同濟大學

课程名称 人工智能

设计名称 利用 α - β 减枝实现五子棋 AI

学院(系) 电子与信息工程学院

专　　业 计算机科学与技术

成　　员 蔡乐文　　学号 1353100

成　　员 周宇星　　学号 1352652

2015-2016 学年 第 2 学期

目录

对抗问题.....2
α-β 减枝.....2
五子棋问题.....3
进一步的优化.....6
实验成果.....7
实验总结.....8
源代码(无界面)：.....9

对抗问题

对抗问题：顾名思义，博弈双方是带有对抗性质的。博弈的任何一方都希望局面尽量对自己有利，同时局面也应该尽量令对方不利。通常这一类问题可以通过 Minimax 算法解决。Minimax 算法又名极小化极大算法，是一种找出失败的最大可能性中的最小值的算法。Minimax 算法常用于棋类等由两方较量的游戏和程序，这类程序由两个游戏者轮流，每次执行一个步骤。

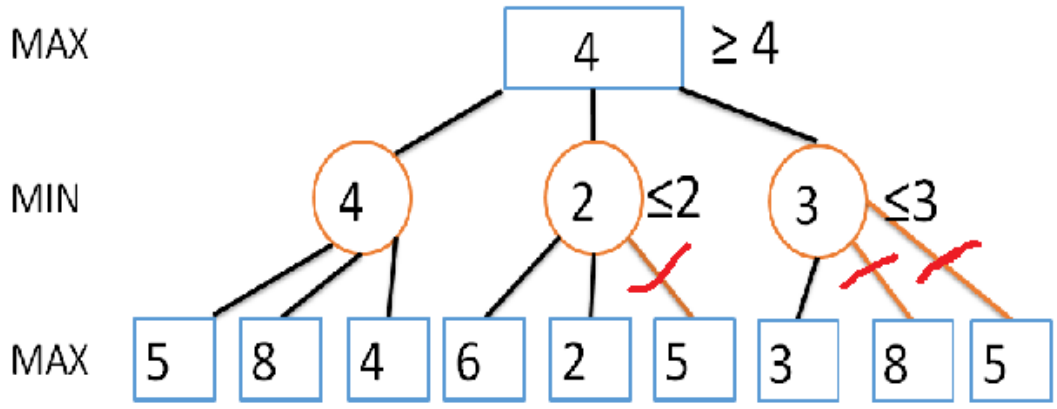
为了执行 Minimax 算法，我们可以通过穷举的方式，枚举所有的状态空间，从而使得我们可以在游戏刚一开始，就预测到输赢。

但是，在实际情况下，游戏的状态空间都是异常庞大的。很显然，我们不能将以穷举方式实现的 Minimax 算法用于实际应用。

α-β 减枝

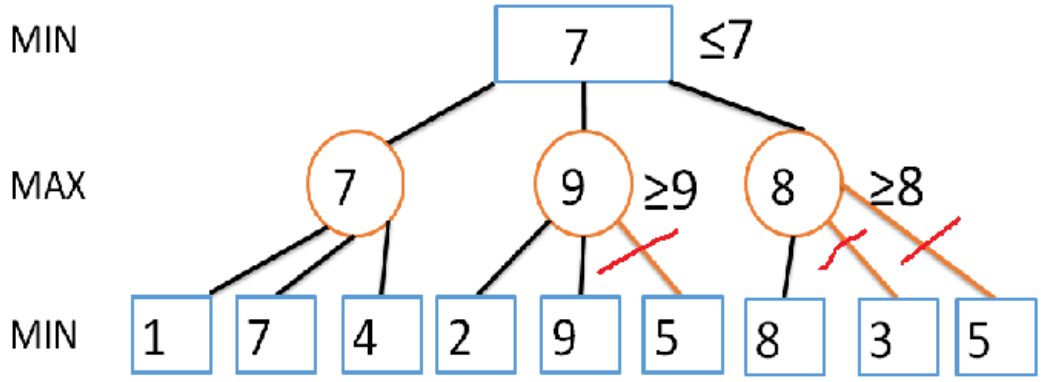
通过分析可以发现，在利用穷举方法执行 Minimax 算法中有许多的无效搜索，也就是说，许多明显较劣的状态分支我们也进行搜索了。

我们在进行极大值搜索的时候，我们仅仅关心，下面最大的状态，对于任何小于目前值的分支也都是完全没有必要进行进一步检查的。(α 减枝)



通过上图，我们可以发现，我们可以减去大量无用的状态检查，从而降低我们的运算量。

同时，我们在进行极小值搜索的时候，我们仅仅关心，下面最小的状态，对于任何大于目前值的分支都是完全没有必要进行进一步检查的。(β 减枝)

