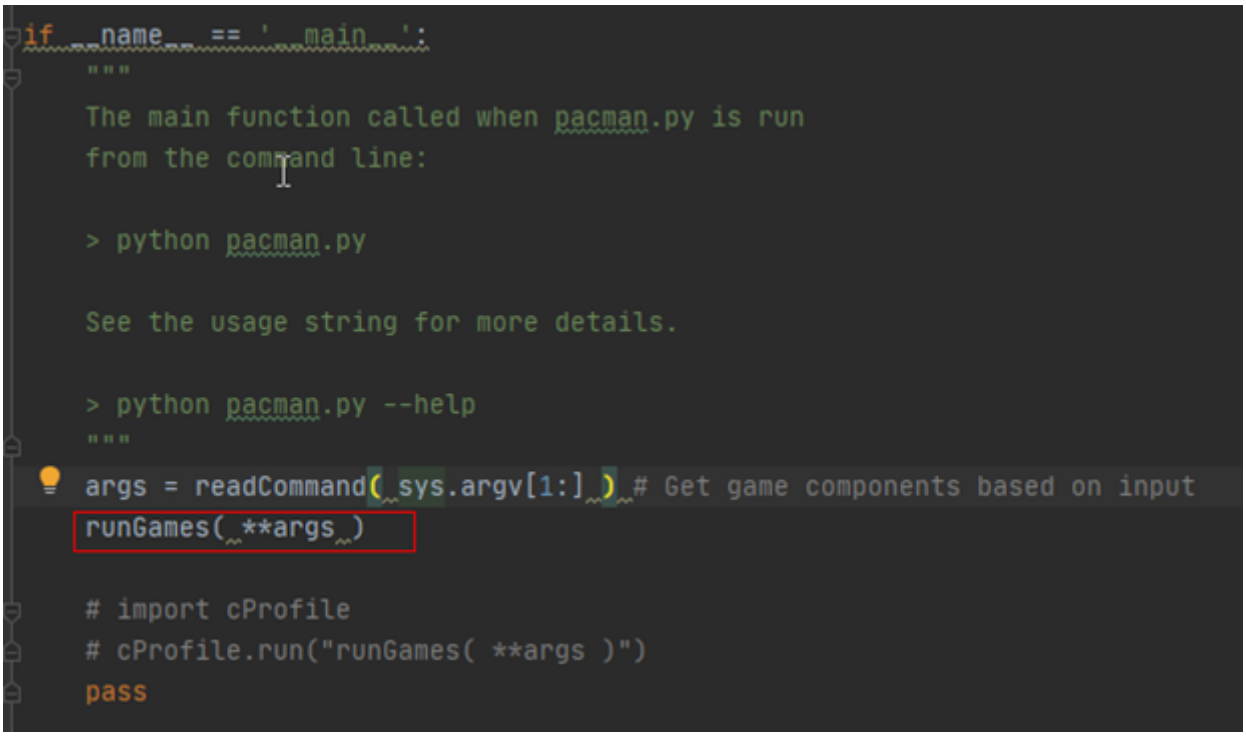
需要阅读的几个文件如下：

文件名	功能
`pacman.py`	吃豆人游戏的主程序
`game.py`	吃豆人游戏的运行逻辑
`util.py`	搜索策略可以用到的数据结构

项目使用Tkinter包作为GUI开发框架，游戏交互逻辑实现较复杂，不需做了解。autograder等测试相关的文件如有兴趣可以自行阅读源码。

2.4 单步调试(可选)

刚接手一个新的项目代码，比较快速的熟悉方式是先通过说明文件或者调试器找到项目的入口，再通过调试器单步调试查看代码的运行过程，边运行边阅读源代码。Pacman项目的入口代码是pacman.py中的runGames()。



```
if __name__ == '__main__':
    """
    The main function called when pacman.py is run
    from the command line:

    > python pacman.py

    See the usage string for more details.

    > python pacman.py --help
    """
    args = readCommand( sys.argv[1:] ) # Get game components based on input
    runGames( **args )

    # import cProfile
    # cProfile.run("runGames( **args )")
    pass
```

Python自带调试工具pdb，类似c语言的gdb，操作比较类似。这里介绍下VS Code中调试pacman。**单步调试非必须**，如对Python比较熟悉可以直接看后面的实验内容，对于每个问题，都给出了要编写代码的位置。

