



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO

Dipartimento di Informatica

Corso di Laurea Triennale in Informatica

TESI DI LAUREA

Dalla α lfa alla β eta

Una panoramica sulle moderne tecniche di realizzazione e lo stato dell'arte dei motori scacchistici

RELATORE

Prof. Fabio Palomba

Università degli studi di Salerno

CANDIDATO

Giuseppe Pagano

Matricola: 0512106337

Anno Accademico 2021-2022

"Many of us have either dreamed about, or had nightmares of, the possibilities artificial intelligence — of machines that were smarter than anyone in the human race. This may reach a fairly harmless fruition with chess-playing machines far stronger than the best human players. It would give a chance to observe the effect on humans before such machines, with even broader abilities, might pose a threat to the human ego"(Claude Shannon).

Sommario

Gli scacchi sono da sempre un gioco tanto affascinante quanto complesso ed è proprio questo che li rende un terreno fertile per l'introduzione di tecniche innovative di ricerca e valutazione. All'interno di questa tesi vengono affrontati gli algoritmi più noti e vengono discusse le idee alla base della loro efficacia per, infine, accennare allo stato dell'arte del mondo dei motori scacchistici. In particolare, vengono affrontati i concetti di mini-max e potatura alfa-beta, comuni alla quasi totalità degli algoritmi che tentano di risolvere giochi a turni quali scacchi e dama, e migliorie apportabili alla alfa-beta, applicate nel contesto degli scacchi computazionali ma generalizzabili per funzionare in un qualsiasi algoritmo mini-max. Infine, viene fornita un'idea generale su come costruire una funzione di valutazione adatta al gioco degli scacchi.

Indice	ii
Elenco delle figure	iv
1 Introduzione	1
1.1 Contesto applicativo	1
1.2 Motivazioni e obiettivi	2
1.3 Risultati ottenuti	3
1.4 Struttura della tesi	3
2 Progettazione e implementazione	4
2.1 Rappresentazione della scacchiera e dei pezzi	4
2.1.1 Introduzione	4
2.1.2 Rappresentazione della scacchiera Pezzocentrica	5
2.1.3 Rappresentazione della scacchiera Casellocentrica	6
2.2 Move Generation	8
2.2.1 Approcci alla generazione delle mosse	8
2.2.2 Perft	11
2.3 Ricerca	12
2.4 Valutazione	18
2.5 Libro delle aperture e Tablebase	21
3 Validazione preliminare	22

4 Stato dell'arte per Algoritmi di intelligenza artificiale e motori scacchistici per il gioco degli scacchi	26
4.1 Stockfish pre rete neurale	26
4.1.1 Struttura interna	26
4.2 AlphaZero	27
4.3 Stockfish-NNUE	27
5 Conclusioni e Sviluppi Futuri	29
Bibliografia	30
Ringraziamenti	31

Elenco delle figure

1.1	le 20 mosse iniziali possibili per il giocatore bianco ad inizio partita	3
2.1	Rappresentazione di una board 10x12; notare come le 2 traverse extra sopra e sotto siano necessarie per evitare accessi out of bounds in caso di cavalli posizionati sulla prima o ottava fila.	7
2.2	posizione d'esempio dove è possibile catturare en passant	9
2.3	posizione della figura 2.2 dopo aver catturato en passant	9
2.4	posizione d'esempio su una scacchiera	11
2.5	Bitboard di occupazione che codifica la figura 2.4	11
2.6	Output tipico di una funzione di Perft/divide, il numero di nodi al secondo (32.27M) può essere utilizzato come metrica prestazionale.	12
2.7	esempio di valori associati alle caselle della scacchiera per un cavallo conservati in un array del linguaggio C	20
3.1	Valore elo del motore sviluppato parallelamente a questa tesi ad ogni milestone di sviluppo	24

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Contesto applicativo

Gli scacchi sono un gioco di strategia deterministico¹ a somma zero² e ad informazione completa³ che si svolge su una tavola quadrata formata da 64 caselle, di due colori alternati, detta scacchiera, sulla quale ogni giocatore, contraddistinto da uno dei due colori (bianco o nero), dispone di 16 pezzi: un re, una regina, due alfieri, due cavalli, due torri e otto pedoni. L'obiettivo del gioco è dare scacco matto, ovvero minacciare la cattura del re avversario mentre egli non ha modo di rimuovere il re dalla sua posizione di pericolo alla sua prossima mossa.

¹Si definisce deterministico un gioco in cui gli stati assunti durante la partita sono determinati unicamente dalle azioni dei giocatori, si parla quindi di giochi in cui non vi è una componente aleatoria.

²Si definisce a somma zero un gioco in cui il guadagno o la perdita di un partecipante è perfettamente bilanciato da una perdita o un guadagno di un altro partecipante in una somma uguale e opposta.

³Si definisce ad informazione completa un gioco i cui stati sono completamente esplicati ai giocatori, si parla quindi di giochi dove entrambi i giocatori hanno accesso a tutte le informazioni riguardanti lo stato della partita, non vi sono quindi "carte coperte" o elementi di sorpresa.

1.2 Motivazioni e obiettivi

Gli scacchi, gioco nato in India attorno al 600 d.C.[1], sono da sempre uno dei campi di battaglia più famosi tra l'uomo e la macchina⁴, infatti, in oltre 1400 anni di storia, non hanno mai fallito nel saper catturare l'attenzione del grande pubblico.

È facile capire come sia possibile se ci si concentra su una delle caratteristiche fondamentali del gioco degli scacchi: la **complessità**.

In una partita di scacchi fin dalla prima mossa sono possibili 20 scelte, in quanto ognuno degli 8 pedoni del giocatore di partenza potrà essere mosso di una o due caselle ed ognuno dei due cavalli avrà 2 possibili mosse a disposizione, come visibile nella figura 1.1; per la seconda il totale di possibili combinazioni sale a 400, avendo il giocatore nero le stesse 20 mosse iniziali possibili in risposta ad ognuna delle 20 mosse del giocatore bianco, dopo 5 mosse avremo 119,060,324 possibili risposte, frutto dell'elevato fattore di diramazione medio⁵ degli scacchi esteso per 5 mosse. In totale le possibili mosse di una partita si stimano attorno alle 2^{155} .

Con uno spazio di ricerca così grande non dovrebbe stupire scoprire che è da quando esistono i computer che si cerca un modo di sfruttare la loro potenza di calcolo nel mondo degli scacchi. La nascita degli scacchi computazionali si deve al lavoro di Claude Shannon, famoso per i suoi innumerevoli contributi al campo della teoria dell'informazione. Egli, con il suo paper "Programming a Computer for Playing Chess"[2] del 1950, ha gettato le basi per quello che oggi è il campo conosciuto come scacchi computazionali.

Questa tesi nasce dalla volontà di esplorare questo vasto e interessante campo dell'informatica e dal voler creare un testo in grado di guidare chiunque lo legga nella creazione di un motore scacchistico spiegando tutte le fasi della progettazione ed illustrando le possibili scelte che condizionano l'efficienza di un motore.

⁴Nel 1996 e nel 1997 avvennero due delle partite di scacchi più importanti di sempre, per la prima volta un computer, Deep Blue progettato e prodotto da IBM, sfidava un campione del mondo di scacchi, e non un campione qualsiasi ma Garry Kasparov, uno dei giocatori più vincenti e titolati di sempre. L'evento dalla notevole importanza mediatica terminò prima con una vittoria da parte di Kasparov nel 1996 e poi con una vittoria di Deep Blue in una rivincita del 1997, segnando per molti quella che rappresenta la fine della supremazia umana nel gioco degli scacchi.

⁵Il fattore di diramazione medio è il numero medio di risposte possibili ad ogni mossa dell'avversario, negli scacchi. È stato calcolato che il fattore di diramazione medio sia compreso tra 28 e 35, ciò significa che, di media, un giocatore ha a disposizione circa 30 mosse legali ad ogni turno.