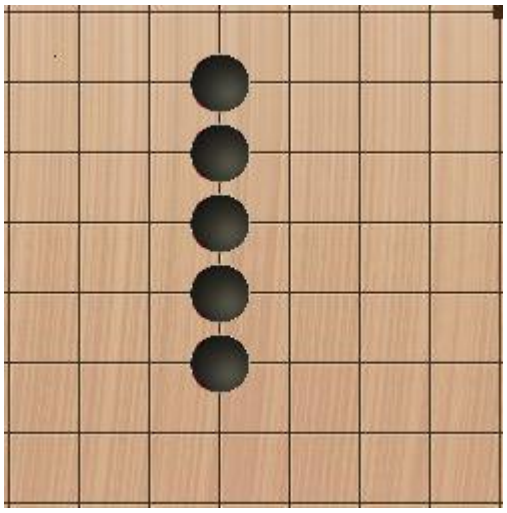


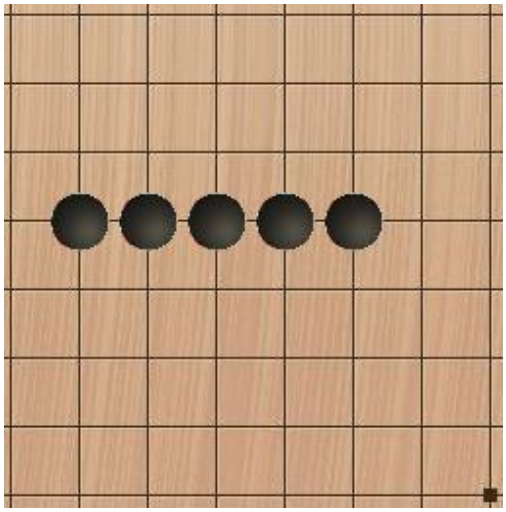
通过上图，我们可以发现，我们可以减去大量无用的状态检查，从而降低我们的运算量。

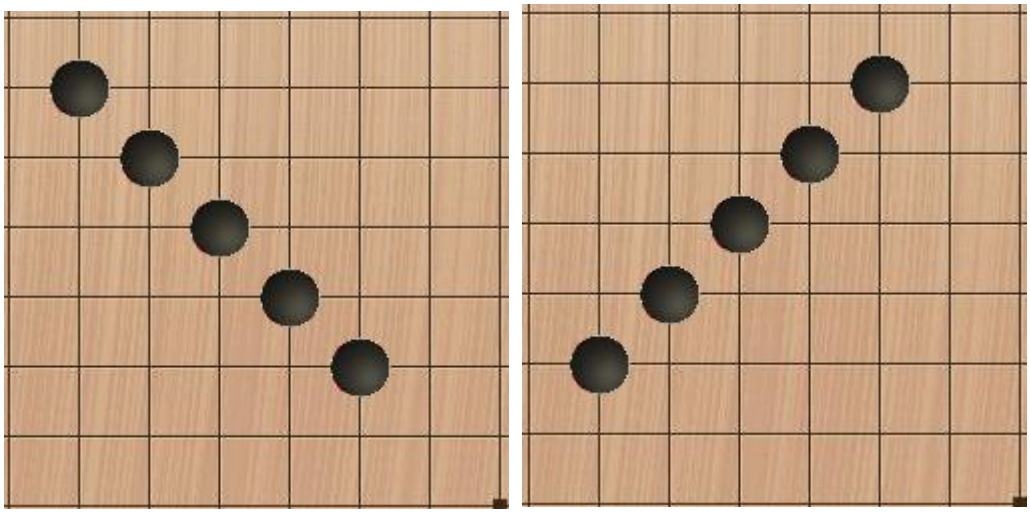
将上述所提到的 α 减枝与 β 减枝进行综合就可以得到 α-β 减枝。
对于对抗搜索而言，我们需要精心设计其估值函数，不然我们的 α-β 减枝将毫无用武之地。

五子棋问题

五子棋：是一种两人对弈的纯策略型棋类游戏，通常双方分别使用黑白两色的棋子，下在棋盘直线与横线的交叉点上，先形成 5 子连线者获胜。

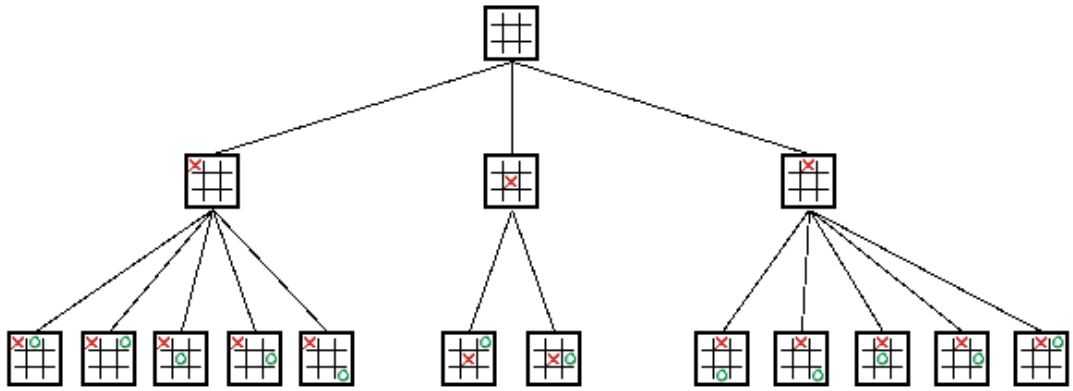






这里，我们采用了极大极小博弈树(MGT)，来实现 AI

这里用一张井字棋的搜索示意图来说明。



上图很清晰的展示了对局可能出现的所有情况（已经去除了等价的情况），如果让这个图延展下去，我们就相当于穷举了所有的下法，如果我们能在知道所有下法的情况下，对这些下法加以判断，我们的 AI 自然就可以选择具有最高获胜可能的位置来下棋。

极大极小博弈树就是一种选择方法，由于五子棋以及大多数博弈类游戏是无法穷举出所有可能的步骤的（状态会随着博弈树的扩展而呈指数级增长），所以通常我们只会扩展有限的层数，而 AI 的智能高低，通常就会取决于能够扩展的层数，层数越高，AI 了解的信息就越多，就越能做出有利于它的判断。