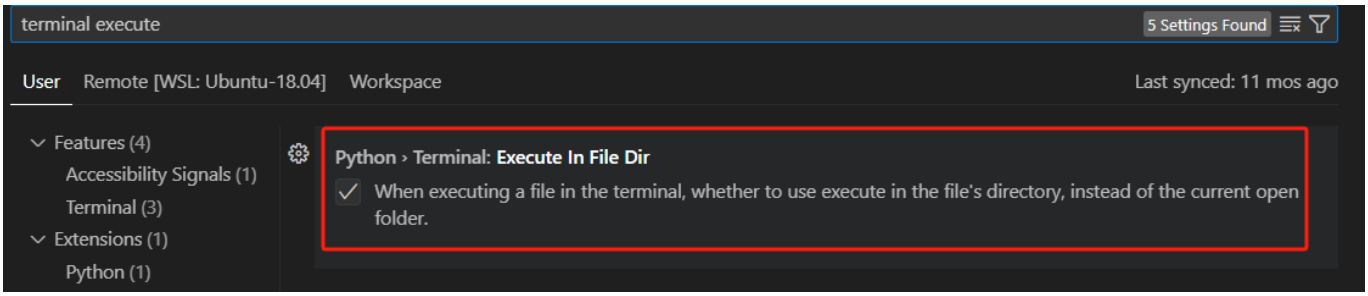
2.4.1 VS Code 单步调试

基本操作请参考：Python debugging in VS Code

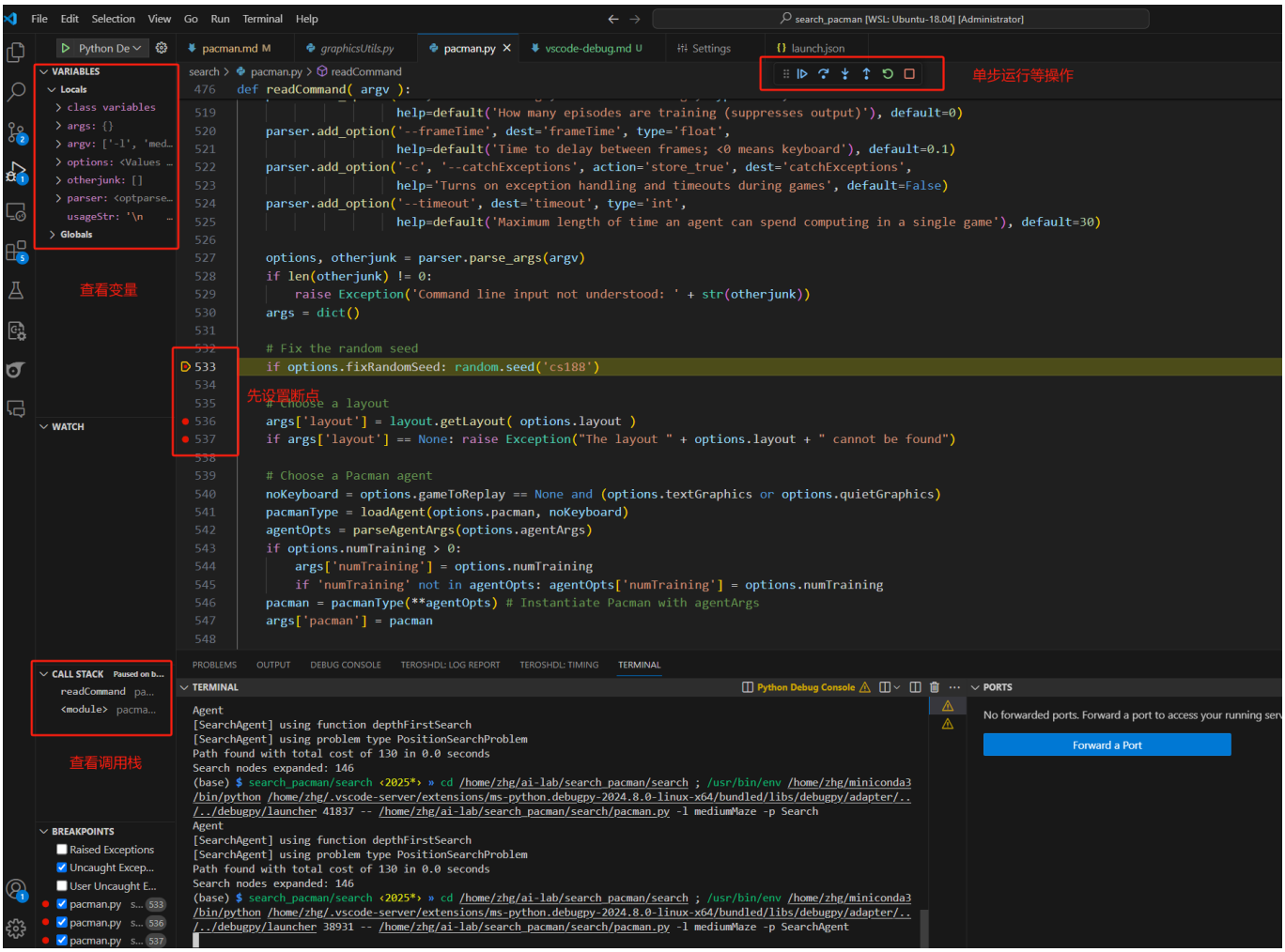
launch.json文件可参考如下的配置：

```
{
    "version": "0.2.0",
    "configurations": [
        {
            "name": "Python Debugger: Current File with Arguments",
            "type": "debugpy",
            "request": "launch",
            "program": "${file}",
            "console": "integratedTerminal",
            "args": ["-l", "mediumMaze", "-p", "SearchAgent"],
            "cwd": "${fileDirname}",
        }
    ]
}
```

