# Streszczenie

W niniejszej pracy celem była implementacja i analiza wydajnościowa generatora silników gier logicznych. Aby jednak go prawdiłowo zaimplementować najpierw należało dokonać dokładnego przeglądu i analizy dostępnych implementacji silników popularnych gier.

Właśnie takiej opisowej analizie wraz z przytaczaniem kluczowych fragmentów kodów źródłowych programów grających poświęcony jest cały pierwszy rozdział. Jest to rozdział typowo opisowy aczkolwiek z racji skupienia tematu na silnikach i wydajności pokuszono się o dokładną analizę kodu kluczowego dla wydajności. Dużo uwagi poświęcono efektywnym reprezentacjom planszy i stanów gry. Wydajne struktury danych używane dla generowania ruchów i algorytmów AI zajęły sporą część opisu. W każdym z analizowanych silników szczególnym zainteresowaniem potraktowano wszelkie optymalizacje sprzętowe. Poszukiwano i jeżeli znaleziono to dokładnio opisano wszelkie wstawki assemblerowe, funkcje „instrinsic” czy wołanie bezpośrednio instrukcji procesora. Używanie instrukcji dostępnych dla konkretnych, nowoczesnych architektur procesorów zostało znalezione i opisane w przypadku silników programów mistrzowskich.

Łącznie analizie poddano trzy silniki gier logicznych. Analizowany silnik do gry w szachy – Stockfish jest programem mistrzowskim i opisane znalezione w nim rozwiązania dobrze zaprezentowały najnowsze trendy w programach grających. Analizie poddano także wersję z 2011 roku mistrzowskiego programu MoHex do gry w Hex jak i jedyny otwartoźródłowy silnik Connect-k dla stosunkowo nowej gry Connect-6. Ten ostatni nie zachwycił optymalnymi rozwiązaniami, ale to nawet dobrze, gdyż umożliwił w ten sposób sukces w realizacji części implementacyjnej pracy.

W rozdziale drugim skupiono się na implementacji generatora silników dla gier z rodziny (m,n,k,p,q) (czyli Connect-k, GoMoku, Tic-Tac-Toe również). Celem było zaimplementowanie generatora tworzącego na podstawie zdefiniowanych przez użytkownika parametrów konkretnego silnika do konkretnej gry z rodziny (m,n,k,p,q) a przy tym lepszego niż dostępne rozwiązania. Dzięki wyborowi programu Connect-k w części opisowej można było z powodzeniem napisać generator tak aby generowane silniki były lepsze wydajnościowo i silniejsze pod względem AI niż silnik programu Connect-k. Impelementacja okazała się w pełni sukcesem a generowane silniki poprawne i szybkie. Co ważniejsze generowane silniki wykorzystują udogodnienia nowoczesnych architektur procesorów jak i efektywną reprezentację (kompresję) stanów gry z uwzględnieniem zdefiniowanych parametrów. Dla mniejszej planszy jest np. używana w bitboardzie zmienna o mniejszym zakresie.

W trzecim i ostatnim rozdziale celem była dokładna analiza poprawnościowo-wydajnościowa zaimplementowanego generatora silników gier. W tym celu opracowano oddzielną aplikację, która była w stanie się komunikować z silnikiem po znanym interfejsie. Mając w swojej bazie zakodowane konkretne gry wraz z wynikami i optymalnymi posunięciami aplikacja ta wywołuje silnik dla zdefiniowanych przypadków testowych i sprawdza jakość i czas wygenerowania nowego ruchu. Zdefiniowano w bazie aplikacji testującej ponad XYZ przypadków testowych, testowane silniki zachowują się poprawnie dla każdego z nich. Testy wydajności pozytywnie zaskoczyły autora i jednocześnie utrwaliłi w przekonaniu, że implementacja silnika gry w C/C++ ze wstawkami assemblerowymi to dobry wybór.

**Słowa kluczowe**: generator silników gier logicznych, gry logiczne, analiza silników gier logicznych, programy grające, connect-6, gomoku, szachy, hex, MoHex, Stockfish, Connect-k, rozwiązywanie gier, reprezentacje stanów gry, reprezentacje planszy w grach, gry parametryzowane, silniki gier, gry z rodziny (m,n,k,p,q), monte carlo

**Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymogami OECD**: 1.2 Nauki o komputerach i informatyka

# Abstract

//TODO….

**Keywords**: generator

# Spis treści

[Streszczenie 3](#_Toc453551628)

[Abstract 4](#_Toc453551629)

[Spis treści 5](#_Toc453551630)

[Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów 6](#_Toc453551631)

[1. Wstęp i cel pracy 7](#_Toc453551632)

[2. Przegląd i analiza dostępnych implementacji silników popularnych gier logicznych 9](#_Toc453551633)

[2.1 Stockfish 11](#_Toc453551634)

[2.1.1 Reprezentacja planszy – bitboard 14](#_Toc453551635)

[2.1.2 Wykorzystanie zaawansowanych instrukcji assemblerowych procesora 15](#_Toc453551636)

[2.1.3 Reprezentacja ruchu i wartości dla funkcji ewaluacji 18](#_Toc453551637)

[2.2 Mo-Hex 20](#_Toc453551638)

[2.3 MIMHex 20](#_Toc453551639)

[2.4 Connect-k 20](#_Toc453551640)

[2.4.1 Plik shared.h – definicje stałych i typów używanych w całym programie 21](#_Toc453551641)

[2.4.2 Plansza i stany gry 23](#_Toc453551642)

[2.4.3 Plik state.c i funkcje modyfikujące stan 24](#_Toc453551643)

[2.4.4 Sztuczna inteligencja – ogólnie 29](#_Toc453551644)

[2.4.5 Strategia oparta na zagrożeniu 33](#_Toc453551645)

[2.4.6 Sekwencje 33](#_Toc453551646)

[2.4.7 Monte Carlo 33](#_Toc453551647)

[3. Implementacja generatora silników wybranej gry 36](#_Toc453551648)

[3.1 Problem wyboru gry 36](#_Toc453551649)

[3.1.1 Początkowy wybór – szachy 37](#_Toc453551650)

[3.1.2 Wybór ostateczny – Connect6, Gomoku, (m,n,k,p,q) 37](#_Toc453551651)

[3.2 Architektura projektu 37](#_Toc453551652)

[3.3 Generator silników - (m,n,k,p,q)EnginesGenerator 37](#_Toc453551653)

[3.4 Silnik gry w C++ z placeholderami - (m,n,k,p,q)GameEngine 37](#_Toc453551654)

[3.5 Aplikacja do interfejsu użytkownika - (m,n,k,p,q)GUI 38](#_Toc453551655)

[3.6 Aplikacja do analizy wydajnościowo-poprawnościowej generowanych silników - (m,n,k,p,q)EnginesAnalyzer 38](#_Toc453551656)

[4. Analiza wydajnościowo-poprawnościowa zaimplementowanego generatora silników gier 38](#_Toc453551657)

[5. Podsumowanie 39](#_Toc453551658)

[Wykaz literatury 40](#_Toc453551659)

[Wykaz rysunków 42](#_Toc453551660)

[Wykaz tabel 43](#_Toc453551661)

[Dodatek A: Tytuł dodatku A 44](#_Toc453551662)

# Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

ICGA – International Computer Games Association

TCEC – Top Chess Engine Championship

WPF – Windows Presentation Foundation

GUI – graficzny interfejs użytkownika

UI – interfejs użytkownika

.NET – Microsoft .NET Framework

n – liczba wierszy planszy

m – liczba kolumn planszy

k – k-pod-rząd postawionych pionów jest potrzebnych żeby wygrać

p – liczba ruchów (np. stawianych pionów) w turze gracza

q – liczba ruchów (np. stawianych pionów) przez pierwszego gracza w pierwszej turze

UCI – Universal Chess Interface

AI – Artificial Intelligence, sztuczna inteligencja

LERF – Little-Endian Rank-File

# Wstęp i cel pracy

W początkowych dziejach algorytmiki i komputerów, znacznie bardziej istotną cechą algorytmów była złożoność pamięciowa [1]. Wynikało to z faktu, że dostępne komputery miały mało pamięci operacyjnej, a sama w sobie była ona niezwykle droga. Duża jej ilość jest natomiast niezbędna dla niektórych silników gier logicznych, jako, że muszą one np. generować możliwe posunięcia lub trzymać „drzewo gry” w pamięci. Dokładając do tego niewielką wydajność pierwszych komputerów, pierwsze programy dobrze grające w gry logiczne, jak warcaby czy szachy nie pojawiły się aż do późnych lat siedemdziesiątych [2][3][4].

Dzisiaj, dzięki dużej, taniej i łatwo dostępnej pamięci operacyjnej, wysokiej wydajności procesorów i rozwojowi algorytmiki mamy do czynienia z prawdziwym rozkwitem dziedziny zajmującej się programami grającymi. Rozwój jest tym bardziej podsycany poprzez nieustanną rywalizację pomiędzy programami grającymi podczas takich wydarzeń jak olimpiada ICGA [5][6] czy TCEC [7]. Na samej olimpiadzie ICGA rozgrywane są corocznie mistrzostwa programów grających w około 36 różnych gier logicznych [8], a autorzy zapewniają możliwość dodania kolejnych gier jeżeli tylko znajdą się chętni [9].

Przy całej tej rywalizacji i rozwoju oczywiste jest, że kolejne generacje silników gier będą coraz bardziej wydajne i coraz lepiej wykorzystujące zasoby sprzętowe. Jedną z możliwości dalszego zwiększania wydajności jest stosowanie optymalizacji sprzętowych – wykorzystywanie konkretnych funkcji architektury procesora, o ile są dostępne. Często wymaga to umieszczania wstawek assemblerowych w kodzie źródłowym programu grającego.

Trzeba jednak przyznać nam, jako gatunkowi ludzkiemu niemały sukces na tym polu, dzięki wspomnianemu szybkiemu rozwojowi wydajności procesorów, pojemności pamięci i efektywności algorytmów udało się w 2007 roku rozwiązać wariant angielski Warcabów [10]. Rozwiązanie jest określane jako *słabe*, tj algorytm zaimplementowany w programie Chinook nie mna gwarancji wygranej z każdym przeciwnikie, ale jest zagwarantowane, że nigdy nie przegra. Tak czy owak, robi to ogromne wrażenie i jest wspólnym osiągnięciem algorytmiki i inżynierii komputerowej – wyznacznikiem naszego postępu jako ludzkość. Algorytmika, która korzysta z dobrodziejstw inżynierii komputerowej, możnaby rzecz „algorytmy zoptymalizowane pod sprzęt” to właśnie bardzo istotna część tej pracy dyplomowej jak i nowoczesnych programów grających.

W niniejszej pracy, z racji złożoności tematyki i trudności implementacji wydajnych silników gier logicznych poświecono cały pierwszy rozdział na przegląd i analizę dostępnych implementacji silników popularnych gier logicznych. Przegląd ten przede wszystkim ma za zadanie nakreślić ogólny trend w rozwoju silników gier i co ważniejsze, umożliwić autorowi implementację generatora silników dla wybranej gry logicznej w rozdziale drugim.

Głównym celem pracy jest implementacja i analiza generatora silników dla wybranej gry logicznej. Program powinien umożliwić obsługującemu go człowiekowi wygodne wygenerowanie konkretnego silnika wybranej gry logicznej, parametryzowanego takimi wartościami jak: rozmiary planszy, liczba pól aktywnych planszy, zasady gry, liczba graczy. W implementacji głównym wyzwaniem jest napisać taki generator, aby generowane silniki były przynajmniej równie dobre (równie szybkie, z równie mocnym AI) co znane silniki dla wybranej gry. Jest to zadanie zdecydowanie trudne, dlatego też cały trzeci rozdział jest przeznaczony na sprawdzenie poprawności i wydajności zaimplementowanego generatora.