为了让计算机选择那些获胜可能性高的步骤走，我们就需要一个对局面进行打分的算法，越有利，算法给出的分数越高。在得到这个算法过后，计算机就可以进行选择了，在极大极小博弈树上的选择规则是这样的：

AI 会选择子树中具有最高估值叶子节点的路径；

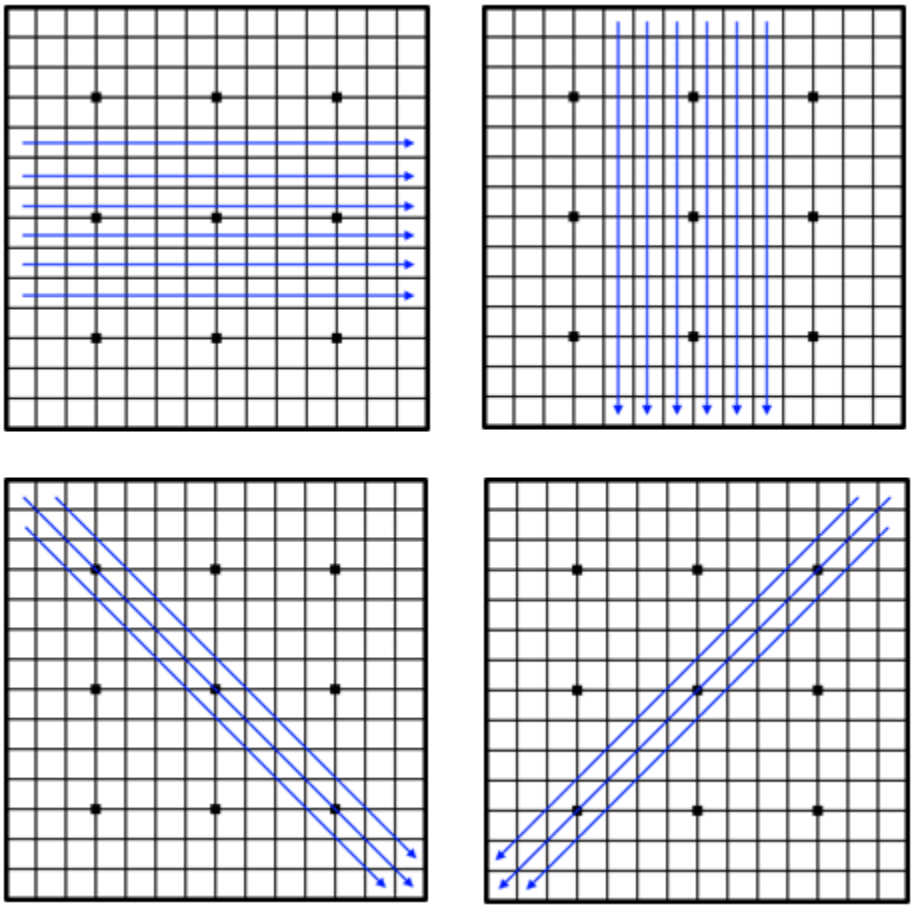
USER 会选择子树中具有最小估值叶子节点的路径。

这样的原则很容易理解，作为玩家，我所选择的子一定要使自己的利益最大化，而相应的在考虑对手的时候，也不要低估他，一定要假设他会走对他自己最有利，也就是对我最不利的那一步。

接下来，我们实现关键的局面评分步骤：

直接分析整个棋面是一件很复杂的事情，为了让其具备可分析性，我们可以将其进行分解，分解成易于我们理解和实现的子问题。

对于一个二维的期面，五子棋不同于围棋，五子棋的胜负只取决于一条线上的棋子，所以根据五子棋的这一特征，我们就来考虑将二维的棋面转换为一维的，下面是一种简单的思考方式，对于整个棋盘，我们只需要考虑四个方向即可，所以我们就按照四个方向来将棋盘转换为 15 * 6 个长度不超过 15 的一维向量（分解斜向的时候，需要分为上下两个半区），参考下图：



我们的目的是为了为其评分，那么我们就还需要评估每个线状态，将每个线状态的评分进行汇总，当做我们的棋面评分：

$$evaluateValue = \sum evaluateLine(lineState[i])$$

接下来我们所要做的就是评价每一条线状态，根据五子棋的规则，我们可以很容易穷举出各种可能出现的基本棋型，我们首先为这些基本棋型进行识别和评价，并且统计每个线状态中出现了多少种下面所述的棋型，并据此得出评价值，得到如下图所示的静态估值表：

棋型名称	棋型示意	静态估值
活一	□●□	10
眠一	○●□	1
活二	□●●□	100
眠二	○●●□	10
活三	□●●●□	1000
眠三	○●●●□	100
活四	□●●●●□	10000
眠四	○●●●●□	1000
五子连珠	●●●●●	100000
□: 空位 ●: 正评估方棋子 ○: 正评估方对方棋子		

