



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش ریاضی

هوش مصنوعی - گزارش ۰۴ - پیاده سازی بازی دونفره
با جستجوی تخصصی

پایان نامه

نگارش
آترین حجت

استاد راهنما
نام کامل استاد راهنما

استاد مشاور
نام کامل استاد مشاور

فروردین ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی - را قرار دهید.

نکات مهم:

- نگارش پایان نامه/رساله باید به **زبان فارسی** و بر اساس آخرین نسخه دستورالعمل و راهنمای تدوین پایان نامه های دانشگاه صنعتی امیرکبیر باشد.(دستورالعمل و راهنمای حاضر)
- رنگ جلد پایان نامه/رساله چاپی کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکترا باید به ترتیب مشکی، طوسی و سفید رنگ باشد.
- چاپ و صحافی پایان نامه/رساله بصورت **پشت و رو(دورو)** بلامانع است و انجام آن توصیه می شود.



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: فروردین ۱۴۰۰

اینجانب **آترین حجت** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

آترین حجت

امضا

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	شرح مسئله و روند کار	۱
۱-۱	مقدمه	۲
۲-۱	روش اجرا	۲
۲	پیاده‌سازی رابط کاربری و Engine بازی	۳
۱-۲	Engine	۴
۱-۱-۲	تابع <code>getAvailableMoves</code>	۴
۲-۱-۲	تابع <code>makeMove</code>	۶
۲-۲	رابط کاربری CLI	۱۰
۳-۲	Agent ها	۱۰
۱-۳-۲	Human Agent	۱۱
۲-۳-۲	Minimax Agent	۱۱
۳-۳-۲	رجیستر کردن agent ها	۱۲
۳	پیاده‌سازی الگوریتم Minimax	۱۴
۱-۳	Zobrist Hashing	۱۵
۲-۳	تغییر جدول پس از هر حرکت	۱۶
۳-۳	نگهداری موقعیت‌های دیده شده	۲۱
۴-۳	Alpha-Beta Pruning	۲۱
۵-۳	الگوریتم	۲۲
۶-۳	اتصال به Python	۲۵
۳۱	منابع و مراجع	
۳۲	پیوست	

فهرست اشکال

صفحه

شکل

فهرست جداول

صفحه

جدول

فهرست نمادها

نماد	مفهوم
$n(G)$	تعداد رئوس گراف G
$\deg_G(v)$	درجه‌ی راس v در گراف G
$nei(v)$	همسایه‌های راس v در گراف

فصل اول

شرح مسئله و روند کار

۱-۱ مقدمه

در این گزارش با استفاده از الگوریتم Minimax یک agent برای بازی Othello می‌سازیم. پیاده سازی و کد در [اینجا](#) قابل مشاهده می‌باشد. برای پیاده سازی engine بازی و رابط کاربری از Python و برای پیاده سازی الگوریتم از C++ استفاده شده است.

۲-۱ روش اجرا

برای اجرای برنامه نیاز به Python با حداقل ورژن 3.8 و gcc/g++ با c++17 دارید. برای اجرای برنامه ابتدا نیاز به راه اندازی یک Virtual environment برای Python است. به این منظور در فولدر Report 04/game دستورات زیر را اجرا کنید.

```
cd Report\04\game
```

```
python3 -m venv venv
```

برای activate کردن با توجه به سیستم عامل دستورات [اینجا](#)^۱ را اجرا کنید.

برای نصب پیشنیازها دستورات زیر را اجرا کنید.

```
python3 -m pip install -r requirements.txt
```

برای اضافه کردن ماژول Minimax باید کد c++ الگوریتم به ماژول Python تبدیل شود.

```
cd agent/MiniMaxCompEngine
```

```
python3 setup.py build
```

```
python3 setup.py install
```

```
cd ../../
```

سپس با اجرای فایل test01.py قادر به اجرای برنامه خواهید بود.

```
python3 test01.py
```

^۱ برای جزئیات بیشتر به [اینجا](#) مراجعه کنید

فصل دوم

پیاده‌سازی رابط کاربری و Engine بازی

۱-۲ Engine

کلاس Engine مسئولیت نگهداری موقعیت بازی را بر عهده دارد. اعضای این کلاس شامل boardSize, state, hisotry, availableMoves و توابع makeMove, getAvailableMoves می‌باشد. state یک dict شامل موقعیت کنونی بازی، امتیاز هر بازیکن، آخرین بازی کنی که حرکت کرده و اطلاعات پایان بازی می‌باشد. history یک لیست از موقعیت های گذشته و حرکات انجام شده است.

