

Polish

Politechnika Wrocławska
Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Kierunek: **Informatyka algorytmiczna (INA)**

PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA

Bot dla gry w Szachy

Bot for Chess game

Krzysztof Wiśniewski

Opiekun pracy
dr Maciej Gębala, prof. uczelni

Słowa kluczowe: szachy, bot, teoria gier

WROCŁAW, 2025

Streszczenie

Celem pracy było opracowanie silnika szachowego w języku Java. Program ten zaprojektowano tak, aby analizować i oceniać pozycję na szachownicy, a następnie sugerować graczowi najlepszy ruch, uwzględniając jego strategiczne i taktyczne aspekty. Interakcję z programem zaprojektowano dla wiersza poleceń, z wykorzystaniem Uniwersalnego Interfejsu Szachowego. Umożliwiło to łatwą integrację z innymi aplikacjami szachowymi oraz pozwoliło na przeprowadzanie symulacji i analiz działania silnika bez potrzeby aplikowania interfejsu graficznego.

Niniejsza praca inżynierska składa się z trzech części, w których omówiono kolejne etapy pracy nad opracowaniem silnika szachowego. W pierwszej części przedstawiono podstawową wersję programu, która obejmuje generowanie możliwych ruchów zgodnie z zasadami gry w szachy, algorytm wyszukiwania optymalnego ruchu oraz implementację naiwnej heurystyki. W części drugiej opisano ulepszenia algorytmów wyszukiwania i oceny pozycji, mające na celu zwiększenie efektywności i precyzji silnika. Ostatnią część pracy poświęcono zagadnieniom związanym z testowaniem siły programu. Przeprowadzono analizę wydajności w odniesieniu do różnych jego wersji oraz innych silników, uwzględniając testy porównawcze oraz metodologię oceny skuteczności.

Efektom prac jest silnik, którego ranking szachowy można szacować na zakres pomiędzy 1600 a 1700 ELO, co plasuje go na poziomie porównywalnym z graczem posiadającym II kategorię szachową.

Słowa kluczowe: szachy, bot, teoria gier

Abstract

The aim of this thesis is to develop a chess engine in Java. This program is designed to analyze and evaluate position on the chessboard and subsequently suggest the best move for the player, considering its both strategic and tactical aspects. Interaction with the program is conducted via the command line, using the Universal Chess Interface. This allows for easy integration with other chess applications and facilitates the simulation and analysis of the engine's performance without the need to create graphical interface.

This engineering thesis consists of three parts, which discuss the successive stages of developing the chess engine. The first part presents the basic version of the program, which includes generating possible moves according to the rules of chess, the algorithm for searching for the optimal move, and the implementation of a naive heuristic. The second part describes the improvements to the search and position evaluation algorithms, aiming to increase the efficiency and precision of the engine. The final part of the thesis is dedicated to issues related with testing the engine's strength. An analysis of performance was conducted with respect to various versions of the program and other engines, including comparative tests and methodology for assessing effectiveness.

The result of the work is an engine, whose chess ranking can be estimated in the range between 1600 and 1700 ELO, which places it at a level comparable to a player with the Polish title of 2nd Category.

Keywords: chess, bot, game theory

Spis treści

1. Wstęp	9
1.1. Wprowadzenie	9
1.2. Cel i zakres	10
1.3. Układ pracy	10
2. Implementacja silnika szachowego	11
2.1. Komunikacja z systemem	11
2.1.1. Notacja Forsyth-Edwardsa	11
2.1.2. Szachowa Notacja Algebraiczna	12
2.1.3. Uniwersalny Interfejs Szachowy	12
2.2. Reprezentacja pozycji	12
2.2.1. Reprezentacja szachownicy	12
2.2.2. Reprezentacja stanu	13
2.2.3. Reprezentacja ruchu	14
2.3. Generowanie ruchów	15
2.3.1. Operacje na mapach bitowych	15
2.3.2. Hyperbola Quintessence	16
2.3.3. Ruchy specjalne	16
2.3.4. Generowanie ruchów legalnych	16
2.4. Ocena heurystyczna	17
2.5. Algorytm wyszukiwania	18
2.5.1. Algorytm minimalizowania maksymalnych strat	18
2.5.2. Zarządzanie czasem	19
3. Ulepszenia dla silnika szachowego	20
3.1. Ulepszenia dla wyszukiwania	20
3.1.1. Biblioteka otwarć	20
3.1.2. Alfa-Beta cięcie	21
3.1.3. Ewaluacja cichych stanów	22
3.1.4. Statyczne sortowanie ruchów	23
3.1.5. Tabela transpozycji	23
3.1.6. Okno estymacji	24
3.1.7. Rozszerzanie wyszukiwania	24
3.2. Ulepszenia dla oceny heurystycznej	26
3.2.1. Tablice figur	26
3.2.2. Ochrona króla	26
3.2.3. Struktura pionów	27
3.2.4. Moment gry	27
3.2.5. Mobilność	28
4. Ocena siły silnika	29
4.1. Porównanie wersji silnika	29

4.1.1. Ustalona liczba rozgrywek	29
4.1.2. Sequential Probability Ratio Test	30
4.2. Porównanie z innymi silnikami	31
4.2.1. Metodologia badawcza	31
4.2.2. Omówienie wyników	31
5. Zakończenie	32
5.1. Możliwości dalszego rozwoju silnika	32
5.2. Podsumowanie otrzymanych wyników	32
Bibliografia	33
A. Instrukcja wdrożenia	34
A.1. Rozgrywka na platformie Lichess	34
A.2. Kompilacja kodu i połączenie z GUI	34
B. Protokół UCI	35
B.1. Wykorzystane komendy	35
B.2. Przykład użycia	36
C. Wyniki Perft	37

Spis rysunków

2.1. Przykładowe pozycje szachowe: a) startowa, b) po paru ruchach	11
2.2. Kodowanie ruchu szachowego	14
3.1. Przykładowe tablice ciepłne bierok: a) białych pionów, b) czarnych skoczków . . .	26
4.1. Wyniki rozgrywek pomiędzy wersjami silnika	30
4.2. Ranking na platformie lichess	31

Spis tabel

3.1. Teoretyczny limit alfa-beta cięcia dla współczynnika rozgałęzienia $b_f = 35$	21
B.1. UCI - komunikacja GUI do silnika	35
B.2. UCI - komunikacja silnika do GUI	35
B.3. Przykład użycia UCI	36

Spis listingów

2.1. Metoda dodająca ruchy z maski wraz z przykładowym wywołaniem	15
2.2. Implementacja algorytmu negaMax	19
3.1. Implementacja algorytmu Quiescence Search	22

Skróty

UCI (ang. *Universal Chess Interface*) Uniwersalny Interfejs Szachowy

FEN (ang. *Forsyth–Edwards Notation*) Notacja Forsytha-Edwardsa

LAN (ang. *Long Algebraic Notation*) Pełna Algebraiczna Notacja Szachowa

FIDE (fr. *Fédération Internationale des Échecs*) Międzynarodowa Federacja Szachowa

Perft (ang. *Performance Test*) Test Wydajności

SPRT (ang. *Sequential Probability Ratio Test*) Sekwencyjnych Testów Probabilistycznych

MVV-LVA (ang. *Most Valuable Victim – Least Valuable Attacker*) Najbardziej Wartościowa
Ofiara – Najmniej Wartościowy Atakujący

Rozdział 1

Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Szachy, powszechnie nazywane grą królewską, są jedną z najstarszych, a zarazem najpopularniejszych form intelektualnej rozrywki w dziejach ludzkości. Swoją niekwestionowaną reputację, tak wśród profesjonalistów, jak i amatorów, zawdzięczają połączeniu prostoty zasad ze złożonością strategicznych wyzwań. Ich historia, sięgająca VI wieku p.n.e., obejmuje stale ponawiane próby udoskonalania reguł i odkrywania nowych, coraz bardziej zaawansowanych, taktyk mających zagwarantować zwycięstwo nad oponentem. Wprowadzenie roszady, czy ruchu en-passant to najbardziej spektakularne przykłady zmian, świadczących o nieograniczonej kreatywności kolejnych pokoleń graczy.

Jednak największą zmianę w swojej ponad dwu i pół tysiącletniej historii, szachy zawdzięczają postępowi technologicznemu w połowie XX wieku. Rozwój zaawansowanych maszyn liczących otworzył możliwość zautomatyzowania procesu analizy partii szachowych na niespotykaną dotąd skalę.

Za pioniera w tej dziedzinie uważa się amerykańskiego matematyka Claude Shannona, który w roku 1950 opublikował pracę o teoretycznych aspektach programowania silników szachowych, opartych o ocenę heurystyczną oraz algorytm min-max. Istotny wkład w rozwój szachowej sztucznej inteligencji miał także ojciec informatyki – Alan Turing, który rok po publikacji pracy Shannona zaprojektował pierwszy program komputerowy, w pełni zdolny do rozegrania partii szachowej. Ograniczenia techniczne tamtych czasów nie pozwoliły jednak na przetestowanie programu na maszynie. Rozegrano niewielką liczbę partii szachowych, w których każdy ruch był obliczany analogowo.

Najstarszy program uruchomiony na komputerze, który pozwalał na przeprowadzenie pełnej rozgrywki, powstał w 1958 roku. Od tamtego momentu wiele silników szachowych biło rekordy swoich poprzedników. Do kluczowego przełomu doszło zimą 1997 roku, kiedy to silnik szachowy DeepBlue wygrał pojedynek $3\frac{1}{2} - 2\frac{1}{2}$ z ówczesnym mistrzem świata, Garrym Kasparovem.

Po tym wydarzeniu świat wkroczył w erę super silników. Szachy stały się nie tylko areną dla ludzkiego intelektu, ale także polem testowym zaawansowanych technologii. Współcześnie, wykorzystanie komputerów stanowi nieodłączny element analizy partii szachowych. Zastosowanie najnowocześniejszych rozwiązań, takich jak uczenie maszynowe i sieci neuronowe, zrewolucjonizowało sposób, w jaki rozumiemy tę grę, oraz pokazało, jak wiele jeszcze można w tej dziedzinie osiągnąć.

1.2. Cel i zakres

Zasadniczym celem pracy było stworzenie silnika szachowego, zdolnego do oceny heurystycznej pozycji, oraz proponowania graczowi ruchów z uwzględnieniem ich strategicznych aspektów.

Zakres pracy objął następujące zagadnienia:

- Przegląd literatury na temat technik oraz algorytmów wykorzystywanych przy tworzeniu nowoczesnych silników szachowych.
- Zapoznanie się z powszechnie obowiązującymi zasadami turniejowej gry w szachy, opublikowanymi przez Międzynarodową Federację Szachową.
- Stworzenie silnika szachowego w języku programowania Java 22, z celowym pominięciem dodatkowych rozwiązań open-source.
- Wykorzystanie Uniwersalnego Interfejsu Szachowego do komunikacji z systemem.
- Zintegrowanie silnika z wybranym interfejsem graficznym.
- Testowanie poprawności stworzonego oprogramowania.
- Implementacja rozwiązań programistycznych przyspieszających przeszukiwanie drzewa decyzyjnego oraz ulepszających dokładność oceny heurystycznej.
- Przeprowadzenie analizy porównawczej pomiędzy wersjami systemu w celu oceny efektywności zastosowanych rozwiązań.
- Porównanie najlepszej wersji silnika z już istniejącymi rozwiązaniami w celu określenia poziomu gry.