另外打开VS Code的设置，通过搜索找到Terminal:Execute In File Dir这一项并勾选。



配置无误后，先设置断点，再启动调试，效果如下：



3、实验具体内容

3.1 找到一个特定位置的豆子：问题1-4

首先，运行以下命令测试Python环境和SearchAgent是不是正常工作。

```
python pacman.py -l tinyMaze -p SearchAgent -a fn=tinyMazeSearch
```

这条命令的意思是用`tinyMazeSearch`算法在tinyMaze迷宫中找到特定位置的豆子。命令中fn是function的简写即搜索算法，只能传入search.py文件中定义的函数，提供了bfs、dfs、astar、ucs四个缩写。正常情况会弹

出游戏界面，游戏结束后会输出运行情况，游戏分数Score无需关注。

```
I:\search>python pacman.py -l tinyMaze -p SearchAgent -a fn=tinyMazeSearch
[SearchAgent] using function tinyMazeSearch
[SearchAgent] using problem type PositionSearchProblem
Path found with total cost of 8 in 0.0 seconds
Search nodes expanded: 0
Pacman emerges victorious! Score: 502
Average Score: 502.0
Scores:        502.0
Win Rate:      1/1 (1.00)
Record:        Win

I:\search>
```

tinyMazeSearch默认已实现，该搜索算法只能在tinyMaze迷宫中成功找到豆子。接下来需要完成指定的搜索算法帮助吃豆人规划路线。

3.1.1 问题1：应用深度优先搜索找到一个特定的位置的豆

找到一个特定位置的豆子是路径规划问题，初始状态、动作、目标函数定义如下：

- **Pathing**
  - States: (x,y) locations
  - Actions: North, South, East, West
  - Transition model (getting the next state): Update location only
  - Goal test: Is (x,y)=END?

相关实现在`searchAgents.py/PositionSearchProblem`中，请阅读对应代码。对于`PositionSearchProblem`，大家只需要实现对应的搜索算法函数即可。对于问题1，实现深度优先算法`searcy.py/depthFirstSearch`，运行以下测试命令，如果实现正确都能顺利通过：

```
python pacman.py -l tinyMaze -p SearchAgent
python pacman.py -l mediumMaze -p SearchAgent
python pacman.py -l bigMaze -z .5 -p SearchAgent
```

弹出的游戏界面中，对于已经搜索过的状态，迷宫上将显示一个叠加物(overlay)，并显示出访问的顺序(红色由深到浅)。以上3个测试都通过并不代表完全正确，需再运行以下自动化测试，-q 选项是指定对应的问题。

```
python autograder.py -q q1
```

若没有实现对应算法或者实现出错，执行之后会有错误提示。下图是未实现depthFirstSearch时的错误信息，会提示FAIL以及出错的原因。

```
I:\search>python autograder.py -q q1
Starting on 3-27 at 17:06:16

Question q1
===========
*** Method not implemented: depthFirstSearch at line 90 of I:\search\search.py
*** FAIL: Terminated with a string exception.

### Question q1: 0/3 ###


Finished at 17:06:16

Provisional grades
==================
Question q1: 0/3
------------------
Total: 0/3

Your grades are NOT yet registered.  To register your grades, make sure
to follow your instructor's guidelines to receive credit on your project.


I:\search>
```