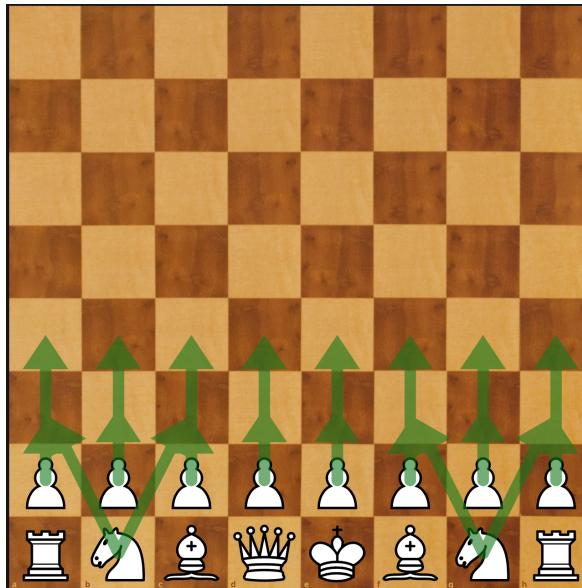


Figura 1.1: le 20 mosse iniziali possibili per il giocatore bianco ad inizio partita

1.3 Risultati ottenuti

È stato ottenuto un motore scacchistico di medio livello che implementa tutte le componenti più importanti, in grado di essere capito da un novizio ma che allo stesso tempo funge da ottima base per lo sviluppo di un motore allo stato dell'arte e che riesce a confrontarsi e vincere in maniera convincente contro motori famosi per chi si approccia al mondo degli scacchi computazionali come Vice o TSCP; sono anche stati raccolti dati sull'effetto di queste tecniche, utilizzati per produrre una prova della loro efficacia.

1.4 Struttura della tesi

La tesi è strutturata in 5 capitoli:

- Il primo funge da introduzione ed illustra a grandi linee il contenuto della tesi.
- Nel secondo viene affrontato il processo di progettazione di un motore scacchistico dal punto di vista teorico.
- Nel terzo vengono illustrati gli effetti pratici delle scelte effettuate nel secondo capitolo.
- Il quarto è una panoramica sullo stato dell'arte dei motori scacchistici odierni.
- Il quinto rappresenta uno specchio sui possibili sviluppi di un motore costruito a partire da questa tesi.

CAPITOLO 2

Progettazione e implementazione

2.1 Rappresentazione della scacchiera e dei pezzi

2.1.1 Introduzione

Il primo passo dello sviluppo di un motore scacchistico è decidere come rappresentare la scacchiera. Si tratta di una scelta fondamentale, non solo perché in seguito ci permetterà di testare le funzioni che andremo a implementare, ma anche perché è nella scacchiera che, generalmente, viene conservato lo stato generale della partita.¹

Inoltre, il tipo di codifica può influenzare la rapidità e la facilità col quale possiamo accedere alle informazioni sullo stato corrente dei pezzi e, come vedremo in seguito, è in grado di influenzare funzioni come la generazione delle mosse; per questi motivi, non è raro per motori scacchistici particolarmente complessi l'utilizzo di più tipi di strutture dati in base al tipo di informazione da conservare e all'utilizzo che se ne vuole fare, spesso alternando tra strutture efficienti dal punto di vista computazionale (bitboard) e strutture che permettono l'accesso casuale o facilitano operazioni di manipolazione da parte di un programmatore umano (qualsiasi rappresentazione casellocentrica).

Per la rappresentazione di una scacchiera sono chiaramente possibili moltissime scelte, di seguito verranno illustrate alcune tra le più famose ed utilizzate.

¹Per stato di una partita si intendono informazioni come quelle su chi ha diritto di muovere, i permessi di arrocco, lo stato della regola delle 50 mosse etc.

2.1.2 Rappresentazione della scacchiera Pezzocentrica

Si definisce rappresentazione pezzocentrica un qualsiasi tipo di rappresentazione della scacchiera che mantiene liste array o set dei pezzi attualmente presenti sulla scacchiera con annesse le informazioni sulle caselle da essi occupate. Le rappresentazioni più comuni sono:

Piece-Lists

Liste o array di ogni pezzo sulla scacchiera: ogni elemento della lista o dell'array associa un pezzo alla casella che esso occupa. Le caratteristiche di ogni pezzo (colore, tipo etc.) possono essere associate all'indice dell'array in cui si trovano o essere presenti in ulteriori array o liste esterne.

Bitboards

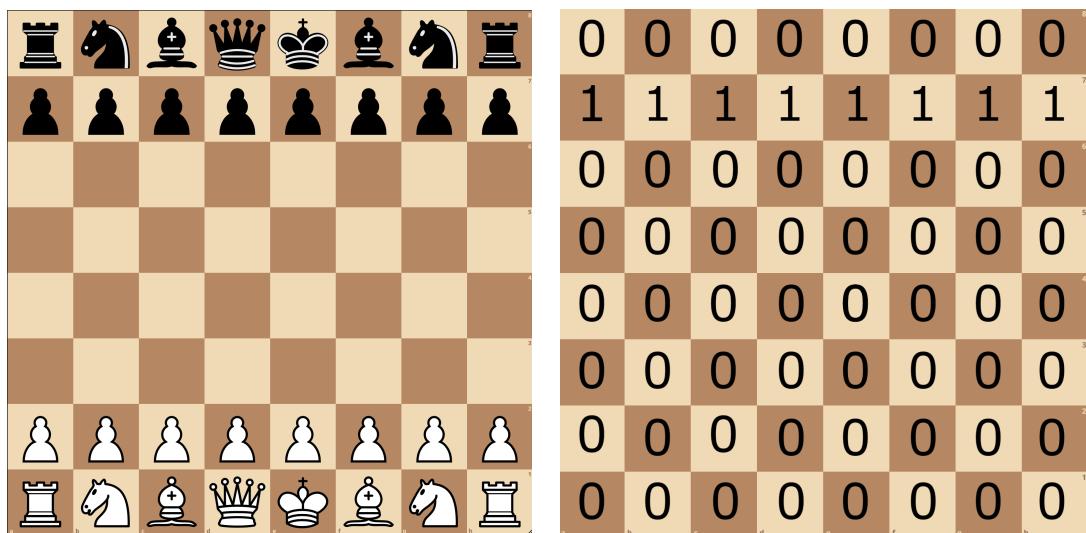
Una Bitboard è una struttura dati specifica per i giochi da tavolo: si tratta, in sostanza, di una struttura dati in grado di immagazzinare lo stato di ogni casella della scacchiera all'interno di una parola² di 64 bit[3].

Vediamo un esempio pratico: Immaginiamo di avere una scacchiera che si trova nello stato di default di inizio partita come nella figura 2.2. Una bitboard tipica ci permette di sapere in quali caselle è presente un determinato pezzo (es. un pedone nero). Per costruirla, operando casella per casella, ci poniamo la seguente domanda: "In questa casella è presente un pedone nero?" se si allora quella casella viene marcata con un 1, altrimenti viene marcata con uno 0. Il risultato di questa traduzione diventa in questo caso la parola di 64 bit: 00000000 11111111 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 come si può vedere in ??.

Piece-Sets

Rappresentazione con set con un bit per ogni pezzo dentro una parola a 32 bit o 2 parole a 16 bit per ogni lato i Piece-sets hanno delle somiglianze con le bitboards, ma ogni bit del set non è direttamente correlato ad una casella, bensì ad un indice dentro ad una piece-list. Spesso la posizione del bit nella parola di un piece-set implica di che tipo e colore il pezzo è, mentre le bitboards solitamente mantengono set distinti per pezzi diversi.

²Una parola è un gruppo di bit di una determinata dimensione che è gestito come unità dal set di istruzioni o dall'hardware di un processore.



(a) Scacchiera nella posizione iniziale di gioco

(b) bitboard

2.1.3 Rappresentazione della scacchiera Casellocentrica

La rappresentazione casellocentrica mantiene un'associazione inversa rispetto a quella pezzocentrica: per ogni casella conserviamo in memoria se è vuota o occupata da un pezzo in particolare. La macro-categoria di rappresentazione più comune è la Mailbox:

Mailbox

La rappresentazione Mailbox è una rappresentazione casellocentrica dove la codifica di ogni casella risiede in una struttura dati che permette l'accesso casuale. Solitamente si utilizza un array con l'indice che codifica dal numero della casella in array monodimensionali o dalla coppia traversa/colonna³ in array bidimensionali. Il nome deriva dall'associazione di ogni indice al concetto di "indirizzo" di una casella postale. Le implementazioni più famose e comuni del concetto di Mailbox sono la 8x8 Board e la 10x12 Board.

8x8 Board

Una board 8x8 è una rappresentazione pezzocentrica consistente in un array mono o bidimensionale di bytes o interi, contenenti rappresentazioni codificate per i pezzi e per la casella vuota, con i due indici ricavati o dalla coppia traversa/colonna che identifica la casella sulla scacchiera, o più comunemente da 0 a 63, uno per ogni casella della scacchiera conservata in un array monodimensionale. Questo tipo di rappresentazione è usata spesso

³Termini scacchistici per indicare le righe e le colonne della scacchiera.

come rappresentazione ridondante all'interno di programmi che utilizzano bitboards per individuare se e quali pezzi sono presenti su una casella in maniera efficiente.

