Politechnika Wrocławska

Sprawozdanie z zajęć laboratoryjnych
Sztuczna inteligencja i inżynieria wiedzy

Lista 02
Minmax, Alphabeta

Tomasz Mroczko, 266604

13 maja 2024

Spis treści

1 Wprowadzenie

Celem projektu było zaimplementowanie algorytmu *Minmax* oraz jego ulepszonej wersji *Alphabeta* oraz zastosowanie ich do gry w *Halma*. Zadanie wykonane zostało najpierw w języku *Python*, jednak ze względu na interpretowany charakter tego języka oraz jego słabą wydajność, zdecydowano się na przepisanie algorytmów do języka *C++*.

2 Zadania

2.1 Zdefiniowanie stanu gry i funkcji generującej możliwe ruchy dla gracza

2.1.1 Stan gry

Stan gry jest reprezentowany przez obiekt klasy *Board*, która przechowuje tablicę dwuwymiarową *16x16* reprezentującą planszę do gry. Każde pole planszy jest reprezentowane przez jedną z wartości enumeracji *FieldType*

```
enum FieldType {
  EMPTY,
  WHITE,
  BLACK
};
```

Deklaracja klasy *Board* wygląda następująco

```
class Board {
public:
    static const int BOARD_SIZE = 16;
    static const int PIECE_COUNT = 19;
    static const vector<pair<int, int>> DIRECTIONS;
    static const unordered_map<FieldType, vector<pair<int, int>>> PLAYER_CAMPS;

    Board();
    vector<piece_move> getPlayerMoves(FieldType playerType) const;
    vector<pair<int, int>> getPlayerPositions(FieldType playerType) const;
    vector<pair<int, int>> getPlayerGoalCamp(FieldType playerType) const;
    int playerPiecesInGoalCamp(FieldType playerType) const;
    pair<int, int> getEmptyGoal(vector<pair<int, int>> playerGoalCamp) const;
    void makeMove(piece_move move);
    void undoMove(piece_move move);
    void printBoard() const;

private:
    FieldType state[BOARD_SIZE][BOARD_SIZE];
    vector<piece_move> getPieceMoves(int row, int col) const;
    vector<piece_move> getDirectMoves(int row, int col) const;
    vector<piece_move> getJumpMoves(int row, int col) const;
    bool isWithinBounds(int row, int col) const;
    void initializeDefaultBoard();
};
```

Statyczne pola klasy przechowują informacje o rozmiarze planszy, liczbie pionków, kierunkach ruchu oraz pozycjach obozów graczy. Metody klasy zostaną opisane w dalszej części sprawozdania. Stan planszy przechowywany jest w tablicy dwuwymiarowej *state*.

2.1.2 Metoda genrująca ruchy dla gracza

Ruchu danego gracza generowane sa przez metodę *Board.getPlayerMoves(FieldType playerType).*

```
vector<piece_move> Board::getPlayerMoves(FieldType playerType) const {
    vector<pair<int, int>> playerPositions = getPlayerPositions(playerType);
    vector<piece_move> allMoves;

    for (const pair<int, int> &position : playerPositions) {
        int row = position.first;
        int col = position.second;

        vector<piece_move> moves = getPieceMoves(row, col);
        allMoves.insert(allMoves.end(), moves.begin(), moves.end());
    }
    return allMoves;
}
```

Metoda ta pobiera pozycje wszystkich pionków gracza, a następnie dla każdego z nich generuje możliwe ruchy za pomocą metody *Board.getPieceMoves(int row, int col).*

Metoda *Board.getPieceMoves(int row, int col)* generuje możliwe ruchy dla pionka na pozycji *(row, col)*. Wywołuje ona metody *Board.getDirectMoves(int row, int col)* oraz *Board.getJumpMoves(int row, int col)*, a następnie łączy wyniki tych metod.

```
vector<piece_move> Board::getPieceMoves(int row, int col) const {
    vector<piece_move> moves = getDirectMoves(row, col);
    vector<piece_move> jumpMoves = getJumpMoves(row, col);
    for (piece_move move : jumpMoves) {
        moves.push_back(move);
    }
    return moves;
};
```

Generowanie bezpośrednich ruchów realizoawnane jest przez metodę *Board.getDirectMoves(int row, int col).*

```
vector<piece_move> Board::getDirectMoves(int row, int col) const {
    vector<piece_move> directMoves;
    for (pair<int, int> direction : DIRECTIONS) {
        int adjRow = row + direction.first;
        int adjCol = col + direction.second;
        if (isWithinBounds(adjRow, adjCol) &&
            state[adjRow][adjCol] == FieldType::EMPTY) {
            piece_move move = {row, col, adjRow, adjCol};
            directMoves.push_back(move);
        }
    }
    return directMoves;
};
```

Dla każdego z kierunków ruchu sprawdzane jest czy pole jest puste. Jeśli tak, to zapisywany jest prawidłowy ruch.