如果运行python autograder.py出现以下错误，是因为python版本不兼容的问题。可以在grading.py中import html，再将294行的cgi.escape用html.escape代替。

```
Traceback (most recent call last):
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\autograder.py", line 355, in <module>
    evaluate(options.generateSolutions, options.testRoot, moduleDict,
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\autograder.py", line 311, in evaluate
    grades.grade(sys.modules[__name__], bonusPic = projectParams.BONUS_PIC)
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\grading.py", line 81, in grade
    self.addExceptionMessage(q, inst, traceback)
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\grading.py", line 149, in addExceptionMessage
    self.fail('FAIL: Exception raised: %s' % inst)
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\grading.py", line 272, in fail
    self.addMessage(message, raw)
  File "D:\code\AI_2022\ref-search-python3\grading.py", line 294, in addMessage
    message = cgi.escape(message)
AttributeError: module 'cgi' has no attribute 'escape'
```

参考来源：https://stackoverflow.com/questions/62470666/getting-this-error-with-py2-7-as-well-as-with-py3-7)

如果结果出错，可以使用print或者pdb单步进行调试：

1. 在适当的位置使用print输出观测信息，比如查看depthFirstSearch函数的节点扩展过程，与参考结果做对比。
2. 单步调试，结合出错信息，查看变量的中间状态。

如果实现正确，每个测试用例会显示PASS，并显示得分。

```
(base) $ ~/search »python autograder.py -q q1
Starting on 3-27 at 17:08:07

Question q1
===========
*** PASS: test_cases/q1/graph_backtrack.test
***     solution:               ['1:A->C', '0:C->G']
***     expanded_states:        ['A', 'D', 'C']
*** PASS: test_cases/q1/graph_bfs_vs_dfs.test
***     solution:               ['2:A->D', '0:D->G']
***     expanded_states:        ['A', 'D']
*** PASS: test_cases/q1/graph_infinite.test
***     solution:               ['0:A->B', '1:B->C', '1:C->G']
***     expanded_states:        ['A', 'B', 'C']
*** PASS: test_cases/q1/graph_manypaths.test
***     solution:               ['2:A->B2', '0:B2->C', '0:C->D', '2:D->E2', '0:E2->F', '0:F->G']
***     expanded_states:        ['A', 'B2', 'C', 'D', 'E2', 'F']
*** PASS: test_cases/q1/pacman_1.test
***     pacman layout:          mediumMaze
***     solution length: 130
***     nodes expanded:         146

### Question q1: 3/3 ###


Finished at 17:08:07

Provisional grades
==================
Question q1: 3/3
------------------
Total: 3/3

Your grades are NOT yet registered.  To register your grades, make sure
to follow your instructor's guidelines to receive credit on your project.

(base) $ ~/search »
```

`depthFirstSearch`返回的是一个从初始状态到目标状态的操作（actions）序列，即移动的方向序列，具体取值可以参考`searcy.py/tinyMazeSearch`函数的返回结果，如下。

```
def tinyMazeSearch(problem):
    """
    Returns a sequence of moves that solves tinyMaze.  For any other maze,
the
    sequence of moves will be incorrect, so only use this for tinyMaze.
    """
    from game import Directions
    s = Directions.SOUTH
    w = Directions.WEST
    return  [s, s, w, s, w, w, s, w]
```

每一步移动的方向是东、西、南、北四个方向中的一个，将每一步的方向组合成list列表作为结果返回。`depthFirstSearch`函数与`tinyMazeSearch`函数返回值要一样，是一个列表，列表中的元素是方向。

```
class Directions:
    NORTH = 'North'
    SOUTH = 'South'
    EAST = 'East'
```

```
    WEST = 'West'
    STOP = 'Stop'
```

每一步的actions可以从`SearchProblem.getSuccessors`获取，所有操作必须合法（不能翻墙）。 可以在搜索的过程就将action保存，也可以先找到目标，最后回溯得到正确的路径。