Podsumowując, jak już wspomniano praca ma zasadniczo trzy części, w pewnym sensie są więc trzy cele do zrealizowania w pracy. Część pierwsza jest czysto opisowa, skupia się na przeglądzie i analizie dostępnych silników gier logicznych, jej celem jest poznanie trendów implementacyjnych współczesnych programów grających. Część druga jest czysto implementacyjna, jej celem jest powstanie generatora wydajnych i poprawnych silników wybranej gry logicznej. Część trzecia ma najbardziej charakter analizy i testów, jej celem jest zbadanie wydajności zaimplementowanego generatora i jego dogłębne przetestowanie (głównie poprzez testowanie silników przez niego generowanych.

# Przegląd i analiza dostępnych implementacji silników popularnych gier logicznych

W niniejszym rozdziale postanowiono bliżej przyjrzeć się wybranym, dostępnym implementacjom silników popularnych gier logicznych. Ze względu na ograniczoną objętość pracy, należało dokonać mądrych wyborów, tj. wybrać nowoczesne i aktywnie rozwijane silniki (aby uwzględnić trend ich rozwoju), ale też przeznaczone do popularnych gier (większa rywalizacja, więc wyższa jakość implementacji). Autor jako miłośnik czystego kodu, w procesie wyboru silników do analizy, dużą wagę przywiązywał również do tego czy udostępniony kod źródłowy programu grającego jest dobrze ustrukturalizowany i przejrzyście napisany.

Wstępnie zadecydowano również, że najlepsze do analizy będą programy najlepsze w swojej dziedzinie, interesujące są przecież rozwiązania bliskie optymalnym – można zadać pytanie „co takiego znajduje się w kodzie programu grającego, że dało mu przewagę nad innymi”. W tym celu przeanalizowano wyniki z olimpiad ICGA i TCEC.

**Tabela 2.1.** Wyniki turnieju "Top Chess Engine Championship" [5]

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Sezon | Data | Zwycięzca | Drugie miejsce |
| 1 | Dec 2010 – Feb 2011 | Houdini 1.5a | Rybka 4.0 |
| 2 | Feb 2011 – Apr 2011 | Houdini 1.5a | Rybka 4.1 |
| 3 | Apr 2011 – May 2011 | *brak (sezon niedokończony)* | |
| 4 | Jan 2013 – May 2013 | Houdini 3 | Stockfish 250413 |
| 5 | Aug 2013 – Dec 2013 | Komodo 1142 | Stockfish 191113 |
| 6 | Feb 2014 – May 2014 | Stockfish 170514 | Komodo 7x |
| 6 (szachy losowe) | June 2014 – July 2014 | Stockfish 260614 | Houdini 4 |
| 7 | Sep 2014 – Dec 2014 | Komodo 1333 | Stockfish 141214 |
| 8 | Aug 2015 – Nov 2015 | Komodo 9.3x | Stockfish 021115 |
| 9 | May 2016 – Dec 2016 |  |  |

W tabeli 2.1 zaprezentowano wyniki z wszystkich sezonów turnieju szachowego TCEC. Na ich podstawie można stwierdzić, że prawdopodobnie dwa najlepsze programy grające w szachy na dzień dzisiejszy to Stockfish oraz Komodo. Przydałoby się przeanalizować w niniejszym rozdziale oba. Niestety Komodo, który jest prawdopodobnie najlepszym silnikiem szachowym na świecie [25] [26], jest także komercyjny i jego kod źródłowy jest zamknięty. Można jedynie kupić obecną wersję wykonywalną [27] lub poprzednią w wyprzedaży [28], dwie wersje wstecz są natomiast dostępne na licencji freeware [29]. Tak czy owak jako, że kod źródłowy nie jest dostępny analiza nie może zostać przeprowadzona. Szczęśliwie jednak, miejsce drugie z TCEC z 2015 roku, czyli Stockfish jest otwartoźródłowy i dostępny na publicznym repozytorium w serwisie github [30] [31]. W dalszej części tego rozdziału będzie jednym z kluczowych silników poddanych analizie.

**Tabela 2.2.** Wyniki w grze Go 9x9 [11]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Miejsce | Nazwa programu | Punkty |
| **1** | **Zen** | 9.5 |
| **2** | **Abakus** | 7.5 |
| **3** | **CGI** | 7.0 |
| 4 | Nomitan | 4.0 |
| 5 | MC\_ark | 2.0 |
| 6 | Wingo | 0.0 |

Program Zen w 2015 wygrał we wszystkich rozgrywanych na Olimpiadzie Gier Komputerowych ICGA wersjach gry Go [11], nie tylko w wersji 9x9, której wyniki przedstawiono w tabeli 2.2 ale też w wersjach 13x13 i 19x19. Byłby więc doskonałym kandydatem na analizę, niestety program został wydany komercyjnie [12]. Autor – japoński programista Yoji Ojima po raz pierwszy w opublikował go jako komercyjny program w roku 2009 i kolejne jego wersje w latach następnych. Najnowsza wersja 6 pochodzi z 2016 i można ją zakupić na stronie [13], nie ma więc mowy o jakiejkolwiek analizie kodu źródłowego.

**Tabela 2.3.** Wyniki w grze Hex 11x11 [11]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Miejsce | Nazwa | Punkty |
| **1** | Mo-Hex | 7 |
| **2** | Deep-Hex | 5 |
| **3** | Ezo | 0 |

**Tabela 2.4.** Wyniki w grze Hex 13x13 [11]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Miejsce | Nazwa | Punkty |
| **1** | Mo-Hex | 6 |
| **2** | Deep-Hex | 6 |
| **3** | Ezo | 0 |

Innym dominującym silnikiem na wspomnianej wcześniej olimpiadzie okazał się być program MoHex, który wygrał w obu rozgrywanych odmianach gry Hex (11x11 i 13x13) [11] jak pokazano w tabelach 2.3 i 2.4. W tym przypadku okazało się, że przynajmniej jakaś (zapewne starsza) wersja kodu źródłowego jest dostępna [14][15]. Dodatkowym atutem jest fakt, że w mistrzowskim programie Mo-Hex został wykorzystany algorytm polaka, Jakuba Pawlewicza – „new virtual connection implementation”. Po raz pierwszy ten algorytm został zaprezentowany w programie polaka MIMHex, którego kod źródłowy jest dostępny w kilku wersjach, rozwijanych przez różnych autorów [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24], co jeszcze bardziej ułatwi analizę.

Ostatnią już grą dla jakiej postanowiono dokonać przeglądu i analizy zaimplementowanych i dostępnych silników jest Connect6. Przyczyną jest pewna fascynacja autora zagadnieniem gier (n,m,k,p,q), gdzie Connect6 jest grą (∞,∞,6,2,1) [34] [35]. Istnieją też inne, niezwiązane bezpośrednio z jakością dostępnych silników tej gry, przyczyny, które zostaną ujawnione w dalszej części pracy.

**Tabela 2.5.** Wyniki w grze Connect6 [11]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Miejsce | Nazwa | Punkty |
| 2 | Floating Cloud | 6 |
| 1 | **Explorer** | 6 |
| **3** | **USTB1** | 0 |

Niestety pomimo dogłębnego przeszukania internetu, żaden z programów grających w Connect6 i biorących udział w Olimpiadzie Gier Komputerowych ICGA w 2015 roku nie został odnaleziony w internecie. Ani w formie plików wykonywalnych ani tym bardziej w formie kodu źródłowego. Po dosyć dogłębnych poszukiwaniach programów grających w Connect6 udało się znaleźć jeden dobrze napisany, nazwany „Connect-k”. Jego autor twierdzi, że jedynym innym dostępnym w internecie programem grający w Connect6 jest NCTU6 autorstwa dr-a I-Chen Wu (pomysłodawcy Connect6) [37]. NCTU6 zazwyczaj wygrywa z Connect-k ale jest za to o zamkniętym kodzie i w języku Chińskim [37] [38], odpada więc uwzględnienie go w analizie. Autor tej pracy znalazł też inny silnik Connect6, zaimplementowany przez bliżej nieznaną osobę [39], może posłużyć on do ewentualnego porównania z Connect-k, który zostanie w dalszej części rozdziału dogłębnie zanalizowany.

## Stockfish

Dostępny na wszystkie popularne platformy sprzętowe Windows, Linux, Mac OS X, Android, iOS, darmowy i open source, udostępniony na licencji GNU GPL v3. Rozwijany przez Marco Costalba, Joona Kiiski, Gary Linscott, Tord Romstad i internetową społczeność od 2004 roku i od ponad siedmiu lat pod własną nazwą (wcześniej Glaurung) [46], składający się z ponad 12000 linii kodu, zajmujący notorycznie pierwsze lub drugie miejsce na świecie w rankingu siły silników szachowych CCLR [47] [48] [49] Stockfish jest prawdopodobnie najlepszym do analizy silnikiem ze względu na cele pracy. Aby pokazać jego złożoność i zaawansowanie technologiczne i algorytmiczne poniżej zebrano niektóre jego cechy i wykorzystywane przez niego techniki:

* wykorzystanie kilku reprezentacji szachownicy i przełączanie między nimi
  + bitboard z mapowaniem LERF
  + „magiczny” bitboard z podejściem wyszukanym (ang. „fancy”)
  + bitboard BMI2 – PEXT
  + listy figur
* sam silnik (bez kodu UI) - korzysta z protokołu UCI
* support dla szachów losowych (Chess960)
* wykorzystanie tablic końca gry (Sygzy endgame tablabase)
* wykorzystanie dobrodziejstw nowoczesnych architektur procesorów
* wielowątkowość z wykorzystaniem do 128 rdzeni procesora
* zaawansowane funkcje ewaluacji figur i pozycji z uwzględnieniem:
  + fazy gry (tapered eval)
  + mobilności
  + struktury pionów
  + bezpieczeństwa króla
  + parowania gońców
  + tablic figura-pozycja
  + własnych, zdefiniowanych na starcie parametrów
* głębokie przeszukiwanie drzewa gry [56] [55] z uwzględnieniem:
  + iteratywnego pogłębiania (iterative deepening)
  + tablic transpozycji (transposition table)
  + haszowania Zobrist
  + przeszukiwania równoległego z użyciem wątków
  + heurystyki ruchów przeciwdziałających
  + heurystyki MVV-LVA
  + agresywnego odcinania [56]
    - odcinanie Null Move
  + wyszukiwania cichego (Quiescence search)
  + redukcji ruchów w późnej grze

To zaledwie część z techniki i możliwości programu grającego, techniki, które często są bardzo złożone i trudne pojęciowo. Jednakże z punktu widzenia celu tej pracy, większość z tych technik nie ma aż takiego wielkiego znaczenia, gdyż dotyczy sztucznej inteligencji programu grającego. O wiele bardziej interesujące są rozwiązania niskopoziomowe, które umożliwiły temu silnikowi wysoką wydajność generowania ruchów za pomocą algorytmów i technik AI. Dlatego też w dalszej częśti tego podrozdziału skupimy się w dużej mierze na reprezentacji planszy, stanów gry i innych danych dotyczących rozgrywki a mniej na wyszukanych technikach AI.



Rysunek 2.1. Graf zależności w programie Stockfish

### Reprezentacja planszy – bitboard

Stockfish używa wewnętrznie prawdopodobnie najefektywniejszej możliwej reprezentacji planszy, o bardzo dużym stopniu gęstości informacji. Tą reprezentacją jest oczywiście bitboard. Tak się składa, że plansza w szachach ma 64 pola tak samo jak rejrestry w procesorach 64-bitowych. Przechowywanie więc planszy w 64-bitowej zmiennej na 64-bitowym procesorze poza korzyściami pamięciowymi oznacza możliwość wykonania niektórych operacji w jednym cyklu zegara – czyli najszybciej jak się da [50]. Sposób mapowania planszy na 64-bitową zmienna używany przez Stockfish to mapowanie Little Endian Rank-File, czyli mniej znaczący bit odpowiada wcześniejszemu polu i poruszanie się po szachownicy poziomo zmienia wartość o jeden a poruszanie się pionowo o 8 [52]. Całość zaprezentowano na poniższym rysunku.