1.3. Układ pracy

Niniejsza praca inżynierska składa się z trzech głównych części.

W pierwszej z nich opisano elementy oprogramowania konieczne do stworzenia podstawowej wersji silnika szachowego. Przedstawiono metody komunikacji z interfejsem, techniki reprezentacji pozycji i generowania dostępnych ruchów, algorytm minimalizowania start i maksymalizowania zysków wraz z oceną heurystyczną oraz metodologię zarządzania czasem gry. Przetestowano aplikację w celu sprawdzenia poprawności działania.

Następny rozdział poświęcono pracy nad ulepszeniem systemu. Przedstawiono zaimplementowane rozwiązania mające na celu poprawę poziomu gry systemu. Skupiono się na dwóch kierunkach: poprawie prędkości przeszukiwania stanów oraz na udoskonaleniu precyzji heurystycznej oceny pozycji. Jako że dla słabych silników o wiele większe znaczenie w poprawie poziomu jego gry ma pierwszy z tych aspektów, omówiono go najpierw. [14] Z uwagi na mnogość opisanych w literaturze możliwych rozwiązań danego problemu algorytmicznego, w niektórych miejscach przedstawiono także techniki, które ostatecznie nie zostały zaimplementowane w silniku, a także wytłumaczono, czym kierował się autor przy wyborze danego rozwiązania.

Ostatnią część pracy poświęcono testom wydajnościowym oraz jakościowym. Przetestowano program pomiędzy różnymi jego wersjami. Przedstawiono wyniki gry systemu przeciwko innemu, publicznie dostępnemu silnikowi. Na końcu podsumowano rozgrywki przeprowadzone z graczami. W dodatku do pracy zamieszczono instrukcję wdrożenia aplikacji w celu odpalenia silnika we własnym środowisku.

Choć autor zakłada, że czytelnik zna zasady gry w szachy, w pracy zawarto także omówienie niektórych, bardziej skomplikowanych bądź mniej znanych, jej aspektów. Wiele z opisanych rozwiązań algorytmicznych można znaleźć jedynie w literaturze anglojęzycznej. W miejscach, gdzie tłumaczenie uznano za niewystarczające, podano także oryginalne nazewnictwo.

Rozdział 2

Implementacja silnika szachowego

2.1. Komunikacja z systemem

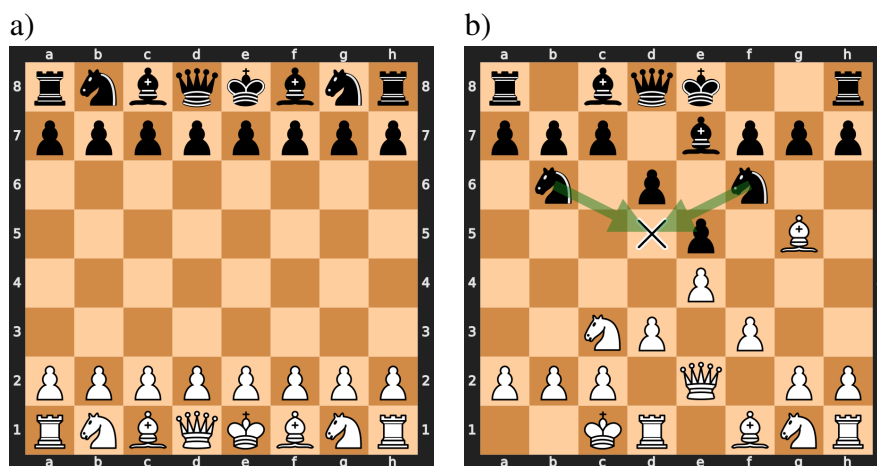
2.1.1. Notacja Forsytha-Edwardsa

W 1950 roku amerykański matematyk Claude Shannon na łamach "Philosophical Magazine" opublikował pracę naukową zatytułowaną "Programowanie komputera do gry w szachy". [13] Stała się ona teoretyczną podstawą dla dalszego rozwoju silników szachowych. Zawarte w niej zostało między innymi oszacowanie, co do ilości możliwych pozycji szachowych, wynoszące 10^{43} . Oznacza to, że liczba legalnych ułożeń planszy o rzędy wielkości przewyższa liczbę gwiazd w widzialnym wszechświecie.

Aby umożliwić użytkownikowi efektywne wprowadzenie danych oraz komunikację z programem, należało w pierwszej kolejności sprecyzować format, w jakim zostaną dostarczone informacje dotyczące aktualnej pozycji. Standardem, wykorzystywanym nie tylko w większości silników, ale także w pojedynkach rozgrywanych online, jest Notacja Forsytha-Edwardsa (ang. *Forsyth-Edwards Notation*, w skrócie FEN).

Notacja FEN jest sześciopolową linią znaków ASCII, która pozwala na precyzyjne określenie aktualnego stanu gry. Wielkimi literami kodowane są bierki białe, małymi natomiast bierki czarne. Każda z nich opisana jest skrótem pochodzącym od ich angielskich nazw.

Pełna specyfikacja FEN dostępna jest w dokumentacji "Portable Game Notation". [6]



Rys. 2.1: Przykładowe pozycje szachowe: a) startowa, b) po paru ruchach

2.1 a) rnbqkbnr/pppppppp/8/8/8/8/PPPPPPPP/RNBQKBNR w KQkq - 0 1

2.1 b) r1bqk2r/ppp1bppp/1n1p1n2/4p1B1/4P3/2NP1P2/PPP1Q1PP/2KR1BNR b kq - 7 7

2.1.2. Szachowa Notacja Algebraiczna

Kluczowym aspektem, z perspektywy komunikacji z systemem, jest także określenie formatu zapisu ruchów. W aplikacji wykorzystano Szachową Notację Algebraiczną.

Notacja ta, w swojej krótkiej formie, jest powszechnie stosowana w literaturze oraz podczas oficjalnych zawodów. Zawiera informacje o rodzaju ruszanej bierki oraz o jej polu docelowym. Zapis ten z punktu widzenia komputerów zawiera jednak wadę. W sytuacji, w której dwie bierki tego samego rodzaju mogą poruszyć się na jedno pole, występuje dwuznaczność zapisu 2.1. Choć w takiej sytuacji dodaje się do ruchu kolumnę bądź wiersz startowy różniący obie bierki, jest to rozwiązanie wymagające implementacji dodatkowej logiki, oraz wiedzy o stanie całej planszy.

Znacznie bardziej intuicyjne dla komputerów jest zastosowanie długiej wersji szachowej notacji algebraicznej. Zawarte są w niej informacje o polu startowym oraz polu docelowym ruchu, usuwając tym samym ryzyko dwuznaczności. Roszady oznaczano przez pola ruchu króla, natomiast do ruchów z promocją dopisano literę określającą rodzaj podmienionej figury.

2.1.3. Uniwersalny Interfejs Szachowy

Uniwersalny Interfejs Szachowy (ang. *Universal Chess Interface*, w skrócie UCI) [8] jest ustandaryzowanym protokołem tekstowym, służącym do wymiany informacji pomiędzy różnymi programami szachowymi. Jego implementacja pozwoliła na komunikację silnika szachowego z wybranymi interfejsami graficznymi oraz środowiskami testowymi.

UCI jest protokołem rozbudowanym, pozwalającym między innymi na rozgrywki innych wersji szachów niż europejskie, dla przykładu Chess960. W silniku zaimplementowano jedynie te z komend, które konieczne były do rozegrania podstawowej partii mierzonej czasowo.

Metodę połączenia z dowolnym programem obsługującym UCI przedstawiono w dodatku A. Opisy komend oraz przykład wymiany informacji pomiędzy aplikacją a GUI zaprezentowano w dodatku B.

2.2. Reprezentacja pozycji

2.2.1. Reprezentacja szachownicy

Struktury danych, wybrane do reprezentacji szachownicy, w dużym stopniu determinują implementację funkcji generowania dostępnych ruchów, a co za tym idzie, bezpośrednio wpływają na wydajność całego silnika. Z tego względu ich dobór musiał zostać odpowiednio zaplanowany, uwzględniając ogół architektury programu. Po zapoznaniu się z proponowanymi w literaturze rozwiązaniami, w projekcie zdecydowano się zastosować dwie redundantne techniki reprezentacji 64 pól szachowych.

Obie charakteryzują się odmiennymi właściwościami, znajdując zastosowanie dla innych algorytmów wewnątrz programu. Różnią się one pod względem gęstości zawartych informacji, szybkości dostępu do danych oraz łatwości modyfikacji. Jedna z nich skupia się na każdym z pól szachownicy (ang. *Square Centric*), druga natomiast bierze pod uwagę położenie konkretnych rodzajów bierek (ang. *Piece Centric*).

Przy procesie implementacji omawianego fragmentu należało zachować szczególną ostrożność, aby ciągłe aktualizowanie dwóch niezależnych struktur danych nie doprowadziło do ich rozspójnienia, a co za tym idzie wprowadzenia trudnych do zdebugowania błędów. Ryzyko ich pojawienia zostało zminimalizowane dzięki wprowadzeniu testów jednostkowych regularnie kontrolujących poprawność operacji podczas enumeracji drzewa gry.

Tablica pól szachowych

Naturalnym podejściem do reprezentacji szachownicy wydało się zastosowanie 64 elementowej tablicy, w której każde pole odpowiada konkretnemu miejscu na planszy. W tej implementacji poszczególne bierki zostały zakodowane liczbami od 1 do 6, natomiast cyfry 0 i 8 odpowiednio reprezentują biały oraz czarny kolor. W ten sposób, za pomocą pojedynczych bajtów, można określić zarówno typ figury, jak i jej kolor na danym polu.

Taka struktura danych jest szczególnie użyteczna, gdy konieczna jest szybka odpowiedź na pytanie, czy na danym kwadracie znajduje się figura, a jeśli tak, to jaka. Dzięki prostemu indeksowaniu tablicy dostęp do informacji o stanie pojedynczego pola jest bardzo efektywny.

Wada tej techniki objawia się w momencie, gdy wymagane jest odnalezienie wszystkich pól zawierających konkretny typ figury. W takim przypadku konieczna staje się iteracja całej tablicy, w celu zidentyfikowania odpowiednich miejsc. Operacja ta, szczególnie przy wielokrotnym wywołaniu, może znacząco obniżyć wydajność implementowanego algorytmu.

Tablice bitowe bierek

W celu zaadresowania powyższych spowolnień zastosowana została technika reprezentacji szachownicy za pomocą tablic bitowych, powszechnie znanych w środowisku programistów szachowych jako ang. *Bitboards*. Informacja o położeniu konkretnego typu bierki na planszy przechowywana jest w postaci tablicy liczb o rozmiarze 8 bajtów.