10x12 Board

Una board 10x12 visibile nella figura 2.1 contorna una board 8x8 con traverse e colonne sentinelle per individuare indici al di fuori della scacchiera durante la generazione delle mosse. Anche questo tipo di board, come la 8x8 di cui è un derivativo, può essere usata per accedere in maniera efficiente e facile per un programmatore umano a specifiche caselle della scacchiera per individuare o meno la presenza di pezzi.

a	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
81	82	83	84	85						
71	72									
61	62									
51	52	53								
41	42	43	44							
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Figura 2.1: Rappresentazione di una board 10x12; notare come le 2 traverse extra sopra e sotto siano necessarie per evitare accessi out of bounds in caso di cavalli posizionati sulla prima o ottava fila.

Rappresentazione dei pezzi

Una volta scelto il tipo di rappresentazione della scacchiera si può iniziare a pensare alla rappresentazione dei pezzi.

Anche se può sembrare contorto i pezzi non hanno bisogno di una struttura elaborata, in quanto la generazione delle possibili mosse verrà gestita in una funzione di move generation, trattata nel paragrafo 2.2, che gestirà in maniera autonoma la logica necessaria ed il loro spostamento all'interno della scacchiera verrà gestito da una funzione indipendente, in grado di distinguere autonomamente i pezzi, solitamente chiamata MakeMove. Per i pezzi, quindi, abbiamo bisogno di una rappresentazione semplice, di facile interpretazione e che occupi poco spazio.

Rappresentazioni molto comuni sono quella tramite interi, dove ad ogni tipo di pezzo viene assegnato un numero che funge da identificativo univoco, e quella tramite caratteri, dove ad ogni tipo di pezzo viene assegnato un carattere che lo identifica (e che in linguaggi come il C è funzionalmente identica a quella per interi).

2.2 Move Generation

Una volta stabilito il tipo di rappresentazione il passo successivo è quello della generazione delle mosse. Per generazione delle mosse si intende la generazione di tutte le mosse legali eseguibili data una posizione di partenza ed è un processo fondamentale in quanto identifica i rami che il nostro algoritmo potrà esplorare nella successiva fase, quella appunto di ricerca, trattata nel paragrafo 2.3.

2.2.1 Approcci alla generazione delle mosse

La generazione delle mosse viene affrontata con 3 approcci radicalmente diversi a seconda del tipo di pezzo che stiamo trattando. In particolare, la distinzione si effettua tra pedoni, pezzi scorrevoli (alfieri, torri, regine) e non scorrevoli (re e cavalli).

Pedoni

Il pedone muove solo in avanti, mai indietro o di lato, e può avanzare di due caselle solo se è la prima volta che viene mosso, altrimenti può avanzare solo di una.

Il pedone mangia un pezzo avversario spostandosi diagonalmente di una casella, sempre soltanto in avanti, o a destra o a sinistra; se un pedone raggiunge la traversa finale della



Figura 2.2: posizione d'esempio dove è possibile catturare en passant



Figura 2.3: posizione della figura 2.2 dopo aver catturato en passant

scacchiera rispetto alla sua direzione di movimento allora viene promosso e diventa, quindi, a scelta del giocatore che possiede la pedina, uno qualsiasi degli altri pezzi (ad eccezione del re). In un approccio basato su board 8x8 o 12x10 possiamo calcolare le possibili mosse del pedone affidandoci a un flag che rappresenta la possibilità di effettuare catture en passant⁴, di cui vediamo un esempio nelle figure 2.2 e 2.3, e controllando la possibilità di muovere di 2 caselle e di promuovere il pedone, basandoci sulla posizione di partenza di quest'ultimo; le caselle di arrivo possibili sono a quel punto calcolabili sommando alla casella di partenza degli offset prefissati.

Pezzi non scorrevoli

I pezzi non scorrevoli sono i pezzi che possono spostarsi solo di un numero finito e fisso di caselle. Questo vuol dire che, conoscendo il tipo e la posizione di un pezzo non scorrevole, possiamo calcolare i suoi movimenti sommando alla sua posizione dei valori prefissati; a quel punto dovremo solo assicurarci che la casella di arrivo sia nei limiti della scacchiera e che la mossa risultante sia legale⁵.

⁴Una cattura en passant è un particolare tipo di cattura effettuabile da un pedone. Si tratta della cattura di un pedone, che ha mosso di 2 caselle, da parte di un pedone del colore opposto che lo tratta come se avesse mosso di una casella sola. Il pedone che cattura in en passant, quindi, si sposta su una casella ma "mangia" una pedina presente in un'altra casella. Questo motivo e il fatto che la possibilità di effettuare la mossa è influenzata dal movimento del pedone avversario rendono l'en passant un tipo di mossa unico.

⁵Nel gioco degli scacchi una mossa illegale è una mossa che pone il re sotto scacco o non libera il re da uno scacco subito alla mossa precedente.

Pezzi scorrevoli

Si definiscono pezzi scorrevoli i pezzi che possono spostarsi di un numero non prefissato di caselle lungo l'asse orizzontale, verticale o diagonale, fino a raggiungere il bordo della scacchiera o un altro pezzo; nel gioco degli scacchi consistono di alfiere, torre e regina. La generazione delle mosse di questo tipo di pezzi è più complessa rispetto a quella degli altri, in quanto bisogna controllare la presenza di pezzi, propri o avversari che siano, in grado di fermare il movimento del pezzo e assicurarsi che esso non superi il bordo della scacchiera; nel corso dei decenni si è arrivati a stabilire due approcci ottimali per la generazione delle mosse dei pezzi scorrevoli, da preferire in base all'architettura della macchina che esegue il motore.

Bitboard magiche

L'approccio con le bitboard magiche consiste nell'assegnare ad ogni pezzo scorrevole un numero "magico" pre-calcolato per ogni casella della scacchiera, rappresentata da una bitboard. Quel numero verrà poi moltiplicato per il valore individuato dalla posizione dei pezzi bloccanti sulla scacchiera, ottenuto settando ad 1 la casella su cui ogni pezzo che per primo blocca il movimento di un pezzo in una data direzione di spostamento giace, come visibile nelle figure 2.4 e 2.5.

Questa moltiplicazione darà luogo ad un indice con il quale accedere ad un archivio di bitboard di attacco⁶ pre-calcolate. Si tratta di una soluzione che richiede più cicli di cpu e risulta quindi meno efficiente rispetto alle bitboard che si basano sull'utilizzo dell'istruzione hardware pext per generare l'indice e va utilizzata solo in caso di architetture che non supportano nativamente il set di istruzioni BMI2.

PEXT Bitboards

Una bitboard pext funziona in maniera simile ad una bitboard magica. Utilizza il valore individuato dalla posizione dei pezzi bloccanti sulla scacchiera sulla bitboard per generare un indice da usare per accedere ad una bitboard di attacco. La differenza sostanziale però è nell'approccio: una bitboard pext, come intuibile dal nome, utilizza l'istruzione pext introdotta nel set di istruzioni BMI2 da Intel sui processori Haswell e con la serie 5000 dei processori Ryzen da AMD; si tratta di un'istruzione che, dato un input ed una maschera, trasferisce i bit dell'input individuati dalla maschera, in ordine contiguo e da destra a sinistra.

⁶Bitboard che segnala con dei bit ad 1 quali caselle il pezzo può attaccare.



Figura 2.4: posizione d'esempio su una scacchiera

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0

Figura 2.5: Bitboard di occupazione che codifica la figura 2.4

Con l'istruzione pext, usando una bitboard che rappresenta la scacchiera come input e la posizione dei pezzi bloccanti come maschera, si può ottenere un indice per la hash table delle bitboard di attacco. Il tutto viene eseguito in un solo ciclo di cpu e risulta quindi molto più efficiente di un approccio con bitboard magiche.