根据这个表以及我们之前所谈到的规则，我们就可以得到一个可以运行的 AI 了。

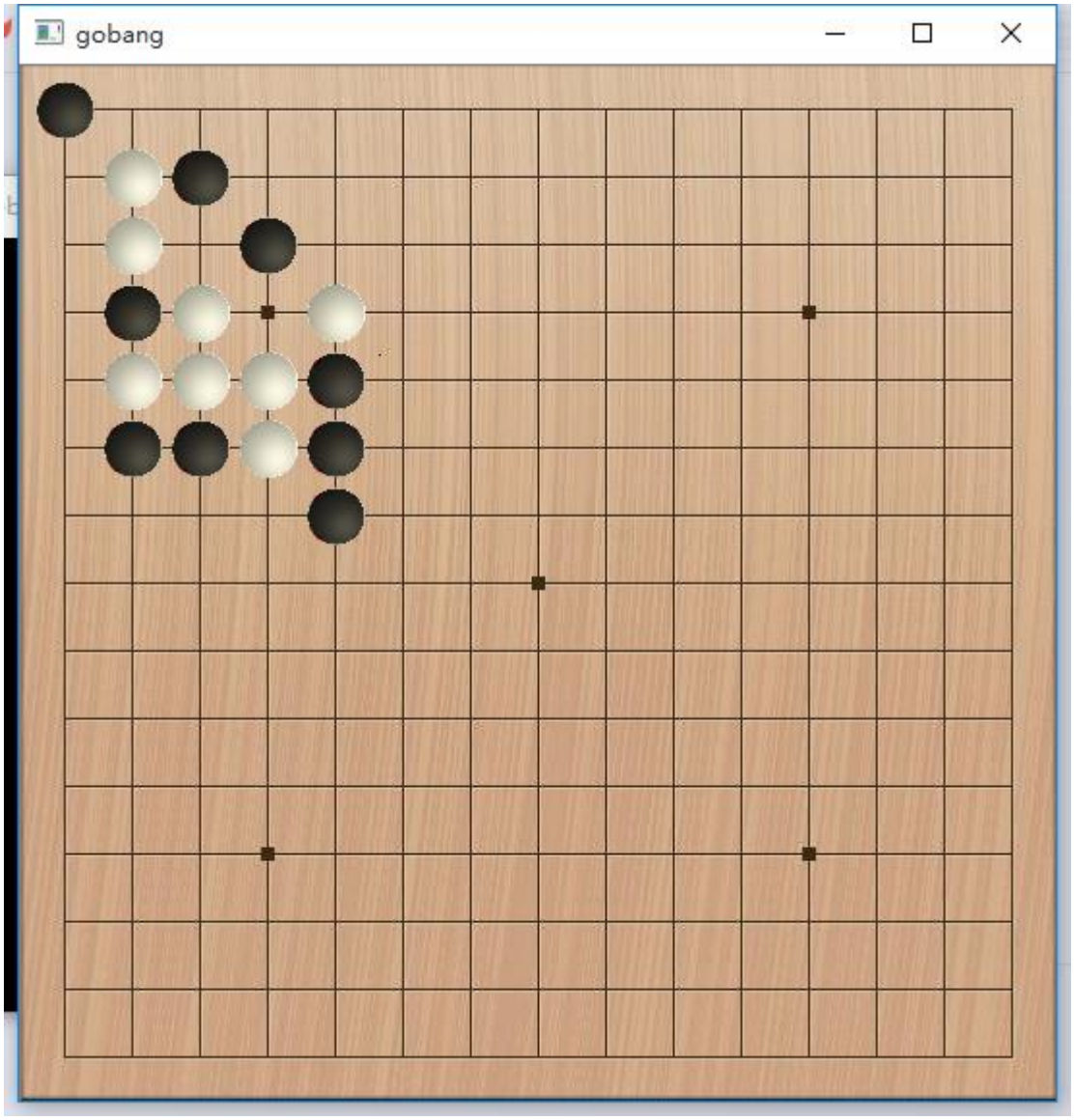
进一步的优化

注意到，如果我们搜索到第四层，总共需要搜索：
224 + 224 * 223 + 224 * 223 * 222 + 224 * 223 * 222 * 221 = 2 461 884 544 个状态节点，搜索如此多的状态节点的开销是十分可观的，因此，我们提高效率的方式就锁定到了：如何减少需要搜索的状态节点。