۱-۱-۲ تابع getAvailableMoves

تابع getAvailableMoves() با حرکت روی تمام خانه‌های خالی، چک می‌کند که اگر بازی کن کنونی این نقطه را انتخاب کند رنگ حداقل یک خانه‌ی همسایه تغییر می‌کند یا نه. سپس لیستی از حرکات ممکن برمیگرداند.

```
def getAvailableMoves(self):
    if self.availableMoves:
        return [tuple(i) for i in self.availableMoves]
    curPlayer =(PLAYERS.BLACK if
                self.state['lastPlayer'] ==PLAYERS.WHITE else PLAYERS.WHITE)
    availableMoves =[]

    for i in range(self.boardSize):
        for j in range(self.boardSize):
            if self.state['board'][i][j] !=PLAYERS.NONE:
                continue
            # Horizontal
            ok =False
            for jp in range(j +1, self.boardSize):
                if self.state['board'][i][jp] ==PLAYERS.NONE:
                    break
                elif self.state['board'][i][jp] ==curPlayer:
                    ok =jp >j +1
                    break
```

```
if ok:
    availableMoves.append((i, j))
    continue
for jp in range(j - 1, -1, -1):
    if self.state['board'][i][jp] == PLAYERS.NONE:
        break
    elif self.state['board'][i][jp] == curPlayer:
        ok = jp < j - 1
        break
if ok:
    availableMoves.append((i, j))
    continue

# Vertical
for ip in range(i + 1, self.boardSize):
    if self.state['board'][ip][j] == PLAYERS.NONE:
        break
    elif self.state['board'][ip][j] == curPlayer:
        ok = ip > i + 1
        break
if ok:
    availableMoves.append((i, j))
    continue
for ip in range(i - 1, -1, -1):
    if self.state['board'][ip][j] == PLAYERS.NONE:
        break
    elif self.state['board'][ip][j] == curPlayer:
        ok = ip < i - 1
        break
if ok:
```

```

        availableMoves.append((i, j))
        continue

    # Diagonal
    for idel in range(-1, 2, 2):
        for jdel in range(-1, 2, 2):
            for k in range(1, self.boardSize):
                if i + idel * k >= self.boardSize or i + idel * k < 0:
                    break
                if j + jdel * k >= self.boardSize or j + jdel * k < 0:
                    break
                ip, jp = i + idel * k, j + jdel * k
                if self.state['board'][ip][jp] == PLAYERS.NONE:
                    break
                elif self.state['board'][ip][jp] == currentPlayer:
                    ok = k > 1
                    break
                if ok: break
            if ok: break
        if ok:
            availableMoves.append((i, j))
            continue

    self.availableMoves = [tuple(i) for i in availableMoves]
    return availableMoves

```

۲-۱-۲ تابع makeMove

تابع makeMove اندیس از خروجی getAvailableMoves دریافت می‌کند و آن حرکت را برای بازی‌کن کنونی انجام می‌دهد. سپس چک می‌کند که آیا بازی به اتمام رسیده و آیا رقیب حرکت مجازی دارد یا نه و اگر حریف حرکت مجازی نداشت نوبت را به همان بازیکن بر می‌گرداند.

```

def makeMove(self, move):
    if self.state['gameEnded']:
        return False

    if move not in self.availableMoves:
        return False

    self.history.append({'move': move, 'board': self.state['board']})
    board = np.copy(self.state['board'])
    self.state['board'] = board
    curPlayer = (PLAYERS.BLACK if
                 self.state['lastPlayer'] == PLAYERS.WHITE else PLAYERS.WHITE)
    self.state['lastPlayer'] = curPlayer

    i, j = move
    board[i][j] = curPlayer
    for jp in range(j + 1, self.boardSize):
        if self.state['board'][i][jp] == PLAYERS.NONE:
            break
        elif self.state['board'][i][jp] == curPlayer:
            for t in range(j + 1, jp):
                self.state['board'][i][t] = curPlayer
            break

    for jp in range(j - 1, -1, -1):
        if self.state['board'][i][jp] == PLAYERS.NONE:
            break
        elif self.state['board'][i][jp] == curPlayer:
            for t in range(j - 1, jp, -1):
                self.state['board'][i][t] = curPlayer
            break

# Vertical