2.2.2 Perft

Perft è una funzione di debugging che attraversa l'albero delle mosse legali generate e conta tutti i nodi foglia fino ad una data profondità n. Il numero viene poi comparato con dei valori noti per controllare la presenza di bug nella nostra generazione delle mosse. Una funzione di Perft può essere anche utilizzata per testare le prestazioni di una stessa funzione di move generation su macchine diverse, confrontando il tempo impiegato per la sua esecuzione su ognuna delle macchine o similmente può essere utilizzata per testare la rapidità di diversi approcci alla generazione delle mosse. Ne possiamo osservare un esempio nella figura 2.6. Esiste una variante del Perft che divide le mosse per sottoalbero di appartenenza per facilitare il debugging e prende il nome di Perft/divide.

```

Performance test

move: a2a3    nodes: 4463267
move: a2a4    nodes: 5363555
move: b2b3    nodes: 5310358
move: b2b4    nodes: 5293555
move: c2c3    nodes: 5417640
move: c2c4    nodes: 5866666
move: d2d3    nodes: 8073082
move: d2d4    nodes: 8879566
move: e2e3    nodes: 9726018
move: e2e4    nodes: 9771632
move: f2f3    nodes: 4404141
move: f2f4    nodes: 4890429
move: g2g3    nodes: 5346260
move: g2g4    nodes: 5239875
move: h2h3    nodes: 4463070
move: h2h4    nodes: 5385554
move: b1a3    nodes: 4856835
move: b1c3    nodes: 5708064
move: g1f3    nodes: 5723523
move: g1h3    nodes: 4877234

Depth: 6
Nodes: 119060324
Time: 3688 ms

Nodes per second 32274000

```

Figura 2.6: Output tipico di una funzione di Perft/divide, il numero di nodi al secondo (32.27M) può essere utilizzato come metrica prestazionale.

2.3 Ricerca

Una volta generate tutte le possibili mosse nella fase di move generation si entra nella fase di ricerca, che consiste nell'eseguire diversi sottoinsiemi delle possibili mosse e valutare lo stato della scacchiera per trovare le mosse che forniscono il risultato finale migliore. Possiamo dire in maniera più tecnica che, essendo il gioco degli scacchi un gioco a 2 giocatori, a informazione perfetta e a somma zero, la ricerca implica l'attraversamento e l'ottimizzazione di un albero mini-max contenente le possibili posizioni di gioco. Negli scacchi computazionali esistono due approcci alla progettazione di un algoritmo di ricerca: si può effettuare una ricerca a tappeto limitando la profondità della stessa per far sì che i calcoli finiscano in tempi accettabili, col rischio di sottovalutare implicazioni future di determinate mosse, o focalizzarsi su particolari mosse e quindi rami dell'albero di ricerca nel tentativo di dare maggiore spazio alle mosse migliori (sulla base dell'euristica scelta per determinare come sia fatta una mossa

"migliore"), rischiando quindi di eliminare a priori mosse con dei risvolti successivi molto promettenti; l'approccio adottato da quasi tutti i motori scacchistici moderni è il primo.

Algoritmi di ricerca

Data l'impossibilità di esplorare l'intero spazio dell'albero di ricerca che codifica il gioco degli scacchi in quanto l'elevato numero di nodi richiederebbe una quantità di spazio superiore a quella degli atomi dell'universo ed una quantità di tempo superiore all'età dello stesso, è necessario fare affidamento su algoritmi in grado di ridurre il numero di nodi dell'albero. L'approccio più utilizzato è quello di una ricerca minimax con potatura alfa-beta ad approfondimento iterativo.

Minimax e negamax

L'algoritmo minimax[4] è un algoritmo ricorsivo per la ricerca della mossa migliore in una determinata situazione. Esso si basa su una funzione di valutazione posizionale che assegna ad una posizione (rappresentante un possibile stato del gioco) un punteggio, che indica quanto è desiderabile per il giocatore raggiungere quella posizione. L'obiettivo finale è la minimizzazione (mini) del massimo guadagno del giocatore avversario (max) e l'algoritmo minimax assegna un valore ad ogni mossa, proporzionale a quanto essa diminuisce il valore della posizione per l'altro giocatore; l'effettivo valore che viene assegnato dipende dalla funzione di valutazione adottata (questo argomento verrà trattato successivamente nella parte dedicata alla valutazione). L'algoritmo minimax è in grado di formulare una strategia perfetta per giochi abbastanza semplici da poter permettere la valutazione dell'intero albero di ricerca. Per giochi complessi come gli scacchi però questo non è possibile o lo è solo nelle fasi finali e, in generale, si può solo calcolare una stima della probabilità che una data mossa porti alla vittoria di uno dei giocatori. Il calcolo di questa stima può essere migliorato se è possibile fornire una funzione di valutazione euristica che valuti le posizioni non terminali del gioco senza dover conoscere tutte le mosse successive: in questo caso si può considerare solo un certo numero di mosse future. Questo numero è detto "profondità" dell'algoritmo ed è misurato in mosse. Il numero di nodi da valutare cresce esponenzialmente con la profondità di ricerca. La complessità computazionale dell'algoritmo minimax è quindi NP completa, il che lo rende poco pratico per ottenere una soluzione definitiva di giochi meno che banali. Tuttavia, le prestazioni del minimax possono essere migliorate drasticamente, mantenendo la correttezza dei risultati, adottando la **potatura alfa-beta**.

Negamax è una variante dell'algoritmo minimax che si basa sulla nozione che $\max(a, b) = -\min(-a, -b)$ per semplificare l'implementazione dell'algoritmo minimax. In pratica, il valore di una posizione per il giocatore A è l'opposto di segno di quello del giocatore B, quindi il giocatore che muove deve puntare a massimizzare il valore negato della posizione dopo la sua mossa. Questo tipo di ragionamento è applicabile sia per il giocatore minimizzante che per quello massimizzante; questo modo di operare permette di non dover implementare due funzioni diverse per i due agenti e di ridurre il tutto ad un solo algoritmo.

Potatura alfa-beta

La potatura alfa-beta è un algoritmo di ricerca utilizzato per ridurre il numero di nodi valutati dall'algoritmo minimax; consiste nello smettere di esaminare una mossa e con essa tutte le mosse derivanti a profondità maggiori (i rami del nodo mossa, che vengono quindi "potati"). Quando si rivela peggiore di una mossa già esaminata precedentemente, abbiamo quindi la rimozione di solo mosse ininfluenti per quanto riguarda l'albero minimax e quindi la mossa restituita dopo l'implementazione della potatura alfa-beta sarà equivalente a quella restituita da un algoritmo minimax senza potatura.

Approfondimento iterativo

In ogni variante degli scacchi troviamo un elemento di limitazione temporale, il cosiddetto controllo del tempo⁷. Questo limite temporale implica chiaramente la necessità ad un certo punto di dover cessare di pensare alla possibile mossa migliore ed eseguire la migliore che si è trovata fino a quel momento. A livello implementativo risolvere questo problema si tramuta nella necessità di implementare una componente di approfondimento iterativo all'interno del nostro algoritmo di ricerca. L'approfondimento iterativo consiste nell'effettuare la ricerca all'interno di un albero fino ad una data profondità n ; terminata la ricerca a profondità n si effettua una ricerca a profondità $n+1, n+2$ e via via si aumenta la profondità, tempo permettendo. Questo permette di avere un risultato da restituire indipendentemente dal tempo, a patto che sia sufficiente a completare una ricerca ad almeno profondità 1 (si tratta generalmente di nanosecondi e quindi di tempo che si ha sempre a disposizione). Il lato negativo è quello di dover ripetere la ricerca su livelli già precedentemente esplorati, tuttavia, esistono tecniche

⁷Il controllo del tempo è quanto tempo è assegnato al giocatore per poter effettuare le sue mosse: può essere statico, quando tutto il tempo viene assegnato fin dall'inizio ad ogni giocatore, che può gestirlo come più preferisce, o dinamico, quando il tempo può aumentare dopo determinati punti chiave, come ad esempio l'aver eseguito una o più mosse.

in grado di alleviare questo scotto prestazionale: possiamo utilizzare informazioni apprese durante le precedenti visite per guidare quelle successive e ridurre al minimo la parte da dover ri-esplorare. Le principali euristiche ottenute dalle visite precedenti prendono il nome di **euristica killer** e **euristica storica**.

- **euristica killer:** una mossa killer è una mossa che non cattura nessun pezzo e che causa un taglio beta⁸. Si salvano generalmente un paio di mosse killer per ogni profondità dell'albero di ricerca e nelle successive iterazioni verranno eseguite con una priorità maggiore rispetto alle altre mosse per accelerare la ricerca.
- **euristica storica:** l'euristica storica è un'euristica che si basa sul numero di miglioramenti di alfa che quella mossa ha causato durante la ricerca. Si tratta nuovamente di un tipo di mossa che non cattura nessun pezzo ed inoltre non deve produrre un taglio beta (verrebbe altrimenti classificata come mossa killer). È generalmente conservata come coppia pezzo/casella in cui il pezzo si muove ed anch'essa nelle successive iterazioni verrà eseguita con una priorità maggiore rispetto alle altre mosse per accelerare la ricerca.

