

EN SCHACK AI BASERAD PÅ CASE-BASED REASONING MED GRUNDLIG LIKHET

A CASE-BASED REASONING APPROACH TO A CHESS AI USING SHALLOW SIMILARITY

Gul markering är helt ny eller modifierad text

Grön markering är gammal flyttad text

Examensarbete inom huvudområdet Datavetenskap
Grundnivå 30 högskolepoäng
Vårtermin 2015

Johannes Qvarford

Handledare: Peter Sjöberg
Examinator: Anders Dahlbom

Sammanfattning

Schack är ett spel som ofta används för att undersöka olika tekniker inom artificiell intelligens (AI). I det här arbetet ställs frågan om det går att utveckla en AI-agent vars beslutsfattande är baserat på tekniken Case-based Reasoning (CBR) med grundlig likhet som spelar bättre med fallbaser baserade på bättre experter. En AI-agent har utvecklats som spelat ett antal partier mot sig själv med olika fallbaser baserade på olika experter. Efter att ha undersökt resultatet visade de sig att AI-agenten spelar så dåligt att den nästan aldrig lyckades vinna oavsett fallbas, vilket gjorde att det inte gick att rangordna dem efter skicklighet. I framtida arbete är det intressant att undersöka andra likheter än grundlig likhet. Det är även av intresse att undersöka om en CBR-baserad schackspelande AI-agent kan spela schack med hög skicklighet.

Nyckelord: Schack, Case-based Reasoning, Artificiell Intelligens, Grundlig likhet.

Innehållsförteckning

1	Introduktion.....	3
2	Bakgrund.....	4
2.1	Case-based Reasoning	4
2.1.1	Representation	4
2.1.2	Liknelse	5
2.1.3	Hämtning.....	5
2.1.4	Anpassning.....	6
2.1.5	Grundlig likhet	6
2.1.6	Tidigare arbeten	7
2.2	Schack.....	7
2.2.1	Regler	7
2.2.2	Elo-rankning	10
2.2.3	Portable Game Notation.....	11
2.2.4	Schack AI:s historia.....	11
3	Problemformulering	14
3.1	Problemformulering.....	14
3.2	Metodbeskrivning.....	15
4	Implementation	18
4.1	Schack.....	18
4.1.1	Parti	19
4.1.2	Bräde.....	19
4.1.3	Läge	20
4.1.4	Drag.....	21
4.2	CBR.....	22
4.2.1	Problem och lösning.....	22
4.2.2	Fallbas	23
4.2.3	CBR-process	23
4.2.4	Hämtning	24
4.2.5	Anpassning.....	25
4.3	Sammanfattning av hur partier spelas.....	26
5	Utvärdering.....	28
5.1	Om undersökningen.....	28
5.2	Resultat	31
5.3	Analys.....	32
5.4	Slutsatser.....	33
6	Avslutande diskussion.....	36
6.1	Sammanfattning.....	36
6.2	Diskussion	36
6.3	Framtida arbete	39
	Referenser	41

1 Introduktion

Schack är ett spel som fått mycket uppmärksamhet inom forskningsområdet **artificiell intelligens (AI)**. Redan på 50-talet presenterade Shannon (1950) ett förslag på hur en schackspelande AI-agent kunde fungera och sedan dess har många forskningsarbeten dedikerats till att förbättra hans ursprungliga design. **Trots alla möjliga förbättringar som presenterats genom åren har den grundläggande tekniken som Shannon föreslog dock förblivit den samma och få utförliga arbeten om alternativa tillvägagångssätt har presenterats (Schaeffer 1991).**

I det här arbetet appliceras en alternativ teknik **för en schackspelande** AI-agents beslutstagande som kan vara av användning för schackspel med varierbar svårighetsgrad. Tekniken heter **Case-based Reasoning (CBR)** och är en problemlösningsteknik som går ut på att använda tidigare lösta problem för att lösa nya problem. Ett problem tillsammans med sin lösning kallas för ett fall. För att AI-agenten ska kunna ha några tidigare problem med lösningar att hänvisa till, samlas information in t.ex. genom att låta en mänsklig eller artificiell expert lösa ett antal exempelproblem. Problemen med expertens lösningar lagras i en fallbas som AI-agenten **kan söka i** när den behöver lösa ett nytt problem. Kopplat till schack kan ett problem vara ett läge och en lösning det drag som ska utföras i läget.