Generowanie ruchów możliwych do wykonania poprzez skakanie realizowane jest przez metodę *Board.getJumpMoves(int row, int col).*

```
vector<piece_move> Board::getJumpMoves(int row, int col) const {
    vector<piece_move> jumpMoves;

    queue<pair<int, int>> toVisit;
    set<pair<int, int>> visited;

    toVisit.push({row, col});
    visited.insert({row, col});

    while (!toVisit.empty()) {
        pair<int, int> currPos = toVisit.front();
        toVisit.pop();

        for (pair<int, int> direction : DIRECTIONS) {
            int adjRow = currPos.first + direction.first;
            int adjCol = currPos.second + direction.second;
            if (!isWithinBounds(adjRow, adjCol) ||
                state[adjRow][adjCol] == FieldType::EMPTY) {
                continue;
            }
            int jumpRow = adjRow + direction.first;
            int jumpCol = adjCol + direction.second;

            if (!isWithinBounds(jumpRow, jumpCol) ||
                state[jumpRow][jumpCol] != FieldType::EMPTY) {
                continue;
            }

            if (!visited.contains({jumpRow, jumpCol})) {
                visited.insert({jumpRow, jumpCol});
                toVisit.push({jumpRow, jumpCol});
                piece_move move = {row, col, jumpRow, jumpCol};
                jumpMoves.push_back(move);
            }
        }
    }
    return jumpMoves;
};
```

Metoda ta korzysta z algorytmu BFS z dodatkowymi ograniczeniami, w celu odwiedzenia wszystkich możliwych pól na które można skoczyć. Dla każdego z kierunków, sprawdzane jest czy pole jest zajęte oraz czy pole za nim jest puste. Jeśli tak, to do kolejki dodawane jest to pole, oraz ruch jest zapisywany jako możliwy. Dopóki kolejka nie jest pusta, algorytm kontynuuje przeszukiwanie.

Warto zaznaczyć że ciekawym i naturalnym podejściem do generowanie ruchów jest także podejście rekurencyjne. W tym przypadku, z moich obserwacji wynika, że podejście iteracyjne jest jednak bardziej wydajne oraz bardziej naturalne w kontekście przeszukiwania możliwych ruchów w grze planszowej.

2.1.3 Klasa reprezentująca grę

Klasa która zarządza stanem gry, kolejnością graczy oraz graczami jest klasa *Halma*.

```
class Halma {
public:
    static const FieldType PLAYER_ONE = FieldType::WHITE;
    static const FieldType PLAYER_TWO = FieldType::BLACK;
    Halma(IHalmaPlayer *playerOne = nullptr, IHalmaPlayer *playerTwo = nullptr,
          vector<string> inputLines = {});
    void printBoard() const;
    void switchTurn();
    void makeMove(piece_move move);
    void makeMockMove(piece_move move);
    void undoMockMove(piece_move move);
```

```
    void setPlayerOne(IHalmaPlayer *player);
    void setPlayerTwo(IHalmaPlayer *player);
    bool checkWinner(FieldType playerType);
    void gameFinished();
    Board &getBoard();
    FieldType getCurrentPlayer();
    bool isGameOver;

private:
    const IHalmaPlayer *playerOne;
    const IHalmaPlayer *playerTwo;
    FieldType currentPlayer;
    Board board;
};
```

Klasa ta udostępnia metody do przeprowadzenia oraz symulowania gry. Metody *makeMockMove* oraz *undoMockMove* służą do symulowania ruchów oraz ich cofania. Modyfikują one stan planszy, jednak zawsze zostają wycofane. Pozwala to na przeprowadzanie symulacji ruchów w algorytmach *Minmax* oraz *Alphabeta*, bez konieczności kopiowania planszy, co pozwala na optymalizację zużycia pamięcia oraz (najpradowpodobniej) czasu. Posiada ona wskaźniki do obiektów *IHalmaPlayer* reprezentujące graczy.