```

```

for ip in range(i + 1, self.boardSize):
    if self.state['board'][ip][j] == PLAYERS.NONE:
        break
    elif self.state['board'][ip][j] == curPlayer:
        for t in range(i + 1, ip):
            self.state['board'][t][j] = curPlayer
        break
for ip in range(i - 1, -1, -1):
    if self.state['board'][ip][j] == PLAYERS.NONE:
        break
    elif self.state['board'][ip][j] == curPlayer:
        for t in range(i - 1, ip, -1):
            self.state['board'][t][j] = curPlayer
    ok = ip < i - 1
    break

# Diagonal
for idel in range(-1, 2, 2):
    for jdel in range(-1, 2, 2):
        for k in range(1, self.boardSize):
            if i + idel * k >= self.boardSize or i + idel * k < 0:
                break
            if j + jdel * k >= self.boardSize or j + jdel * k < 0:
                break
            ip, jp = i + idel * k, j + jdel * k
            if self.state['board'][ip][jp] == PLAYERS.NONE:
                break
            elif self.state['board'][ip][jp] == curPlayer:
                for kp in range(1, k):
                    self.state['board'][i + idel * kp][j + jdel * kp] =
                                                                curPlayer
                break

```



```

self.availableMoves =None
t =self.getAvailableMoves()

ongoing =False
blackScore, whiteScore =0, 0
for ix, iy in np.ndindex((self.boardSize, self.boardSize)):
    if self.state['board'][ix, iy] ==PLAYERS.NONE:
        ongoing =True
    elif self.state['board'][ix, iy] ==PLAYERS.WHITE:
        whiteScore =whiteScore +1
    elif self.state['board'][ix, iy] ==PLAYERS.BLACK:
        blackScore =blackScore +1
self.state['score']['black'], self.state['score']['white'] =
        blackScore, whiteScore
if not ongoing or blackScore ==0 or whiteScore ==0:
    self.state['gameEnded'] =True

if ongoing and len(t) ==0:
    # Skip One Move
    curPlayer =(PLAYERS.BLACK if
        self.state['lastPlayer'] ==PLAYERS.WHITE else PLAYERS.WHITE)

    self.history.append({'move': None, 'board':
        np.copy(self.state['board'])})

    self.state['lastPlayer'] =curPlayer

return True

```

۲-۲ رابط کاربری CLI

برای پیاده‌سازی CLI^۱ از کتابخانه Rich^۲ استفاده شده که مسئولیت نشان دادن جدول و خروجی برنامه است. با اجرای این کد، کاربر ابتدا باید سباز برد و دو agent انتخاب کند. agent ها شامل کاربر و Minimax با عمق‌های متفاوت است. سپس تا زمانی که بازی تمام نشده با توجه به موقعیت engine به یک بازیکن اجازه‌ی حرکت می‌دهد.

۳-۲ Agent ها

هر Agent^۳ یک زیرکلاس AbstractAgent^۴ با دو تابع `__init__(self, color)` و `move(self, engine)` می‌باشد. به فراخوانی تابع `move`، یک اندیس از `engine.getAvailableMoves` باید بازگردانده شود.

```
class AbstractAgent:
    def __init__(self, color):
        self.color = color

    def move(self, engine):
        pass
```

^۱<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/interface/CLI.py>

^۲<https://github.com/willmcgugan/rich>

^۳<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/tree/main/Report%2004/game/agent>