Det har undersökts i det här arbetet om CBR med så kallad grundlig liknelse är passande för en schackspelande AI-agents beslutsfattande. **Med passande menas att för två AI-agenter x och y så kommer x vinna oftare mot y givet att x:s fallbas är baserad på en bättre spelare. I arbetet skapades en AI-agent som kunde basera sina fallbaser på partier spelade av olika bra experter.** Undersökningen utfördes genom att låta AI-agenten spela ett antal partier mot sig själv med alla kombinationer av ett antal fallbaser baserade på olika experter, för att se om den vinner oftare med fallbaser baserade på högre rankade spelare. Ett antal partier studerades även för att dra slutsatser om varför den betedde sig som den gjorde.

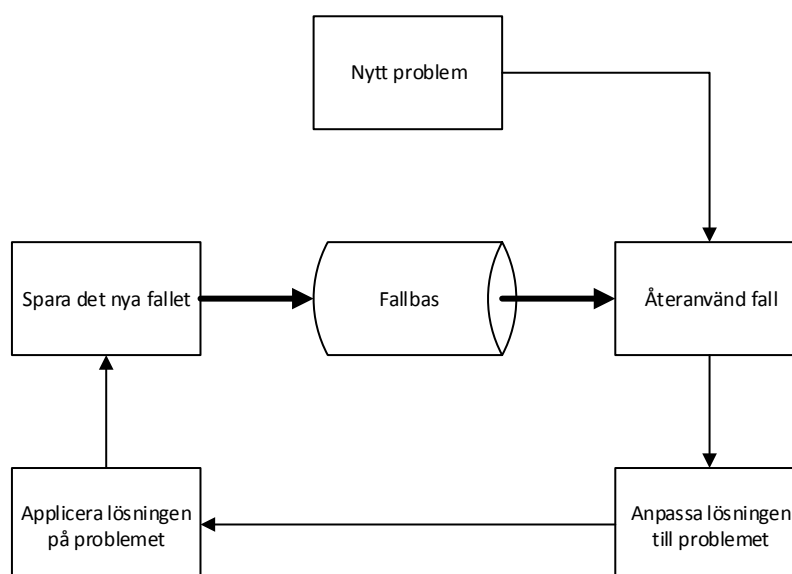
Rapporten är indelad i ett antal sektioner. I sektion 2 presenteras bakgrundsinformation till arbetet. Sektion 3 innehåller problembeskrivningen, **det funktionsbiblioteket som har skapats** för att besvara den och vilken undersökningsmetod som användes. I sektion 4 presenteras **implementationen av funktionsbiblioteket** och i sektion 5 utvärderas resultatet av undersökningen. Tills sist diskuteras resultatet i sektion 6.

2 Bakgrund

I denna sektion presenteras bakgrundsinformation om ämnen och termer som nämns i arbetet. I sektion 2.1 presenteras CBR och hur arbetet bygger på tidigare forskning kring CBR. Sektion 2.2 innehåller reglerna till schack, termer som ofta används inom schack och schack AI:s historia.

2.1 Case-based Reasoning

CBR är en teknik för problemlösning inom AI som är baserad på idén att använda lösningar på tidigare, liknande problem (Richter & Weber 2013). För att använda CBR måste en samling testfall med problem och deras respektive lösningar först samlas in. Hur testfallen samlas in varierar och kan ske genom observation av artificiella eller mänskliga experter. Lösningarna på problemen från experten behöver inte nödvändigtvis uppfylla några korrekthetskrav. Ett problem tillsammans med sin lösning beskrivs som ett fall, och en grupp fall kallas för en fallbas. När ett nytt problem ska lösas kan AI-agentens lösning baseras på hur en expert löste problemet eller ett liknande problem genom att konsultera en fallbas. När det fall har hittats vars problem är mest likt det nya problemet, kan fallets lösning anpassas till det nya problemet. Lösningen kan sedan appliceras. Tillsammans bildar det nya problemet med dess anpassade lösning ett nytt fall, som kan inkluderas i fallbasen och återanvändas. Denna process illustreras i Figur 1.



Figur 1 Figur över processen för att applicera CBR.