2.2 Zbudowanie zbioru heurystyk - 3 różne strategie

2.2.1 Struktura programu

Program gwarantuje klasę czysto wirtualną (abstrakcyjną) *IHalmaPlayer*, która posiada dwie metody *chooseMove*, zwracającą wynik wyszukiwania (ewaluację stanu, ruch oraz liczbe odwiedzonych węzłów). Dodatkowo metoda *setPlayer* pozwala na ustawienie koloru gracza, który następnie przekazywany będzie do algorytmów. Gracze dziedziczą po tej klasie, implementując swoje strategie.

```
class IHalmaPlayer {
public:
    virtual search_result chooseMove(Halma &game) = 0;
    void setPlayer(FieldType player) { this->player = player; }
    FieldType player;
};
```

Kolejny interfejs *IBoardEvaluator* posiada metodę *evaluateBoard*. Za pomocą tego interfejsu realizowane są różne oceny stanu planszy, realizowane następnie przez graczy implementujących interfejs *HalmaPlayer*.

```
class IBoardEvaluator {
public:
    virtual float evaluateBoard(const Board &board, FieldType player) const = 0;
};
```

Metoda przyjmuje referencję do planszy gry oraz kolor gracza, którego pozycja jest ewaluowana.

Ostanim interfejsem używanym do oceny stanu gry jest *IPawnHeuristic*. Pozwala on ocenić odległość pojdeynczego pionka od celu.

```
class IPawnHeuristic {
public:
    virtual float evaluatePawnScore(int row, int col, int goalRow,
                                    int goalCol) const = 0;
};
```

2.2.2 Heurystyki

- **Heurystyka 1** - Odległość Manhattan od celu w obozie przeciwnika
  Pierwsza heurestyka polega na ocenie odległości pionków od celu. W każdej ocenie planszy,

wybierany jest cel pionków. Celem jest pierwsze puste pole w obozie przeciwnika. Ocena jest obliczana następująco: dla każdego pionka obliczana jest odległość Manhattan od celu. Następnie jest ona podnoszona do kwadratu (w celu "zachęty"do opuszczenia obozu). Od ostatecznej oceny odejmowana jest ta odległość (im mniejsza, tym lepiej). Dodatkowo, mocno premiowane są pionki w obozie przeciwnika. W celu zwiększenia różnorodności gry oraz zniwelowania ryzyka zablokowania pionków w cyklu, ocena jest modyfikowana przez losową wartość z przedziału (0, 2).

```
CampDistanceEvaluator::CampDistanceEvaluator(const IPawnHeuristic &pawnHeuristic)
    : pawnHeuristic(pawnHeuristic){};

float CampDistanceEvaluator::evaluateBoard(const Board &board,
                                           FieldType player) const {

    vector<pair<int, int>> goalCamp = board.getPlayerGoalCamp(player);
    vector<pair<int, int>> playerCamp = board.PLAYER_CAMPS.at(player);
    pair<int, int> goalPosition = board.getEmptyGoal(goalCamp);
    vector<pair<int, int>> playerPositions = board.getPlayerPositions(player);
    float evaluation = 0;

    for (const pair<int, int> &position : playerPositions) {
        int row = position.first;
        int col = position.second;
        float penalty = pawnHeuristic.evaluatePawnScore(
            row, col, goalPosition.first, goalPosition.second);
        evaluation -= squareDistancePenalty(penalty);

        bool isInGoalCamp = false;
        for (const auto &goal : goalCamp) {
            if (goal == position) {
                isInGoalCamp = true;
                break;
            }
        }
        if (isInGoalCamp) {
            evaluation += 1000;
        }
        evaluation += dis(gen);
    }

    return evaluation;
};
```

Powyżej znajduje się kod źródłowy klasy *CampDistanceEvaluator*. Pierwsza heurestyka, to po prostu utworzenie jej instancji z odpowiednią heurystyką dla pionków.

```
const IPawnHeuristic &distance = ManhattanDistance();
const IBoardEvaluator &evaluator = CampDistanceEvaluator(distance);
```

- **Heurystyka 2** - Odległość od celu w obozie przeciwnika, z uwzględnieniem odległości od środka planszy
  W tej heurystyce, pod uwagę brana jest zarowno odległość od celu w obozie przeciwnika, jak i odległość od środka planszy. Odległość od środka planszy niest jest tak mocno premiowana jak odległość od celu, jednak nakłania ona pionki do pozostawanie trochę dłużej na środku planszy, co może pozwolić na szybsze przemieszczanie się pionków w przyszłości. Minusem tej strategii, jest fakt, że pionki pozostające na planszy mogą pozwolić także przeciwnikowi na szybsze przemieszczanie się. Kod źródłowy tej heurestyki jest bardzo podobny do poprzedniej, z tą rożnicą, że do ewaluacji każdego pionka odejmowana jest także odległość od środka planszy.

```
float CampAndCenterDistanceEvaluator::evaluateBoard(const Board &board,
                                                    FieldType player) const {
        // Same as CampDistanceEvaluator
        float goalDistance = pawnHeuristic.evaluatePawnScore(
```

```
            row, col, goalPosition.first, goalPosition.second);
        float centerDistance = pawnHeuristic.evaluatePawnScore(
            row, col, board.BOARD_SIZE / 2, board.BOARD_SIZE / 2);

        evaluation -= squareDistancePenalty(goalDistance);
        evaluation -= centerDistance;
        // Same as CampDistanceEvaluator
}
```