Implementacja ta wykorzystuje kodowanie 64 polowej tablicy szachowej w 64 pojedynczych bitach zmiennej. Oznaczając figurę na danym polu za pomocą jedynki, a pozostałe pola jako zera, można w prosty sposób zawrzeć informacje o planszy w dwunastu pojedynczych słowach. Pozycje bierek nie są natomiast jedyną informacją, którą można zakodować w tablicach bitowych. Upřednio policzone maski możliwych ruchów czy atakowanych pól, to tylko niektóre z możliwych zastosowań, które na późniejszych etapach implementacji znacznie przyspieszały obliczenia.

Powszechne użycie 64-bitowej architektury sprawiło, że operacje na danych takiej wielkości są bardzo efektywne, gdyż nie wymagają rozbicia instrukcji na mniejsze części. Dodatkowym atutem jest także szybkość manipulacji danymi przez operatory bitowe takie jak negacja, koniunkcja, alternatywa wykluczająca czy przesunięcie bitowe. Z reguły, a w szczególności na starszych procesorach, operacje bitowe są szybsze, niż ich odpowiedniki w postaci operacji arytmetycznych.

2.2.2. Reprezentacja stanu

Reprezentacja stanu zawiera resztę informacji koniecznych do przedstawienia pozycji. Znajduje się w niej logika dotycząca możliwych roszadach, pola en-passant, czy liczby posunięć od ostatniego bicia. Stan gry posiada również wiedzę o ruchu, który do danej pozycji doprowadził, aby ułatwić jego cofanie przez inne komponenty systemu. W tej klasie zawarto także strukturę HashMap z informacjami, jak często dana pozycja wystąpiła już w grze.

Pozwoliło to na wykrywanie wielokrotnego powtórzenia pozycji, które niekoniecznie następują bezpośrednio po sobie. Choć według oficjalnych zasad automatyczny remis następuje dopiero po pięciokrotnym powtórzeniu, większość platform do rozgrywek online uznaje trzykrotne powtórzenie za obligatoryjny remis. Taka też wersja została zaimplementowana.

Reguła remisu dyktowanego pięćdziesięcioma ruchami bez bicia lub ruchu pionem nie została zaimplementowana. Ze statystyk wynikało, że takie sytuacje zdarzały się niezwykle rzadko, a gdy się pojawiały, pozycje obydwu graczy można było uznać za równą. Remis w takiej sytuacji uznano za korzystny dla obydwu graczy.

Haszowanie Zobrist

Struktura HashMap zawierająca informacje o wcześniejszych pozycjach w grze w pierwotnej wersji została zaimplementowana z kluczami reprezentującymi pozycję FEN. Z perspektywy czasu stało się jasnym natomiast, że każdorazowe generowanie klucza w postaci zmiennej typu String było niezmiernie kosztowne.

Postanowiono zatem jako klucz użyć wartości zwracanej przez haszowanie Zobrist, które posiada parę cech znacząco przyspieszających cały proces. Polega ono na przypisaniu kolorowi czarnemu oraz każdej figurze na każdym polu planszy losowej liczby typu long. Korzystając ze standardowego generatora liczb pseudolosowych, dostępnego w języku Java, otrzymano 769 liczb.

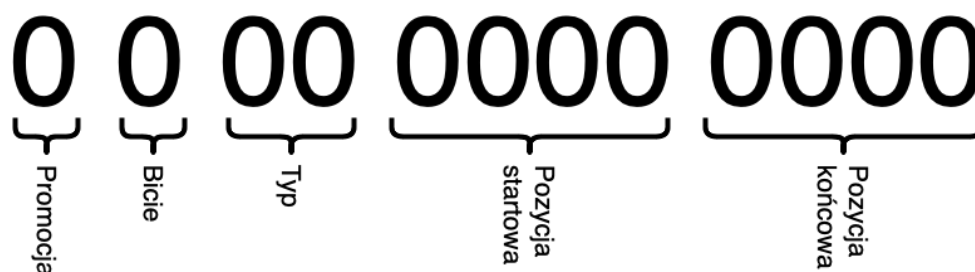
Wartość haszowania dla danej pozycji obliczona została jako alternatywa wykluczająca wszystkich wartości dla figur na planszy oraz koloru aktualnego gracza. Rozwiązanie to byłoby równie złożone, gdyby nie fakt, że wartością odwrotną dla XOR jest ona sama. W trakcie gry nie jest konieczne ponowne obliczanie wartości haszowania dla całej planszy, a jedynie zamiana wartości dla figury dodawanej i usuwanej.

Niestety, zaimplementowany algorytm jest funkcją nieiniekcyjną. Liczba możliwych pozycji w szachach znacząco przewyższa liczbę dostępnych wartości haszowania. Z tego względu istnieje ryzyko kolizji, którego nie da rady się pozbyć. Jest ono natomiast na tyle małe, że zysk czasowy znacząco przewyższa możliwe komplikacje z nim związane. W celu otrzymania większej powtarzalności wyników zdecydowano się na zastosowanie tego samego ziarna (ang. *seed*) dla generatora liczb pseudolosowych. Przeprowadzono testy jednostkowe, gdzie dla różnych pozycji na planszy przechodzono przez drzewo gry, a następnie sprawdzano, czy wartości haszowania powtórzą się dla różnych pozycji. Kolizji nie zaobserwowano. Powyższe rozwiązanie zostało także wykorzystane w dalszych etapach pracy, przy implementacji tabeli transpozycji.

2.2.3. Reprezentacja ruchu

Podobnie jak przy długiej notacji szachowej, informacjami wystarczającymi do zakodowania ruchu, jest jego pole startowe, pole docelowe, oraz w niektórych przypadkach typ promocji. Ruch szachowy jest jednak podstawową strukturą danych, na której silnik musi operować.

Z tego względu słusznym wydało się zastosowanie bardziej deskryptywnej reprezentacji, aby obliczenia wykonywane były przy inicjalizacji zmiennej, unikając ich powielania na późniejszym etapie wyszukiwania i oceny pozycji. Zawarto także informacje o tym, czy ruch jest roszadą, czy może podwójnym ruchem pionka, czy może jest biciem klasycznym, bądź en-passant. Okazało to się szczególnie przydatne przy sortowaniu ruchów.



Rys. 2.2: Kodowanie ruchu szachowego

2.3. Generowanie ruchów

Generowanie możliwych ruchów w danej pozycji jest jednym z podstawowych, ale także kluczowych elementów każdego silnika szachowego. Jego efektywna implementacja to taka, w której silnik spędza jak najmniej czasu, pozostawiając możliwości obliczeniowe na przeszukiwanie drzewa decyzyjnego.

Podstawowym rozróżnieniem stosowanych rozwiązań jest podział na generowanie ruchów pseudolegalnych oraz ruchów legalnych. [2] Ruch pseudolegalny to taki, który nie narusza zasad ruchów poszczególnych bierok, natomiast istnieje ryzyko, że po jego wykonaniu własny król znajdzie się w szachu. Takie rozwiązanie jest możliwe do zastosowania, z uwagi na pozostawienie odpowiedzialności za sprawdzenie legalności ruchu funkcji, która ten ruch wykonuje. Główną zaletą tej metody jest znacznie łatwiejsza implementacja.

Kolejnym aspektem wartym zaznaczenia, jest wydzielenie oddzielnego generatora dla ruchów zbijających. Z perspektywy dalszej implementacji znacznie ułatwiło to rozwój silnika o ewaluację stanów cichych oraz sortowanie ruchów, o czym wspomniano w następnym rozdziale.

2.3.1. Operacje na mapach bitowych

Jak już wcześniej wspomniano, iteracyjne generowanie ruchów każdej z bierok z osobna mogłoby okazać się zbyt czasochłonne. Z tego względu większość dostępnych posunięć tworzona jest dzięki przekształcaniu map bitowych reprezentujących konkretny typ figury. Optymalizacja przynosi szczególny efekt przy generowaniu ruchów pionów, ze względu na ich znaczną ilość przez większość czasu gry.

Pion ma do dyspozycji parę możliwych ruchów, które należało zaimplementować: ruch o jedno pole do przodu, ruch o dwa pola do przodu, bicie w lewo i bicie w prawo.

Maski dla każdego z tych ruchów zostały wygenerowane w oddzielnej metodzie. Przykładowo, dla ruchu o dwa pola do przodu wzór wygląda następująco:

$moves = empty$	pole docelowe musi być puste
$moves = moves \wedge (pionki_w \ll 16)$	biały pion musi być dwa wiersze niżej
$moves = moves \wedge (empty \ll 8)$	wiersz niżej musi być pusty
$moves = moves \wedge rank4$	pole docelowe musi być w czwartym wierszu

W taki sposób stworzono maskę bitową końcowych pól, na które piony mogą się przesuwać, skacząc o dwa pola. Na otrzymanym wyniku należy przeprowadzić serializację, to jest przekształcić go na listę dostępnych ruchów. Aby nie iterować przez wszystkie 64 bity, zastosowano technikę zwaną Bit Scan, która zwraca indeks najbardziej istotnego bitu na masce, dodaje ruch do listy, a następnie usuwa ten bit z maski. Operacja jest wykonywana do momentu, aż maska pozostanie pusta.

Listing 2.1: Metoda dodająca ruchy z maski wraz z przykładowym wywołaniem

```
void addMovesFromMask(long movesMask, byte moveType, byte offset) {
    while(movesMask != 0L) {
        index = (64 - Long.numberOfLeadingZeros(movesMask));
        possibleMoves.add(new Move(index+offset, index, moveType));
        movesMask &= ~(1L << (index - 1));
    }
}

addMovesFromMask(allDoublePushMask, DOUBLE_PAWN_PUSH, -16);
```

Legalne ruchy króla i skoczka generowane są w sposób analogiczny, z tą jednak różnicą, że maski dostępnych ruchów tworzone są nie przez przesunięcia bitowe, ale przy inicjalizacji silnika generowana jest tablica dla każdego z pól startowych.

2.3.2. Hyperbola Quintessence

Generowanie ruchów hetmana, wieży i gońca odbywa się w sposób odmienny. Wynika to z faktu, że figury te poruszają się o dowolną liczbę pól w danym kierunku, aż do momentu napotkania innej bierki na swojej drodze. W przypadku bierki przeciwnika możliwe jest bicie, w przypadku bierki własnej, należy zatrzymać się o pole wcześniej. Choć są to trzy różne figury, to mają do dyspozycji dwa możliwe ruchy, ruch w linii prostej, jak wieża, oraz ruch po przekątnej, jak gońiec. Ruchy hetmana są natomiast sumą dwóch powyższych generatorów.