^۴<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/Agent.py>

Human Agent ۱-۳-۲

کلاس Human Agent^۵ در هر حرکت یک prompt به کاربر نشان داده و شماره‌ی حرکت را از کاربر می‌پرسد. حرکت‌های ممکن و شماره‌هایشان در جدول نشان داده می‌شود.

```
from . import Agent
from rich.prompt import IntPrompt
from engine.OthelloEngine import PLAYERS

class HumanAgent(Agent.AbstractAgent):
    def __init__(self, color):
        self.color = color
        self.colorName = "Black" if PLAYERS.BLACK == color else "White"

    def move(self, engine):
        moveNo = IntPrompt.ask(f"{self.colorName} to move")
        return moveNo
```

Minimax Agent ۲-۳-۲

کلاس MiniMaxAgent^۶ در ابتدا رنگ و عمق لازم را دریافت می‌کند. سپس برای هر حرکت موقعیت بازی را به تابع calculateMiniMax از ماژول MiniMax که به زبان C++ نوشته شده، ارسال می‌کند تا بهترین حرکت محاسبه شود. موقعیت بازی باید فرمت int32_t در C++ داشته باشد تا اطلاعات درست parse شوند.

```
from . import Agent
from rich.prompt import IntPrompt
from engine.OthelloEngine import PLAYERS
import numpy as np
```

^۵<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/Human.py>

^۶<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/MiniMax.py>

^۶<https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/MiniMax.py>

```

from numpy.ctypeslib import ndpointer
from MiniMax import calculateMiniMax

class MiniMaxAgent(Agent.AbstractAgent):
    depth = 7

    def __init__(self, color, depth=7):
        self.color = color
        self.colorName = "Black" if PLAYERS.BLACK == color else "White"
        self.depth = depth

    def move(self, engine):
        grid = np.copy(engine.state['board'].astype(np.int32))
        N = engine.boardSize

        result = calculateMiniMax(N, grid, self.color,
                                   self.depth)

        return engine.getAvailableMoves().index(result['move'])

```

۳-۳-۲ رجیستر کردن agentها

در فایل `agent/__init__.py`^۷ یک لیست از Agent های موجود برای صحت‌کام CLI نگه داشته می‌شود. این لیست شامل یک Human Agent و یازده MiniMax Agent با عمق‌های متفاوت می‌باشد.

```

from . import Human, MiniMax

AGENTS =[

```

^۷https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/__init__.py

```

("Human", Human.HumanAgent),
("MiniMax agent(depth 2)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=2)),
("MiniMax agent(depth 3)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=3)),
("MiniMax agent(depth 4)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=4)),
("MiniMax agent(depth 5)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=5)),
("MiniMax agent(depth 6)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=6)),
("MiniMax agent(depth 7)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=7)),
("MiniMax agent(depth 8)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=8)),
("MiniMax agent(depth 9)", lambda col: MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=9)),
("MiniMax agent(depth 10)", lambda col:
    MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=10)),
("MiniMax agent(depth 11 – up to 10 seconds)", lambda col:
    MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=11)),
("MiniMax agent(depth 12 – up to 100 seconds)", lambda col:
    MiniMax.MinimaxAgent(color=col,
    depth=12)),
]

```

فصل سوم

پیاده‌سازی الگوریتم Minimax

به دلیل محدودیت سرعت پایتون، برای پیاده‌سازی الگوریتم MiniMax^۱ از C++ استفاده شد. الگوریتم با Alpha-Beta Pruning و Cutoff پیاده‌سازی شده و از Zobrist Hashing برای پیش‌گیری از محاسبه دوباره استفاده شده.

برای بررسی امتیاز یک موقعیت از اختلاف تعداد مهره‌های هر بازیکن استفاده شده.

۱-۳ Zobrist Hashing

در پیاده‌سازی Zobrist Hashing از این مقاله استفاده شده.

```
unsigned long long int zobristTable[MaxN][MaxN][STATES];
```

```
...
```

```
void generateZobristValues(int N) {  
    for(int i = 0; i < N; i++)  
        for(int j = 0; j < N; j++)  
            for(int s = 0; s < STATES; s++)  
                zobristTable[i][j][s] = randomGenerator();  
}
```

```
unsigned long long int generateHash(const int N, int **grid) {  
    unsigned long long int val = 0;  
    for(int i = 0; i < N; i++)  
        for(int j = 0; j < N; j++)  
            val ^= zobristTable[i][j][grid[i][j]];  
    return val;  
}
```

به‌علاوه با تغییر هر خانه‌ی جدول به شکل زیر می‌توان هش جدید را به‌دست آورد.