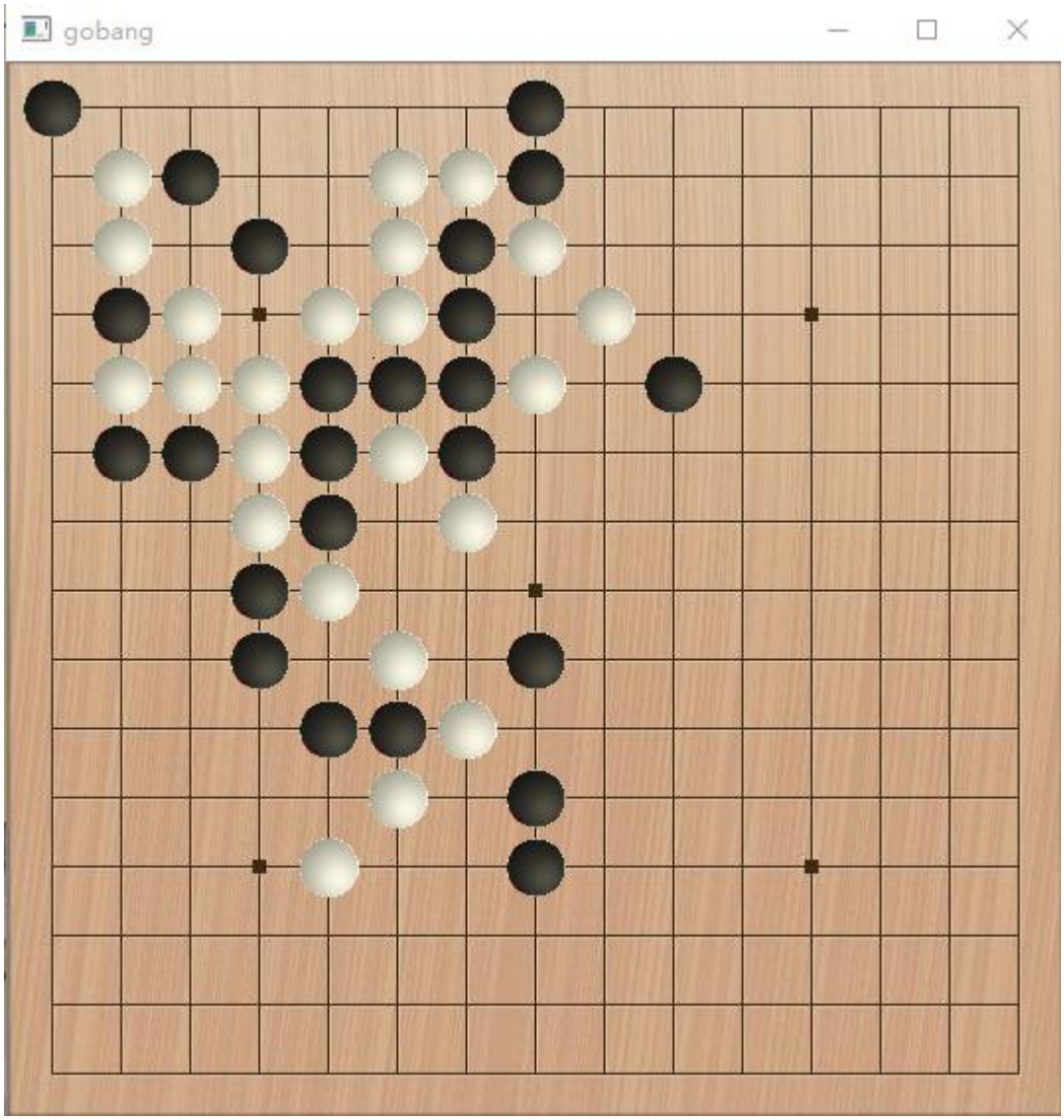
我们可以采取以下方法来减少需要搜索的状态节点:

1. 我们可以利用经典的 α - β 剪枝算法对博弈树剪枝。
2. 我们可以每次搜索仅搜索落子点周围 2*2 格范围内存在棋子的位置，这样可以避免搜索一些明显无用的节点，而且可以大幅度提升整体搜索速度。
3. 避免对必胜/负局面搜索，当搜索过程中出现了必胜/负局面的时候直接返回不再搜索，因为此时继续搜索是没有必要的，直接返回当前棋局的估价值即可。
4. 加入随机化 AI 的下棋方式，普通的 AI 算法对于给定的玩家下棋方式会给出固定的回应，这就导致玩家获胜一次之后只要此后每次都按此方式下棋，都能够获胜。为了避免这种情况，可以在 AI 选择下子位置的时候，在估值相差不多的几个位置中随机挑选一个进行放置，以此增加 AI 的灵活性。
5. 规划搜索顺序，有很多有价值的下子点存在于更靠近棋盘中央的地方，如果从棋盘中央向外搜索的话，则能够提高 α - β 剪枝的效率，让尽可能多的分支被排除。

实验成果



（游戏中间界面）



（游戏中间界面）

实验总结

通过本次实验，加强了组员之间的沟通协调能力，同时也提高了我们对α β减枝算法的了解。我们更了解了五子棋相关的游戏规则以及一些技巧，拓宽了我们的知识面，有助于我们在未来的生活中更好的与人交流。

同时，经过此次实验，我们深入了解了棋类人工智能算法，进一步的提升了我们的专业水平，有助于我们在未来的就业与科研岗位上走的更远。

虽然α β减枝实现起来非常容易，但是五子棋的局势估计却十分的有挑战性，其局势估计的准确与否直接影响了程序的运行结果是否令人满意，AI 是否能够展现出足够的智能。

本次实验，由周宇星（1352652）和蔡乐文（1353100）完成。其中，周宇星设计并完成了五子棋布局的估价函数，与蔡乐文共同完成了α β减枝算法的研究与实现。蔡乐文设计并完成了有关程序界面以及操作的功能。