Większość silników szachowych korzystających z masek bitowych implementuje funkcję, która w literaturze zwana jest jako ang. *Hyperbola Quintessence*. Pozwala ona na wygenerowanie dostępnych ruchów w jednej prostej oraz na uniknięcie zawiłej logiki iteracyjnej.

$$\begin{array}{llll}
 o = 11010101 & o' = 10101011 & \text{pola zajęte przez bierki} \\
 r = 00010000 & r' = 00001000 & \text{pole figury dla której generujemy ruchy} \\
 o - r = 11000101 & o' - r' = 10100011 & \text{pola zajęte minus pole figury} \\
 \alpha = o - 2r = 10110101 & \beta = o' - 2r' = 10011011 & \text{pola zajęte dwukrotnie minus pole figury} \\
 (\alpha \oplus \beta') \wedge \neg \gamma & 01101100 & \text{maska legalnych ruchów}
 \end{array}$$

\oplus — alternatywa wykluczająca x' — odwrócenie bitów
 \wedge — koniunkcja γ — maska pól zajętych przez własne bierki

2.3.3. Ruchy specjalne

Pozostałymi ruchami do zaimplementowania było bicie w przelocie oraz cztery roszady. Z uwagi na znikomą ilość takich posunięć w danej pozycji oraz na złożoną logikę tych ruchów, zostały one wygenerowane explicite z zasad gry.

Oba typy ruchów wymagały dodatkowej weryfikacji z danymi dostępnymi w reprezentacji stanu gry. Pierwszy z nich - en-passant - został wygenerowany przez nałożenie na siebie maski pola bicia w przelocie oraz maski pinów, odpowiednio przesuniętych o ± 7 oraz ± 9 kratek.

Aby uzyskać prawo roszady, należy spełnić następujące warunki:

1. Ani król, ani wieża biorąca udział w roszadzie nie mogły wykonać wcześniej ruchu.
2. Pola między królem a wieżą muszą być puste.
3. Król nie może znajdować się w szachu.
4. Król nie może przechodzić bądź kończyć ruch na polach, atakowanych przez bierki przeciwnika.

2.3.4. Generowanie ruchów legalnych

Technika usuwania ruchów pseudo-legalnych

Po zaimplementowaniu logiki opisanej powyżej silnik był zdolny do generowania posunięć pseudolegalnych. Natomiast ruch, po którym własny król znajduje się w szachu, nie tylko jest ruchem nieoptymalnym, ale również z punktu widzenia reguł FIDE nielegalnym.

W literaturze można znaleźć kilka podejść do problemu odfiltrowywania ruchów pseudolegalnych. Niektóre z nich korzystają z dodatkowych masek bitowych, reprezentujących

poła atakowane przez bierki danej strony. W niniejszej implementacji zastosowano jednak rozwiązanie subiektywnie dla autora łatwiejsze.

Po wykonaniu konkretnego ruchu, w miejscu, gdzie znajduje się król, stawiana jest każda figura z kolei, oraz generowane są dostępne bicia. Jeśli wśród bić znajduje się bierka przeciwnika, tego samego typu, co aktualnie podstawiona, oznacza to, że król znajduje się w szachu, a więc posunięcie nie należy do kategorii ruchów legalnych.

Test wydajności

Generatory ruchów szachowych posiadają skomplikowaną logikę. Z tego względu bardzo łatwo o popełnienie błędu w implementacji. Dopuszczenie choćby jednego błędu, skutkować będzie jego propagacją na większych głębokościach, a w skrajnych przypadkach doprowadzi do błędu programu.

Ocena poprawności dzięki grze w szachowych posiada szereg wad dyskwalifikujących tę metodę. Przede wszystkim, wymaga ręcznego rozegrania wielu partii, w celu odwiedzenia wystarczającej liczby węzłów drzewa. Co więcej, konkretna sytuacja jest czasochłonna do zreplikowania, a pojawiające się błędy trudne do zalogowania.

Z tego względu zastosowano Test Wydajności (ang. *Performance Testing*, w skrócie *Perft Test*). Choć nazwa mogłaby wskazywać na testowanie prędkości generowanych ruchów, test ten można przeprowadzić także w celu kontroli poprawności. Metoda ta opiera się o wykonanie algorytmu DFS dla ograniczonej głębokości na drzewie gry, przy jednoczesnym zliczaniu odwiedzonych węzłów. Tak otrzymane wyniki można porównać z konsensusem osiągniętym przez twórców silników szachowych. Jako punkt odniesienia autor uznał wyniki generowane przez silnik Stockfish. Przeprowadzenie testów z różnych pozycji startowych oraz dla różnych głębokości pozwoliło na potwierdzenie poprawności implementowanego generatora, z prawdopodobieństwem graniczącym z pewnością. Przykładowe wyniki zaprezentowano w dodatku C.

2.4. Ocena heurystyczna

Funkcje heurystyczne są komponentami silnika szachowego, które odpowiadają za ocenę konkretnej pozycji szachowej, z punktu widzenia jednego z graczy. Jest to istotne ze względu na to, że umożliwiają silnikowi wybór i wykonywanie takich ruchów, które prowadzą do osiągnięcia najkorzystniejszej z punktu widzenia silnika pozycji.

Z czysto teoretycznego punktu widzenia, nieskończona moc obliczeniowa pozwalałaby na przeszukanie pełnego drzewa gry, a co za tym idzie, jedyną funkcją heurystyczną godną implementacji, byłaby funkcja zwracająca 1 w przypadku wygranej, oraz -1 w przypadku przeciwnym. W rzeczywistości natomiast mnogość możliwych ruchów z każdej pozycji nakłada limit co do głębokości przeszukiwania i konieczności oceny pozycji, które nie są liśćmi drzewa, to jest pozycjami, które nie kończą partii. Z tego względu konieczne było zaimplementowanie funkcji heurystycznych, które, choć nie prowadzą gracza bezpośrednio do wygranej, to przybliżają go do tego celu na określone sposoby.

W podstawowej wersji silnika zaimplementowano dwie funkcje heurystyczne.

Pierwsza z nich zwraca *MAX* w przypadku mata króla przeciwnika, *MIN* w przypadku mata własnego króla, oraz -5000 w przypadku pata, bądź trzykrotnego powtórzenia pozycji, w celu demotywowania silnika do dążenia do remisu. Druga natomiast opiera się na intuicyjnym założeniu, że korzystniejsza pozycja to taka, w której gracz ma więcej bierki na planszy niż przeciwnik. Różnica między liczbą bierki konkretnego typu dla gracza oraz jego oponenta jest przemnażana przez wagę poszczególnych bierki. W tym celu skorzystano ze skali

zaproponowanej przez Claude Shannona, w której odpowiednio hetman, wieża, goniec, skoczek oraz pion mają wartości 900, 500, 300, 300 oraz 100.

W dalszej części pracy przedstawiono kolejne funkcje heurystyczne, mające na celu poprawę precyzji oceny pozycji. Klasa oceny heurystycznej silnika szachowego zwraca ocenę pozycji P dla koloru, który aktualnie wykonuje ruch według zasady:

$$Ocena(P) = \begin{cases} H_0(P) & \text{if } H_0(P) \neq 0 \\ \sum_{i=1}^n (c_i * H_i(P)) & \text{else} \end{cases} \quad (2.1)$$

H_0 – heurystyka win-loss-draw

c_i – waga heurystyki i

H_i – kolejne funkcje heurystyczne

Manipulowanie wagami konkretnych heurystyk pozwoliło na przeprowadzenie testów porównawczych i ich dostrojenie w celu uzyskania jak najdokładniejszej oceny.

2.5. Algorytm wyszukiwania

Z punktu widzenia teorii gier, szachy można klasyfikować na wiele różnych sposobów.

1. W wydaniu europejskim są one grą dwuosobową.
2. Jest to gra o sumie stałej, ponieważ w wyniku wykonywania dowolnej liczby ruchów proporcja zysków jednego gracza pozostaje niezmienna w stosunku do strat drugiego. Gry o sumie stałej można sprowadzić do gier o sumie zerowej.
3. Rozgrywka toczy się w postaci ekstensywnej, a więc ruchy wykonywane są na przemian.
4. Jest to gra skończona, z uwagi na regułę trzykrotnego powtórzenia.
5. Każdy z graczy posiada dostęp do doskonałej informacji.

Najbardziej istotne, z punktu tworzenia silnika szachowego, jest połączenie dwóch pierwszych z wymienionych cech. Takie gry nazywane są ściśle konkurencyjnymi. Innymi słowy, aby uzyskać maksymalną wypłatę, gracz dąży do tego, by zminimalizować sumę wypłat przeciwnika. [12]

W algorytmice problemy tego typu można rozwiązać za pomocą algorytmów dążących do minimalizowania maksymalnych strat.

2.5.1. Algorytm minimalizowania maksymalnych strat

Algorytm minimax polega na przeszukiwaniu w głąb drzewa gry. Z uwagi na mnogość możliwych decyzji, proces ogranicza się do eksploracji do określonej głębokości. Liściom drzewa przypisywane są obliczone wartości heurystyczne. Następnie idąc w górę grafu, na kolejnych poziomach, nadawane są wartości maksymalne dla protagonisty i minimalne dla antagonisty. Ruch, który prowadzi z korzenia do wierzchołka z największą wartością, jest ruchem proponowanym przez algorytm.

W silniku zastosowano skróconą wersję powyższego algorytmu, wykorzystując fakt, że $\max(\alpha, \beta) = -\min(-\alpha, -\beta)$.

DOPISAĆ DO KOŃCA STRONY

Listing 2.2: Implementacja algorytmu negaMax

```

negaMax(int depth) {
    moves = moveGenerator.generateMoves();
    if(depth == 0 || moves.isEmpty())
        return evaluator.evaluateForCurrentColor();

    int bestMoveValue = MINIMUM;
    for(Move move : moves) {
        board.makeMove(move);
        int score = -negaMax(depth-1);
        if(score > bestMoveValue)
            bestMoveValue = score;
        board.unmakeMove();
    }
    return bestMoveValue;
}

```

2.5.2. Zarządzanie czasem

Estymacja dostępnego czasu

Większość pojedynków szachowych odbywa się w czasie rzeczywistym, z narzuconym ograniczeniem co do łącznego czasu na wykonanie ruchu. Przekroczenie tego limitu stanowiłoby automatyczną wygraną oponenta. Koniecznym było zatem zaimplementowanie mechanizmu zarządzania, który pozwoliłby na podział pozostałego czasu, na wykonanie poszczególnych ruchów. Pozostały czas otrzymany przez UCI w formie `go wtime <wtime> btime <btime> winc <winc> binc <binc>` pozwolił na implementację rozwiązania opartego na wzorze:

$$\text{Est pozostałych ruchów} = \max(40 - \text{wykonaneRuchy}, 10)$$

$$\text{Est pozostałego czasu} = \text{time}_{color} + (\text{inc}_{color} * \text{Est pozostałych ruchów})$$

$$\text{Propozycja czasu} = \frac{\text{Est pozostałych ruchów}}{\text{Est pozostałego czasu}}$$

Założono średnią ilość ruchów na poziomie czterdziestu.

Iteratywne pogłębianie wyszukiwania

Prędkość wykonania algorytmu negaMax zależy od wielu czynników, takich jak głębokość wyszukiwania, aktualna pozycja, prędkość generowania ruchów czy ilość dostępnych dla programu zasobów. Nie ma możliwości oszacowania, ile czasu zajmie jego wykonanie, a przerwanie w trakcie działania, może skutkować wybraniem skrajnie nieoptymalnych posunięć.