^۱https://github.com/atrin-hojjat/Uni-AI-Course-Reports/blob/main/Report%2004/game/agent/MiniMaxCompEng/calc_minimax_eng.cpp

```
newHash ^= zobristTable[ip][jp][prvColor] ^  
           zobristTable[ip][jp][curColor];
```

۲-۳ تغییر جدول پس از هر حرکت

برای بررسی حالت جدول در صورتی که یک حرکت خواص انجام شود، می‌توان هر دفعه کپی جدیدی از جدول درست کرد و به تابع فرستاد. اما در این پیاده‌سازی از آنجایی که حذف Multithreading نداشتیم، در هر مرحله حرکت را روی جدول پیاده کردیم و پس از بررسی آن حالت جدول را به فرم قبلی باز گرداندیم. به این منظور یک پشته^۲ از تغییرات نگه می‌داریم و در حین انجام هر حرکت، تغییرات را به این پشته اضافه می‌کنیم. هر تغییر را به شکل زیر نشان می‌دهیم:

```
struct ChangedSegment {  
    int k, is, js, idir, jdir;  
    unsigned long long int prvHash;  
    int prvColor, curColor;  
};
```

که نشان می‌دهد بازه‌ی $(is + idir, js + jdir)$ تا $(is + k * idir, js + k * jdir)$ از `prvColor` به `curColor` تغییر کرده‌اند. `prvHash` نشان دهنده‌ی هش جدول پیش از شروع تغییرات است. در تابع `makeMove` ابتدا در هر هشت جهت تمام تغییرات ممکن بررسی می‌شود سپس در یک `for` تمام آنها به پشته اضافه و در جدول اعمال می‌شوند.

```
stack<ChangedSegment> moves = stack<ChangedSegment>();  
...
```

```
unsigned long long int makeMove(const int N, int **grid, int player,  
    pair<int, int> selectedMove, unsigned long long int curHash) {  
    int i = selectedMove.first, j = selectedMove.second;
```

²stack


```
if(!~i || !~j || i < 0 || i >= N || j < 0 || j >= N)
    return curHash;
if(grid[i][j] != 0) {
    cout << i << " " << j << endl;
    cout << grid[i][j] << endl;
    cout << "FATAL ERROR WRONG START" << endl;
    exit(-1);
}
vector<ChangedSegment> changes;

changes.push_back({1, i, j, 0, 0, curHash, 0, player});

for(int dir = -1; dir < 2; dir += 2) {
    for(int jp = j + dir; jp > -1 && jp < N; jp += dir) {
        if(grid[i][jp] == 0)
            break;
        if(grid[i][jp] == player) {
            if(abs(jp - j) > 1) {
                ChangedSegment chngd;
                if(jp < j)
                    chngd = {abs(jp - j) - 1, i, j, 0, -1, curHash, 3 ^
                        player, player};
                else
                    chngd = {abs(jp - j) - 1, i, j, 0, 1, curHash, 3 ^
                        player, player};
                changes.push_back(chngd);
            }
        }
    }
}
```

```
        break;
    }
}
for(int ip = i + dir; ip > -1 && ip < N; ip += dir) {
    if(grid[ip][j] == 0)
        break;
    if(grid[ip][j] == player) {
        if(abs(ip - i) > 1) {
            ChangedSegment chngd;
            if(i < ip)
                chngd = {abs(ip - i) - 1, i, j, 1, 0, curHash, 3 ^
                    player, player};
            else
                chngd = {abs(ip - i) - 1, i, j, -1, 0, curHash, 3 ^
                    player, player};
            changes.push_back(chngd);
        }
        break;
    }
}
}
for(int id = -1; id < 2; id += 2)
    for(int jd = -1; jd < 2; jd += 2)
        for(int k = 1; k < N; k++) {
            if(i + id * k < 0 || i + id * k >= N)
                break;
            if(j + jd * k < 0 || j + jd * k >= N)
                break;
```

```
int ip = i + id * k;
int jp = j + jd * k;

if(grid[ip][jp] == 0)
    break;
if(grid[ip][jp] == player) {
    if(k > 1) {
        ChangedSegment chngd = {k - 1, i, j, id, jd, curHash, 3
            ^ player, player};
        changes.push_back(chngd);
    }
    break;
}
}

unsigned long long int newHash = curHash;

for(auto change : changes) {
    moves.push(change);
    // int dist = max(abs(change.ie - change.is), abs(change.je -
    // change.js));
    for(int k = 1; k <= change.k; k++) {
        int ip = change.is + k * change.idir;
        int jp = change.js + k * change.jdir;
        if(ip >= N || ip < 0 || jp >= N || jp < 0) {

            cout << "FATAL ERROR " << change.k << " " << change.is << "
```

```
        " << change.js << " - " << ip << " " << jp << endl;
    exit(-1);
}

newHash ^= zobristTable[ip][jp][change.prvColor] ^
    zobristTable[ip][jp][change.curColor];
grid[ip][jp] = change.curColor;
}
}
return newHash;
}
```