2.1.1 Representation

Problem kan representeras på olika sätt inom CBR, och de passar olika bra beroende på vad för sorts problem som ska lösas. En vanlig representation är en tupel av värden, där varje element överensstämmer med ett attribut (Richter & Weber 2013). Ett värde kan vara sammansatt av flera värden, och kan nästlas till ett arbiträrt djup. Till exempel kan ett värde vara en tupel, vars första element i sin tur kan vara en tupel av ett antal mängder osv.. Som exempel kan det finnas en AI-agent utvecklad för att estimerar priset på begagnade bilar baserat på priset av tidigare sålda begagnade bilar. En bil kan ha flera attribut men vissa attribut kan vara mer relevanta för att identifiera liknande, tidigare sålda bilar. T.ex. kan en

bil representeras med attributen modell, tillverkningsår och mätarställning men sakna attributet färg, för att en bils färg inte har haft en märkbar påverkan på en bils pris tidigare. Representationen illustreras i Figur 2. Andra möjliga representationer av problem är bilder, text och ljud (Richter & Weber 2013). Om det visar sig att bilar som ser liknande ut, har liknande beskrivningar eller låter liknande har en större chans att säljas för liknande pris, så kan det vara en lämplig problemrepresentation.

([Modell], [Tillverkningsår], [Mätarställning])

(Audi A7, 2012, 17203 mil)

(Bmw 320d, 2013, 707 mil)

Figur 2 Ett exempel på hur en begagnad bil kan representeras som ett problem i CBR och två exempel på begagnade bilar.

2.1.2 Liknelse

Richter och Weber (2013) definierar problem som lika om de har liknande lösningar. Det är därför viktigt att identifiera vad som gör problem lika för att hitta liknande och passande lösningar till nya problem. Likhet är i denna benämning inte exakt, utan en grad på en skala. Ett problem kan vara sammansatt av flera värden och det finns olika sätt att beräkna likhet mellan sammansatta värden och primitiva värden.

Två vanliga sätt att beräkna likhet mellan primitiva värden är luddig matchning (engelska: *fuzzy matching*) och avstånd (Richter & Weber 2013). Luddig matchning associerar ett tal till ett par av värden, som är proportionerligt till graden av deras likhet. Avstånd associerar också ett tal till ett par värden, men avståndet är proportionerligt till inversen av graden av deras likhet. Ingen av metoderna är bättre, ibland kan det dock vara enklare att uttrycka likhet på ett eller annat sätt.

Likhet mellan sammansatta värden kan beräknas genom att aggregera deras elements likheter. Två samlingar är då lika om deras element är lika. Hammingsmätning (Richter & Weber 2013) går ut på att mäta likhet mellan två samlingar baserat på antalet element som är exakt lika. Med viktad hammingsmätning värdesätt olika element i samlingen olika, så att två samlingars likhet är mer beroende av vissa elements likhet än andra. Med metrisk likhet (Richter & Weber 2013) summeras istället elementens likhetsgrad. Hammingsmätning kan ge mindre precisa resultat än metrisk likhet, **men kan implementeras effektivare rent prestandamässigt.**

2.1.3 Hämtning

Syftet med att använda hämtning (engelska: *retrieval*) är att hitta en lösning vars problem är mest likt problemet som ska lösas. För att hämta lösningen används en hämtningsfunktion, vars krav kan variera från system till system. **För att hitta den bästa lösningen så måste det problem i fallbasen som är mest likt det nuvarande problemet identifieras. Det är inte alltid praktisk genomförbart att hitta den garanterat bästa lösningen, om systemet har strikta prestandakrav. Fall lagras ofta som en sekventiell lista och sekventiell sökning är vanligt för att hitta det mest lika problemet (Richter & Weber 2013). Det finns flera typer av problem vars individuella problem kan likna varandra ur olika aspekter, vilket innebär att de inte kan lagras i en definitiv enskild ordning.** Av denna anledning är binärsökning mindre användbar för att söka efter fall. Om likhetsmetoden är prestandatung, kan problemen först gallras med en

lättare likhetsmetod och sedan kan den tyngre likhetsmetoden användas på de kvarvarande problemen.

2.1.4 Anpassning

När det mest lika problemet har upptäckts är det inte säkert att dess lösning är direkt applicerbar på det nya problemet. Lösningen kan därför behöva anpassas. Anpassning sker genom att applicera ett antal regler på lösningen för att få fram en ny lösning. En regel består av ett förvillkor och en handling som ska utföras om förvillkoret är sant. Handlingar delas in i två kategorier: transformationsbaserade och genererande handlingar (Richter & Weber 2013). Transformationsbaserade handlingar utgår från lösningen och byter ut delar av den för att anpassa den till det nya problemet. Genererande handlingar används ibland när lösningen har beräknats från dess tillhörande problem. Om lösningen inte är giltigt för det nuvarande problemet, så används samma teknik som användes för att beräkna lösningen från problemet, med den nya lösningen som grund. Detta är användbart när det är mycket dyrare prestandamässigt att beräkna hela lösningen från början, än att utgå från en nästan giltig lösning. Ett exempel är en färdbeskrivning från en plats till en annan. Det kan då vara enklare att utgå från en färdbeskrivning mellan två städer nära ursprungsplatsen och destinationen än att beräkna en helt ny färdbeskrivning.