W tym celu zaimplementowano rozwiązanie iteracyjnego pogłębiania wyszukiwania, polegającego na szukaniu najlepszego ruchu dla kolejnych głębokości. W momencie upływu czasu na obliczenia zwracana jest wartość otrzymana z najgłębszego, w pełni ukończonego przeszukiwania.

Takie podejście mogłoby wydawać się skrajnie nieoptymalne, gdyż wymaga wielokrotnego generowania drzewa gry. W praktyce jednak jest to rozwiązanie gwarantujące otrzymanie w miarę dobrego ruchu, a ulepszenia algorytmu takie jak dynamiczne sortowanie ruchów pozwalają na osiągnięcie szybszych rezultatów, niż przy przeszukaniu drzewa od razu dla danej głębokości. [1]

Rozdział 3

Ulepszenia dla silnika szachowego

Po opisanych w rozdziale drugim krokach silnik stał się zdolny do samodzielnej gry. W poniższej części opisane zostały zagadnienia związane z poprawą szybkości i precyzji działania systemu. W pierwszej kolejności skupiono się na ulepszeniu przeszukiwania ruchów w celu znalezienia najlepszego z posunięć. Następnie opisano zmiany co do heurystyki planszy, pozwalające silnikowi na lepszą ocenę bieżącej sytuacji gry.

3.1. Ulepszenia dla wyszukiwania

3.1.1. Biblioteka otwarć

Opis zagadnienia

Głównym problemem, który należało zaadresować, były otwarcia partii rozgrywanych przez silnik. Gry szachowe zawsze rozpoczynają się z tego samego położenia, więc wiadomo, że system znajdzie się w wielu pozycjach bezpośrednio wynikających z pierwszych posunięć. Program natomiast na obliczenia poświęcał wiele czasu, który lepiej byłoby spożytkować w środkowym etapie rozgrywki.

Profesjonalni gracze, korzystając z dorobku i doświadczenia wielu pokoleń szachistów, zapamiętują pierwsze posunięcia do wykonania. Tym samym oszczędzają czas, który pozostaje na bardziej złożone pozycje w środkowej fazie gry.

Implementacja

W celu zaimplementowania biblioteki otwarć, dostępne posunięcia czytane są z pliku, a następnie zapisywane przy inicjalizacji silnika do `HashMap<String, []Moves>`. Podczas działania silnika, FEN aktualnej pozycji porównywalny jest z dostępnymi kluczami, a ruch losowo wybierany spośród dostępnych w tablicy. W przypadku nieznalezienia klucza program przechodzi do gry środkowej z wykorzystaniem algorytmu `negamax`.

W literaturze znanych jest wiele formatów zapisu biblioteki otwarć, np. EPD, PGN czy Bin-format. System wykorzystuje bibliotekę wygenerowaną przez Sebastiana Lague i dostępną na licencji MIT w implementacji jego silnika. [9]

Rezultat

Efektem prac stał się silnik, który początkowe posunięcia wykonuje za pomocą podpiętej biblioteki otwarć. Dzięki temu pierwsze ruchy wykonywane są bardzo szybko, pozostawiając cenny czas obliczeniowy na dalszą grę, tym samym zwiększając precyzję.

We wcześniejszej wersji silnik był deterministyczny, to jest, dla konkretnej głębokości i pozycji, algorytm zwracał ten sam najlepszy ruch. Dodatkowym atutem stała się jego nieprzewidywalność. Początkowe posunięcia są zrandomizowane, co pozwala na jego testowanie w większej ilości wariantów, a także umila rozgrywkę użytkownikowi.

3.1.2. Alfa-Beta cięcie

Opis zagadnienia

Poprawne wykonanie algorytmu negaMax nie gwarantuje jego skuteczności. Wraz z pogłębianiem wyszukiwania rośnie również liczba wierzchołków, które należy odwiedzić. Uśredniając, liczba dzieci, to jest pozycji wynikających z wykonania ruchu, dla danego rodzica w szachach wynosi 35. [7] Własność ta nazywa się współczynnikiem rozgałęzienia (ang. *branching factor*).

Do minimalizacji liczby odwiedzonych węzłów wykorzystuje się alfa-beta cięcie. Jest to przykład algorytmu metody podziału i ograniczeń, a jego skuteczność w dużym stopniu zależy od kolejności przeszukiwanych ruchów. Zakładając ułożenie posunięć od najlepszego, algorytm wykona najwięcej cięć, co w efekcie skutkować będzie zmniejszeniem liczby odwiedzonych wierzchołków dla głębokości według wzoru z tabeli:

Tab. 3.1: Teoretyczny limit alfa-beta cięcia dla współczynnika rozgałęzienia $b_f = 35$

Głębokość n	b_f^n	$b_f^{\lceil \frac{n}{2} \rceil} + b_f^{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor} - 1$
1	35	35
2	1225	69
3	42875	1259
\vdots	\vdots	\vdots
10	$2,76 * 10^{15}$	$1,05 * 10^8$

Posortowanie ruchów od najgorszych, spowoduje brak możliwych cięć, a tym samym wynik będzie identyczny, jak przy algorytmie bez implementacji alfa-beta cięcia.

Implementacja

Algorytm alfa-beta cięcia jest edycją kodu funkcji negaMax 2.2. α oraz β zostają dodane jako argumenty. W sytuacji, gdy $\text{score} > \text{bestMoveValue}$ oraz $\alpha > \text{bestMoveValue}$, α zostaje zaktualizowana na bestMoveValue . Jeśli $\text{score} \geq \beta$ następuje odcięcie i zwracana jest wartość bestMoveValue . W wywołaniach funkcji na większej głębokości $\alpha = -\beta$ oraz $\beta = -\alpha$.

Rezultat

Implementacja powyższego rozwiązania pozwoliła na zmniejszenie liczby odwiedzonych wierzchołków podczas przeszukiwania, a tym samym pozwoliła iteratywnemu pogłębianiu na osiągnięcie lepszych rezultatów. Realna wartość tego ulepszenia jest różna w zależności od aktualnej pozycji na szachownicy.

3.1.3. Ewaluacja cichych stanów

Opis zagadnienia

Silnik znacznie przyspieszył znajdowanie ruchów dla danej głębokości. Zdarzały się jednak sytuacje, że zwracane wyniki znacznie odbiegały od optymalnych. Dla przykładu mogła zdarzyć się sytuacja, że liściem w drzewie było bicie hetmanem skoczka. Silnik zwracał wynik heurystyki jako bardzo wysoki i wykonywał powyższy ruch. Program nie brał jednak pod uwagę faktu, że na głębokości o jednej większej, hetman ten mógłby zostać zbity przez pionka.

Taką sytuację nazywa się efektem horyzontu. Rozwiązaniem wykonywania nieoptymalnych ruchów, było wykonanie dodatkowego wyszukiwania po osiągnięciu głębokości końcowej. Z liścia drzewa, które poprzednio zostało oceniane heurystycznie, wyprowadzono kolejne wyszukiwanie, w którym generowane ruchy są tylko biciami. Pozwoliło to na ocenę tak zwanych stanów cichych, czyli pozycji, gdzie nie ma żadnego dostępnego ruchu, który prowadziłby do bicia.

Implementacja

Algorytm rozwiązujący efekt horyzontu w literaturze nosi nazwę Quiescence Search.

Listing 3.1: Implementacja algorytmu Quiescence Search

```
public Integer search(int depth, int alpha, int beta) {
    int standPat = evaluator.evaluate();
    if(depth == 0)
        return standPat;

    if (standPat >= beta)
        return beta;
    if (alpha < standPat)
        alpha = standPat;

    ArrayList<Move> moves = generator.generateCaptureMoves();
    for(Move move : moves) {
        board.makeMove(move);
        int score = -search(depth-1, -beta, -alpha);
        board.unmakeMove();

        if(score >= beta)
            return beta;
        if(score > alpha)
            alpha = score;
    }
    return alpha;
}
```

Niektóre wersje tego algorytmu, oprócz ruchów prowadzących do bicia, korzystają także z roszad, czy podwójnych ruchów piona, z uwagi na ich szczególny charakter.

Rezultat

W efekcie implementacji algorytmu osiągnięto silnik, który jest odporny na efekt horyzontu. Niestety, z uwagi na ilość odwiedzonych wierzchołków w algorytmie Quiescence Search, prędkość wyszukiwania rozwiązań dla danej głębokości znacznie spowolniła. Ostatecznie, czy korzystniejszym jest wyszukiwanie dla większych głębokości, czy korzystanie wyłącznie ze stanów cichych zależy od konkretnej sytuacji na planszy.

3.1.4. Statyczne sortowanie ruchów

Opis zagadnienia

W czasie testów zauważono, że podczas przeszukiwania drzewa nie następuje taka ilość alfa-beta cięć, która pozwalałaby na znaczne przyspieszenie obliczeń. Rozpoczynanie przeszukiwania węzłów gry od najlepszych posunięć pozwoliłoby na osiągnięcie teoretycznego limitu wskazanego w tabeli 3.1. W żaden sposób nie ma jednak możliwości wskazania, który ruch prowadzi do najlepszej pozycji, przed wykonaniem tych ruchów. Istnieją jednak posunięcia, które można rozważyć w pierwszej kolejności, ze względu na ich szczególny charakter, a tym samym przyspieszyć pruning. Jeśli sortowanie jest niezależne od wcześniejszych obliczeń, to jest to sortowanie statyczne.

Implementacja

Sortowanie wykonano dzięki implementacji interfejsu *Comparator* w klasie *Move*. W celu porównania pomiędzy sobą dwóch dowolnych ruchów wykorzystano następujące założenia:

- Ruch, który umożliwia bicie, jest prawdopodobnie lepszy od ruchów, które nie umożliwiają bicia.
- Wszystkie ruchy specjalne, takie jak roszady, podwójne ruchy pionem czy promocje, są lepsze od ruchów zwykłych.
- Promocje do wieży i gońca należy rozważyć na końcu, gdyż są mniej wartościowe od promocji do hetmana, jednocześnie dając dostęp do tych samych ruchów.
- Zastosowano technikę Najbardziej wartościowa ofiara – Najmniej wartościowa atakujący (ang. *Most Valuable Victim – Least Valuable Attacker*, w skrócie MVV-LVA). Sortuje ona bicia zakładając, że korzystniejsze są posunięcia, w których bierka zbita reprezentuje wartość większą, od bierki atakującej.

Rezultat

Dzięki zastosowaniu sortowania statycznego, udało się zwiększyć ilość alfa-beta cięć, co spowodowało możliwości przeszukiwania drzew gry do większych głębokości. Szczególnie zauważalne było to ulepszenie w procesie wyszukiwania stanów cichych, gdzie każdy z dostępnych ruchów można było zakwalifikować za pomocą MVV-LVA. Dodatek C zawiera przykładowe pozycje, w których porównano wyniki perft dla wersji klasycznej, z alfa-beta cięciem, oraz z sortowaniem ruchów.