برای باز گرداندن حرکات از تابع undoMove استفاده می‌شود که جدول را به حالتی باز می‌گرداند که هش آن desHash باشد.

```
void undoMoves(const int N, int **grid, int player, unsigned long
    long int desHash) {
    while(moves.size() && moves.top().prvHash == desHash) {
        auto change = moves.top();
        moves.pop();

        // int dist = max(abs(change.ie - change.is), abs(change.je -
            change.js));
        for(int k = 1; k <= change.k; k++) {
            int ip = change.is + k * change.idir;
            int jp = change.js + k * change.jdir;

            grid[ip][jp] = change.prvColor;
        }
    }
```

```
}  
}
```

۳-۳ نگاه‌داری موقعیت‌های دیده شده

برای هر موقعیت دیده شده، بهترین نتیجه‌ی حاصل از آن به همراه عمق بررسی و بهترین حرکت نگاه داشته می‌شود.

```
struct PreCalcData {  
    int value, depth;  
    pair<int, int> bestMove;  
};  
...  
  
map<unsigned long long int, PreCalcData> preCalc[STATES][STATES];
```

پس از بررسی هر موقعیت نتیجه‌ی آن در `preCalc` ذخیره می‌شود و در حین بررسی هر موقعیت، اول چک می‌شود که آیا این موقعیت قبلاً دیده شده یا نه و اگر دیده شده، آیا عمق آن کافی است.

```
if(preCalc[player][curPlayer].find(curHash) !=  
    preCalc[player][curPlayer].end()) {  
    if(preCalc[player][curPlayer][curHash].depth >= remDepth)  
        return preCalc[player][curPlayer][curHash];  
}
```

Alpha-Beta Pruning ۴-۳

برای پیاده‌سازی Alpha-Beta Pruning پس از بررسی هر بچه در یک موقعیت، مقدار آن بچه با بهترین جواب پدر مقایسه شده.

```
if(curPlayer == player) {  
    ...  
    if(~curBestChoice.bestMove.first && val.value >  
        curBestChoice.value) /* alpha-beta pruning */  
        return {val.value, remDepth, mv};  
} else {  
    ...  
    if(~curBestChoice.bestMove.first && val.value <  
        curBestChoice.value) /* alpha-beta pruning */  
        return {val.value, remDepth, mv};  
}
```