Rysunek 2.2. Mapowanie szachownicy na bitboard Little-Endian Rank-File [53]

Oczywiście jeżeli bit odpowiadający danej pozycji przyjmuje wartość 1 to oznacza, że pole jest zajęte, jeżeli 0 to jest wolne. Należy jednak zauważyć, że pojedyńczy bitboard nie wystarczy to repreentacji całej planszy – byłoby tak jedynie wtedy gdybyśmy mieli tylko jeden rodzaj figur szachowych i grali bez rozróżnienia na figury białe i czarne. W rzeczywistości Stockfish trzyma po prostu dużą liczbę bitboardów w różnych celach – np. po dwa bitboardy (gracz czarny, biały) dla każdego rodzaju figury szachowej (pion, goniec, wieża, król, hetman, szkoczek).

Typ Biboard zdefiniowany w pliku types.h zgodnie z intuicją jest po prostu typedef’em na 64-bitową zmienną całkowitą.

typedef uint64\_t Bitboard;

Przykładem użycia bitboardu są choćby maski, położenia i przesunięcia dla figur zdefiniowane w pliku bitboard.cpp.

Bitboard RookMasks [SQUARE\_NB];

Bitboard RookMagics [SQUARE\_NB];

Bitboard\* RookAttacks[SQUARE\_NB];

unsigned RookShifts [SQUARE\_NB];

Bitboard BishopMasks [SQUARE\_NB];

Bitboard BishopMagics [SQUARE\_NB];

Bitboard\* BishopAttacks[SQUARE\_NB];

unsigned BishopShifts [SQUARE\_NB];

Bitboard SquareBB[SQUARE\_NB];

Bitboard FileBB[FILE\_NB];

Bitboard RankBB[RANK\_NB];

Bitboard AdjacentFilesBB[FILE\_NB];

Bitboard InFrontBB[COLOR\_NB][RANK\_NB];

Bitboard StepAttacksBB[PIECE\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard BetweenBB[SQUARE\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard LineBB[SQUARE\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard DistanceRingBB[SQUARE\_NB][8];

Bitboard ForwardBB[COLOR\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard PassedPawnMask[COLOR\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard PawnAttackSpan[COLOR\_NB][SQUARE\_NB];

Bitboard PseudoAttacks[PIECE\_TYPE\_NB][SQUARE\_NB];

Jak widać jest ich naprawdę sporo, w dodatku to zaledwie część bitboardów wykorzystywanych w projekcie. Przechowywane są tutaj np. wszystkie możliwe ataki wieży z każdej z 64 możliwych pozycji.

### Wykorzystanie zaawansowanych instrukcji assemblerowych procesora

W celach wydajnościowych niektóre silniki gier logicznych wykorzystują wstawki kodu assemblerowego. Jednocześnie nowoczesne acrhitektury procesorów rozwijają się i udostępniają coraz to nowe funkcje, zwłaszcza te dotyczące manipulacji na bitach. Szczęśliwie nowoczesne kompilatory C/C++ takie jak Microsoft Visual C++, Intel C/C++ Compiler i GCC udostępniają funkcje „intrinsic”, które bezpośrednio mapują do funkcji assemblerowych np. rozszerzeń SIMD instrukcji procesora (MMX, SSE, SSE2, SSE3, SSE4) [59]. Funkcje „instrinsic” są oczywiście tak implementowane przez współczesne kompilatory z przyczyn wydajnościowych. Opisywane w tym podrodziale funkcje, są właśnie funkcjami tego typu.

Wspomniane wcześniej użycie bitboardu ma jeszcze jedną zaletę, często np. w funkcjach ewalucji (mających ocenić wartość sytuacji szachowej – choćby posiadanie dwóch gońców jest warte więcej niż posiadanie jednego) potrzeba szybko zliczyć ilość danego typu figur. Autorzy programu pokusili się tutaj o wykorzystanie dobrodziejstw nowoczesnej architektury procesorów – nowej instrukcji POPCNT wprowadzonej przez Intel w architekturze Nehalem i AMD w architekturze Barcelona [51]. Jeżeli tylko procesor na którym jest wykonywany program wspiera tę instrukcje, to przy każdym zliczaniu w funkcjach ewaluujących wystąpieniu konkretnego typu figury zostanie na bitboardzie wywołana instrukcja procesora POPCNT, która zliczy liczbę bitów ustawionych na 1 w danej zmiennej – czyli ilość typu figuy w bitboardzie. Oczywiście w innym wypadku program korzysta z wolniejszej implementacji programowej.

W pliku types.h załączanym prawie przez wszystkie pliki w projekcie znajdują się definicje załączające pliki nagłówkowe do obsługi instrukcji procesora POPCNT.

#if defined(USE\_POPCNT) && (defined(\_\_INTEL\_COMPILER) || defined(\_MSC\_VER))

# include <nmmintrin.h> // Intel and Microsoft header for \_mm\_popcnt\_u64()

#endif

Funkcja popcount w pliku bitboard.h jest inline’owana w celach wydajnościowych. Jak widać poniżej, jeżeli nie jest zdefiniowana stała USE\_POPCNT (którą można zdefiniować jako flagę kompilacji) to wykorzystywana jest implementacja programowa. W innym wypadku zależnie od używanego kompilatora wywoływana jest funkcja wywołująca bezpośrednio instrukcje na procesorze.

inline int popcount(Bitboard b) {

#ifndef USE\_POPCNT

extern uint8\_t PopCnt16[1 << 16];

union { Bitboard bb; uint16\_t u[4]; } v = { b };

return PopCnt16[v.u[0]] + PopCnt16[v.u[1]] + PopCnt16[v.u[2]] + PopCnt16[v.u[3]];

#elif defined(\_MSC\_VER) || defined(\_\_INTEL\_COMPILER)

return (int)\_mm\_popcnt\_u64(b);

#else // Assumed gcc or compatible compiler

return \_\_builtin\_popcountll(b);

#endif

}

Poza ewaluacją jest używana również w obliczaniu haszy na potrzeby przeszukiwania tablic końca gry, w tekstowym podsumowaniu stanu gry, w „magicznym bitboardzie”, w ewaluacji struktury pionów i w innych miejscach przede wszystkim związanych z ewaluacją. Autor znalazł 19 wywołań funkcji popcount w projekcie, każde o dużym znaczeniu dl programu grającego. Nie należy więc marginalizować znaczenia szybkiego wykonania tej funkcji dzięki instrukcjom assemblerowym procesora.

Inną funkcją zaimplementowaną podobnie jak popcount jest w Stockfishu funkcja pext. Zdefiniowana w rozszerzeniu BMI2 zbioru instrukcji dla architektury procesorów x86 umożliwia zrównolegloną ekstrakcję bitów [57]. Funkcja przydaje się w reprezentacji „magiczny bitboard”. Gdzie po ustawieniu mask można za jej pomocą łatwo i bardzo szybko sprawdzić wartość konkretnych bitów. Używana jest w pliku bitboard.cpp i bitboard.h. Jej definicja w types.h jest podobna do definicji POPCNT tyle tylko, że nie używa się implementacji programowej, jedyny zysk z tej funkcji jest jeżeli przy zdefiniowanej fladze do kompilatora USE\_PEXT korzysta się z funkcji wywołującej bezpośrednio instrukcję procesora.

#if defined(USE\_PEXT)

# include <immintrin.h> // Header for \_pext\_u64() intrinsic

# define pext(b, m) \_pext\_u64(b, m)

#else

# define pext(b, m) (0)

#endif

Ostatnią już funkcją, którą definicję można manipulować flagami kompilatora jest prefetch. W porównaniu jednak do poprzednich, których użycie wymagało zadeklarowanie pewnej stałej, tutaj należy zadeklarować stałą NO\_PREFETCH jeżeli funkcja prefetch nie ma wywoływać funkcji assemblerowej \_mm\_prefetch().

#if !defined(NO\_PREFETCH) && (defined(\_\_INTEL\_COMPILER) || defined(\_MSC\_VER))

# include <xmmintrin.h> // Intel and Microsoft header for \_mm\_prefetch()

#endif

Jak widać poniżej jeżeli stała powodujące dla komilatora Intela lub Microsoftu niezałączanie pliku nagłówkowego xmmintrin.h jest zadeklarowana, to wywołanie funkcji prefetch nie robi nic.

#ifdef NO\_PREFETCH

void prefetch(void\*) {}

#else

void prefetch(void\* addr) {

# if defined(\_\_INTEL\_COMPILER)

// This hack prevents prefetches from being optimized away by

// Intel compiler. Both MSVC and gcc seem not be affected by this.

\_\_asm\_\_ ("");

# endif

# if defined(\_\_INTEL\_COMPILER) || defined(\_MSC\_VER)

\_mm\_prefetch((char\*)addr, \_MM\_HINT\_T0);

# else

\_\_builtin\_prefetch(addr);

# endif

}

#endif

Funkcja sama w sobie jest jeszcze bliżej sprzętu niż poprzednie z omawianych. Użycie jej to swego rodzaju optymalizacja, funkcja preloaduje dany adres w pamięci cache L1/L2 procesora. W dodatku wywołanie jest nieblokujące CPU czekaniem na dane do załadowania z pamięci, co mogłoby być dosyć wolne. Wykorzystywana jest m.in. w hashowaniu talic transpozycji w przeszukiwaniu jak i hashowaniu tablic pozycji w pliku position.cpp.

// Update pawn hash key and prefetch access to pawnsTable

st->pawnKey ^= Zobrist::psq[us][PAWN][from] ^ Zobrist::psq[us][PAWN][to];

prefetch(thisThread->pawnsTable[st->pawnKey]);

Jeszcze dwie kolejnymi funkcjami wywołującymi zależnie od kompilatora i platformy bezpośrednie instrukcję procesora są funckje lsb I msb. Służą one odpowiednio do zwrócenia najmniej i najbardziej znaczącego bitu w niezerowym bitboardzie.

#if defined(\_\_GNUC\_\_)

inline Square lsb(Bitboard b) {

assert(b);

return Square(\_\_builtin\_ctzll(b));

}

inline Square msb(Bitboard b) {

assert(b);

return Square(63 - \_\_builtin\_clzll(b));

}

#elif defined(\_WIN64) && defined(\_MSC\_VER)

inline Square lsb(Bitboard b) {

assert(b);

unsigned long idx;

\_BitScanForward64(&idx, b);

return (Square) idx;

}

inline Square msb(Bitboard b) {

assert(b);

unsigned long idx;

\_BitScanReverse64(&idx, b);

return (Square) idx;

}

#else

#define NO\_BSF // Fallback on software implementation for other cases

Square lsb(Bitboard b);

Square msb(Bitboard b);

#endif

Jak widać podobnie jak popcount nie są tylko funkcjami optymalizującymi, ale są realnie potrzebne do obliczeń – więc w przypadku, gdy na kompilowanej platformie nie jest dostępna konkretna instrukcja procesora to korzysta się z implementacji programowej, która tutaj nie zostanie już omówiona z powodu trywialności. Instrukcja clzll procesora jest dostępna jednak na większości architektur sprzętowych [58].

### Reprezentacja ruchu i wartości dla funkcji ewaluacji

Ruch jest reprezentowany w podobny sposób jak plansza. Wystarczy tutaj typ short, gdyż potrzebne jest 16-bitów aby go przechować. Kolejne bity są przeznaczone odpowiednio na:

* bity 0-5: pozycja docelowa na szachownicy (wartości od 0 do 63),
* bity 6-11: pozycja źródłowa na szachownicy (wartości od 0 do 63),
* bity 12-13: typ figury podlegającej promocji,
* bity 14-15: flaga specjalnego oznaczenia ruchu (wartości: 0 – nic, 1 – promocja, 2 – bicie w przelocie, 3 – roszada).

W projekcie użyto w tym celu specjalnych enum’ów zaprezentowanych poniżej.

enum Move {

MOVE\_NONE,

MOVE\_NULL = 65

};

enum MoveType {

NORMAL,

PROMOTION = 1 << 14,

ENPASSANT = 2 << 14,

CASTLING = 3 << 14

};

Ciekawostką jest fakt wykorzystania dodatkowego miejsca w enumie Move na przemycenie dwóch innych rodzajów ruchu. Brak ruchu i ruch-null o wartościach odpowiednio 0 i 65 zostały tam pomyslnie umieszczone bez zwiększania rozmiarów z 16-bitów, dzięki faktu, że każdy ruch będzie miał inną pozycję docelową niż źródłową (w szachach nie można dokonać ruchu w miejscu), więc wszystkie wartości Move i identycznymi bitami 0-5 i 5-11 nigdy w programie nie wystąpią. Jest to dosyć bezpieczna optymalizacja i na pewno całkiem wygodna, wygodniejsza niż dostawianie jakichś masek czy dodatkowych struktur.