3.1.5. Tabela transpozycji

Opis zagadnienia

Silnik szachowy wielokrotnie znajduje się w tej samej pozycji planszy, musząc wyliczać wartości heurystyczne od nowa. Dzieje się tak, zarówno w przypadku dotarcia do pozycji w wyniku odmiennych sekwencji ruchów, jak i w wyniku wykonywania kolejnych ruchów. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie tabeli transpozycji, która przechowuje wyniki obliczeń dla pozycji, mając jednocześnie na uwadze głębokość, dla której wynik został obliczony. W sytuacji, gdy silnik ponownie napotka na tę samą pozycję, w pierwszej kolejności sprawdzi, czy w tabeli nie znajduje się wynik oceny heurystycznej dla tej samej, bądź większej głębokości.

Implementacja i rezultat

Do implementacji zastosowano strukturę `HashMap`, gdzie kluczem jest wartość Zobrist Hasz planszy, a wartością wynik obliczeń dla danej pozycji. Po zastosowaniu ulepszenia zaobserwowano znaczący wzrost wydajności silnika dla mniejszych głębokości przeszukiwania drzewa gry. Wynikało to z faktu napotykania tych samych pozycji w trakcie przeszukiwania poprzedniego posunięcia. Nie przełożyło się to jednak na ogólny poziom gry silnika. Program komputerowy zaczął docierać do głębokości, w których nie było już możliwości ukończenia całego poziomu w wyznaczonym czasie, nawet pomimo znajdowania par klucz-wartość dla niższych głębokości.

3.1.6. Okno estymacji

Opis zagadnienia

Poprzednie wersje silnika rozpoczynając przeszukiwanie węzłów gry, dla każdego poziomu głębokości, zakładały wartości alfa i beta jako odpowiednio $-\infty$ i $+\infty$. W praktyce można jednak przypuszczać, że wartości zwrócone dla większych głębokości, nie będą w bardzo dużym stopniu odbiegać, od wartości zwróconych dla głębokości mniejszych. Rozpoczynając wyszukiwanie algorytmem miniMax z wartościami $alpha = sc_{n-1} - \delta$ oraz $beta = sc_{n-1} + \delta$, gdzie sc_{n-1} to wartość zwrócona dla poprzedniej głębokości, a δ to okno estymacji, istnieje szansa wystąpienia większej ilości alfa-cięć oraz beta-cięć. Pomimo oczywistych korzyści wynikających z zastosowania powyższej techniki, istnieje także ryzyko, że w przypadku, gdy wartość wykracza poza okno estymacji, konieczne jest rozpoczęcie ponownego wykonania algorytm wyszukiwania. Ponowne uruchomienie odbywa się z szerszym oknem estymacji.

Implementacja

Kluczowe w implementacji algorytm było odpowiednie ustalenie wartości δ . Zbyt wąskie okno skutkowałoby zbyt częstymi ponownymi przeszukiwaniami drzewa. Zbyt szerokie natomiast, prowadziłoby do braku efektów zastosowanego usprawnienia. Większość silników ustawia wartość δ na 1/3 wartości pionka. [5] Taką też wartość zastosowano w programie. W przypadku wyjścia poza zakres, okno estymacji poszerzone zostaje do $-\infty$ i $+\infty$, co w efekcie gwarantuje poprawne działanie.

Rezultat

JESZCZE NIE ZAIMPLEMENTOWANE

3.1.7. Rozszerzanie wyszukiwania

Opis zagadnienia

Rozszerzenie wyszukiwania to technika, która zakłada, że niektóre z dostępnych posunięć wymagają dodatkowego zbadania. W przypadku, gdy taki ruch nastąpi, algorytm przeszukiwania przedłuży przeszukiwanie poddrzewa gry o jeden poziom. W odróżnieniu od Quiescence Search rozszerzenie wyszukiwania przedłuża się na wszystkie z dostępnych ruchów z pozycji, nie tylko na te, które prowadzą do bicia.

Implementacja

Zdecydowano się na implementację dwóch rodzajów przedłużeń:

- Jeśli ruch jest atakiem powodującym wystąpienie szacha, to przeszukiwanie zostaje przedłużone o jeden poziom.
- W przypadku, gdy istnieje jedynie jedno dostępne posunięcie, również przeszukiwanie zostaje przedłużone o jeden poziom.

W celu uniknięcia zbytniego rozprzestrzeniania się grafu, przedłużenie wyszukiwania może nastąpić w danym poddrzewie gry tylko raz.

Rezultat

JESZCZE NIE ZAIMPLEMENTOWANE

3.2. Ulepszenia dla oceny heurystycznej

3.2.1. Tablice figur

Opis zagadnienia

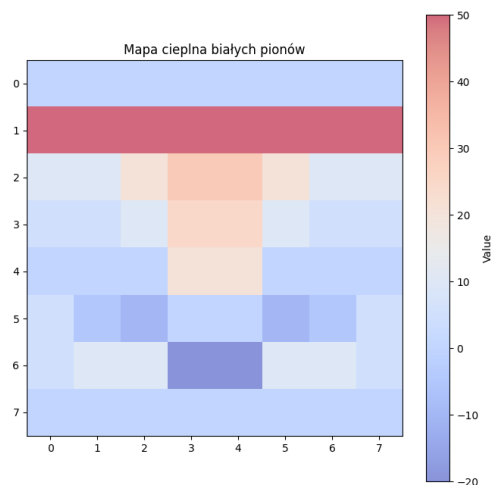
Istotnym z punktu widzenia heurystyki silnika jest prawidłowa ocena informacji na planszy. Ograniczona wiedza, jedynie co do ilości figur na planszy, była niewystarczająca, aby móc prowadzić rozgrywkę na odpowiednio wysokim poziomie.

Wraz z rozwojem strategii szachowych gracze wypracowali szereg schematów, które ułatwiają im podejmowanie decyzji, niezależnie od konkretnej sytuacji na planszy. Są nimi między innymi: zajęcie centralnych pól przez pionki, nierozwijanie skoczka na skrajne pola planszy, czy pozycjonowanie wież na otwartych liniach i wierszach pionów przeciwnika.

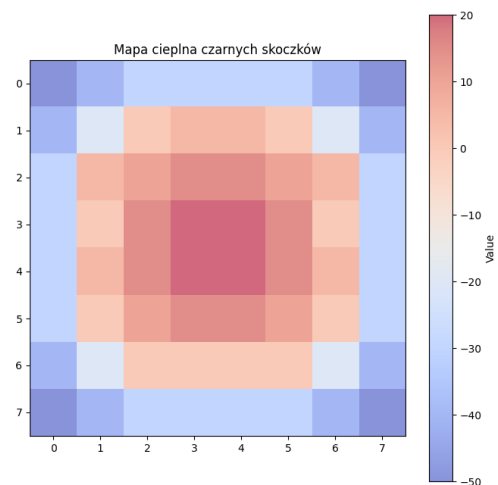
Implementacja

Implementacja każdego z powyższych, jak i wielu innych reguł mogłaby okazać się czasochłonna i złożona obliczeniowo. Zdecydowano się zatem na zastosowanie tablic figur, które można rozumieć jako mapy cieplne, reprezentujące korzystność umieszczenia figury na danym polu. Dla każdego typu bierki (2×6) stworzono tablicę 64 elementową określającą wartości, odnośnie do tego, jak korzystne jest umieszczenie figury na danym polu. Zastosowano się na nie tworzenie własnych tablic, a zastosowanie gotowych, dostępnych na forum tworzenia silników szachowych. [3]

a)



b)



Rys. 3.1: Przykładowe tablice cieplne bierki: a) białych pionów, b) czarnych skoczków

Rezultatem zastosowania tablic figur stał się silnik, który w odczuciu autora znacznie lepiej „rozumiał” pozycję na planszy.

3.2.2. Ochrona króla

W celu próby zapobieżenia sytuacjom, w których król jest zagrożony, zaimplementowano mechanizm, który sprawdza wszystkie bierki w najbliższej okolicy króla. Pionki i figury tego samego koloru są traktowane korzystnie, przeciwnego natomiast bardzo niekorzystnie.

Co więcej, istotny jest typ figury, która zagrożenie stanowi. Miało to w efekcie ograniczyć ryzyko zakładania mata, szczególnie na środkowym etapie gry. Jest to ulepszenie, którego skuteczność jest trudna do zweryfikowania w czasie gry, z uwagi na fakt, że jego efekt jest widoczny dopiero w sytuacji zagrożenia króla.

3.2.3. Struktura pionów

Opis zagadnienia

Po implementacji ulepszenia 3.2.1 silnik zyskał zdolność oceny pozycyjnej. Niedoskonałością było natomiast, że bierki oceniane były pojedynczo, to jest bez uwzględnienia ich wzajemnych relacji, oraz relacji w stosunku do bierok przeciwnika. Było to szczególnie przydatne w przypadku pionków. Termin „struktura pionów” jest szeroko znany w literaturze szachowej [4] i odnosi się do technik mających na celu skoordynowaną obronę własnej części szachownicy oraz przeprowadzania ataków z wykorzystaniem pionów. Skuteczne pozycjonowanie pionków na planszy może prowadzić do uzyskania przewagi w grze.

Implementacja

Zasady rozumiane przez graczy szachowych w sposób intuicyjny należało przekształcić na zbiór reguł możliwych do zrozumienia przez program, a prowadzących do skutecznej oceny pozycji.

- Pionki, które posiadają z tyłu po swojej prawej lub lewej stronie innego pionka, są uważane za dobrze chronione.
- Pionki nieposiadające za sobą innych pionków na sąsiednich kolumnach są traktowane jako izolowane i trudne do obrony.
- Dwa pionki znajdujące się w jednej linii pionowej (tzw. „zdublowane”) są uważane za mało wartościowe, gdyż odsłaniają inne linie na potencjalne ataki.
- Pionki, dla których istnieje możliwość promocji, spowodowana brakiem pionów przeciwnika na sąsiednich kolumnach, są uznawane za bardzo wartościowe.

Powyższe techniki zostały w głównej mierze zaimplementowane z wykorzystaniem tablic bitowych bierok i operacjach na nich. Odbyło się to w sposób analogiczny do generowania dostępnych ruchów.

Rezultat

Rezultatem stał się silnik, który w sposób bardziej złożony oraz koherentny był w stanie ocenić swoją sytuację na planszy. Istniało natomiast ryzyko, że czas konieczny na przeprowadzanie koniecznych obliczeń znacząco przewyższy oferowane korzyści. Nie sposób było to sprawdzić w trakcie zwykłej gry przeciw silnikowi. Rzeczywiste efekty przedstawiono w rozdziale 4.

3.2.4. Moment gry

Opis zagadnienia

Szachy to gra dynamiczna, w której techniki stosowane przez szachistów w dużym stopniu zależą od pozycji na planszy. Jednym z podstawowych wskaźników wpływających na obierane strategie jest moment gry. Partia szachowa dzieli się na trzy etapy: **otwarcie** – najczęściej trwające do 10 ruchów, rozgrywane z zapamiętanej teorii szachowej, grę środkową – najdłuższy etap, w którym obie strony walczą o kontrolę nad planszą, oraz **grę końcową** – etap, w którym ilość bierok po obu stronach jest niska, a gracze próbują znaleźć techniki zamiatowania przeciwnika.