Le euristiche, come quella storica o quella killer, fanno a loro volta parte di un problema più grande e fondamentale per gli scacchi computazionali e la potatura alfa-beta in generale: il problema dell'ordinamento delle mosse.

Ordinamento delle mosse

Come abbiamo precedentemente visto con l'euristica storica e l'euristica killer, provare prima una mossa "forte", ossia una mossa in grado di poter migliorare alpha o causare un taglio beta, ci permette di aumentare enormemente l'efficacia della potatura alfa-beta e diminuire in maniera sensibile lo spazio di ricerca. L'ordinamento delle mosse tenta di massimizzare il guadagno possibile dall'utilizzo di mosse "forti" utilizzando diverse metriche per selezionare mosse da provare prima delle altre. Un esempio di gerarchia tipica di ordinamento delle mosse è:

- la mossa migliore in una posizione individuata in una ricerca precedente a profondità minore;

⁸Quando la ricerca trova una posizione con una valutazione superiore a beta significa che, in fasi precedenti della ricerca, è stato trovato un percorso utilizzabile dall'avversario che risulta in un punteggio finale peggiore per l'avversario; questo significa che, supponendo un gioco perfetto da parte di entrambi i giocatori, il giocatore avversario non finirà mai nel sotto-albero contente tale mossa e che quindi si può procedere alla potatura.

- mosse dalla tabella di trasposizione;
- catture e promozioni;
- mosse killer;
- mosse che non catturano pezzi, ordinate secondo l'euristica storica.

È inoltre possibile utilizzare euristiche per ordinare tra di loro mosse appartenenti allo stesso livello. Non è raro, infatti, optare per ordinare le catture da più promettenti a meno promettenti. L'euristica principale per stabilire quanto una cattura è definibile promettente prende il nome di **mvv-lva** o in forma estesa **most valuable victim / least valuable attacker**: l'obiettivo è quello di identificare il pezzo di minore importanza che può attaccare il pezzo di maggiore importanza; ai due estremi troviamo un pedone in grado di catturare una regina ed una regina che viene scomodata per catturare un semplice pedone. L'ordinamento preferisce intrinsecamente il tipo del pezzo attaccante, quindi tutte le mosse di cattura effettuabili da un pedone verranno considerate prima di quelle di un cavallo che a loro volta verranno considerate prima di quelle di un alfiere e così via fino ad arrivare ad una regina.

Effetto orizzonte e ricerca di quiescenza

L'effetto orizzonte è un problema che affligge tutti gli algoritmi di ricerca con profondità limitata. L'orizzonte è la divisione tra le mosse considerate dal nostro algoritmo di ricerca e quelle che si trovano ad una profondità maggiore rispetto a quella raggiunta dal nostro algoritmo ed il problema nasce dall'impossibilità di poter analizzare le conseguenze delle mosse che si ritengono forti agli ultimi livelli di profondità, in quanto, dovendo fermarci con la ricerca, non possiamo indagare eventuali risposte avversarie.

Immaginiamo di trovarci in una posizione di gioco immaginaria chiamata k e di cercare tutte le possibili posizioni derivanti da k con una profondità pari a 5: chiameremo $k+5$ la migliore delle posizioni raggiunte da queste ricerca sulla base della funzione di valutazione. È possibile che l'avversario abbia una mossa con la quale può ribaltare istantaneamente la bontà della posizione $k+5$, trasformandola quindi in una posizione " $k+6$ " molto più sfavorevole. Un esempio classico di questo problema in ambiente scacchistico è quello di una ricattura⁹: immaginiamo di effettuare una ricerca più superficiale possibile, a profondità 1, in questo stato qualsiasi cattura terminerà con un miglioramento di punteggio per la posizione del giocatore che muove (in quanto ha appena catturato un pezzo avversario). Supponiamo,

⁹Una ricattura si ha quando, in risposta ad una cattura avversaria, si cattura il pezzo attaccante dell'avversario.

quindi, ad esempio, di aver catturato un pedone con una regina: l'effetto orizzonte non ci permette di vedere a profondità 2 o oltre le conseguenze di questa azione; qualora quel pedone fosse stato protetto da qualsiasi altro pezzo, il nostro avversario potrà, in risposta alla cattura del pedone, catturare la regina attaccante. Si passerebbe quindi dall'aver guadagnato un pedone all'aver perso una regina, un cambio di valutazione estremo e repentino. Questo problema, che è estremamente esacerbato a profondità 1, è presente a tutti i livelli di ricerca e rende un motore che non applica misure per contenerlo non in grado di giocare ad un livello soddisfacente.

Un modo per tentare di ovviare a questa soluzione prende il nome di **ricerca di quiescenza**, una ricerca che entra in gioco quando abbiamo raggiunto la massima profondità possibile dalla ricerca alfa-beta e serve a cercare una posizione "calma", senza forti variazioni di valutazione nei turni successivi. Il modo più facile di implementarla consiste nel proseguire con la ricerca alfa-beta a partire dalla massima profondità raggiunta dalla ricerca alfa-beta ma considerando solo le mosse di cattura; la generazione delle sole catture implica che il fattore di diramazione dell'albero è fortemente ridotto e quindi la ricerca non è particolarmente impegnativa (rispetto alla ricerca alfa-beta madre). Al termine di questa ricerca viene restituita una nuova valutazione, che sarà poi considerata la valutazione finale di ogni posizione.

Ricerca a variazione principale

La Ricerca a variazione principale, chiamata anche **PVS (Principal Variation Search)**, conosciuta anche come NegaScout, è un algoritmo di tipo negamax che può essere più veloce della potatura alfa-beta in quanto non considera mai nessun nodo che può essere potato dalla potatura alfa-beta. La PVS si basa sul presupposto che le mosse siano state ordinate in maniera corretta e produce un numero maggiore di tagli dando per scontato che il primo nodo esplorato sia il migliore di quelli possibili. Una ricerca di questo tipo è molto più veloce di una ricerca che si preoccupa che una delle possibili mosse restanti possa essere buona; se però viene trovato un nodo migliore allora è necessario ri-effettuare una ricerca normale alfa-beta su quel nodo. In pratica, quindi, per ogni nodo ordinato in maniera sbagliata si deve ripetere la ricerca e con abbastanza ricerche ripetute diventa più lento di alfa-beta pur esplorando lo stesso numero di nodi: è per questo che la ricerca ha bisogno di un ordinamento il più accurato possibile. In termini pratici una ricerca PVS si realizza utilizzando una ricerca alfa-beta ma con una finestra nulla al posto dei normali parametri alfa e beta; all'interno di un contesto negamax una finestra nulla è un intervallo alfa-beta dove beta vale alpha-1.

Transposition Table e Hashing Zobrist

Non è raro per un motore scacchistico incontrare più volte, durante la fase di ricerca, la stessa posizione, sia per pezzi con mosse "reversibili", in grado quindi di far tornare la ricerca al nodo padre, causando un potenziale ciclo, sia perchè è possibile giungere ad una posizione finale identica percorrendo multiple strade. Immaginiamo, ad esempio, le mosse a2a4-a7a5 e d2d4-d7d5: non importa l'ordine di esecuzione, la posizione finale vedrà in ogni caso un pedone bianco su a4 e su d4 ed un pedone nero su a5 e su d5.

Una **tabella di trasposizione** è una tabella hash che conserva i risultati di ricerche precedentemente effettuate su una data posizione e ogni volta che si raggiunge una nuova posizione (per l'iterazione locale del processo di ricerca). Si cerca all'interno di questa tavola dei risultati precedenti associati a tale posizione e in caso di riscontro positivo vengono prelevati i dati risalenti all'ultima ricerca effettuata, spesso composti da posizione, profondità e punteggio finale della ricerca.