Reprezentacja wyniku czy wartości dla funkcji ewaluującej jest też bardzo efektywna. Najpierw należy przyjrzeć się wagom przydzielonym konkretnym figurom.

enum Value : int {

VALUE\_ZERO = 0,

VALUE\_DRAW = 0,

VALUE\_KNOWN\_WIN = 10000,

VALUE\_MATE = 32000,

VALUE\_INFINITE = 32001,

VALUE\_NONE = 32002,

VALUE\_MATE\_IN\_MAX\_PLY = VALUE\_MATE - 2 \* MAX\_PLY,

VALUE\_MATED\_IN\_MAX\_PLY = -VALUE\_MATE + 2 \* MAX\_PLY,

PawnValueMg = 198, PawnValueEg = 258,

KnightValueMg = 817, KnightValueEg = 896,

BishopValueMg = 836, BishopValueEg = 907,

RookValueMg = 1270, RookValueEg = 1356,

QueenValueMg = 2521, QueenValueEg = 2658,

MidgameLimit = 15581, EndgameLimit = 3998

};

Zgodnie z tym co wcześniej zostało wspomniane Stockfish uwzględnia w ewaluacji fazę gry. Widać to w powyższym kodzie, gdzie wartości dla figur z sufixem Mg (mid-game) są dla środkowej fazy gry a te z Eg (end-game) są dla końcowej.

32-bitowy typ Score przechowuje wyniki w taki sposób, że najmniej znaczące 16-bitów to wyniki dla końcowej fazy gry, natomiast najbardziej znaczące 16-bitów to wartości dla środkowej fazy gry. Kolejna optymalizacja, która co prawda wymaga wołania specjalnych funkcja (są one jednak inline’owane) ale jednak oszczędza pamięć w symulowanym drzewie gry.

enum Score : int { SCORE\_ZERO };

inline Score make\_score(int mg, int eg) {

return Score((mg << 16) + eg);

}

inline Value mg\_value(Score s) {

union { uint16\_t u; int16\_t s; } mg = { uint16\_t(unsigned(s + 0x8000) >> 16) };

return Value(mg.s);

}

inline Value eg\_value(Score s) {

union { uint16\_t u; int16\_t s; } eg = { uint16\_t(unsigned(s)) };

return Value(eg.s);

}

### Fishtest

Opisując sukces programu grającego Stockfish jako sukces nauki, otwartego oprogramowania i intelektualnej współpracy w ramach internetowej społeczności nie można pominąć rozproszonego środowiska testów dla kolejnych wersji Stockfisha nazwanego Fishtest. Należy zauważyć, że większość rozwiązań opisywanych przy okazji analizy tego programu grającego występuje też w innych tego rodzaju programach. To niekoniecznie efektywne reprezentacje planszy czy zaawansowane algorytmy AI zapewniły Stockfishowi sukces. Czymś co wyróżnia go na tle innych silników (poza otwartością i dużą współpracą społeczności), jest właśnie Fishtest. Wystarczy tylko wspomnieć, że od powstania Fishtesta w zaledwie dwanaście miesięcy Stockfish zyskał ponad 120 punktów Elo na wszystkich głównych listach ratingowych silników szachowych [60] [61].

Idea działania jest stosunkowo prosta. Jako, że repozytorium z kodem Stockfisha jest publicznie dostępne zgodnie z modelem fork&pull każdy użytkownik internetu może zgłosić swoje zmiany (nie trzeba być zaakceptowanym członkiem zespołu). Commit z nowymi zmianami jeżeli okaże się interesujący to może zostać włączony do testowego brancha. Ta nowa wersja zostaje wtedy wysłana do Fishtesta, gdzie gra dziesiątki tysięcy gier na komputerach ochotników należących do programu przeciwko starej wersji. Wyniki testów są weryfikowane testem chi-kwadrat i jeżeli tylko wyjściowa p-wartość nie jest statystycznie nieznacząca to wyniki testu jest uznawany za poprawny [46]. W uproszczeniu jeżeli nowy commit jest zauważalnie silniejszy w testach od starszej wersji to trafia do głównego brancha. W ten sposób można weryfikować każdą nową zmianę, oczywiście jest to dosyć kosztowne obliczeniowo, w sumie ochotnicy podarowali projektowi ponad 360 lat obliczeń, odgrywając na swoich komputerach ponad 240 milionów rozgrywek szachowych.

Sam Tord Romstad (jeden z autorów programu) przyznał, że dalsze rozwijanie siły Stockfisha to w dużej mierze modyfikowanie wartości różnych parametrów (np. wartości figur-położen-faz gry dla funkcji ewaluacyjnej) i patrzenie czy wyniki rozgrywek się poprawiły [54]. Przy takiej strategii dalszego rozwoju kodu grającego niezbędny jest dobry framework testowy, aby dokładnie sprawdzić każdą zmianę, coś co Fishtest z pewnością umożliwia.

Poniżej zaprezentowano wycinek z głównej strony Fishtesta, gdzie widać 3 testowane nowe wersje. Trzecia wydaje się wnosić statystycznie znaczącą poprawę siły algorytmu grającego o 35.12 punktów Elo. W tabeli przedstawiono m.in. wyniki testów, czas testów, datę ich uruchomienia i branch z którego pochodzi testowany kod. W ostatniej kolumnie jest krótkie podsumowanie zmian w danej wersji testowej.



Rysunek 2.3. Uruchomione obecnie testy na Fishteście [62]

Dodatkowo można też porównać zmiany wprowadzane przez testowany kod w stosunku do głównej wersji klikając „diff”. Przykładowo dla pierwszego wiersza testowane zmiany są bardzo niewielkie.



Rysunek 2.4. Porównanie zmian wprowadzanych przez testowaną wersję [62]

## Mo-Hex

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## MIMHex

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## Connect-k

Program Connect-k powstał w pierwotnej wersji na uniwersytecie w Minnesocie jako projekt semestralny z przedmiotu Sztuczna Inteligencja w 2007 roku [37]. Grupa projektowa składała się z czterech osób ale tylko jedna postanowiła go dalej rozwijać. Jeff Deitch opracował AI opartę o metodę Monte Carlo i sekwencje, Gabe Emerson i Erik Shimshock pracowali nad interfejsem i częścią silnika gry natomiast Michael Levin poza rysowaniem i strategii AI opartej o zagrożenie (Threat-Based Strategy) pracuje nad programem do dziś.



Rysunek 2.5. Graf zależności w programie Connect-k

Niestety część odpowiedzialna za implementację silnika gry nie jest w programie zbyt dobrze wyodrębniona, mimo, że analizowna jest najnowsza (2.0) wersja programu [40]. Sytuacji nie poprawia fakt, że projekt był rozwijany w czystym języku C na Linux Debianie z bibliotekami GTK+. Kod odpowiadzialny za grafikę i interfejs jest mieszany z kodem odpowiedzialnym za logikę ale za to AI jest dosyć dobrze wyodrębnione i podzielone na 3 wspomniane wcześniej zaimplementowane w programie metody.

### Plik shared.h – definicje stałych i typów używanych w całym programie

Analizę należy zacząć od pliku nagłówkowego który jest załączany dyrektyrwą include w prawie każdym innym pliku z kodem. To tutaj znajdziemy definicję podstawowych stałych jak i ograniczeń dla nich. Poniżej przedstawiono doyć istotny fragment z początku pliku. Zdefiniowane są ograniczenia wartości parametrów k,p,q oraz wielkości planszy. Nie ma generalnie jakichś odgórnych wymagań co do wartości tych ograniczeń. Autorzy programu zdefiniowali je tak a nie inaczej między innymi po to aby obraz gry powstający w plikach definiujących interfejs użytkownika był w miarę czytelny.

/\* We limit the maximum values of these variables; note that these are not

arbitrary limits and should be modified with care \*/

#define MAX\_BOARD\_SIZE 59

#define MAX\_CONNECT\_K 12

#define MAX\_PLACE\_P 12

#define MAX\_START\_Q 6

#define MAX\_DEPTH 9

#define MAX\_BRANCH 32

Z tych stałych możemy też wyciągnąć ciekawy wniosek, że chociaż autorzy nazwali swój program grający „Connect-k”, to tak naprawdę wartości p i q również są parametryzowane. Program jest więc dosyć uniwersalny i bliski prawdziwej grze (m,n,k,p,q) [32] [24] [35]. Część z zadeklarowanych stałych dotyczy zachowania AI, ograniczona jest maksymalna głębokość przeszukiwania jak i maksymalna ilość przeszukiwanych gałęzi gry.

Poniżej przedstawiono nienazwany enum, który przechowuje stałe oznaczające m.in. różne typu pól. Jeżeli pole na planszy gry jest puste to przyjmuje wartość PIECE\_NONE, jeżeli zajętę przez pierwszego lub drugiego gracza to odpowiednio PIECE\_BLACK i PIECE\_WHITE. Ciekawostką jest fakt wprowadzenia w reprezentacji pól definicji pola błędnego PIECE\_ERROR, używane ono jest do otoczenia paskiem o szerokości 1 całej planszy tak aby łatwo wykrywać wychodzenie poza planszę lub źle ustawiony indeks w tablicy. Jest to rozwiązanie o tyle dobre, że w języku C w porównaniu do języków zarządzalnych jak C# nie ma standardowego sposobu wykrywania wyjścia poza granicę tablicy [41] [42] czy też innych tego typu błędów – tablica to po prostu wskażnik, co może prowdzić do wielu błędów. Wprowadzając definicję pola błędnego PIECE\_ERROR przynajmniej część z tych błędów wyjścia indeksu poza normalną planszę możemy uniknąć. Inne zadeklarowane stałe w typ enumie to m.in. znaczniki używane przez AI do określania np. ryzyka w strategii operatej o ryzyko jak i znaczniki używane przy przeszukiwaniu drzewa / potencjalnego drzewa gry.

enum {

PIECE\_ERROR = -1,

/\* Error pieces form a one tile deep border around the board \*/

PIECE\_NONE = 0,

PIECE\_BLACK,

PIECE\_WHITE,

/\* Empty and played pieces \*/

PIECES,

/\* Total number of normal pieces (2) \*/

PIECE\_SEARCHED,

PIECE\_SEARCHED\_MAX = PIECE\_SEARCHED + MAX\_DEPTH,

/\* Markers used by the search system \*/

PIECE\_THREAT0,

PIECE\_MARKER = PIECE\_THREAT0,

/\* These threat markers are usable by the AIs \*/

};

typedef int PIECE;

Do przechowywania informacji o typie pola na planszy (zajęte / wolne / błędne / znaczniki AI,..) używa się typu int poprzez odpowiednio zdefiniowany typedef. Wydaje się to na pozór nieoptymalne, gdyż jeżeli wartości byłyby ze zbioru (pierwszy gracz, drugi gracz, puste) lub nawet z polem błędu to i tak wystarczyłby spokojnie 8-bitowy char lub unsigned char. Jednak znaczniki używane przez AI np. oznaczenia ryzyka przyjmują w tej implementacji Connect-k wartości aż do INT\_MAX. Autorzy potrzebowali większej dziedziny aby lepiej wartościować wagi pozycji czy posunięc. Niemniej jednak można sobie wyobrazić efektywniejszą implementację, gdzie ewentualna informacja o zagrożeniu posunięcia jest trzymana gdzieś indziej a stany planszy są lżejsze. Innym rozwiązaniem byłoby chociaż ograniczenie dziedziny wag pozycji czy zagrożenia do przedziału i tak dosyć obszernego reprezentowanego przez np. typ short.