Implementacja

Pierwszy z nich zaimplementowany został dzięki Bibliotece Otwarcie 3.1.1. W celu odróżnienia gry środkowej od końcowej zastosowano kryterium, mówiące o pozostaniu po każdej stronie maksymalnie jednej figury wysokiej (hetmana, wieży) bądź dwóch figur niskich (gońca, skoczka). W przypadku spełnienia tego warunku silnik przechodzi do fazy końcowej, cechującej się odmienną oceną.

Między innymi zmienia się tablica dla figury króla. W fazie środkowej król zazwyczaj unikał walki bezpiecznie schroniony po roszadzie w rogu planszy. Natomiast w fazie końcowej, z uwagi na mniejszą ilość materiału zyskuje on na znaczeniu. Powinien przesunąć się do centrum planszy, pomagając w ochronie pionków oraz znajdowaniu matów na przeciwniku. Co więcej, na znaczeniu zyskały same pionki, gdzie ich promocja na hetmana może przesądzić o losie partii.

Rezultat

Zastosowane ulepszenie przyniosło zakładane rezultaty. W połączeniu ze zwiększeniem głębokości wyszukiwania, wynikającej z mniejszej liczby bierek, a co za tym idzie niższym współczynnikiem rozgałęzienia drzewa, doprowadziło do efektywnej gry końcowej. Wyszukiwanie ruchów było na tyle dobre, że podjęto decyzję o zaniechaniu implementacji siatek matowych, gdyż silnik radził sobie bardzo dobrze ze znajdowaniem rozwiązań.

3.2.5. Mobilność

Opis zagadnienia

Mobilność bierek mówi o ilości posunięć dostępnych dla danej figury. Celem jest zwiększenie liczby dostępnych ruchów, a co za tym idzie, kontroli większej części planszy, zmuszając przeciwnika do wycofania. Tablice figur pozwoliły na wskazanie typowych pól, które są korzystne z punktu widzenia hetmana, wieży czy gońca. Istnieją jednak sytuacje, w których warto ustawić się na polu obiektywnie mniej korzystnym, natomiast umożliwiającym kontrolę otwartej linii bądź przekątnej.

Implementacja i rezultat

Do implementacji zastosowano generator ruchów, który wskazywał ilość dostępnych posunięć dla konkretnej figury. Wartość ta, przekazywana do funkcji heurystycznej i mnożona przez odpowiedni współczynnik, pozwalała na ocenę mobilności. W wyniku implementacji powstał silnik, który lepiej oceniał poszczególne dostępne ruchy. Niestety, zwiększenie liczby koniecznych obliczeń zdecydowanie obniżyło wydajność. Efektywna implementacja tego ulepszenia, choć możliwa, wymagałaby zastosowania bardziej zaawansowanych technik generowania ruchów. Zdecydowano się na zrezygnowanie z tego ulepszenia na rzecz innych, bardziej obiecujących pod względem efektywności.

Rozdział 4

Ocena siły silnika

Zastosowane w poprzednim rozdziale ulepszenia, w postaci heurystyk oraz algorytmów przeszukiwania drzewa, w empirycznym odczuciu autora, przynosiły zamierzone rezultaty. W celu potwierdzenia tych przypuszczeń konieczne było przeprowadzenie bardziej formalnych, to jest miarodajnych i obiektywnych, testów porównawczych.

4.1. Porównanie wersji silnika

W pierwszej kolejności wysiłki skierowano ku porównaniu wersji silnika z różnym poziomem zaimplementowanych usprawnień. Pozwoliło to na potwierdzenie poprawności zaimplementowanych rozwiązań oraz na wyłonienie jego najsilniejszej wersji.

4.1.1. Ustalona liczba rozgrywek

Najbardziej oczywistą, a zarazem najłatwiejszą do zaimplementowania metodą porównawczą jest rozegranie określonej liczby pojedynków pomiędzy oponentami, a następnie sprawdzenie współczynnika wygranych. Do przeprowadzenia testów wykorzystano program komputerowy Cutechess, służący nie tylko jako szachowy interfejs graficzny, ale także jako zarządca turniejowy dla silników implementujących protokół UCI.

Pomiędzy każdą parą silników rozegrano po 25 gier, każda trwająca 1 minutę na partię plus 0,6 sekundy na ruch. Aby zmniejszyć powtarzalność wyników, gry rozpoczynają nie od pozycji startowej, ale od losowych otwarć szachowych z bazy danych. [11] Pozycje te są wyrównane, aby uniknąć przewagi któregoś z silników.

Co zaobserwowano w wynikach przedstawionych na rysunku 4.1, to fakt, że zastosowane ulepszenia w postaci heurystyk oraz algorytmów przeszukiwania drzewa, przyniosły zamierzone rezultaty. Wersja silnika z zaimplementowanymi ulepszeniami wygrywała znaczącą większość pojedynków z poprzednią wersją oraz z podstawowym programem.

Najkorzystniejsze ulepszenia

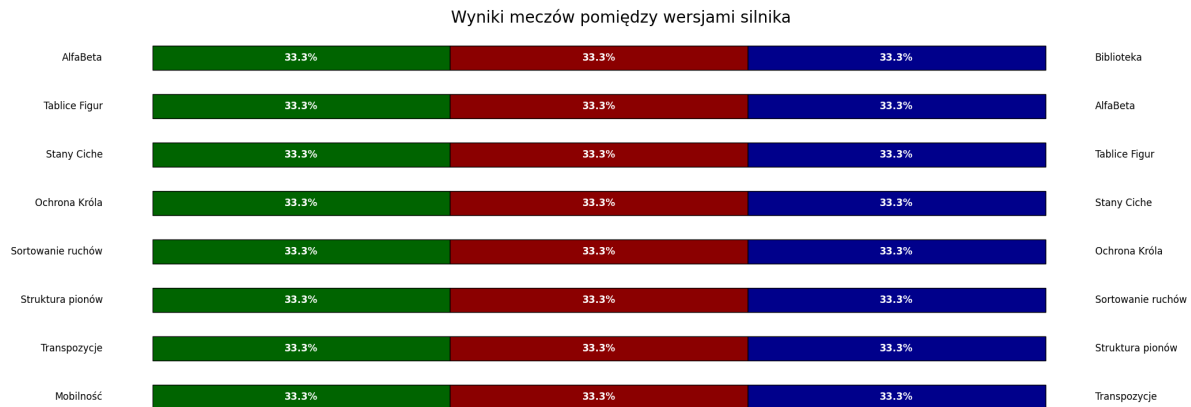
Największe różnice zaobserwowano w ulepszeniach:

- **Tablica figur** – współczynnik wygranej dla tego ulepszenia sięgnął 90%. Wynikło to po części z tego, że silnik uzyskał o wiele więcej informacji co do pozycjonowania konkretnych figur na planszy. Z drugiej strony mogło to wynikać z przewidywalności ruchów z uwagi na determinizm silnika. Po zaimplementowaniu tablicy otwarć gry były bardziej losowe.
- **Sortowanie ruchów** – lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit.

Najmniej istotne ulepszenia

Najmniejsze różnice zaobserwowano natomiast w ulepszaniach:

- **Ochrona króla** – wersja ulepszona, jak i poprzednia otrzymały po 50% wygranych. Przypuszczeniem autora jest, że zmiana heurystyki dotyczyła bardzo specyficznych sytuacji, które nie miały dużego wpływu na ogół rozgrywek.
- **Biblioteka otwarc** – nie porównano wersji z biblioteką otwarc, gdyż rozgrywki rozpoczynają się od wyrównanych pozycji w grze środkowej, a więc biblioteka otwarc nie miałaby wpływu na wynik.



Rys. 4.1: Wyniki rozgrywek pomiędzy wersjami silnika

4.1.2. Sequential Probability Ratio Test

Testy porównawcze stosujące ustaloną liczbę rozgrywek, miały jednak szereg wad wpływających na wyniki testów. Przede wszystkim, nie sposób było w tej metodzie ustalić, ile partii należy rozegrać, aby uzyskać wiarygodne statystycznie wyniki. W przypadku dużej przewagi jednego z silnika wyniki można było uznać za autentyczne, jednak przy mniejszych różnicach powstawało ryzyko, że rozgrywki nie były reprezentatywne.

W celu zwiększenia wiarygodności wyników, zdecydowano się na zastosowanie Sekwencyjnych Testów Probabilistycznych (ang. *Sequential Probability Ratio Test*, SPRT).

Metodologia

Who knows? I dont.

Przeprowadzenie testów

W celu przeprowadzenia SPRT zdecydowano się na ponowne zastosowanie Cutechess.

Omówienie wyników

4.2. Porównanie z innymi silnikami

Przedstawione powyżej rozwiązania są w stanie z dużą dozą pewności wskazać najsilniejszą wersję silnika szachowego. Są to jednak wyniki subiektywne, odnoszące się jedynie do samego programu. W celu obliczenia relatywnej siły silnika konieczne jest przetestowanie zaimplementowanych rozwiązań przeciwko innym programom szachowym.

4.2.1. Metodologia badawcza

Platforma lichess

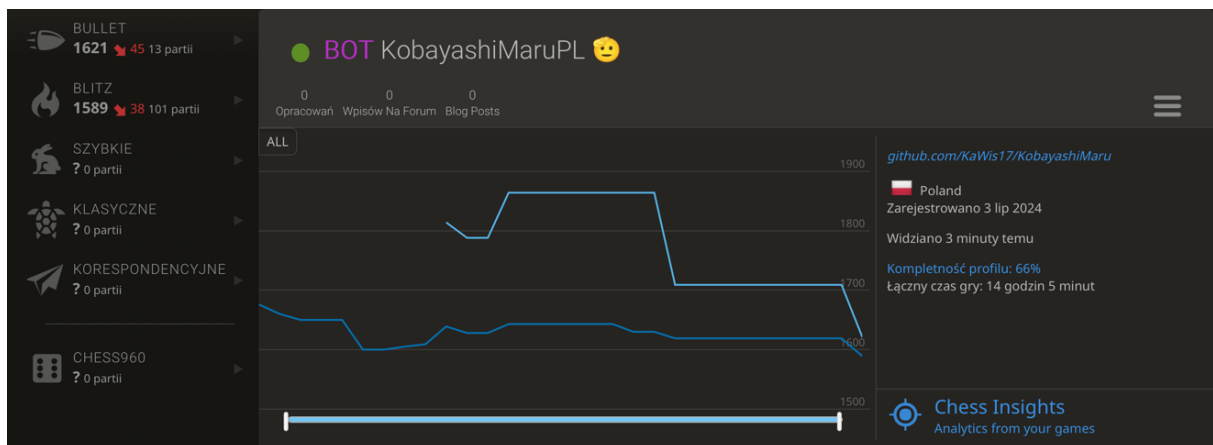
Lichess jest darmową platformą internetową, umożliwiającą prowadzenie rozgrywek online. Jedną z jej funkcji, jest możliwość wykorzystania udostępnionego przez dewelopera API, w celu podłączenia konta do lokalnie uruchomionego programu z silnikiem wykonującym ruchy.