Per individuare una posizione all'interno della tabella si utilizza una chiave hash in grado di codificare univocamente una posizione su una scacchiera. Per la generazione di queste chiavi una tecnica molto diffusa prende il nome di **hashing zobrist**. Nell'hashing zobrist si assegna una chiave casuale di 64 bit ad ogni combinazione pezzo-posizione, ad ogni possibile insieme di permessi di arrocco, ad ogni possibile casella di en passant ed ai due lati di gioco possibili (bianco e nero). Si parte poi da una chiave vuota e man mano vengono inseriti, tramite XOR bit a bit, le chiavi dei pezzi presenti sulla scacchiera corrispondenti alle posizioni in cui si trovano, degli attuali permessi di arrocco del lato giocante e dell'eventuale casella di enpassant. Data però l'impossibilità di contenere tutte le possibili chiavi all'interno di una tabella hash, si utilizzano metodi per ridurre l'universo delle chiavi, il più banale e comune rappresentato dall'effettuare il modulo della chiave zobrist originale col numero di istanze massime nella tabella. Per via di questa limitazione è possibile che avvengano delle collisioni, in quanto due chiavi zobrist diverse possono generare la stessa chiave hash post modulo. Per ovviare a questo problema è necessario controllare che la chiave zobrist corrisponda a quella salvata nella tabella di trasposizione ad ogni accesso ed in caso contrario effettuare la sovrascrittura dell'istanza precedentemente inserita.

2.4 Valutazione

Nella sezione di ricerca abbiamo incontrato per la prima volta la necessità di valutare una posizione tramite una funzione di valutazione, in modo da poter guidare la ricerca

verso soluzioni dal punteggio migliore rispetto ad altre. Per parlare di ricerca però abbiamo visto la funzione di valutazione come una scatola nera: ci bastava semplicemente sapere che esisteva una funzione che data una posizione qualsiasi era in grado di restituire un numero che ne rappresentasse la bontà. In realtà la funzione di valutazione è il pezzo più complesso e delicato di un motore, in grado da sola di distinguere un pessimo motore da uno dei migliori al mondo e per questo è necessario, quando si lavora alla formulazione di una funzione del genere, lavorare in maniera graduale e testare ampiamente ogni modifica che si apporta.

hand-crafted evaluation

Si definisce *hand-crafted evaluation*, abbreviata in HCE e traducibile con "valutazione fatta a mano", una funzione di valutazione che considera diversi aspetti della posizione ed assegna ad ognuno di essi un peso arbitrario deciso dallo sviluppatore (da qui il termine hand-crafted); si tratta della metodologia classica per la scrittura di una funzione di valutazione ed ancora oggi si dimostra estremamente popolare in motori di tutti i livelli, anche se sta man mano venendo soppiantata dall'utilizzo di reti neurali, come constatabile nella crème de la crème dei motori scacchistici (Stockfish, Lc0, Dragon). L'approccio più comune nella realizzazione di una funzione di valutazione HCE consiste nell'effettuare una combinazione lineare di diverse euristiche indipendenti, ognuna riguardante un aspetto più o meno fondamentale di una posizione.

La prima e più banale euristica che possiamo considerare è quella del valore dei pezzi: si assegna ad ogni pezzo un valore numerico espresso in centesimi di pedone che ne individua l'importanza¹⁰. Il valore di una posizione per un dato giocatore sarà espresso dalla somma dei valori dei suoi pezzi meno la somma dei valori dei pezzi avversari. Questo approccio da solo è utile per evitare che pezzi fondamentali come la regina vengano lasciati in balia delle mosse avversarie ma allo stesso tempo è insufficiente nel guidare le mosse del motore in fase di attacco; fermandosi qui ci si ritroverebbe con un motore che scappa costantemente dal confronto ed accetta di tanto in tanto degli scambi di materiale senza puntare ad una conclusione e senza nessun approccio tattico. Un'altra euristica molto banale e di facile implementazione si basa sull'associare ad ogni coppia pezzo-casella un valore, che verrà poi sommato al valore intrinseco del pezzo stesso: questo valore può essere positivo per incentivare lo spostamento di un pezzo in una determinata casella o negativo per ottenere l'effetto opposto. La positività e la negatività di un valore associato ad una casella sono

¹⁰Si riportano ad esempio i valori individuati da Alan Turing nel 1953: Pedone:100, Cavallo:300, Alfiere:350, Torre:500, Regina:1000

```

const int knight_score[64] =
{
    -5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -5,
    -5, 0, 0, 10, 10, 0, 0, -5,
    -5, 5, 20, 20, 20, 20, 5, -5,
    -5, 10, 20, 30, 30, 20, 10, -5,
    -5, 10, 20, 30, 30, 20, 10, -5,
    -5, 5, 20, 10, 10, 20, 5, -5,
    -5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -5,
    -5, -10, 0, 0, 0, 0, -10, -5
};

```

Figura 2.7: esempio di valori associati alle caselle della scacchiera per un cavallo conservati in un array del linguaggio C

un tentativo di inserire nozioni scacchistiche di base all'interno dell'algoritmo per meglio guidarne le scelte. Ad esempio, è comunemente risaputo che un cavallo ha molto più valore al centro, dove può sfruttare tutta la sua mobilità con un massimo possibile di 8 mosse e non ad un angolo della scacchiera, dove almeno 4 di quelle mosse (tutte quelle che vanno verso il bordo sul quale il cavallo si trova) vengono perse.

L'ultima euristica che andremo a considerare, in quanto è impossibile elencarle tutte ed è anche controproducente poiché la natura scacchistica delle stesse richiede conoscenze che non possono essere facilmente riassunte, riguarda la posizione dei pedoni. Un pedone può godere di tre caratteristiche in grado di cambiarne il valore: un pedone può essere, infatti, un pedone passato, doppiato o isolato.

Un pedone passato è un pedone che non può essere contrastato nella marcia in avanti da un pedone avversario sia sulla stessa colonna, sia a destra o a sinistra di essa; questo tipo di pedone, quindi, può facilmente minacciare un'avanzata verso la fila posteriore nemica con lo scopo di promuovere. Un pedone passato è un pezzo particolarmente utile nel fine gioco ed in quanto tale gli viene conferito un punteggio migliore rispetto a quello di un normale pedone.

Un pedone doppiato è un pedone che, a seguito di una presa, passa nella fila vicina dove si trova un altro pedone dello stesso colore; si tratta generalmente di una debolezza strutturale di una posizione ed in quanto tale va evitata se non porta a vantaggi sostanziali. Spesso, quindi, si assegna ad ogni pedone doppiato un malus di punteggio.

Un pedone isolato è un pedone che nel corso della partita rimane senza pedoni sulle due

colonne adiacenti; si tratta, quindi, di un pedone che non può essere difeso dai pedoni adiacenti e quindi di un pezzo facilmente attaccabile per l'avversario e per questo è prassi assegnare ad ogni pedone isolato un malus di punteggio. In termini pratici una realizzazione tipica di questa euristica si basa sulla generazione di bitmask statiche che in combinazione con la bitboard dei pedoni saranno in grado di identificare queste tipologie di pedoni.

2.5 Libro delle aperture e Tablebase

Le mosse iniziali di una partita di scacchi, chiamate nel loro insieme "apertura", posseggono un particolare binomio di caratteristiche: si tratta di mosse che avvengono in posizioni estremamente aperte, con tutti o quasi i pezzi in gioco e quindi con moltissime possibilità da calcolare; allo stesso tempo si tratta di alcune tra le mosse più studiate in ambito di teoria scacchistica nel corso dei secoli e per questa ragione è prassi evitare che il calcolatore elabori da sé le prime mosse e far sì che si appoggi su un database di mosse di apertura chiamato appunto libro delle aperture, che contiene solitamente aperture che vanno dalle 4 alle 10-11 mosse. Seguendo ancora il paradigma di risparmiare al motore parti di calcolo basandosi su mosse precompilate, ma con un caso d'uso diametralmente opposto, ossia quando la posizione di gioco è abbastanza semplice da poter enumerare ogni possibile mossa e calcolare a priori il miglior risultato possibile per un determinato giocatore, nascono le tablebase, database esaustivi di mosse pre-calcolate delle fasi finale di una partita. Ad oggi sono disponibili tablebase complete fino a 7 pezzi presenti sulla scacchiera e questo significa che, per un numero di pezzi compreso tra 3 e 7, non importa quali o disposti in quale modo, è possibile conoscere da subito l'esito della partita (presupponendo un gioco perfetto).