Poniżej przedstawiono kilka użytecznych makr zdefniowanych również w pliku shared.h. Prawdopodobnie wybrano definicję makr zamiast funkcji z powodów wydajnościowych. Makra te służą do wyznaczania wartości znaczników pól używanych przez AI (np. zagrożenie). Makro piece\_empty(p) sprawdza za to czy pole jest piste – nie jest to całkiem trywialne, ponieważ pole ejst pste wtedy kiedy jest oznaczone jako puste lub jest markerem używanym przez AI.

#define MAX\_THREAT (INT\_MAX - PIECE\_THREAT0)

/\* Highest value a threat marker can have \*/

#define PIECE\_THREAT(n) (PIECE\_THREAT0 + (n))

/\* This marker represents a threat n-turns (of that player) away \*/

#define piece\_empty(p) ((p) == PIECE\_NONE || (p) >= PIECES)

/\* Checks if a piece is an empty or a marker \*/

typedef unsigned int PLAYER;

/\* Type for AIs, this is the index of the AI entry in ai.c \*/

typedef unsigned int BCOORD;

/\* Type for board coordinates \*/

Powyżej przedstawiono również kolejen typedef’y używane tym razem jako odpowiednio indeks gracza AI w metodach sztucznej inteligencji i typ do trzymania współrzędnych na planszy. Po raz kolejny część kodu wydaje się nieoptymalna – współrzędne raczej nie potrzebują tek dużej dziedziny jaką jest unsigned int. Tym razem jednak nieoptymalność nie jest tylko pozorna ale rzeczywiście przy zdefiniowanej na początku pliku stałej ograniczającej maksymalny rozmiar planszy na 59 (MAX\_BOARD\_SIZE) nie potrzebujemy aż tak dużego typu.

### Plansza i stany gry

W dalszej części pliku shared.h znajduje się intuicyjnie podstawowa struktura reprezentująca stan gry. Jest nią struct Board reprezentujący planszę gry w danym momencie i wszystkich momentach w historii. Struktura ta jest niezwykle ważna, gdyż jest używana nie tylko do reprezentacji obecnego stanu gry ale jest także używana przez wszystkie algorytmu AI do reprezentacji wszystkich stanów w drzewie gry itp. Struktura trzyma m.in. wskażnik na poprzednią swoją wersję – czyli de facto poprzedni stan gry w zmiennej parent. Stosuje się także tutaj zmienną typu AllocChain reprezentującą pewien łańcuch alokacji obiektów (alokacji kolejnych stanów planszy np. w algorytmach symulacyjnych AI) niezwykle przydatną do czyszczenia pamięci po wykonaniu obliczeń przez AI – po wykonaniu obliczeń i wyznaczeniu ruchu usuwa się np. potencjalne przyszłe plansze z algorytmów symulacyjnych AI. Zmienna ac musi być jako pierwsza zadeklarowana w strukturze, gdyż często wykonujemy rzutowanie tych struktur aby łatwiej allokować /deallokować pamięć.

typedef struct AllocChain {

gboolean free;

/\* Is this object unallocated? \*/

unsigned int id;

/\* Each object has a unique id \*/

struct AllocChain \*next;

/\* Next object in the chain \*/

} AllocChain;

typedef struct Board {

AllocChain ac;

/\* Allocation chain must be the first member \*/

unsigned int moves\_left;

/\* How many moves the current player has left \*/

struct Board \*parent;

/\* The board preceeding this one in history \*/

gboolean won;

BCOORD win\_x1, win\_y1, win\_x2, win\_y2;

/\* On won boards, used to indicate where the winning line is \*/

PIECE turn;

/\* Whose turn it is on this board \*/

BCOORD move\_x, move\_y;

/\* The move to the next Board in history \*/

PIECE data[];

} Board;

/\* The board structure represents the state of the game board. Do NOT preserve

board pointers across games. \*/

Z punktu widzenia optymalności silnika niezwykle ważne jest jak trzymane są konkretne pola planszy. Tutaj jest to zwykła tablica o nazwie data, która trzyma wartości PIECE, które jak wiemy z poprzedniego podrozdziału są tak naprawdę typu int. Reprezentacja ta nie jest więcj optymalna jak byłby np. bitboard, trzeba jednak zauważyć, że ma pewne zalety [43] [44] i obliczenia / funkcje na niej działające są dzięki temu w miarę proste.

Do trzymania stanu użyto po prostu zmiennych globalnych typów opisanych wcześniej ze słówkę extern – tab aby w każdym pliku z dyrektywą include do shared.h można było się do tych zmiennych odnosić.

extern AllocChain \*board\_root;

extern gsize board\_mem;

/\* Variables for the allocation chain \*/

extern Board \*board;

/\* This is the current board. Do NOT modify it, that's cheating. :) \*/

extern int board\_size, board\_stride, move\_no, connect\_k, place\_p, start\_q;

/\* Board size (for all boards), moves in the game, connect\_k to win, place\_p

moves at a time, black has start\_q moves on the first move; do NOT modify

these directly! \*/

Ostatnim ciekawym fragmentem kodu (poza definicjami struktur dla AI, o czym będzie w dalszym podrozdziale) są funkcje z dyrektywą inline dla wydajności i makra służące do wygodnego dostępu do pól planszy do gry.

static inline PIECE piece\_at(const Board \*b, BCOORD x, BCOORD y)

{

return b->data[(y + 1) \* board\_stride + x + 1];

}

/\* Returns the piece at (x, y) on board b. If the coordinates are out of range,

this function will return PIECE\_ERROR. \*/

static inline void place\_piece\_type(Board \*b, BCOORD x, BCOORD y, PIECE type)

{

b->data[(y + 1) \* board\_stride + x + 1] = type;

}

#define place\_piece(b, x, y) place\_piece\_type(b, x, y, (b)->turn)

#define place\_threat(b, x, y, n) place\_piece\_type(b, x, y, PIECE\_THREAT(n))

/\* Places a piece on board b, overwriting any piece that was previously in that

place \*/

Z powodu użycia tablicy jednowymiarowej zamiast dwuwymiarowej oraz dodatkowego „paska błędu” wokół planszy niezbędne są pewne przeliczenia. Zmienna board\_stride reprezentuje rozmiar planszy z uwzględnieniem szerokości „paska błędu”, czyli jest to rozmiar planszy powiększony o dwa. Łatwo sprawdzić, że funkcje działają poprawnie próbując podstawić za y lub x wartość 0.

### Plik state.c i funkcje modyfikujące stan

W pliku state.c znajduje się właściwa deklaracja, implementacja i ustawienie zmiennych używanych do trzymania globalnego stanu gry, dostępnych z niemal każdego pliku w projekcie za pomocą opisywanego w poprzednim podrodziale pliku nagłówkowego. Znajdują się to implementacje funkcji „globalnych”, zadeklarowanych w pliku shared.h jak i implementacje funkcji, które muszą być dostępne z punktu widzenia interfejsu użytkownika i są zadeklarowane w pliku connectk.h. Poniżej przedstawiono zmienne reprezentujące stan i parametry gry.

Board \*board;

AllocChain \*board\_root = NULL;

int board\_size, board\_stride, move\_no, move\_last,

connect\_k = 6, place\_p = 2, start\_q = 1;

gsize board\_mem = 0;

Inicjalizacja i alokacja pamięci na planszę to jeden z pierwszych kroków nowej rozgrywki. W poniżej przedtsawionych dwóch funkcjach widać cały proces z m.in. ustawieniem wokół planszy pól typu PIECE\_ERROR o czym pisano wcześniej.

static void board\_init(Board \*b)

{

memset((char\*)b + sizeof (AllocChain), 0, sizeof (Board) -

sizeof (AllocChain));

}

AllocChain \*board\_alloc(AllocChain \*ac)

{

Board \*b = (Board\*)ac;

int i;

/\* Clear the old board \*/

if (b) {

for (i = 1; i <= board\_size; i++)

memset(b->data + board\_stride \* i + 1, 0,

board\_size \* sizeof (PIECE));

board\_init(b);

return (AllocChain\*)b;

}

/\* New boards are allocated with a 1-tile wide boundary of PIECE\_ERROR

around the edges \*/

b = (Board\*)g\_slice\_alloc0(board\_mem);

memset(b->data, PIECE\_ERROR, sizeof (PIECE) \* board\_stride);

for (i = 1; i <= board\_size; i++) {

b->data[i \* board\_stride] = PIECE\_ERROR;

memset(b->data + board\_stride \* i + 1, 0,

board\_size \* sizeof (PIECE));

b->data[(i + 1) \* board\_stride - 1] = PIECE\_ERROR;

}

memset(b->data + board\_stride \* (board\_stride - 1), PIECE\_ERROR,

sizeof (PIECE) \* board\_stride);

board\_init(b);

return (AllocChain\*)b;

}

void board\_clean(Board \*b)

{

int y, x;

for (y = 0; y < board\_size; y++)

for (x = 0; x < board\_size; x++)

if (piece\_at(b, x, y) >= PIECES)

place\_piece\_type(b, x, y, PIECE\_NONE);

}

Kod jest dosyć trywialny tak samo jak powyżej przedstawione “czyszczenie” planszy.

Zmiana rozmiaru planszy z kolei jest znacznie bardziej złożonym procesem niż proste jej wyczyszczenie. W związku z tym, że w języku C nie ma garbage collectora, przydaje się tutaj zaimplementowany wcześniej AllocChain, który znacznie ułatwia usunięcie z pamięci kolejnych historycznych reprezentacji planszy (stanów gry). Oczywiście jeżeli wołamy funkcję z parametrem równym rozmiarowi planszy to nie robimy nic.

void set\_board\_size(unsigned int size)

{

if (board\_size == size)

return;

draw\_marks(NULL, FALSE);

achain\_dealloc(&board\_root, board\_mem);

achain\_dealloc(&aimoves\_root, aimoves\_mem);

board\_size = size;

board\_stride = size + 2;

board\_mem = sizeof (Board) + board\_stride \* board\_stride \*

sizeof (PIECE);

aimoves\_mem = sizeof (AIMoves) + size \* size \* sizeof (AIMove);

}

Funkcji achain\_dealloc wywoływana jest zarówno na wskaźniku na korzeń alokacji plansz gry jak i korzeń alokacji ruchów AI. W ten sposób czyścimy całą zaalokowaną w trakcie gry pamięć.

static void achain\_dealloc(AllocChain \*\*root, gsize mem)

{

AllocChain \*ac = \*root, \*ac\_next;

while (ac) {

ac\_next = ac->next;

g\_slice\_free1(mem, ac);

ac = ac\_next;

}

\*root = NULL;

}

Wreszczie nie pisząc już więcej o alokacji i dealokacji pamięci przechodzimy do dwóch prawdopodobnie najważniejszych funkcji w pliku state.c. Są to funkcje sprawdzające warunek wygranej.

gboolean check\_win\_full(const Board \*b, BCOORD x, BCOORD y,

BCOORD \*x1, BCOORD \*y1, BCOORD \*x2, BCOORD \*y2)

{

int i, c1, c2, xs[] = {1, 1, 0, -1}, ys[] = {0, 1, 1, 1};

PIECE type;

type = piece\_at(b, x, y);

if (type != PIECE\_BLACK && type != PIECE\_WHITE)

return FALSE;

for (i = 0; i < 4; i++) {

c1 = count\_pieces(b, x, y, type, xs[i], ys[i], NULL);

c2 = count\_pieces(b, x, y, type, -xs[i], -ys[i], NULL);

if (c1 + c2 > connect\_k) {

if (x1)

\*x1 = x + xs[i] \* (c1 - 1);

if (y1)

\*y1 = y + ys[i] \* (c1 - 1);

if (x2)

\*x2 = x - xs[i] \* (c2 - 1);

if (y2)

\*y2 = y - ys[i] \* (c2 - 1);

return TRUE;

}

}

return FALSE;

}

Funkcja check\_win\_full sprawdza czy świeżo po wykonaniu ruchu do współrzędnych x,y przez jednego z graczy ten ruch zapewnia mu wygraną. Zwraca również poprzez wskaźniki x1,x2,y1,y2 współrzędne linii dającej wygraną jeżeli ktoś wygrał. Kluczową częścią tej funkcji są wywowołania funkcji count\_pieces z współrzędnymi x,y i kolejnymi czterema kierunkami od tych współrzędnych z rosnącymi i malającymi współrzędnymi. Po podliczeniu ile pod rząd pól tego samego gracza występuje sprawdzamy czy jest ich więcej niż k (c1+c2 daje o 1 więcej, bo pole x,y liczymy w obu wywołaniach) – należy tutaj zauważyć różnicę od gry Gomoku, gdzie musiałoby być dokładnie k+1 [34]. Jeżeli jest ich więcej niż k, to wyznaczamy z pomocą tablic przesunięć xs i wartości ilości c1, c2 prostym przekształceniem matematycznym wartości współrzędnych wygrywającej linii i zwaracamy prawdę. W innymi wypadku po sprawdzeniu wszystkich kierunków od x,y zwracamy po prostu fałsz.