源代码

```
#include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
#include "opencv2/imgcodecs.hpp"
#include "opencv2/videoio/videoio.hpp"
#include "opencv2/highgui/highgui.hpp"

#include <iostream>

#include <iostream>
#include <cstdio>
#include <cstring>
#include <cstdio>
#include <cstdlib>
#include <iomanip>

using namespace std;
using namespace cv;
//sro 菜神 Orz

cv::Mat chessboard, whiteChess, blackChess, tmp, BGS;

int is_red(Vec3b X) {
    // cout << (int)X[1] << ' ' << (int)X[2] << ' ' << (int)X[3] << endl;
    return X[0] < 200 && X[1] < 200 && X[2] > 230;
}

cv::Mat BG;
//将棋子复制到背景画面上
void imageCopyToBG(cv::Mat chess, int x, int y) {
    x *= 35;
    y *= 35;
    int rows = chess.rows;
    int cols = chess.cols;
    for (int i = 0; i < rows; ++i) {
        for (int j = 0; j < cols; ++j) {
            if (!is_red(chess.at<Vec3b>(i, j))) {
                BG.at<Vec3b>(x + i + 8, y + j + 8) = chess.at<Vec3b>(i, j);
            }
        }
    }
}
```

```
/*
实现用的参数
*/
class CONFIG {
public:
    static const int BOARD_SIZE = 15;
    static const int EMPTY = 0;
    static const int USER_1 = 1;
    static const int USER_2 = 2;
    static const int AI_EMPTY = 0; // 无子
    static const int AI_MY = 1; // 待评价子
    static const int AI_OP = 2; // 对方子或不能下子
    static const int MAX_NODE = 2;
    static const int MIN_NODE = 1;
    static const int INF = 106666666;
    static const int ERROR_INDEX = -1;
    //估价值
    static const int AI_ZERO = 0;
    static const int AI_ONE = 10;
    static const int AI_ONE_S = 1;
    static const int AI_TWO = 100;
    static const int AI_TWO_S = 10;
    static const int AI_THREE = 1000;
    static const int AI_THREE_S = 100;
    static const int AI_FOUR = 10000;
    static const int AI_FOUR_S = 1000;
    static const int AI_FIVE = 100000;
};

/*
棋盘格子
*/
class Grid :CONFIG {
public:
    int type; //类型

    Grid() {
        type = EMPTY;
    }

    Grid(int t) {
        type = t;
    }
```

```
    void grid(int t = EMPTY) {
        type = t;
    }

    int isEmpty() {
        return type == EMPTY ? true : false;
    }
};

/*
棋盘
*/
class ChessBoard :CONFIG {
public:
    Grid chessBoard[BOARD_SIZE][BOARD_SIZE];

    ChessBoard() {
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i)
            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j)
                chessBoard[i][j].grid();
    }

    ChessBoard(const ChessBoard &othr) {
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i)
            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j)
                chessBoard[i][j].grid(othr.chessBoard[i][j].type);
    }

    /*
    放置棋子
    返回放置棋子是否成功
    */
    bool placePiece(int x, int y, int type) {
        if (chessBoard[x][y].isEmpty()) {
            chessBoard[x][y].type = type;
            return true;
        }
        return false;
    }
};

/*
煞笔AI
```

```
*/
class Game :CONFIG {
public:
    ChessBoard curState; // 当前棋盘
    bool isStart; // 是否进行中
    int curUser; // 当前行棋人
    int MAX_DEPTH; // 最大搜索层数

                /*
                开始并设定难度
                */
    void startGame(int nd = 2) {
        MAX_DEPTH = nd;
        isStart = true;
        curUser = USER_1;
    }

    /*
    转换行棋人
    */
    void changeUser() {
        curUser = curUser == USER_1 ? USER_2 : USER_1;
    }

    /*
    根据给定type
    A:待判断棋子的类型
    type:我方棋子的类型
    返回A是待判断棋子 无棋子 对方棋子
    */
    int getPieceType(int A, int type) {
        return A == type ? AI_MY : (A == EMPTY ? AI_EMPTY : AI_OP);
    }

    int getPieceType(const ChessBoard &board, int x, int y, int type) {
        if (x < 0 || y < 0 || x >= BOARD_SIZE || y >= BOARD_SIZE)// 超出边界按对方棋子
算
            return AI_OP;
        else
            return getPieceType(board.chessBoard[x][y].type, type);
    }

    /*
    当前行棋人放置棋子
```

```
放置失败返回失败
放置成功
检察游戏是否结束
转换游戏角色后返回成功
*/
bool placePiece(int x, int y) {
    if (curState.placePiece(x, y, curUser)) {
        // 检察行棋人是否胜利
        if (isWin(x, y)) {
            isStart = false; // 游戏结束
                             //  return true;
        }
        changeUser(); // 转换游戏角色
        return true;
    }
    return false;
}

bool isWin(int x, int y) {
    if (evaluatePiece(curState, x, y, curUser) >= AI_FIVE)
        return true;
    return false;
}

/*
以center作为评估位置进行评价一个方向的棋子
*/
int evaluateLine(int line[], bool ALL) {
    int value = 0; // 估值
    int cnt = 0; // 连子数
    int blk = 0; // 封闭数
    for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
        if (line[i] == AI_MY) { // 找到第一个己方的棋子
                                // 还原计数
            cnt = 1;
            blk = 0;
            // 看左侧是否封闭
            if (line[i - 1] == AI_OP)
                ++blk;
            // 计算连子数
            for (i = i + 1; i < BOARD_SIZE && line[i] == AI_MY; ++i, ++cnt);
            // 看右侧是否封闭
            if (line[i] == AI_OP)
                ++blk;
```

```
            // 计算评估值
            value += getValue(cnt, blk);
        }
    }
    return value;
}

/*
以center作为评估位置进行评价一个方向的棋子（前后4格范围内）
*/
int evaluateLine(int line[]) {
    int cnt = 1; // 连子数
    int blk = 0; // 封闭数
                // 向左右扫
    for (int i = 3; i >= 0; --i) {
        if (line[i] == AI_MY) ++cnt;
        else if (line[i] == AI_OP) {
            ++blk;
            break;
        }
        else
            break;
    }
    for (int i = 5; i < 9; ++i) {
        if (line[i] == AI_MY) ++cnt;
        else if (line[i] == AI_OP) {
            ++blk;
            break;
        }
        else
            break;
    }
    return getValue(cnt, blk);
}

/*
根据连字数和封堵数给出一个评价值
*/
int getValue(int cnt, int blk) {
    if (blk == 0) {// 活棋
        switch (cnt) {
        case 1:
            return AI_ONE;
        case 2:
```

```
            return AI_TWO;
        case 3:
            return AI_THREE;
        case 4:
            return AI_FOUR;
        default:
            return AI_FIVE;
        }
    }
    else if (blk == 1) {// 单向封死
        switch (cnt) {
        case 1:
            return AI_ONE_S;
        case 2:
            return AI_TWO_S;
        case 3:
            return AI_THREE_S;
        case 4:
            return AI_FOUR_S;
        default:
            return AI_FIVE;
        }
    }
    else {// 双向堵死
        if (cnt >= 5)
            return AI_FIVE;
        else
            return AI_ZERO;
    }
}

/*
对一个状态的一个位置放置一种类型的棋子的优劣进行估价
*/
int evaluatePiece(ChessBoard state, int x, int y, int type) {
    int value = 0; // 估价值
    int line[17];  //线状态
    bool flagX[8];// 横向边界标志
    flagX[0] = x - 4 < 0;
    flagX[1] = x - 3 < 0;
    flagX[2] = x - 2 < 0;
    flagX[3] = x - 1 < 0;
    flagX[4] = x + 1 > 14;
    flagX[5] = x + 2 > 14;
```

```
        flagX[6] = x + 3 > 14;
        flagX[7] = x + 4 > 14;
        bool flagY[8];// 纵向边界标志
        flagY[0] = y - 4 < 0;
        flagY[1] = y - 3 < 0;
        flagY[2] = y - 2 < 0;
        flagY[3] = y - 1 < 0;
        flagY[4] = y + 1 > 14;
        flagY[5] = y + 2 > 14;
        flagY[6] = y + 3 > 14;
        flagY[7] = y + 4 > 14;

        line[4] = AI_MY; // 中心棋子
                         // 横
        line[0] = flagX[0] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x - 4][y].type,
type));
        line[1] = flagX[1] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x - 3][y].type,
type));
        line[2] = flagX[2] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x - 2][y].type,
type));
        line[3] = flagX[3] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x - 1][y].type,
type));

        line[5] = flagX[4] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x + 1][y].type,
type));
        line[6] = flagX[5] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x + 2][y].type,
type));
        line[7] = flagX[6] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x + 3][y].type,
type));
        line[8] = flagX[7] ? AI_OP : (getPieceType(state.chessBoard[x + 4][y].type,
type));

        value += evaluateLine(line);

        // 纵
        line[0] = flagY[0] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y - 4].type,
type);
        line[1] = flagY[1] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y - 3].type,
type);
        line[2] = flagY[2] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y - 2].type,
type);
        line[3] = flagY[3] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y - 1].type,
type);
```

```
        line[5] = flagY[4] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y + 1].type,
type);
        line[6] = flagY[5] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y + 2].type,
type);
        line[7] = flagY[6] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y + 3].type,
type);
        line[8] = flagY[7] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x][y + 4].type,
type);

        value += evaluateLine(line);

        // 左上-右下
        line[0] = flagX[0] || flagY[0] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 4][y
- 4].type, type);
        line[1] = flagX[1] || flagY[1] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 3][y
- 3].type, type);
        line[2] = flagX[2] || flagY[2] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 2][y
- 2].type, type);
        line[3] = flagX[3] || flagY[3] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 1][y
- 1].type, type);

        line[5] = flagX[4] || flagY[4] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 1][y
+ 1].type, type);
        line[6] = flagX[5] || flagY[5] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 2][y
+ 2].type, type);
        line[7] = flagX[6] || flagY[6] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 3][y
+ 3].type, type);
        line[8] = flagX[7] || flagY[7] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 4][y
+ 4].type, type);

        value += evaluateLine(line);

        // 右上-左下
        line[0] = flagX[7] || flagY[0] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 4][y
- 4].type, type);
        line[1] = flagX[6] || flagY[1] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 3][y
- 3].type, type);
        line[2] = flagX[5] || flagY[2] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 2][y
- 2].type, type);
        line[3] = flagX[4] || flagY[3] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x + 1][y
- 1].type, type);

        line[5] = flagX[3] || flagY[4] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 1][y
+ 1].type, type);
```

```
        line[6] = flagX[2] || flagY[5] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 2][y
+ 2].type, type);
        line[7] = flagX[1] || flagY[6] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 3][y
+ 3].type, type);
        line[8] = flagX[0] || flagY[7] ? AI_OP : getPieceType(state.chessBoard[x - 4][y
+ 4].type, type);

        value += evaluateLine(line);

        return value;
    }

    /*
    评价一个棋面上的一方
    */
    int evaluateState(ChessBoard state, int type) {
        int value = 0;
        // 分解成线状态
        int line[6][17];
        int lineP;

        for (int p = 0; p < 6; ++p)
            line[p][0] = line[p][16] = AI_OP;

        // 从四个方向产生
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
            // 产生线状态
            lineP = 1;

            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j) {
                line[0][lineP] = getPieceType(state, i, j, type); /* | */
                line[1][lineP] = getPieceType(state, j, i, type); /* - */
                line[2][lineP] = getPieceType(state, i + j, j, type); /* \ */
                line[3][lineP] = getPieceType(state, i - j, j, type); /* / */
                line[4][lineP] = getPieceType(state, j, i + j, type); /* \ */