Powyżej znajduje się kod źródłowy klasy *CampAndCenterDistanceEvaluator*. Jak widać jest on bardzo podobny do poprzedniej klasy, z tą różnicą, że od wyniku odejmowana jest także odległość pionka od środka planszy,

Podobnie jak dla każdej heurestyki, instancja tej klasy tworzona jest z użyciem funkcji oceniającej dystans. Wygląda to następująco:

```
const IPawnHeuristic &distance = ManhattanDistance();
const IBoardEvaluator &evaluator = CampAndCenterDistanceEvaluator(distance);
```

- **Heurystyka 3** - Uwzględnienie ilości potencjalnych ruchów
  W tej heurystyce, ocena planszy jest obliczana na podstawie ilości potencjalnych możliwych ruchów pionków gracza. Podobnie jak w pierwszej heurestyce liczona jest odległość od celu, następnie dodawana jest liczba możliwych ruchów. Takie podejście premiuje pozycje gwarantujące większą swobodę ruchu.

```
float CampAndCenterDistanceEvaluator::evaluateBoard(const Board &board,
                                                    FieldType player) const {
        // Same as CampDistanceEvaluator
        float goalDistance = pawnHeuristic.evaluatePawnScore(
            row, col, goalPosition.first, goalPosition.second);
        int possiblePieceMoves = board.getPieceMoves(row, col).size();

        evaluation -= squareDistancePenalty(goalDistance);
        evaluation += possiblePieceMoves;
        // Same as CampDistanceEvaluator
}
```

Utworzenie instancji tej klasy wygląda analogicznie do poprzednich heurystyk oceniających stan planszy:

```
const IPawnHeuristic &distance = ManhattanDistance();
const IBoardEvaluator &evaluator = MovePotentialEvaluator(distance);
```

Tak utworzone heurystyki są następnie przekazywane do graczy, którzy wykorzystują je w algorytmach *Minmax* oraz *Alphabeta*. Zostaną one opisane w dalszej części sprazowdania.

2.3 Implementacja metody Minmax z punktu widzenia gracza

2.3.1 Struktura programu

Każda klasa implementująca strategię gracza dziedziczy po klasie *IHalmaPlayer*. Wszystkie klasy implementują metodę *chooseMove*, która jest odpowiedzialna za wybór ruchu na podstaiwe instancji klasy *Halma*. Takie ujednolicenie pozwala na łatwe zmiany strategii gracza, poprzez podmianę obiektu gracza, i umożliwia podpięcie innego rodzaju gracza w przyszłości.

Interfejs reprezentujący gracza prezentuje się następująco:

```
class IHalmaPlayer {
public:
    virtual search_result chooseMove(Halma &game) = 0;
    void setPlayer(FieldType player) { this->player = player; }
    FieldType player;
};
```

Główną metodą jest metoda *chooseMove*, która przyjmuje referencję do obiektu klasy *Halma* oraz zwraca strukturę *search_result*, która zawiera ocenę stanu, ruch oraz liczbę odwiedzonych węzłów.

2.3.2 Klasa MinmaxPlayer

Klasa *MinmaxPlayer* implementuje algorytm *Minmax*. Wykorzystuje ona rekurencyjne przeszukiwanie drzewa gry, w celu znalezienia najlepszego ruchu. W zależności od aktualnego gracza, wybierany jest ruch minimalizujący lub maksymalizujący ocenę stanu planszy. Algorytm ten zakłada, że przeciwnik wybierze ruch minimalizujący ocenę stanu planszy, co w przypadku większości dobrych graczy powinno być bliskie prawdzie. Instancja klasy *MinmaxPlayer* przyjmuje referencję do obiektu implementującego interfejs *IBoardEvaluator*, którego używa do oceny stanu planszy z punktu widzenia gracza oraz głębokość przeszukiwania drzewa gry. Dodatkowo, ważne jest ustawienie gracza korzystając z metody *setPlayer*, dziedziczonej po klasie *IHalmaPlayer*. Gwarantuje to działanie algorytmu z punktu widzenia odpowiedniego gracza.

```
class MinmaxPlayer : public IHalmaPlayer {
public:
    MinmaxPlayer(const IBoardEvaluator &boardEvaluator, int depth = 1);
    search_result chooseMove(Halma &game);

private:
    search_result minmax(Halma &game, int depth, FieldType maximizingPlayer,
                         const IBoardEvaluator &boardEvaluator);

private:
    int depth;
    const IBoardEvaluator &boardEvaluator;
};
```

Impelementacja metody *chooseMove* wygląda następująco:

```
search_result MinmaxPlayer::chooseMove(Halma &game) {
    search_result minmaxResult = minmax(game, depth, player, boardEvaluator);

    return minmaxResult;
}
```

Metoda ta po prostu wywołuję metodę *minmax* z odpowiednimi parametrami.