Jednocześnie widać możliwość pewnej optymalizacji, której autorzy programu niestety uniknęli. Jako, że przed wywołaniem tej funkcji wiemy, kto dokonał ruchu nie ma potrzeby sprawdzenia funkcją piece\_at typu pola na które dokonano ruchu. Typ możnaby po prostu przekazać do funkcji, co zwiększyłoby odrobinę wydajność programu biorąc pod uwagę jak często dla algorytmów symulacyjnych AI ta funkcja jest wywoływana na symulowanych planszach.

Poniżej zaprezentowano jeszcze funkcję count\_pieces, jako, że jest kluczowa dla cełgo procesu.

int count\_pieces(const Board \*b, BCOORD x, BCOORD y, PIECE type, int dx, int dy,

PIECE \*out)

{

int i;

PIECE p = PIECE\_NONE;

if (!dx && !dy)

return piece\_at(b, x, y) == type ? 1 : 0;

for (i = 0; x >= 0 && x < board\_size && y >= 0 && y < board\_size; i++) {

p = piece\_at(b, x, y);

if (p != type)

break;

x += dx;

y += dy;

}

if (out)

\*out = p;

return i;

}

Funkcja jest dosyć trywialna. Zliczamy wszystkie wystąpienia pola typu type od miejsca na planszy o współrzędnych x,y w kierunku zdefniowanym przez parametry dx,dy tak długo aż się skończy plansza lub wystąpi inny typ pola. Opcjonalnie jeżeli ostatni argument nie był nullem możemy zwrócić typ pola które zatrzymało nasze zliczanie.

Kolejne funkcje służą do reprezentacji współrzędnych w formie alfanumerycznej – np. b23 to inaczej (1,23). Mogłoby to być przydatne do komunikacji z GUI w formie ustandaryzowanego standardu takiego jak UCI w przypadku szachów [45] i w opisywanym wcześniej Stockfish’u. Niestety gra Connect-6 jest stosunkowo młoda i nie powstały jeszcze ani ustandaryzowane protokoły komunikacji ani tym bardziej z nich korzystające, niezależne od silnika programy GUI [35]. W programie jest to jednak wykorzystywane do generaowania i wczytywania ruchów z plików tekstowych, funkcje są wywoływane w ten sposób w pliku projektu file.c Poniżej funkcja zamieniająca współrzędną na literkę.

/\* Convert a boord coordinate to alpha representation \*/

const char \*bcoord\_to\_alpha(BCOORD x)

{

static char buf[2][32];

static int which;

int i, divisor = 26;

which = !which;

for (i = 0; i < sizeof (buf[which]) - 1; i++) {

div\_t result;

result = div(x, divisor);

buf[which][i] = 'a' + result.rem \* 26 / divisor;

if (i)

buf[which][i]--;

x -= result.rem;

if (!x)

break;

divisor \*= 26;

}

buf[which][i + 1] = 0;

return g\_strreverse(buf[which]);

}

// Get a string representation of board x/y coordinates (d7, h16, etc)

const char \*bcoords\_to\_string(BCOORD x, BCOORD y)

{

static char buf[2][32];

static int which;

which = !which;

g\_snprintf(buf[which], sizeof (buf[which]), "%s%d",

bcoord\_to\_alpha(x), board\_size - y);

return buf[which];

}

/\* Convert a string representation to coordinates \*/

void string\_to\_bcoords(const char \*str, BCOORD \*x, BCOORD \*y)

{

\*x = 0;

\*y = 0;

while (\*str && \*str >= 'a' && \*str <= 'z') {

\*x \*= 26;

\*x += \*str - 'a';

str++;

}

while (\*str && \*str >= '0' && \*str <= '9') {

\*y \*= 10;

\*y += \*str - '0';

str++;

}

if (\*y)

\*y = board\_size - \*y;

}

Kolejne powyżej zaprezentowane funkcje to konwersje współrzędnych na łańcuchy znaków i vice versa.

Z ciekawostek program trzyma całą historię rozgrywki wraz z opcjami powrotu do konkretnego miejsca.

static GPtrArray \*history = NULL;

Board \*board\_at(unsigned int move)

{

if (move >= history->len)

return NULL;

return (Board\*)g\_ptr\_array\_index(history, move);

}

void go\_to\_move(unsigned int move)

{

Board \*board2;

if (!history)

history = g\_ptr\_array\_sized\_new(32);

if (move > history->len)

move = history->len;

if (move == history->len) {

board2 = board\_new();

if (board)

board\_copy(board, board2);

g\_ptr\_array\_add(history, board2);

board2->parent = board;

} else

board2 = (Board\*)g\_ptr\_array\_index(history, move);

board = board2;

move\_no = move;

if (move\_no > move\_last)

move\_last = move\_no;

}

void clear\_history(unsigned int from)

{

int i;

if (!history)

return;

if (from >= history->len) {

g\_warning("Attempted to clear future history");

return;

}

for (i = from; i < history->len; i++)

board\_free(g\_ptr\_array\_index(history, i));

g\_ptr\_array\_remove\_range(history, from, history->len - from);

move\_last = from;

}

### Sztuczna inteligencja – ogólnie

Program Connect-k powstał w pewnym sensie jako pole testów różnych technik AI do problemu rozwiązywania gier z serii Connect [37]. W związku z tym, istnieje w sumie aż 8 różnych algorytmów sztucznej inteligencji zaimplementowanych na potrzeby programu, z czego 6 jest udostępnionych przez interfejs graficzny a przynajmniej 3 są na tyle silne, że mogą być wyzwaniem nawet dla ponadprzeciętnego gracza. Zaimplementowane algorytmy posortowane względem złożoności i efektywności:

* ai\_random (stawia losowy ruch na wolne pole),
* ai\_adjacent (naiwne podejście do próby zbudowania sekwencji k-pod-rząd),
* ai\_threats (strategia oparta o zagrożenie, podobne do gry średnio doświadczonego człowieka),
* ai\_windows (ciekawe podejście polegające na zastosowaniu przesuwającego się okna poszukiwań wystąpień pod rząd pól tego samego gracza),
* ai\_priority (priorytetyzacja ruchów zwróconych przez ai\_threats),
* ai\_sequences (złożone podejście polegające na budowaniu konfiguracji, które potencjalnie mogą stać się później liniami wygrywającymi),
* DFS alpha-beta
* ai\_mesh (ciekawe podejście, siatka gęstości pól zajętych),
* ai\_monte\_carlo (metoda Monte Carlo).

Pierwsze dwa są trywialne, więc nie warte omawiania. Algorytmy ai\_windows i ai\_priority nie są z bliżej nieznanego powodu nie są uwzględnione w interfejsie użytkownika (być może są jeszcze niedokończone lub występują w nich błędy), ich analiza nie ma więc również większego sensu. Nawet jeżeli byłby sens omawiać wszystkie to należy zauwżyć, że niniejsza praca nie powinna za bardzo skupiać się na AI – tylko na silnikach programów grających i ich implementacji co wraz z AI ma wpływ na wydajność całego programu grającego ale w tej pracy ineteresujący jest wpływ implementacji silnika programu grającego a nie jego AI na wydajność. Ostatecznie zadecydowano więc, że zostaną omówione jedynie trzy z tych algorytmów w dalszej części pracy: ai\_threats, ai\_sequences, ai\_monte\_carlo.

Zanim dokonana zostanie analiza wspomnianych algorytmów, należy opisać nieco struktury i metody dedykowane AI i współdzielone przez wszystkie te algorytmy. Znajdziemy je przede wszystkim w plikach state.c, ai.c oraz shared.h.

Podstawą są struktry AIMove i AIMoves odpowiedzialne za reprezentacje ruchu AI oraz sekwencji ruchów AI. Ta druga struktura trzymając AllocChain przypomina nieco w swojej koncepcji strukturę planszy opisywaną kilka podrozdziałów wcześniej. Istotnie możliwość alokacji i dealokacji łańcuchów ruchów AI jest przydatna w niektórych z algorytmów/ Struktura AIMove posiada jedynie współrzędne (unsigned int) oraz wagę (int).

typedef struct {

AIWEIGHT weight;

BCOORD x, y;

} AIMove;

/\* AIs return an array filled with these \*/

typedef struct AIMoves {

AllocChain ac;

/\* Allocation chain must be the first member \*/

unsigned int len;

/\* Number of members in data \*/

AIWEIGHT utility;

/\* A composite utility value set by some AIs when producing a moves

list \*/

AIMove data[];

/\* Array of AIMove structures \*/

} AIMoves;

/\* An array type for holding move lists \*/

Istotne są też niektóre z góry istniejące wagi przydzielane konkretnym ruchom w zależności od tego co robią.

/\* Some guideline values for move weights: \*/

#define AIW\_MAX INT\_MAX /\* largest weight value \*/

#define AIW\_MIN INT\_MIN /\* smallest weight value \*/

#define AIW\_WIN AIW\_MAX /\* this move wins the game \*/

#define AIW\_DEFEND (AIW\_WIN - 2) /\* defends from an opponent win \*/

#define AIW\_NONE 0 /\* does nothing \*/

#define AIW\_DRAW AIW\_NONE /\* draw game \*/

#define AIW\_LOSE (-AIW\_WIN) /\* this move loses the game \*/

#define AIW\_THREAT\_MAX 262144 /\* value of an immediate threat \*/

Liczne funkcje powiązane z alokacją I dealokacją łańcuchową ruchów sztucznej inteligencji tutaj już zostana pominięte, jako, że są dosyć podobne do analogicznych funkcji dla planszy. Dwie podobne do siebie funkcje, które służą do dodawania lub podłączania nowych ruchów do struktury AIMoves przedstawiono poniżej.

void aimoves\_add(AIMoves \*moves, const AIMove \*move)

{

int i;

i = aimoves\_find(moves, move->x, move->y);

if (i < 0) {

if (moves->len >= board\_size \* board\_size)

g\_warning("Attempted to add a move to a full AIMoves");

else

moves->data[moves->len++] = \*move;

} else

moves->data[i].weight += move->weight;

}

void aimoves\_append(AIMoves \*moves, const AIMove \*move)

{

int i;

if (move->x >= board\_size || move->y >= board\_size)

return;

for (i = 0; i < moves->len; i++) {

AIMove \*aim = moves->data + i;

if (aim->x == move->x && aim->y == move->y) {

aim->weight = move->weight;

return;

}

}

if (moves->len >= board\_size \* board\_size) {

g\_warning("Attempted to append a move to a full AIMoves");

return;

}

moves->data[moves->len++] = \*move;

}

Jak uważny czytelnik może zauważyć funkcje różnią się jedynie tym, że aimoves\_add może dodać wagę do już istniejącego ruchu, podczas gdy aimoves\_append z definicji umieszcza nowy ruch, więc jeżeli taki sam już istnieje to waga zostaje podmieniona. Pierwszy znajduje zastosowanie w metodzie Monte Carlo i z siatkami gęstości, druga w metodzie z oknem przesuwnym, losowej, ai\_adjacent i przy łączeniu struktur AIMoves. Warto też zauważyć, że struktura AIMoves może przechowywać maksymalnie tyl ruchów ile jest pól na planszy, co jednej strony jest oczywiste, z drugiej jeszcze bardziej upadabnia ją w koncepcji do strukutry planszy.