说明：

1. 从`util.py`中选择Stack数据结构实现，否则无法兼容autograder测试将不通过。
2. 搜索算法不只是到了目标节点就返回，还需返回到目标节点的路径，这也是难点之一。对于`PositionSearchProblem`，目标节点goal是固定的（1,1）。
3. 压入到open表的数据可以自定义，可以是tuple、list或者两者的嵌套等，除了状态本身，还可以附加其他信息。
4. 该问题除了Python内置的数据类型，另外可以只用到`searchAgents.py/PositionSearchProblem`、`game.py/Actions`、`util.py/Stack`，先阅读下这三个类的源码。

3.1.2 问题2：应用广度优先搜索找到一个特定的位置的豆

实现广度优先搜索算法`searcy.py/breadthFirstSearch`，并分别通过以下测试：

```
python pacman.py -l mediumMaze -p SearchAgent -a fn=bfs
python pacman.py -l bigMaze -p SearchAgent -a fn=bfs -z .5
python autograder.py -q q2
```

如果已经正确实现了深度优先搜索，广度优先搜索的实现则很容易。实际上，深搜（DFS）、广搜（BFS）、代价一致搜索（UCS）、 A*搜索可以用一个通用的图搜索框架实现。

问题1-4要求用通用的图搜索算法实现，伪代码如下图，reached对应closed表，frontier对应open表，不同的搜索方法仅仅在于open表内元素的排序不同。

```
function GRAPH-SEARCH(problem, frontier) return a solution or failure
    reached ← an empty set
    frontier← INSERT(MAKE-NODE(INITIAL-STATE[problem]), frontier)
    while not IS-EMPTY(frontier) do
        node ← POP(frontier)
        if problem.IS-GOAL(node.STATE) then return node
        end if
        if node.STATE is not in reached then
            add node.STATE in reached
            for each child-node in EXPAND(problem, node) do
                frontier ← INSERT(child-node, frontier)
            end for
        end if
    end while

    return failure
```

3.1.3 问题3：应用代价一致搜索找到一个特定的位置的豆

深搜和广搜中，默认每一步的代价都是1。现在考虑更复杂一点的情况，通过修改代价函数`costFn`，使得每一步的代价并不相同，Pacman从而可以发现不同路径。例如，有ghost的区域，增加每步的代价，而在食物丰富的区域减少每步的代价，一个理性的Pacman应该相应地调整它的行为，躲开ghost吃到更多的食物。实现代价一致搜索算法`searcy.py/uniformCostSearch`，并分别通过以下测试：

```
python pacman.py -l mediumMaze -p SearchAgent -a fn=ucs
python pacman.py -l mediumDottedMaze -p StayEastSearchAgent
python pacman.py -l mediumScaryMaze -p StayWestSearchAgent
python autograder.py -q q3
```

3.1.4 问题4：应用A* 算法找到一个特定的位置的豆

实现A*搜索算法`searcy.py/aStarSearch`，利用曼哈顿距离作为启发函数，并分别通过以下测试：

```
python pacman.py -l bigMaze -z .5 -p SearchAgent -a
fn=astar,heuristic=manhattanHeuristic
python autograder.py -q q4
```

3.2 找到所有的角落：问题5-6

在角落迷宫的四个角上面有四个豆，该搜索问题要求找到一条访问所有四个角落的最短的路径。

3.2.1 问题5：基于BFS的角落问题

相比于问题1-4，问题5-6的状态空间不同，对于问题5，只需要补充完成`searchAgents.py/CornersProblem`类的实现。相比于`PositionSearchProblem`，初始状态、后继函

数、目标函数都不同。实现CornersProblem之后分别进行以下测试：

```
python pacman.py -l tinyCorners -p SearchAgent -a
fn=bfs,prob=CornersProblem
python pacman.py -l mediumCorners -p SearchAgent -a
fn=bfs,prob=CornersProblem
python autograder.py -q q5
```

说明：

1. 状态的定义只需包含必要的信息，Agent位置和4个角落的状态，使其能够表示角落是否被访问过，数据类型不限。
2. 后继函数getSuccessors中，子节点的cost都是1。

3.2.2 问题6：基于A*的角落问题

在问题5完成的CornersProblem基础上，使用A*算法，构建合适的启发函数，找到一条访问迷宫所有四个角落的最短路径。实现`searchAgents.py/cornersHeuristic`函数，并通过以下测试：

```
python pacman.py -l mediumCorners -p AStarCornersAgent -z 0.5
python autograder.py -q q6
```

其中AStarCornersAgent等同于以下选项

```
-p SearchAgent -a fn=aStarSearch,prob=CornersProblem,heuristic=cornersHeuristic
```