Metoda *minmax*:

```
search_result MinmaxPlayer::minmax(Halma &game, int depth,
                                   FieldType maximizingPlayer,
                                   const IBoardEvaluator &boardEvaluator) {
    int visitedNodes = 0;
    Board &board = game.getBoard();
    if (depth == 0) {
        return search_result{
            boardEvaluator.evaluateBoard(board, maximizingPlayer),
            piece_move(-1, -1, -1, -1), visitedNodes};
    }

    FieldType currentPlayer = game.getCurrentPlayer();
    bool maximize = currentPlayer == maximizingPlayer;
    float bestEvaluation = maximize ? -numeric_limits<float>::infinity()
                                    : numeric_limits<float>::infinity();
    piece_move bestMove = {-1, -1, -1, -1};
    vector<piece_move> allMoves = board.getPlayerMoves(currentPlayer);

    for (piece_move move : allMoves) {
        game.makeMockMove(move);
        search_result childResult =
            minmax(game, depth - 1, maximizingPlayer, boardEvaluator);
        game.undoMockMove(move);

        float evaluation = childResult.evaluation;
        visitedNodes++;
```

```
        visitedNodes += childResult.visitedNodes;

        if (maximize) {
            if (evaluation > bestEvaluation) {
                bestEvaluation = evaluation;
                bestMove = move;
            }
        } else {
            if (evaluation < bestEvaluation) {
                bestEvaluation = evaluation;
                bestMove = move;
            }
        }
    }
    return search_result{bestEvaluation, bestMove, visitedNodes};
};
```

Metoda ta rekurencyjnie przeszukuje drzewo gry, wybierając najlepszy ruch. W zależności od gracza, wybierany jest ruch maksymalizujący lub minimalizujący. Minimalizacja jest wybierana w zależności od tego czy aktualny gracz (*game.getCurrentPlayer()*) jest równy graczowi przypisanemu do klasy.

Jeśli głębokość przeszukiwania jest równa 0, to zwracana jest ocena stanu planszy wraz z nieprawidłowym ruchem {-1, -1, -1, -1}, który nigdy nie zostanie wykonany oraz liczbą odwiedzonych węzłów. W przeciwnym wypadku, podejmowana jest decyzja o minimalizacji lub maksymalizacji oceny stanu planszy, w zależności od aktualnego gracza. Zabieg ten ma na celu ominięcie narzutu wydajnościowego związanego z tworzeniem kopii planszy. Zamiast tego zmieniany jest aktualny gracz, a ruch jest symulowany za pomocą metod *makeMockMove* oraz *undoMockMove* z klasy *Halma*. Dla każdego z możliwych ruchów wywoływana jest rekurencyjnie metoda *minmax*, która zchodzi niżej w drzewie gry, dopóki nie osiągnie głębokości 0. Ruchy są symulowane, a następnie cofane. W ten sposób algorytm przeszukuje drzewo gry, wybierając najlepszy ruch. Zwracany jest wynik w postaci struktury *search_result*.

2.3.3 Klasa AlphabetaPlayer

Struktura klasy *AlphabetaPlayer* jest bardzo podobna do klasy *MinmaxPlayer*. Plik nagłówkowy wygląda niemalże identycznie. Przechowywana jest referencja do ewaluatora planszy, głębokość przeszukiwania oraz implementacja metody *chooseMove* oraz *alphabeta*.

```
class AlphaBetaPlayer : public IHalmaPlayer {
public:
    AlphaBetaPlayer(const IBoardEvaluator &boardEvaluator, int depth = 1);
    search_result chooseMove(Halma &game);

private:
    search_result alphabeta(Halma &game, int depth, FieldType maximizingPlayer,
                            const IBoardEvaluator &boardEvaluator, float alpha,
                            float beta);

private:
    int depth;
    const IBoardEvaluator &boardEvaluator;
};
```