W przeszukiwaniu DFS spore znaczenie ma też funkcja zwracająca najlepszy możliwocy ruch ze struktury AIMoves. Wykonuje ona sortowanie po wagach i wybiera losowy indeks ze zbioru indeksów ruchów o najwyższej wadze (gdyby więcej niż jeden ruch był najlepszy).

int aimoves\_choose(AIMoves \*moves, AIMove \*move)

{

int i = 0, top = 0;

if (!moves || !moves->len)

return 0;

aimoves\_sort(moves);

for (top = 0; top < moves->len &&

moves->data[top].weight == moves->data[0].weight; top++);

if (top)

i = g\_random\_int\_range(0, top);

\*move = moves->data[i];

return 1;

}

Duże znaczenie ma więc wywowałanie funkcji sortującej aimoves\_sort.

void aimoves\_sort(AIMoves \*moves)

{

qsort(moves->data, moves->len, sizeof (AIMove), aimoves\_compare);

}

Jak widać jest to zwykły quicksort z wywołaniem poniższej funkcji porównującej.

int aimoves\_compare(const void \*a, const void \*b)

{

return ((AIMove\*)b)->weight - ((AIMove\*)a)->weight;

}

Sortowanie przebiega oczywiście po wagach ruchów.

Z punktu widzenia Monte Carlo gdzie wstępnie interesuje nas n najlepszych ruchów wyznaczonych z innego algorytmu ważna jest też poniżej zaprezentowana metoda aimoves\_crop, która zwraca n lub mniej najlepszych ruchów.

void aimoves\_crop(AIMoves \*moves, unsigned int n)

{

if (moves->len < n)

return;

aimoves\_shuffle(moves);

aimoves\_sort(moves);

moves->len = n;

}

Jako, że algorytm quicksort używany do sortowania ruchów w metodzie aimoves\_sort ma pesymistyczną złożoność O(n2) w przypadku tablicy już posortowanej, autorzy na wszelki wypadek najpierw „przetasowują” tablicę ruchów a potem wysyłają do sortowania. Również tutaj możnaby się pokusić o drobną optymalizację i np. w funkcji sort sprawdzać czy tablica już jest posortowana.

W dalszej części kodu mamy również metody duplikujące, wyszukające (ruch lub zakres wag), łączące z wykorzystaniem aimoves\_append jak i scalające a nawet odejmujące struktury AIMoves, jednak ich implementacja nie jest szczególnie ciekawa ani z punktu widzenia analizy wydajnościowej ani z punktu widzenia trudności.

W usuwaniu konkretnego indeksu z polaga data struktury AIMoves posłużono się dorbną optymalizacją polegającą na szybkim usunięciu wartości z indeksu wstawiając tam ostatni element i zmniejszając długość tablicy o 1.

void aimoves\_remove\_index\_fast(AIMoves \*moves, int i)

{

if (moves->len > i)

moves->data[i] = moves->data[moves->len - 1];

moves->len--;

}

void aimoves\_remove(AIMoves \*moves, BCOORD x, BCOORD y)

{

int i;

for (i = 0; i < moves->len; i++) {

AIMove \*aim = moves->data + i;

if (aim->x == x && aim->y == y) {

aimoves\_remove\_index\_fast(moves, i);

return;

}

}

}

Drobna optymalizacja ale dla algorytmów AI znaczy wiele, ponowna alokacja pamięci przy każdym usunięciu ruchu w przypadku Monte Carlo, który gra 1000 razy i w każdej grze po każdym ruchu usuwa ze struktur dostępnych ruchów ten świeżo wykonany, byłaby na tyle kosztowane, że algorytm stałby się bezużyteczny.

### Strategia oparta na zagrożeniu

//TODO: Do zrobienia lub zrezygnować.

### Sekwencje

//TODO: Do zrobienia lub zrezygnować.

### Monte Carlo

Inspiracją do zastosowania metody Monte Carlo w programie Connect-k, były dla autorów wcześniejsze próby zastosowania symulowanego wyżarzania do gry w Go [37]. Po genracji niewielkiej liczby ruchów (np. 10) za pomocą innego algorytmu (np. sekwencji) pewna stosunkowo duża liczba gier losowych (np. 1000) jest odgrywana dla wzbogaconej o konkretny ruch planszy. Ruch dla którego największa liczba gier losowych jest wygranych dla obecnego gracza zostaje wybrany.

Monte Carlo generuje w praktyce silne posunięcia ale spędza sporo czasu obliczeniowego wybierając ruch. To oczywiście wynika z faktu, że pewnym sensie jest to jednak technika brute-force, tyle tylko, że przeszukujemy ograniczoną ilość losowych gier zamiast wszystkie możliwe. Bardzo duża przestrzeń stanów ma niebagatelny wpływ na wydajność. Poniżej przedstawiono obrazek planszy z programu, gdzie po uruchomieniu metody Monte Carlo dla czterech ruchów wygenerowanych z algorytmu „sekwencji” zostanie wybrany tak naprawdę ten sam ruch (kolor pomarańczowy - wybrany, bordowy to analizowane), który wybrałaby sekwencja.



Rysunek 2.6. Monte Carlo

Poniżej przedstawiono kod metody ai\_monte\_carlo, odpowiedzialną za zwrócenie MONTE\_N lub mniej (zdefiniowane na 10) najlepszych według metody ruchów. Jak widać metoda alokuje pamięc na nową planszę, pozyskuje wstępnie dobre ruchu z metody move\_utilities, wybiera z nich MONTE\_N najlepszych. Następnie odpowiednio dla każdego ruchu:

* tworzy kopię planszy,
* wykonuje na niej ruch,
* jeżeli ruch jest wygrywający to przydziela mu wagę MONTE\_NUM\_RUNS (czyli tak jakby wygrał wszystkie gry losowe),
* jeżeli nie to rozgrywa MONTE\_NUM\_RUNS (domyślnie 1000) gier losowych i przydziela ruchowi wagę zgodnie z ilością wygranych gier - 1 za każdą wygraną,
* pole uitility struktury moves przechowuje ogólną liczbę wygranych gier losowcyh przez wszystkie ruchu.

Na koniec jest zwalniana pamięć i zwracana jest struktura zawierająca wszystkie analizowane ruchu wraz z przydzielonymi wagami.

AIMoves \*ai\_monte\_carlo(const Board \*b)

/\* chooses the best move based on which one wins the most random games \*/

{

int i, k, wins, len;

Board \*new\_board = board\_new();

AIMove move;

AIMoves \*moves = move\_utilities(b);

moves->utility = 0;

aimoves\_crop(moves, MONTE\_N);

len = moves->len;

for (i = 0; i < len; i++) {

move = moves->data[i];

board\_copy(b, new\_board);

place\_piece(new\_board, move.x, move.y);

if (check\_win(new\_board, move.x, move.y)) {

move.weight = MONTE\_NUM\_RUNS;

moves->data[i] = move;

moves->utility += MONTE\_NUM\_RUNS;

} else {

/\* run the monte carlo trials \*/

wins = 0;

for (k = 0; k < MONTE\_NUM\_RUNS; k++) {

wins += mc\_run(new\_board);

}

move.weight = wins;

moves->data[i] = move;

moves->utility += wins;

}

}

board\_free(new\_board);

return moves;

}

Należy jeszcze pokazać metodę mc\_run, która jest odpowiedziala na rozegranie gry losowej na zmodyfikowanej o jeden, nowy – analizowany ruch.

int mc\_run(Board \*b)

/\* plays a random game on board b, returns 1 if the current player wins

and 0 otherwise \*/

{

Board \*new\_board = board\_new();

board\_copy(b, new\_board);

AIMove move;

AIMoves \*empties;

empties = empty\_cells(new\_board);

int tries = 0;

int i;

while ( TRUE ) {

/\* if the board filled up, start over \*/

if (empties->len == 0) {

board\_copy(b, new\_board);

empties = empty\_cells(new\_board);

tries++;

if (tries == 10) {

g\_debug("bailing");

board\_free(new\_board);

aimoves\_free(empties);

return 0;

}

}

i = g\_random\_int\_range(0, empties->len);

move = empties->data[i];

aimoves\_remove\_index\_fast(empties, i);

place\_piece(new\_board, move.x, move.y);

if (check\_win(new\_board, move.x, move.y)) {

if (new\_board->turn == board->turn) {

board\_free(new\_board);

aimoves\_free(empties);

return 1;

}

else {

board\_free(new\_board);

aimoves\_free(empties);

return 0;

}

}

new\_board->moves\_left--;

if (new\_board->moves\_left == 0) {

new\_board->turn = other\_player(new\_board->turn);

new\_board->moves\_left = place\_p;

}

}

}

Aby nie tracić cennego czasu obliczeniowego, dla planszy dla której po 10 losowych grach nie osiągnięto wygranej AI ani przeciwnika zwracana jest po prostu wartość 0 – czyli AI nie wygrało. Ruchy stawiane przez graczy są losowe, ponieważ ze wszystkich pustych pól na planszy zwracacanych przez metodę empty\_cells wybieramy za każdym razem to o losowym indeksie.

# Implementacja generatora silników wybranej gry

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## Problem wyboru gry

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

### Początkowy wybór – szachy

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.



Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

### Wybór ostateczny – Connect6, Gomoku, (m,n,k,p,q)

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## Architektura projektu

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld. Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld. Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

## Generator silników - (m,n,k,p,q)EnginesGenerator

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## Silnik gry w C++ z placeholderami - (m,n,k,p,q)GameEngine

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

## Aplikacja do interfejsu użytkownika - (m,n,k,p,q)GUI

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

## Aplikacja do analizy wydajnościowo-poprawnościowej generowanych silników - (m,n,k,p,q)EnginesAnalyzer

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

# Analiza wydajnościowo-poprawnościowa zaimplementowanego generatora silników gier

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.

# Podsumowanie

Zdefiniowane na początku cele pracy udało się zrealizować z sporym zapasem. Impelementacja generatora silników gier logicznych okazała się wyzwaniem ale ostatecznie działa on w pełni poprawnie a generowane silniki wykorzystują zalety nowoczesnych architektur procesorów oraz efektywną reprezentację stanów gry w pamięci. Zbadanie wydajności i poprawności dzięki zaimplementowaniu specjalnego programu testującego generowane silniki zostało zrealizowane z nawiązką. W dodatku jest możliwe łatwe dopisywanie przypadków testowych, które ma analizować aplikacja-tester. Obszerny przegląd i analiza dostępnych silników popularnych gier logicznych umożliwiły poznanie najnowszych trendów w implementacjach programów grającyh i zdobycie niezbędnej wiedzy do implementacji generatora.

Wybór gier z rodziny (m,n,k,p,q) umożliwł bogactwo parametrów do modyfikacji w generatorze. Program z pewnością umożliwiłby badaczom lepsze poznanie gier z tej rodziny i zastanowienie się nad ich rozwiązywalnością zależnie od zdefiniowanych parametrów. Jedynie pozostaje niedosyt w zaimplementowanych algorytmach sztucznej inteligencji umieszczanych w generowanych silnikach. Wydaje się, że należaloby generować AI bardziej z uwzględnieniem parametrów. Z pewnością AI to spore pole do dalszego rozwoju generatora.

W dalszych pracach możnaby także pokusić się o większy stopień skomplikowania parametrów w generowanych silnikach. Np. sensownym pomysłem byłoby umożliwienie generacji silników z nieskończonym parametrem m lub n. Oczywiście wymagałoby to dostosowania aplikacji GUI, ale z pewnością nie jest to niemożliwe a badania nat takimi grami mogłoby być niezwykle ciekawe. Idąc dalej możnaby definiować niektóre parametry jako zależne od tury gry itp.

Jakkolwiek by na to nie patrzeć możliwości dalszego rozwoju samego generatora a nawet całej pracy jest wiele. Jednym z prostszych zadań, które nalezałoby w przyszłości zrobić byłoby stworzenie ustandaryzowanego protokołu łączności pomiędzy programem grającym a GUI dla gier z rodziny (m,n,k,p,q) tak jak UCI dla szachów. Obecne podejście ze znanym interfejsem wydaje się mieć pewne wady, np. interfejs nie jest nigdzie publicznie wystawiony.