CAPITOLO 3

Validazione preliminare

Validazione preliminare

Essendo un motore scacchistico un progetto che per sua stessa natura va affrontato con un processo di integrazione continua si rende necessario avere un metodo per poter calcolare la nuova forza stimata del motore ad ogni singolo cambiamento delle funzioni di ricerca e di valutazione, per assicurarci che i cambiamenti apportati non abbiano reso il motore più debole¹. Prima di parlare di "perdere" o "acquisire" forza, è bene introdurre come si quantifica e cosa rappresenta la forza di un motore. Il sistema di rappresentazione è mutuato dal sistema utilizzato per classificare i giocatori di scacchi da parte delle federazioni scacchistiche ed è un sistema che prende il nome di elo. Essendo gli scacchi un gioco in cui rendimento di un giocatore non può essere misurato in maniera assoluta, ma può solo essere dedotto dai risultati, i punteggi hanno significato solo relativamente ai punteggi degli avversari: sia la media sia l'intervallo dei punteggi possono essere scelti arbitrariamente. Elo suggerì una scala per cui una differenza di 200 punti significa che il giocatore ha un punteggio atteso di 0,75. Il punteggio atteso di un giocatore è dato dalla probabilità di vincere, più la metà della probabilità di pareggiare. Quindi un punteggio atteso di 0,75 può rappresentare un 75% di possibilità di vittoria, 25% di sconfitta e 0% di pareggio, o all'altro estremo 50% di vittoria, 0% di sconfitta e 50% di pareggio.

¹Questo tipo di test è anche detto test di regressione.

Se il giocatore A ha una forza reale RA e il giocatore B una forza reale RB, la formula esatta (usando la curva logistica) per calcolare il punteggio atteso del giocatore A è:

$$E_A = \frac{1}{1 + 10^{\frac{RB - RA}{400}}} \quad (3.0.1)$$

Similarmente, il punteggio atteso del giocatore B è:

$$E_B = \frac{1}{1 + 10^{\frac{RA - RB}{400}}} \quad (3.0.2)$$

Si noti che

$$E_A + E_B = 1 \quad (3.0.3)$$

In pratica, siccome la forza reale di un giocatore è sconosciuta, i punteggi attesi sono calcolati utilizzando i punteggi effettivi dei giocatori. Quando i risultati di un giocatore eccedono il punteggio atteso, il sistema elo considera il fatto come evidenza che il punteggio del giocatore è troppo basso, perciò deve essere aggiustato verso l'alto. Se invece i risultati restano sotto il punteggio atteso, il punteggio del giocatore viene aggiustato verso il basso. L'idea originale di Elo, ancora largamente usata, è quella di un semplice aggiustamento lineare, proporzionale a quanto il giocatore sia stato sopra o sotto il punteggio atteso. Supponendo che il giocatore A abbia un punteggio atteso di E_A punti, ma abbia ottenuto S_A punti. La formula per aggiornare il suo punteggio è:

$$R'_A = R_A + K(S_A - E_A) \quad (3.0.4)$$

L'aggiornamento può essere effettuato dopo ogni partita, dopo ogni torneo, o dopo ogni periodo prestabilito. Un esempio può aiutare a comprendere. Supponiamo che il giocatore A abbia un punteggio di 1613 e giochi in un torneo con cinque partite. Perde contro un giocatore quotato 1609, pareggia con un giocatore che ha 1477 punti, sconfigge un giocatore con 1388 punti, uno con 1586 e infine perde con un giocatore che ha 1720 punti. Il suo punteggio è $(0 + 0,5 + 1 + 1 + 0) = 2,5$. Il suo punteggio atteso, calcolato secondo la formula sopra esposta, sarebbe dovuto essere $(0,506 + 0,686 + 0,785 + 0,539 + 0,351) = 2,867$. Quindi, il suo nuovo punteggio è $(1613 + 32(2,5 - 2,867)) = 1601$ [5].

Come detto precedentemente, così come per i giocatori umani anche per i motori viene utilizzato il concetto di elo per la misura delle prestazioni. Ci sono, però, delle differenze pratiche sostanziali: in primis, a differenza di un giocatore umano, dove "l'hardware" è immutabile, la forza di un motore scacchistico dipende anche dalla potenza di calcolo della macchina sulla quale viene eseguito e in secundis l'elo può dipendere da fattori esterni come

la gestione del tempo che si ha a disposizione per una mossa. Questo è un problema che si applica anche ai giocatori umani ma che fa intrinsecamente parte del loro punteggio in quanto un giocatore umano ha libertà di gestire come vuole il proprio tempo, a differenza di un motore scacchistico dove, soprattutto in motori più basilari, è possibile che il tempo sia gestito in maniera statica. Per ovviare a questo problematiche ed ottenere una misura di elo significativa è importante uniformare il più possibile la piattaforma sulla quale si effettuano le prove e valutare con attenzione il time control utilizzato.

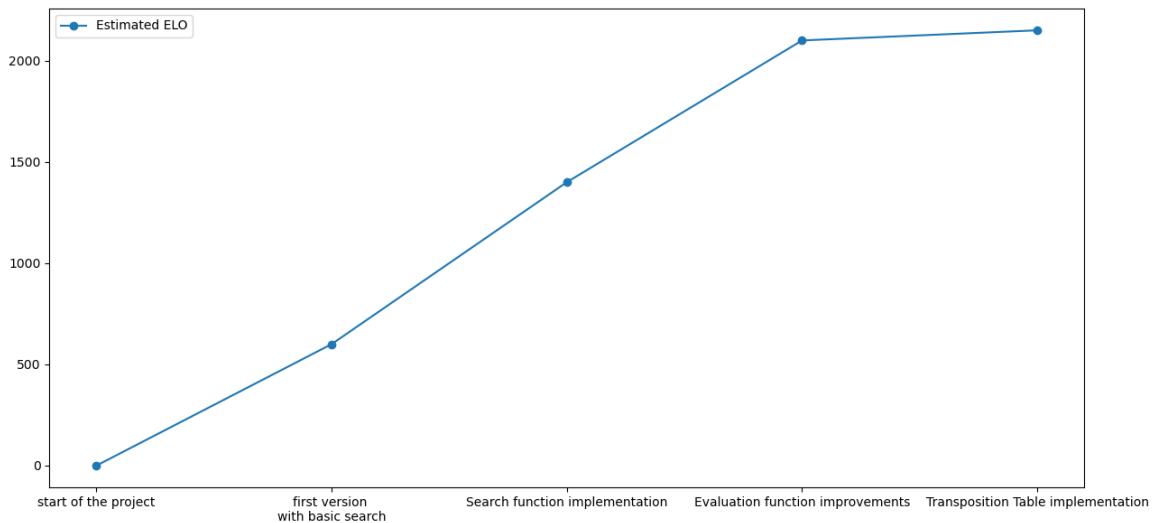


Figura 3.1: Valore elo del motore sviluppato parallelamente a questa tesi ad ogni milestone di sviluppo

Oltre al punteggio elo esistono altre metriche che possono essere utilizzate per analizzare singolarmente alcune delle componenti che compongono un motore. Per la generazione delle mosse abbiamo già visto nel paragrafo 2.2 che è possibile utilizzare la funzione di Perft per valutare le prestazioni di un generatore di mosse e, essendo la generazione delle mosse un concetto molto semplice, possiamo seguire un'euristica basilare: "più nodi vengono generati al secondo migliore è il generatore". Valutare le parti di ricerca non è invece altrettanto facile. Se è vero che abbiamo un'idea di fondo alla base dell'ottimizzazione della nostra ricerca, ossia "meno nodi vengono esplorati migliore è la funzione di ricerca", è anche vero che questo concetto, a differenza di quello della generazione delle mosse, è sottoposto ad ulteriori clausole: vogliamo sì che il nostro algoritmo di ricerca esplori meno nodi possibili, ma vogliamo anche che la qualità delle scelte possibili venga preservata; un numero minore di nodi esplorati, quindi, è positivo solo se la forza giocante del nostro motore non diminuisce (o ancor meglio se aumenta). Ciò nonostante il variare del numero dei nodi può darci un'idea sulla bontà del trade-off elo/tempo di calcolo necessario ed in generale indicarci se l'approccio

che stiamo seguendo meriti o meno ulteriori approfondimenti.

Depth	Total Nodes	$\alpha\beta$	CE2BIT	Vice 1.1
1	20	21	27	21
2	400	231	313	89
3	8902	3346	654	694
4	197281	18081	3407	4000
5	4865609	138712	4624	11000
6	119060324	774756	32490	61000

Tabella 3.1: Confronto tra i numeri esplorati da un semplice algoritmo di ricerca alfa-beta e quelli esplorati da diversi motori scacchistici

CAPITOLO 4

Stato dell'arte per Algoritmi di intelligenza artificiale e motori scacchistici per il gioco degli scacchi

4.1 Stockfish pre rete neurale

Prima della rivoluzione dei motori scacchistici, favoreggiata dall'introduzione di reti neurali nel processo di valutazione di una posizione che vedremo in seguito, lo stato dell'arte era rappresentato da una decina di motori con funzioni di valutazione HCE. Tra questi è difficile trovare un rappresentante migliore di Stockfish, uno dei motori scacchistici più vincenti di sempre e frutto di un progetto open source che va ormai avanti da decenni.