۵-۳ الگوریتم

در پیاده‌سازی الگوریتم، ابتدا با hashing Zobrist بررسی می‌کنیم که آیا این موقعیت قبلاً دیده‌شده یا نه. اگر remDepth که مقدار عمق باقی‌مانده است، صفر بود، heuristic موقعیت کنونی را بر می‌گردانیم. سپس از تابع getPossibleMoves لیستی از حرکات ممکن می‌گیریم. در صورتی که هیچ حرکت نداشتیم، اگر مورد پر بود، به موقعیت Terminal رسیده‌ایم، در غیر اینصورت موقعیت مورد را در صورتی که نوبت حریفمان بود محاسبه می‌کنیم. سپس به ازای هر حرکت باقی‌مانده موقعیت مورد در صورت انجام آن حرکت را محاسبه می‌کنیم و بهترین موقعیت را پیدا می‌کنیم.

```
PreCalcData MiniMax(const int N, int **grid, unsigned long long int  
    curHash,  
    int remDepth, int curPlayer, int player, PreCalcData  
        curBestChoice = {0, 0, {-1, -1}}) {  
    if(preCalc[player][curPlayer].find(curHash) !=  
        preCalc[player][curPlayer].end()) {  
        if(preCalc[player][curPlayer][curHash].depth >= remDepth)
```

```

    return preCalc[player][curPlayer][curHash];
}
if(remDepth == 0) {
    return preCalc[player][curPlayer][curHash] = {evaluate(N, grid,
        player), 0, {-1, -1}};
}
auto posmoves = getPossibleMoves(N, grid, player);

if(posmoves.size() == 0) {
    bool boardFull = true;
    for(int i = 0; i < N && boardFull; i++)
        for(int j = 0; j < N; j++)
            if(grid[i][j] == 0) {
                boardFull = false;
                break;
            }

    if(boardFull)
        return preCalc[player][curPlayer][curHash] = {evaluate(N,
            grid, player), inf, {-1, -1}};
    else
        return preCalc[player][curPlayer][curHash] = {MiniMax(N, grid,
            curHash, remDepth - 1,
            curPlayer ^ 3, player).value, remDepth, {-1, -1}};
}

PreCalcData bestAnswer = {(__builtin_popcount(player ^ curPlayer)
    - 1) * inf,

```

```
remDepth, {-1, -1});
```

```
for(auto mv : posmoves) {  
    unsigned long long int newHash = makeMove(N, grid, player, mv,  
        curHash);
```

```
    PreCalcData val;
```

```
    val = MiniMax(N, grid, newHash, remDepth - 1, curPlayer ^ 3,  
        player, bestAnswer);
```

```
    undoMoves(N, grid, curPlayer, curHash);
```

```
    if(curPlayer == player) {  
        if(val.value > bestAnswer.value) {  
            bestAnswer.value = val.value;  
            bestAnswer.bestMove = mv;  
        }  
        if(~curBestChoice.bestMove.first && val.value >  
            curBestChoice.value) /* alpha-beta pruning */  
            return {val.value, remDepth, mv};  
    } else {  
        if(val.value < bestAnswer.value) {  
            bestAnswer.value = val.value;  
            bestAnswer.bestMove = mv;  
        }  
        if(~curBestChoice.bestMove.first && val.value <  
            curBestChoice.value) /* alpha-beta pruning */
```



```
        return {val.value, remDepth, mv};
    }

}

return preCalc[player][curPlayer][curHash] = bestAnswer;
}
```

۳-۶ اتصال به Python

برای اتصال به Python کد را به یک Python extension تبدیل کردیم. اطلاعات بیشتر در پاورقی موجود است.^{۵ ۴ ۳}

به این منظور ابتدا باید با تابع زیر اطلاعات ورودی از Python را به فرمت C++ تبدیل کنیم. این تابع پس از اجرای الگوریتم، جدول نهایی را به جدول ورودی مقایسه می‌کند تا از باز کردانی صحیح همه‌ی حرکات اطمینان حاصل کند.

```
static PyObject* calculateMiniMax(PyObject* self, PyObject* args) {
```

```
    char *argnames[] = {"N", "grid", "player", "max_depth", NULL};
```

```
    int N, player, max_depth;
```

```
    int *gridVal;
```

```
    PyObject *gridArg = NULL;
```

```
    PyObject *gridArr = NULL;
```

```
    if(!PyArg_ParseTuple(args, "i0ii", &N, &gridArg, &player,
```