                line[5][lineP] = getPieceType(state, BOARD_SIZE - j - 1, i + j, type);
/* / */
                ++lineP;
            }
            // 估计
            int special = i == 0 ? 4 : 6;
            for (int p = 0; p < special; ++p) {
                value += evaluateLine(line[p], true);
            }
```

```
        }
        return value;
    }

    /*
    若x, y位置周围1格内有棋子则搜索
    */
    bool canSearch(ChessBoard state, int x, int y) {

        int tmpx = x - 1;
        int tmpy = y - 1;
        for (int i = 0; tmpx < BOARD_SIZE && i < 3; ++tmpx, ++i) {
            int ty = tmpy;
            for (int j = 0; ty < BOARD_SIZE && j < 3; ++ty, ++j) {
                if (tmpx >= 0 && ty >= 0 && state.chessBoard[tmpx][ty].type != EMPTY)
                    return true;
                else
                    continue;
            }
        }
        return false;
    }

    /*
    给出后继节点的类型
    */
    int nextType(int type) {
        return type == MAX_NODE ? MIN_NODE : MAX_NODE;
    }

    /*
    state 待转换的状态
    type  当前层的标记：MAX MIN
    depth 当前层深
    alpha 父层alpha值
    beta  父层beta值
    */
    int minMax(ChessBoard state, int x, int y, int type, int depth, int alpha, int
beta) {
        ChessBoard newState(state);
        newState.placePiece(x, y, nextType(type));

        int weight = 0;
        int max = -INF; // 下层权值上界
```

```
        int min = INF; // 下层权值下界

        if (depth < MAX_DEPTH) {
            // 已输或已胜则不继续搜索
            if (evaluatePiece(newState, x, y, nextType(type)) >= AI_FIVE) {
                if (type == MIN_NODE)
                    return AI_FIVE; // 我方胜
                else
                    return -AI_FIVE;
            }

            int i, j;
            for (i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
                for (j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j) {
                    if (newState.chessBoard[i][j].type == EMPTY && canSearch(newState,
i, j)) {
                        weight = minMax(newState, i, j, nextType(type), depth + 1, min,
max);

                        if (weight > max)
                            max = weight; // 更新下层上界
                        if (weight < min)
                            min = weight; // 更新下层下界

                                    // alpha-beta
                        if (type == MAX_NODE) {
                            if (max >= alpha)
                                return max;
                        }
                        else {
                            if (min <= beta)
                                return min;
                        }
                    }
                    else
                        continue;
                }
            }

            if (type == MAX_NODE)
                return max; // 最大层给出最大值
            else
                return min; // 最小层给出最小值
        }
```

```
        else {
            weight = evaluateState(newState, MAX_NODE); // 评估我方局面
            weight -= type == MIN_NODE ? evaluateState(newState, MIN_NODE) * 10 :
evaluateState(newState, MIN_NODE); // 评估对方局面
            return weight; // 搜索到限定层后给出权值
        }
    }


    int cnt[BOARD_SIZE][BOARD_SIZE];
    /*
    AI 行棋
    */
    bool placePieceAI() {
        int weight;
        int max = -INF; // 本层的权值上界
        int x = 0, y = 0;
        memset(cnt, 0, sizeof(cnt));
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j) {
                if (curState.chessBoard[i][j].type == EMPTY && canSearch(curState, i,
j)) {
                    weight = minMax(curState, i, j, nextType(MAX_NODE), 1, -INF, max);
                    cnt[i][j] = weight;
                    if (weight > max) {
                        max = weight; // 更新下层上界
                        x = i;
                        y = j;
                    }
                }
                else
                    continue;
            }
        }
        return placePiece(x, y); // AI最优点
    }

    /*
    控制台打印。。。
    */
    void show() {

        chessboard.copyTo(BG);
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
```

```
            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j) {
                if (curState.chessBoard[i][j].type == 1)
                    imageCopyToBG(blackChess, i, j);
                if (curState.chessBoard[i][j].type == 2)
                    imageCopyToBG(whiteChess, i, j);
            }
        }
        for (int i = 0; i < BOARD_SIZE; ++i) {
            for (int j = 0; j < BOARD_SIZE; ++j) {
                if (curState.chessBoard[i][j].type == 0)
                    cout << " -";
                if (curState.chessBoard[i][j].type == 1)
                    cout << " X";
                if (curState.chessBoard[i][j].type == 2)
                    cout << " O";
            }
            cout << endl;
        }
        imshow("gobang", BG);
        cv::waitKey(5);
    }

};

using namespace cv;
using namespace std;

int X, Y = 0;
int optIsOk = 1;
Game G;
//使用回调函数输入数据
static void onMouse(int event, int x, int y, int, void*)
{
    if (event != EVENT_LBUTTONDOWN)
        return;
    if (!optIsOk) return;
    X = x;   Y = y;
    optIsOk = 0;
}

int main(int argc, char** argv)
{
    chessboard = cv::imread("chessboard.bmp");
    tmp = cv::imread("whiteChess.bmp");
```

```
    resize(tmp, whiteChess, Size(30, 30), 0, 0, CV_INTER_LINEAR);
    tmp = cv::imread("blackChess.bmp");
    resize(tmp, blackChess, Size(30, 30), 0, 0, CV_INTER_LINEAR);

    namedWindow("gobang", 1);
    setMouseCallback("gobang", onMouse, 0);
    chessboard.copyTo(BG);
    imshow("gobang", BG);
    cv::waitKey(50);

    int flag = 0;

    G.startGame(4);
    for (;;)
    {
            G.placePieceAI();
            G.show();
            G.placePieceAI();
            G.show();
            optIsOk = 1;
     //   }
        cv::waitKey(5);
    }

    return 0;
}
```