Implementacja metody *alphabeta* wygląda następująco:

```
search_result
AlphaBetaPlayer::alphabeta(Halma &game, int depth, FieldType maximizingPlayer,
                           const IBoardEvaluator &boardEvaluator,
                           float alpha = -numeric_limits<float>::infinity(),
                           float beta = numeric_limits<float>::infinity()) {
    int visitedNodes = 0;

    Board &board = game.getBoard();
    if (depth == 0 || game.checkWinner(maximizingPlayer)) {
```

```
        return {boardEvaluator.evaluateBoard(board, maximizingPlayer),
                piece_move(-1, -1, -1, -1), visitedNodes};
    }

    FieldType currentPlayer = game.getCurrentPlayer();
    bool maximize = currentPlayer == maximizingPlayer;
    float bestEvaluation = maximize ? -numeric_limits<float>::infinity()
                                    : numeric_limits<float>::infinity();
    piece_move bestMove = {-1, -1, -1, -1};

    vector<piece_move> allMoves = board.getPlayerMoves(currentPlayer);

    for (const piece_move &move : allMoves) {
        game.makeMockMove(move);

        search_result childResult = alphabeta(game, depth - 1, maximizingPlayer,
                                              boardEvaluator, alpha, beta);
        game.undoMockMove(move);
        float evaluation = childResult.evaluation;

        visitedNodes++;
        visitedNodes += childResult.visitedNodes;

        if (maximize) {
            if (evaluation > bestEvaluation) {
                bestEvaluation = evaluation;
                bestMove = move;
            }
            alpha = max(alpha, evaluation);
            if (beta <= alpha) {
                break;
            }
        } else {
            if (evaluation < bestEvaluation) {
                bestEvaluation = evaluation;
                bestMove = move;
            }
            beta = min(beta, evaluation);
            if (beta <= alpha) {
                break;
            }
        }
    }

    return search_result{bestEvaluation, bestMove, visitedNodes};
};
```

Pierwszą różnicą jest dodanie dwóch parametrów typu *float alpha* oraz *beta*. Są to wartości graniczne, które pozwalają na przyspieszenie algorytmu *Alphabeta*. Ich domyślną wartością są odpowiednio $-\infty$ oraz ∞. Algorytm ten działa bardzo podobnie do algorytmu *Minmax*. Różnice są następujące. Po obliczeniu oceny stanu planszy, w przypadku maksymalizacji, wartości *alpha*, czyli wartość najlepszej wartości dla gracza maksymalizującego (czyli największa), jest aktualizowana na największą dotychczas znalezioną. W przypadku minimalizacji, wartość *beta*, jest ustawiana na minimum z dotychczas znalezionych wartości. Dzięki śledzeniu tych wartości algorytm jest w stanie "przyciąć"gałęzie drzewa, które nie mają wpływu na wynik.

2.4 Modyfikacja programu tak, by wykonywał tylko jeden ruch

Kod źródłowy programu został napisany na tyle elastycznie, że modyfikacja ta nie sprawiła problemów. Klasa Halma została rozszerzona o metodę *playTurn*, która wykonuje jeden ruch aktualnego gracza.

```
int Halma::playTurn(bool print) {
    search_result foundMove;
    if (currentPlayer == PLAYER_ONE) {
        search_result foundMove = playerOne->chooseMove(*this);
    } else if (currentPlayer == PLAYER_TWO) {
```

```
6           search_result foundMove = playerTwo->chooseMove(*this);
7       }
8
9       makeMove(foundMove.move);
10      if (print) {
11          printBoard();
12          std::cout << "\n\n";
13      }
14      return foundMove.visitedNodes;
15  }
```

Dzięki takiemu podejści możliwe jest wykonanie tylko jednego ruchu oraz wypisanie planszy na wyjście standardowe, co pozwoliłoby na łatwe rozgrywanie gier pomiędzy dwoma graczami, wczytującymi stan gry ze standardowego wejścia.

3 Napotkane problemy

3.1 Lista problemów

- **Wydajność programu** - Pierwszym napotkanym problemem była wydajność programu. Pierwotna implementacja, napisana w języku *Python* nie pozwalała na przeprowadzenie gry w rozsądnym czasie, nawet na głębokości 3. Pomimo prób optymalizacji i unikania niepotrzebnych kopii, a także prób użycia biblioteki do operacji na tablicach i liczbach *numpy*, kod był bardzo wolny.

  Zaadresowano ten problem poprzez przepisanie programu do języka *C++*. Wykorzystując kompilowaną naturę tego języka oraz tablice statyczne, udało się znacząco przyspieszyć program. Przydatne także okazało się kompilowanie z flagą *-O1*, która pozwala kompilatorowi w sprytny sposób zoptymalizować kod. Pomimo prób debugowania za pomocą *gdb*, niestety nie udasło się skompilować programu z wyższym poziomem optymalizacji. Pomimo tego, program okazał się mniej więcej 30 razy szybszy niż wersja *Python*. Finalnie udało się rozegrać rozgrywkę na głębokości 4 z wykorzystnaiem cięć alpha beta, w czasie około 7 minut.