4.1.1 Struttura interna

Per la rappresentazione della scacchiera Stockfish non offre sorprese particolari, utilizza un mix di bitboard e board 8x8 per la rappresentazione dei pezzi ed opta per l'utilizzo di bitboard pext o magiche per la generazione delle mosse.

La ricerca è tipo alfa-beta con approfondimento iterativo, come già visto in precedenza; vi è anche la presenza di quelle aggiunte alla ricerca minimax che in questo campo risultano essere fondamentali, come una tabella di trasposizione e varie euristiche di ordinamento della mossa.

La vera grande differenza tra Stockfish e un motore hobbystico per quanto riguarda la ricerca è l'implementazione di un algoritmo di ricerca multi-thread: si tratta di una versione dell'algoritmo molto complessa in quanto deve gestire tutti i problemi classici della concor-

renza e in più assicurarsi che il lavoro parallelo dei thread abbia un effetto costruttivo e non distruttivo. In particolare, Stockfish implementa l'algoritmo di ricerca parallelo chiamato Lazy SMP, nel quale vengono fatte partire diverse ricerche (una per thread) a partire dallo stesso nodo sorgente ma con differenti variabili di ricerca (profondità massime diverse, pesi diversi per l'ordinamento delle mosse o per la potatura) e i risultati vengono conservati in una tabella hash comune a tutte le istanze di ricerca, che possono quindi utilizzare i risultati delle altre per auto-guidarsi. Infine, per quanto riguarda la parte di valutazione, ossia quella più complessa e delicata, va detto che non esiste un modo per descrivere brevemente le sottili ed intricate scelte all'interno della funzione. In particolare, per quanto riguarda i pesi utilizzati dalla funzione obiettivo, ci basti sapere che a questo punto della storia (pre fine 2017) Stockfish è mosso da una funzione di valutazione di tipo HCE, che coinvolge diverse euristiche di tipo scacchistico e centinaia di pesi calibrati a mano dopo milioni e milioni di test di regressione.

4.2 AlphaZero

Alla fine dell'anno 2017 un controverso paper[6] da parte del team di Google DeepMind apre un nuovo spiraglio di possibilità nel mondo degli scacchi computazionali. In questo paper, infatti, viene presentato un motore chiamato AlphaZero, sprovvisto di una funzione di valutazione HCE, finora standard praticamente unico del mondo scacchistico. Questo motore, complice anche l'enorme potenza dei cluster di calcolatori di Google, fu in grado di partire dalle sole basi del gioco degli scacchi, senza nessuna conoscenza posizionale fornita esternamente, ed in 4 ore auto-migliorarsi al punto da competere e riuscire a vincere in maniera convincente contro la versione di Stockfish dell'anno precedente ma con un approccio da parte del team di ricerca non esente da critiche[7].

4.3 Stockfish-NNUE

Nonostante le critiche e i dubbi sulla performance di AlphaZero, gli appassionati di scacchi computazionali non rimasero impassibili davanti ai meriti di un approccio orientato alle reti neurali. Il 6 agosto del 2020, un anno e mezzo dopo la pubblicazione definitiva dell'articolo su AlphaZero da parte di DeepMind e dopo un anno di lavoro, viene ufficialmente introdotta, all'interno della repo di Stockfish, NNUE.

NNUE, acronimo di "Efficiently Upgradable Neural Network" scritto da sinistra a destra,

è una rete neurale per la valutazione di posizioni shogi, alle quali assegna un punteggio utilizzato poi in fase di potatura, adattata per operare sugli scacchi ed essere integrata in Stockfish. In questa nuova versione Stockfish, chiamato da questo momento in poi anche Stockfish+NNUE, mantiene le caratteristiche principali che contraddistinguono la sua versione precedente e la valutazione NNUE viene utilizzata in tutte le posizioni materialmente bilanciate. In totale il guadagno di Stockfish dopo il passaggio a NNUE è stato stimato nel range di 80-100 punti ELO.

CAPITOLO 5

Conclusioni e Sviluppi Futuri

In conclusione, si può dire di aver effettuato una panoramica completa seppur basilare della struttura di un motore scacchistico. Diversi algoritmi "storici" sono stati riproposti e ri-analizzati, mostrando la loro efficacia e il motivo per cui sono diventati fondamentali, ed è stata fornita la base ottimale per un motore di medio livello.

Infine, si elencano delle potenziali migliorie in grado di elevare un motore progettato seguendo questa tesi da un motore amatoriale di medio livello ad un motore in grado di competere con i migliori al mondo:

- **NNUE:** Una funzione di valutazione basata su NNUE è in grado, con un investimento temporale molto breve, di battere anche le migliori funzioni di valutazione tradizionali. Per un motore non particolarmente forte il passaggio a NNUE può comportare un guadagno di svariate centinaia di punti elo.
- **Introduzione di ulteriori euristiche di ricerca:** Le euristiche di ricerca per un motore scacchistico sono numerose e nella tesi vengono trattate solo le principali; scavando più a fondo nel mondo degli algoritmi di ricerca è possibile guadagnare diverse centinaia di punti elo.
- **Tuning del motore:** Un altro fattore importante nello sviluppo di un motore scacchistico consiste nel tuning dei suoi iperparametri. Si tratta di un processo nel quale attraverso molteplici iterazioni e campionamenti statistici si cerca il valore ottimale di ogni costante che detta il comportamento del motore.

È possibile visualizzare un esempio pratico di alcune di queste migliorie e seguire lo sviluppo attivo di un motore scacchistico nella repository github del motore associato a questa tesi, Alexandria.

Bibliografia

- [1] Irving L Finkel and British Museum. *Ancient board games in perspective : papers from the 1990 British Museum colloquium, with additional contributions.* London : British Museum Press., 2007. (Citato a pagina 2)
- [2] CLAUDE E. SHANNON. Programming a computer for playing chess. *Philosophical Magazine*, Ser.7, Vol. 41, No. 314 - March 1950., 1950. URL <https://www.pi.infn.it/~carosi/chess/shannon.txt>. (Citato a pagina 2)
- [3] G M Adel'son-Vel'skii et al. Programming a computer to play chess. *Russ. Math. Surv*, 25(2), 1970. (Citato a pagina 5)
- [4] Wikipedia. Minimax — wikipedia, l'enciclopedia libera, 2022. URL <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Minimax&oldid=125837390>. [Online; in data 20-aprile-2022]. (Citato a pagina 13)
- [5] Wikipedia. Elo — wikipedia, l'enciclopedia libera, 2022. URL <http://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Elo&oldid=125247032>. Accessed: 2022-04-04. (Citato a pagina 23)
- [6] David Silver, Thomas Hubert, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Matthew Lai, Arthur Guez, Marc Lanctot, Laurent Sifre, Dharshan Kumaran, Thore Graepel, Timothy P. Lillicrap, Karen Simonyan, and Demis Hassabis. Mastering chess and shogi by self-play with a general reinforcement learning algorithm. *CoRR*, abs/1712.01815, 2017. URL <http://arxiv.org/abs/1712.01815>. (Citato a pagina 27)
- [7] PeterDoggers. alphazero reactions from top gms and stockfish author. <https://www.chess.com/news/view/alphazero-reactions-from-top-gms-stockfish-author>, 2018. Accessed: 2022-04-01. (Citato a pagina 27)

Ringraziamenti

Alla mia famiglia senza la quale nulla di tutto questo sarebbe stato possibile.

Ai miei amici, vi voglio veramente bene bastardi.

And now a special thank you to all the people that made this project possible:

- BluefeverSoftware for his Vice chess engine from which i learnt the basic structure and functionality of a chess engine.
- CodeMonkeyKing for his chess engine from which i learnt how bitboards work and several refined search techniques.
- The Stockfish Dev Team and Discord server members for the sharing of code and the pleasurable discussions about chess engines.
- A giant thanks to Luecx that helped me immensely in the process of setting up the NNUE and gave me some training data generated by Koivisto.
- Lucex (again) and Jay Honnold for the wonderlud CudAD trainer that was used to train the NNUE <https://github.com/Luecx/CudAD>.
- Andrew Grant for the OpenBench platform Used to SPRT test the engine.
- Every chess engine author i had the pleasure to talk and share ideas with.