Jako pośrednik pomiędzy platformą a silnikiem, wykorzystano program lichess-bot. Umożliwił on komunikację z serwerem lichess, automatyczne dobieranie przeciwników oraz przekazywanie ruchów.

4.2.2. Omówienie wyników

W trakcie działania programu przeprowadzono xxx gier, z czego xxx procent odbyło się przeciwko innym silnikom, reszta przeciwko graczom. System został skonfigurowany w taki sposób, aby akceptować wyzwania jedynie dla gier typu bullet oraz blitz.

W czasie zakończenia prac nad silnikiem, osiągnął on ranking 1621 ELO dla gier typu bullet oraz 1589 ELO dla gier typu blitz.



Rys. 4.2: Ranking na platformie lichess

Rozdział 5

Zakończenie

5.1. Możliwości dalszego rozwoju silnika

Jak pokazano w ostatnim rozdziale, stworzony program reprezentuje wysoki poziom gry oraz może stanowić wyzwanie dla niejednego gracza. Jednakże silnik powstał w taki sposób, aby umożliwić łatwą implementację dodatkowych usprawnień, które w dalszym stopniu mogłyby zwiększyć jego siłę. Można zdefiniować trzy teoretyczne ścieżki dalszego rozwoju programu:

Zarządzanie czasem gry jest jednym z pól, które można by rozwinąć. W obecnej konfiguracji silnik oblicza czas ruchu na podstawie pozostałego czasu, nie biorąc pod uwagę takich aspektów, jak przewaga nad przeciwnikiem, czy też pozycja na planszy. Niektóre ruchy, które wydają się oczywiste, gdyż znacznie poprawiają pozycję, mogłyby być wykonywane szybciej, pozostawiając cenny czas na obliczenia w bardziej złożonych, czy równiejszych sytuacjach.

Kolejnym polem do rozwoju jest sortowanie ruchów. Silnik przed wykonaniem ruchu stosuje statyczne sortowanie ruchu, tak jak opisano w rozdziale 3.1.4. Po zapoznaniu z powszechnie stosowanymi w silnikach technikami można by przypuszczać, że istotnym ulepszeniem byłoby zastosowanie dynamicznego sortowania ruchów, czyli takiego, w którym sortowanie ruchów zależy od wyników wyszukiwań na niższych głębokościach. Dla przykładu można by rozpocząć od ruchów, które poprzednio doprowadziły do jak największego alfa beta cięcia.

Naturalnym przedłużeniem prac nad silnikiem szachowych byłoby zaimplementowanie algorytmów z dziedziny sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. W kategorii heurystyk oceny pozycji można by zastosować implementację algorytmu genetycznego, w celu dostrojenia wag poszczególnych funkcji oceny, tak aby były one zbliżone do optymalnych. Natomiast w kategorii wyszukiwania ruchów, można by zaimplementować sieć neuronową, która proponowałaby obiecujące ruchy, na podstawie wyuczonej wiedzy z zestawu partii szachowych.

5.2. Podsumowanie otrzymanych wyników

W ocenie autora, cel pracy dyplomowej został osiągnięty. Przegląd literatury oraz zapoznanie się z wykorzystywanymi algorytmami pozwoliło na zrozumienie zasad działania silników szachowych. Zdobyta wiedza pozwoliła na implementację programu komputerowego w języku Java 22, który analizuje i ocenia pozycję na szachownicy, a następnie wykonuje legalny i optymalny ruch. Architektura programu pozwoliła na łatwą implementację dodatkowych usprawnień, które zwiększyły jego skuteczność. Przeprowadzono analizę porównawczą w celu oceny jakości zaimplementowanych rozwiązań. Wyniki testów wskazały, że silnik osiąga na platformie Lichess ranking szachowy w zakresie pomiędzy 1600 a 1700 ELO. Plasuje go tym samym w 69. percentylu graczy na stronie.

Bibliografia

- [1] *Chess Programming Wiki: Iterative Deepening*. URL: [chessprogramming . org / Iterative_Deepening](http://chessprogramming.org/Iterative_Deepening) (term. wiz. 11. 10. 2024).
- [2] *Chess Programming Wiki: Move Generation*. URL: [www . chessprogramming . org / Move_Generation](http://www.chessprogramming.org/Move_Generation) (term. wiz. 08. 10. 2024).
- [3] *Chess Programming Wiki: Simplified Evaluation Function*. URL: [https : / / www . chessprogramming . org / Simplified _ Evaluation _ Function](https://www.chessprogramming.org/Simplified_Evaluation_Function) (term. wiz. 05. 11. 2024).
- [4] *Chess Terms: Pawn Structure*. URL: [https : / / www . chess . com / terms / pawn - structure](https://www.chess.com/terms/pawn-structure) (term. wiz. 11. 11. 2024).
- [5] W. Duch. *Chess Programming Theory*. Notatki do wykładów. URL: [http : / / fizyka . umk . pl / ~ duch / Wyklady / AI / Notki / Chess % 20 Programming % 20 Theory . htm](http://fizyka.umk.pl/~duch/Wyklady/AI/Notki/Chess%20Programming%20Theory.htm) (term. wiz. 11. 11. 2024).
- [6] S. J. Edwards. *Standard: Portable Game Notation Specification and Implementation Guide*. 1994. URL: [thechessdrum . net / PGN_Reference . txt](http://thechessdrum.net/PGN_Reference.txt) (term. wiz. 04. 09. 2024).
- [7] M. Franaszczuk. *Chess Programming Wiki: Evaluation*. URL: [cs . cornell . edu / boom / 2004sp / ProjectArch / Chess / chessmain . html](http://cs.cornell.edu/boom/2004sp/ProjectArch/Chess/chessmain.html) (term. wiz. 10. 10. 2024).
- [8] R. Huber i S.-M. Kahlen. *Description of the universal chess interface (UCI)*. 2006. URL: [backscattering . de / chess / uci /](http://backscattering.de/chess/uci/) (term. wiz. 05. 09. 2024).
- [9] S. Lague. *Biblioteka otwarc.* URL: [github . com / SebLague / Chess - Coding - Adventure / blob / Chess - V2 - UCI / Chess - Coding - Adventure / resources / Book . txt](https://github.com/SebLague/Chess-Coding-Adventure/blob/Chess-V2-UCI/Chess-Coding-Adventure/resources/Book.txt) (term. wiz. 10. 10. 2024).
- [10] *Lichess-bot*. URL: [github . com / lichess - bot - devs / lichess - bot](https://github.com/lichess-bot-devs/lichess-bot) (term. wiz. 02. 10. 2024).
- [11] official-stockfish. *Chess books used to develop Stockfish*. URL: [https : / / github . com / official - stockfish / books / tree / master](https://github.com/official-stockfish/books/tree/master) (term. wiz. 05. 11. 2024).
- [12] T. Płatkowski. *Matematyka stosowana, Wstęp do Teorii Gier*. URL: [mst . mimuw . edu . pl / wykklady / wtg / wyklad . pdf](http://mst.mimuw.edu.pl/wyklady/wtg/wyklad.pdf) (term. wiz. 09. 10. 2024).
- [13] C. E. Shannon i B. Telephone. „XXII. Programming a Computer for Playing Chess I”. W: *Philosophical Magazine Series I* 41 (1950), s. 256–275. URL: [api . semanticscholar . org / CorpusID : 12908589](http://api.semanticscholar.org/CorpusID:12908589).
- [14] S. Vrzina. „Piece By Piece: Building a Strong Chess Engine.” Bachelor’s Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam, 2023. URL: [cs . vu . nl / ~ wanf / theses / vrzina - bscthesis . pdf](http://cs.vu.nl/~wanf/theses/vrzina-bscthesis.pdf).

Dodatek A

Instrukcja wdrożenia

A.1. Rozgrywka na platformie Lichess

Najłatwiejszym i najszybszym sposobem na zmierzenie się z silnikiem jest rozgrywka na platformie lichess.com, do czego autor niniejszej pracy serdecznie zaprasza. Należy odszukać silnik po nazwie użytkownika *KobayashiMaruPL* i gdy ten będzie aktywny zaprosić go do pojedynku.

W celu implementacji tego rozwiązania została wykorzystana biblioteka lichess-bot, która stanowi pośrednik pomiędzy silnikami wykorzystującymi UCI a API platformy Lichess. [10]

A.2. Kompilacja kodu i połączenie z GUI

Dodatek B

Protokół UCI

B.1. Wykorzystane komendy

Tab. B.1: UCI - komunikacja GUI do silnika

Komenda	Opis działania
uci	Określenie używanego protokołu. Po otrzymaniu komendy silnik powinien odpowiedzieć id oraz listą dostępnych opcji.
setoption name <name> value <value>	Instrukcja zmiany wewnętrznego parametru silnika. Nazwa parametru jest podawana przez silnik. Wartość może być typu bool, int, String.
position [startpos <fen>] moves <moves>	Ustawienie pozycji zaczynając od startowej bądź z podanego FEN. Możliwe wykonanie dalszych ruchów przekazanych w formacie LAN.
isready	Zapytanie, służące synchronizacji GUI z silnikiem. Gdy silnik nie przetwarza poleceń powinien odpowiedzieć uciok.
go wtime <wtime> btime <btime> winc <winc> binc <binc>	Instrukcja rozpoczęcia szukania ruchu. Kolejne argumenty w milisekundach wyrażają: pozostały czas białego i czarnego, dodatkowy czas per ruch białego i czarnego.
debug [on off]	Zmiana trybu diagnostycznego silnika.
quit	Kończy działanie silnika.

Tab. B.2: UCI - komunikacja silnika do GUI

Komenda	Opis działania
id [name author] <value>	Instrukcja służąca identyfikacji silnika przez GUI.
option name <name> type <type>	Wypisanie dostępnych opcji oraz typu ich działania.
uciok	Wysyłany po id oraz option, aby potwierdzić poprawne wykonanie komendy uci.
readyok	Odpowiedź na isready. Synchronizuje GUI z silnikiem.
info <value>	Przekazywanie GUI informacji nad aktualnym stanem obliczeń najlepszego ruchu.
bestmove <move>	Odpowiedź na instrukcję go. Zwraca ruch proponowany przez silnik.

B.2. Przykład użycia

Tab. B.3: Przykład użycia UCI

Output GUI	Output silnika
uci	
	id name KobayashiMaru id author Krzysztof Antoni Wiśniewski option name OwnBook type check uciok
setoption name OwnBook value false isready	
	readyok
position startpos go wtime 60000 btime 60000 winc 600 binc 600	
	info depth 1 nodes 21 pv g1f3 info depth 2 nodes 177 pv d2d4 g8f6 ... bestmove d2d4
position startpos moves d2d4 d7d5 go wtime 58000 btime 55000 winc 600 binc 600	
...	...
quit	

Dodatek C

Wyniki Perft