Należy też podkreślić, że praca chociaż nie wyczerpała tematu to jednak dzięki swojej objętości podjęła najważniejsze wątki w tematyce. Widać też, że chociaż niektóre cechy silników są wspólne niezależnie od gry to jednak niezwykle ważna jest w implementacji tzw wiedza domenowa. Wiedza to może być bardzo obszerna, zwłascza w przypadku złożonych gier logicznych jak choćby szachy czy Go. Niemniej jednak autor nie mając wcześniej zbyt dużej wiedzy w tematyce opanował przynajmniej część tej wiedzy na potrzeby pracy, więc nie jest to nieosiągalne.

Przyszłość silników gier logicznych należy też upatrywać w eksperymentowaniu z różnymi parametrami (ang. „tuning parameters” lub „tuning values”) i nieustannym testowaniu rezultatów. Świetnie się tutaj sprawdza rozproszone środowisko testowe takie jak Fishtest używany przez Stockfisha. Kto wie, może następne wielkie odkrycie w tematyce rozwiązywania gier zostanie właśnie dokonane podczas takich niewinnych eksperymentów i nie zostanie przeoczone ponieważ ktoś postanowi je przetestować w podobnym rozproszonym środowisku testowym.

# Wykaz literatury

1. Łagodne wprowadzenie do analizy algorytmów, Marek Kubale, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2016, ISBN: 978-83-7348-652-2
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Computer_chess>, (data dostępu 02.04.2016)
3. <http://en.wikipedia.org/wiki/Human–computer_chess_matches>, (data dostępu 02.04.2016)
4. <http://www.fierz.ch/history.htm>, (data dostępu 02.04.2016)
5. <https://en.wikipedia.org/wiki/Top_Chess_Engine_Championship>, (data dostępu 02.04.2016)
6. <https://en.wikipedia.org/wiki/International_Computer_Games_Association>, (data dostępu 02.04.2016)
7. <https://en.wikipedia.org/wiki/Computer_Olympiad>, (data dostępu 02.04.2016)
8. <https://icga.leidenuniv.nl/?page_id=1112>, (data dostępu 02.04.2016)
9. Zasady XIX Olimpiady Gier Komputerowych ICGA  
   <https://icga.leidenuniv.nl/wp-content/uploads/2016/03/Rules-ICGA-events-2016-3.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
10. <https://en.wikipedia.org/wiki/Solved_game>, (data dostępu 02.04.2016)
11. <https://icga.leidenuniv.nl/?page_id=1315>, (data dostępu 02.04.2016)
12. <http://senseis.xmp.net/?ZenGoProgram>, (data dostępu 02.04.2016)
13. <https://book.mynavi.jp/tencho6/>, (data dostępu 02.04.2016)
14. <https://boardgamegeek.com/thread/609440/mohex-available-download>, (data dostępu 02.04.2016)
15. <http://benzene.sourceforge.net>, (data dostępu 02.04.2016)
16. <https://github.com/lukaszlew/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
17. <https://github.com/ala/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
18. <https://github.com/kdudzik/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
19. <https://github.com/krzysiocrash/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
20. <https://github.com/theolol/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
21. <https://github.com/bartoszborkowski/mimhex>, (data dostępu 02.04.2016)
22. <https://github.com/krzysiocrash/patterns>, (data dostępu 02.04.2016)
23. <https://github.com/qelo/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
24. <https://github.com/jakubpawlewicz/MiMHex>, (data dostępu 02.04.2016)
25. <https://en.wikipedia.org/wiki/Komodo_(chess)> , (data dostępu 02.04.2016)
26. <https://komodochess.com>, (data dostępu 02.04.2016)
27. <https://komodochess.com/Komodo10-50a.htm>, (data dostępu 02.04.2016)
28. <https://komodochess.com/Komodo9-43a.htm>, (data dostępu 02.04.2016)
29. <https://komodochess.com/pub/komodo-8.zip>, (data dostępu 02.04.2016)
30. <https://stockfishchess.org>, (data dostępu 02.04.2016)
31. <https://github.com/official-stockfish/Stockfish>, (data dostępu 02.04.2016)
32. <https://en.wikipedia.org/wiki/M,n,k-game>, (data dostępu 02.04.2016)
33. <https://en.wikipedia.org/wiki/Tic-tac-toe>, (data dostępu 02.04.2016)
34. <https://en.wikipedia.org/wiki/Gomoku>, (data dostępu 02.04.2016)
35. <https://en.wikipedia.org/wiki/Connect6>, (data dostępu 02.04.2016)
36. A New Family of k-in-a-row Games, I-Chen Wu and Dei-Yen Huang, Department of Computer Science and Information Engineering, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan  
    <http://www.connect6.org/k-in-a-row.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
37. <http://risujin.org/connectk/>, (data dostępu 02.04.2016)
38. <http://www.connect6.org>, (data dostępu 02.04.2016)
39. <https://bitbucket.org/BadRobot/connect6/src>, (data dostępu 02.04.2016)
40. Kod źródłowy programu Connect-k, najnowsza wersja stabilna v2.0, czerwiec 2007  
    <http://risujin.org/pub/connectk/connectk-2.0.tar.gz>, (data dostępu 02.04.2016)
41. <http://stackoverflow.com/questions/671703/array-index-out-of-bound-in-c/671709#671709>, (data dostępu 02.04.2016)
42. <https://msdn.microsoft.com/en-US/library/system.indexoutofrangeexception(v=vs.110).aspx>, (data dostępu 02.04.2016)
43. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bitboard>, (data dostępu 02.04.2016)
44. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_field>, (data dostępu 02.04.2016)
45. <https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Chess_Interface>, (data dostępu 02.04.2016)
46. <https://en.wikipedia.org/wiki/Stockfish_(chess)>, (data dostępu 02.04.2016)
47. <http://www.computerchess.org.uk/ccrl/404/>, (data dostępu 02.04.2016)
48. <http://www.computerchess.org.uk/ccrl/4040/>, (data dostępu 02.04.2016)
49. <http://www.computerchess.org.uk/ccrl/404FRC/>, (data dostępu 02.04.2016)
50. <http://en.wikipedia.org/wiki/64-bit_computing>, (data dostępu 02.04.2016)
51. <https://en.wikipedia.org/wiki/SSE4#POPCNT_and_LZCNT>, (data dostępu 02.04.2016)
52. <https://chessprogramming.wikispaces.com/Stockfish>, (data dostępu 02.04.2016)
53. <https://chessprogramming.wikispaces.com/Square+Mapping+Considerations#LittleEndianRankFileMapping>, (data dostępu 02.04.2016)
54. Wykład “How do modern chess engines work?” - Daylen Yang, University of California, Berkeley  
    <https://www.youtube.com/watch?v=pUyURF1Tqvg>, (data dostępu 02.04.2016)
55. <http://www.talkchess.com/forum/viewtopic.php?start=0&t=50220>, (data dostępu 02.04.2016)
56. <https://chessdailynews.com/im-erik-kislik-analyzes-the-tcec-superfinal-in-depth/>, (data dostępu 02.04.2016)
57. <https://en.wikipedia.org/wiki/Bit_Manipulation_Instruction_Sets>, (data dostępu 02.04.2016)
58. <https://en.wikipedia.org/wiki/Find_first_set>, (data dostępu 02.04.2016)
59. <https://en.wikipedia.org/wiki/Intrinsic_function>, (data dostępu 02.04.2016)
60. <http://computerchess.org.uk/ccrl/404/cgi/compare_engines.cgi?family=Stockfish&print=Rating+list&print=Results+table&print=LOS+table&print=Ponder+hit+table&print=Eval+difference+table&print=Comopp+gamenum+table&print=Overlap+table&print=Score+with+common+opponents>
61. <http://fastgm.de/60+0.60%20-%20E5450.html>
62. http://tests.stockfishchess.org/tests
63. <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/hex/#MoHex>, (data dostępu 02.04.2016)
64. <http://www.trmph.com/hexwiki/MoHex.html>, (data dostępu 02.04.2016)
65. Kod źródłowy programu MoHex w ramach pakietu benzen, wersja v0.9, wrzesień 2010  
    <http://downloads.sourceforge.net/project/benzene/benzene/0.9/benzene-0.9.0.tar.gz>
66. Kod źródłowy programu MoHex w ramach pakietu benzen, wersja rozwojowa, listopad 2011  
    <https://sourceforge.net/p/benzene/benzene/ci/master/tree/src/mohex/>
67. Dokumentacja programu MoHex w ramach pakietu benzen  
    <http://benzene.sourceforge.net/benzene-doc/html/mohexmainpage.html>
68. <http://www.game-ai-forum.org/icga-tournaments/program.php?id=555>, (data dostępu 02.04.2016)
69. <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/publications.html>, (data dostępu 02.04.2016)
70. B. Arneson, R. Hayward, P. Henderson: MoHex Wins Hex Tournament (14th Computer Olympiad 2009 Pamplona), ICGA Journal 32-2 (June 2009) 114-116  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/rptPamplona.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
71. B. Arneson, R. Hayward, P. Henderson: MoHex Wins Hex Tournament (16th Computer Olympiad 2010 Kanazawa) ICGA Journal 33-3 (Sept 2010) 181-187  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/rptKanazawa.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
72. R. Hayward: MoHex Wins Hex Tournament, ICGA Journal 35-2 (June 2012) 124-127  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/rptTilburgrevised.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
73. S. Huang, B. Arneson, R. Hayward, M. Mueller, J. Pawlewicz: MoHex 2.0: a pattern-based MCTS Hex player, Proc. Computers and Games CG2013, Springer LNCS 8427 (2014) 60-71  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/m2.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
74. R Hayward, B Arneson, S-C Huang, J Pawlewicz: MoHex Wins Hex Tournament, ICGA Journal 36-3 (Sept 2013) 180-183  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/rptYokohama.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)
75. R Hayward, J Pawlewicz, K Takada, T Van der Valk: MoHex Wins Hex Tournaments, ICGA Journal, 2015  
    <http://webdocs.cs.ualberta.ca/~hayward/papers/rptLeiden15.pdf>, (data dostępu 02.04.2016)

# Wykaz rysunków

[Rysunek 2.1. Graf zależności w programie Stockfish 14](#_Toc453636531)

[Rysunek 2.2. Mapowanie szachownicy na bitboard Little-Endian Rank-File [53] 15](#_Toc453636532)

[Rysunek 2.3. Uruchomione obecnie testy na Fishteście [62] 22](#_Toc453636533)

[Rysunek 2.4. Porównanie zmian wprowadzanych przez testowaną wersję [62] 22](#_Toc453636534)

[Rysunek 2.5. Graf zależności w programie Connect-k 23](#_Toc453636535)

[Rysunek 2.6. Monte Carlo 37](#_Toc453636536)

# Wykaz tabel

[**Tabela 2.1.** Wyniki turnieju "Top Chess Engine Championship" [5] 10](#_Toc453636476)

[**Tabela 2.2.** Wyniki w grze Go 9x9 [11] 11](#_Toc453636477)

[**Tabela 2.3.** Wyniki w grze Hex 11x11 [11] 11](#_Toc453636478)

[**Tabela 2.4.** Wyniki w grze Hex 13x13 [11] 11](#_Toc453636479)

[**Tabela 2.5.** Wyniki w grze Connect6 [11] 12](#_Toc453636480)

Dodatek A: Tytuł dodatku A

Ramadan kokokdad, dashjaf afjkashfjka i fala moko. Ragodago miko miko regajlsafjas, aksgsa jkla. Jakaakaka moranranin polo mdiasdoas.

Ja kaokkka hjfksahfja fsjdkhfas fsdkjfhsdjk vdsjvhds, hgjkdsgds, hgjdkshgjskdhgjksdhgjkasd i jakaa ahkgjsdhjkghasdjkgsadgds. Moja fhjadkfhsjdkfhui fhdsiufhdsui i jok. Hjhfahfsa hjafsaj i jaaa, hjaksfhkjsa jvskld.