不同的启发函数扩展的节点不一样得分也会不一样，要求启发函数是非平凡非负一致的，平凡的启发函数是处处为0，非平凡的启发函数会返回非0值，一致性即课程中介绍的单调性限制。autograder.py会跟根据扩展的节点数给分，标准如下。

Number of nodes expanded	Grade
more than 2000	0/3
at most 2000	1/3
at most 1600	2/3
at most 1200	3/3

课程要求实现两种不同的启发函数并做对比！！！

3.3 吃掉所有的豆子：问题7-8

3.3.1 问题7：吃掉所有的豆子（FoodSearchProblem）

构造恰当的启发式函数，利用 A* 算法，以尽可能少的步数吃掉迷宫中存在的所有豆子。FoodSearchProblem已经实现好了不需修改，问题的解定义为一条收集到世界中所有食物的路径。如果前面问题的搜索算法已经实现, 不需要改代码，使用null heuristic 的A*（等价于代价一致算法）可以求得testSearch问题的最优解，用以下命令测试：

```
python pacman.py -l testSearch -p AStarFoodSearchAgent
```

该问题要求设计一个更好的启发函数，并补充`searchAgents.py/foodHeuristic`实现，完成后用以下两个命令测试：

```
python pacman.py -l trickySearch -p AStarFoodSearchAgent
python autograder.py -q q7
```

不同的启发函数扩展的节点会不一样，要求启发函数是非平凡非负一致的，autograder.py会跟根据扩展的节点数给分，标准如下。

Number of nodes expanded	Grade
more than 15000	1/4
at most 15000	2/4
at most 12000	3/4
at most 9000	4/4 (full credit; medium)
at most 7000	5/4 (optional extra credit; hard)

3.3.2 问题8：次最优搜索

有的时候，即使使用 A* 加上好的启发函数，找到吃掉所有豆子的最优路径也比较耗时。定义一个优先吃最近的豆子函数是提高搜索速度的一个好的办法。在本问题中，使用`searchAgents.py/ClosestDotSearchAgent`进行次最优搜索，ClosestDotSearchAgent总是贪心地吃掉最近的豆子。

本问题主要两步：

- 先实现`AnyFoodSearchProblem.isGoalState()`函数完成目标的判断。
- 实现`searchAgents.py/findPathToClosestDot`函数，该函数使用合适的搜索算法搜索到最近豆的路径，解会非常短。至于选择哪种搜索算法，广搜、深搜、代价一致搜索、A*搜索大家可以简单思考下。

实现之后用以下两条命令测试：

```
python pacman.py -l bigSearch -p ClosestDotSearchAgent -z .5
python autograder.py -q q8
```

4、启发函数的设计

关于启发函数的设计，除了选择一些常用的函数，比如：曼哈顿距离、欧几里得距离、对角线距离等，也有一些设计方法，以下引用《人工智能：现代方法（第4版）》中3.6.2节内容，更多的说明和其他方法可参阅书籍。

4.1 从松弛问题出发生成启发式函数

减少了对动作的限制条件的问题称为松弛问题（relaxed problem）。松弛问题的状态空间图是原始状态空间的一个超图，因为删除限制条件会导致原图中边的增加。

因为松弛问题向状态空间图中添加了一些边，根据定义，原问题的任一最优解也是松弛问题的一个解；但是，如果增加的边提供了捷径，松弛问题可能有更好的解。因此，松弛问题中最优解的代价可以作为原问题的一个可容许的启发式函数。此外，因为得到的启发式函数是松弛问题的准确代价，所以它一定满足三角不等式，因此它是一致的。

例如，如果将 8 数码问题的行动描述为：如果方格 X 与方格 Y 相邻，且 Y 是空格，那么滑块可以从方格 X 移动到方格 Y。 我们可以通过删除一个或两个条件来生成 3 种松弛问题。（a）如果方格 X 与方格 Y 相邻，那么滑块可以从方格 X 移动到方格 Y。（b）如果方格 Y 是空格，那么滑块可以从方格 X 移动到方格 Y。（c）滑块可以从方格 X 移动到方格 Y。 由（a）可以推导出 h（曼哈顿距离）。原因是，如果我们将每个滑块依次移动到其目标位置，那么 h2 就是准确的步数。

5、实验报告与提交说明

代码只需要提交修改后的 `search.py、searchAgents.py` 文件，报告内容见模板。