- **Mała głębokość przeszukiwania** - Pomimo przepisania programu do języka *C++*, dbając o jego wydajność, głębokość algorytmów możliwa do przeszukania w krótkim czasie dalej jest stosunkowo niska.

- **Końcówka gry** - W końcówce gry napotkano kilka problemów:

  - **Pionek został w obozie** - W przypadku gry *Halma*, sytuacja w której jeden pionek zostanie w obozie przeciwnika, może prowadzić do sytuacji, w której żaden z graczy nie jest w stanie zakończyć gry. W celu rozwiązania tego problemu, odległość pionka od celu podnoszona jest do kwadratu, co powoduje, że pionek ma większą "zachętę"do opuszczenia obozu.
  - **Brak możliwości wykrycia wygrywającego ruchu** - Z powodu małej głębokości, w końcówce gry, często algorytm nie jest w stanie wykryć żadnego ruchu prowadzącego do wygranej lub lepszej ewaluacji. W takim wypadku ostatni pionek może pozostać na planszy, i powtarzać 2 ruchy na zmianę. W celu rozwiązania tego problemu, dodano element losowości do ewaluacji ruchów, dzięki czemu algorytm wyrwie się z cyklu (niestety w sposób daleki od optymalnego).

4 Przykładowe działanie

4.1 Czasy działania aplikacji

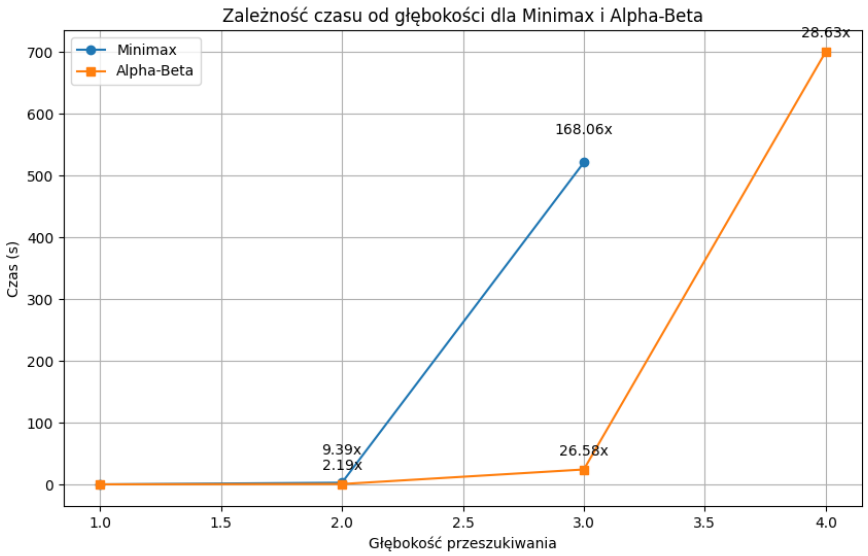
Tabela 1: Czasy wykonania aplikacji

Algorytm	Głębokość	Odwiedzone węzły	Czas wykonania (s)
Minmax	1	32 674	0.33s
Alphabeta	1	32024	0.42s
Minmax	2	5 285 131	3.10s
Alphabeta	2	927 210	0.92s
Minmax	3	784 374 170	521.00s
Alphabeta	3	28 240 682	24.45s
Minmax	4	BRAK	BRAK
Alphabeta	3	189 789 544	700.02s

Powyżej znajduje się tabela porównujaca czas wykonania i liczbę odwiedzonych węzłów dla algorytmów *Minmax* oraz *Alphabeta*. Wszystkie wyniki były przeprowadzone dla tej samej metody ewaluacji planszy.

Ciekawą obserwacją, jest fakt, że przy głębokości 1, algorytm *Minmax* jest szybszy niż *Alphabeta*. Liczba porównań jest mniej więcej taka sama. Jest to spowodowane tym, że przy głębokości 1, ustalona alpha/beta nie jest przekazana do rekurencyjnego wywowałania, i gałąź nie może zostać "obcięta".

Dla pozostałych przypadków, algorytm *Alphabeta* jest znacznie szybszy niż *Minmax*. Liczba porównywanych węzłów jest zauważalnie mniejsza dla algorytmu *Alphabeta*, a różnica staje się bardziej znacząca wraz ze wzrostem głębokości przeszukiwania. Niestety nawet dla algorytmu *Alphabeta*, głębokość 4 to największa jaką udało się przeprocesować w sensownym czasie.