³<https://docs.python.org/3/extending/extending.html>

⁴<https://docs.python.org/3/extending/building.html>

⁵<https://docs.scipy.org/doc/numpy-1.15.0/reference/c-api.html>

```
&max_depth)) {
    PyErr_SetString(PyExc_TypeError,
                    "Invalid Parameter");
    return NULL;
}

// if(!PyArg_ParseTupleAndKeywords(args, kwds, "", argnames, &N,
//    &grid, &player, &max_depth))
//    return NULL;

// PyArray_FROM_OTF(gridArg, NPY_INT32, NPY_ARRAY_IN_ARRAY);

gridVal = (int*) PyArray_DATA((PyArrayObject*)gridArg);

int **ngrid = new int*[N];
for(int i = 0; i < N; i++)
    ngrid[i] = new int[N];
setup(N);
for(int i = 0; i < STATES; i++)
    for(int j = 0; j < STATES; j++)
        preCalc[i][j] = map<unsigned long long int, PreCalcData>();
moves = stack<ChangedSegment>();
for(int i = 0; i < N; i++)
    for(int j = 0; j < N; j++)
        ngrid[i][j] = gridVal[i * N + j];

// cout << player << " " << max_depth<< endl;
auto res = MiniMax(N, ngrid, generateHash(N, ngrid), max_depth,
```

```
player, player);
```

```
for(int i = 0; i < N; i++)
    for(int j = 0; j < N; j++)
        if(ngrid[i][j] != gridVal[i * N + j]) {
            cout << "FATAL ERROR" << endl;
            cout << "MOVE SEQUECE WASN'T SYMMETRICAL" << endl;
            for(int I = 0; I < N; I++, cout << endl)
                for(int J = 0; J < N; J++)
                    cout << ngrid[I][J] << " ";
            for(int I = 0; I < N; I++, cout << endl)
                for(int J = 0; J < N; J++)
                    cout << gridVal[I * N + J] << " ";
            exit(-1);
        }
```

```
PyObject* ret = PyDict_New();
```

```
PyDict_SetItem(ret, PyUnicode_FromString("value"),
    PyLong_FromLong(res.value));
```

```
PyDict_SetItem(ret, PyUnicode_FromString("depth"),
    PyLong_FromLong(res.depth));
```

```
PyDict_SetItem(ret, PyUnicode_FromString("move"), PyTuple_Pack(2,
    PyLong_FromLong(res.bestMove.first),
    PyLong_FromLong(res.bestMove.second)));
```

```
return ret;
```

```
}
```

سپس باید این تابع را در Python رجیستر کنیم.

```
static PyMethodDef MiniMaxMethods[] = {
    {"calculateMiniMax", calculateMiniMax, METH_VARARGS, "Calculate
        Minimax"},
    {NULL, NULL, 0, NULL}
};

static struct PyModuleDef MiniMaxModule = {
    PyModuleDef_HEAD_INIT,
    "MiniMax", /* name of module */
    NULL, /* module documentation, may be NULL */
    -1, /* size of per-interpreter state of the module,
        or -1 if the module keeps state in global
        variables. */
    MiniMaxMethods
};

PyMODINIT_FUNC
PyInit_MiniMax(void)
{
    return PyModule_Create(&MiniMaxModule);
}

/* This function is for registering python modules */
int main(int argc, char *argv[]) {
    wchar_t *program = Py_DecodeLocale(argv[0], NULL);
```

```
if (program == NULL) {
    fprintf(stderr, "Fatal error: cannot decode argv[0]\n");
    exit(1);
}

/* Add a built-in module, before Py_Initialize */
if (PyImport_AppendInittab("MiniMax", PyInit_MiniMax) == -1) {
    fprintf(stderr, "Error: could not extend in-built modules
        table\n");
    exit(1);
}

/* Pass argv[0] to the Python interpreter */
Py_SetProgramName(program);

/* Initialize the Python interpreter. Required.
   If this step fails, it will be a fatal error. */
Py_Initialize();

PyMem_RawFree(program);
return 0;
}
```

برای کامپایل و نصب از distutils در Python استفاده شده.

```
from distutils.core import setup, Extension
import os
import shutil
import numpy
```

```
os.environ["CC"] = "g++"
os.environ["CXX"] = "g++"

module1 = Extension('MiniMax',
                    sources=['calc_minimax_eng.cpp'],
                    language="c++17",
                    include_dirs=[numpy.get_include()],
                    extra_compile_args=["-std=c++17", "-Wall", "-Wextra"],
                    )

setup(name='MiniMaxCppExtension',
      version='0.1',
      description='Calculates Minimax for othello',
      ext_modules=[module1])
```

منابع و مراجع

پیوست