Rysunek 1: Wykres prezentujący wzrost czasu wykonania wraz ze wzrostem głębokości

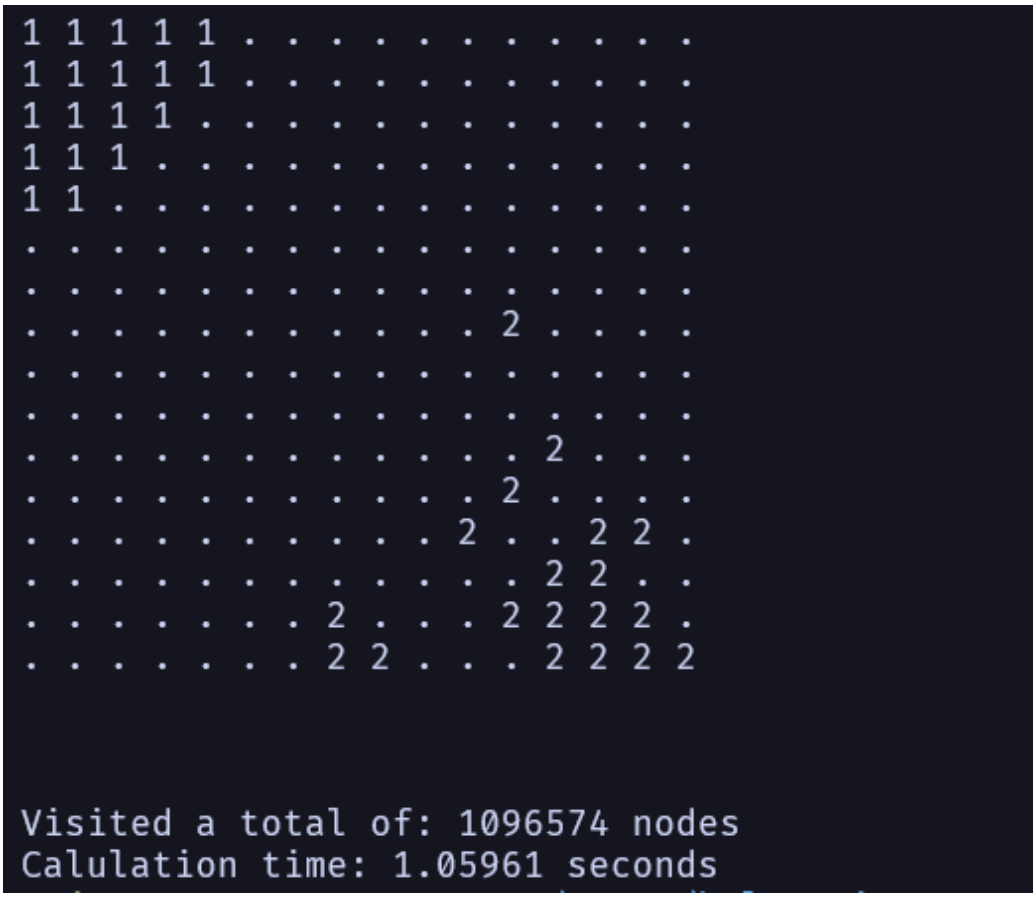
Jak widać na wykresie powyżej, czas wykonywania dla algorymu minmax rósł wykładniczo wraz ze wzrostem głębokości. Już dla głębokosc 3, czas wyszukiwania był 168 razy większy niż

dla głębokości 2. Jeśli chodzi o algorytm *Alphabeta*, to rósł on trochę wolniej, jednak już dla głębokości 3 osiągnął on dużą wartość.

4.2 Przykładowy przebieg gry

Funkcja main zaczynająca gre wygląda następująco:

```
int main() {
    const IPawnHeuristic &distance = ManhattanDistance();
    const IBoardEvaluator &movePotentialEvaluator =
        MovePotentialEvaluator(distance);
    const IBoardEvaluator &campDistanceEvaluator =
        CampDistanceEvaluator(distance);
    AlphaBetaPlayer player1(campDistanceEvaluator, 2);
    AlphaBetaPlayer player2(campDistanceEvaluator, 2);

    try {
        auto start = chrono::high_resolution_clock::now();

        Halma h(&player1, &player2);
        int visited = h.playGame();

        auto end = chrono::high_resolution_clock::now();
        std::chrono::duration<double> elapsed_seconds = end - start;

        std::cout << "\nVisited a total of: " << visited << " nodes";
        std::cout << "\nCalulation time: " << elapsed_seconds.count()
                  << " seconds";

    } catch (const exception &ex) {
        cerr << "An error occurred: " << ex.what() << endl;
    }
}
```



Rysunek 2: Przykładowy wynik gry

Zdjęcie powyżej prezentuje przykładowy wynik gry. Zaprezentowana jest plansza, liczba odwiedzonych węzłów oraz czas wykonania.