2.1.5 Grundlig likhet

Grundlig likhet innebär i det här arbetet att implementationen av liknelse och anpassning inte kräver djupare kunskaper om schack som t.ex. vanliga strategier, istället krävs i största del visuell igenkänning. Med grundlig likhet representeras problem som lägen och lösningar som dragen att utföra i respektive lägen. Inom grundlig likhet innebär problemlikhet att två lägen är lika om de generellt innehåller samma pjäser på samma rutor. Inom grundlig likhet innebär anpassning att ändra dragets käll- och destinationsrutor så lite som möjligt i avstånd, samtidigt som den fångande pjäsen och den eventuellt fångade pjäsen skiljer sig så lite som möjligt.

Djup likhet kan ses som en motsats till grundlig likhet. Djup likhet är likhet som inte syns visuellt, utan likheter mellan lägen och drag är beroende på om de är konceptuellt lika, om ett drag till exempel är del av en strategi att matta kungen, eller att hota kungen så att en värdefull pjäs kan fångas. En vanligt mer långvarig strategi är t.ex. skolmatt, där en spelare gör matt tidigt i partiet genom hota och matta kungen med en drottning, försvarad av t.ex. en löpare. Två lägen skulle med djup liknelse kunna anses lika om de båda liknar uppbyggnad mot skolmatt och anpassningen av draget skulle ske så att AI-agenten försöker göra skolmatt. Problemet med att använda djup likhet är att det finns så många olika strategier i schack som kan användas för att avgöra likhet och anpassning. Alla strategier måste vägas mot varandra för att avgöra vilken som ska prioriteras i ett visst läge, vilket ökar i komplexitet för varje ny strategi som appliceras. Det begränsar även AI-agenten till strategier som tidigare har upptäckts och definierats. Hsu (1991) har även visat att användandet av rigida strategier gjorde att schackmaskinen Deep Thought, föregångaren till Deep Blue (Campbell, Hoane & Hsu 2002) spelade sämre. Djup likhet är dessutom ett stort område som är svårt att undersöka till fullo, relativt till grundlig likhet.

Det är inte säkert att CBR med grundlig likhet är passande för en schackspelande AI-agents beslutsfattande. León-Villagrà och Jäkel (2013) har tidigare visat att visuell likhet skiljer sig från hur schackexperter känner igen liknande situationer, utan abstrakt likhet har istället visat sig bättre representera hur schackexperter tänker. Grundlig likhet är relaterat till visuell likhet

och djup likhet är relaterad till abstrakt likhet. Huruvida detta samband har en möjlighet att påverka om grundlig likhet kan användas för att uppfylla arbetets problemformulering är dock oklart.

2.1.6 Tidigare arbeten

CBR har tidigare applicerats på spel med varierande resultat.

Wender och Watson (2014) har undersökt hur CBR kan användas för att mikrohantera enheter i realtidsstrategispelet (RTS) Warcraft 3. Deras CBR-baserade AI-agent styrde och attackerade med enheter baserat på tidigare liknande situationer. Likhetsmetoden i arbetet var hur nära de respektive enheterna var varandra i situationerna och hur lika deras hälsopoäng var. I arbetet testade de deras CBR-baserade AI-agent på mänskliga spelare och undersökte hur spelets inbyggda AI presterade på sin högsta skicklighetsnivå mot spelarna. De kom fram till att bara de bästa spelarna kunde besegra båda AI-agenterna, men ingen kunde besegra den CBR-baserade AI-agenten utan att förlora några enheter.

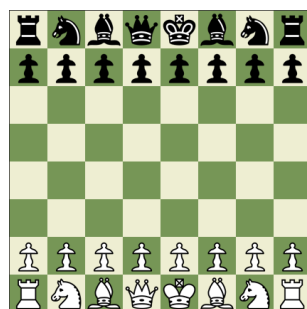
Bellamy-McIntyre (2008) presenterade hur CBR kan appliceras för att lära en AI-agent att göra bud i öppningar av bridge. Det upptäcktes dock att AI-agenten inte lyckades göra bra bud med sina givna händer, för att två händer som ansågs lika enligt likhetsmetoden ofta hade olika bud. Bellamy-McIntyre sammanfattade att CBR kanske inte är lämpligt för bridge-AI, eftersom att bridgespelare ofta använder ett regelverk för att bestämma vilket bud de ska göra för en given hand - de baserar inte sina bud på tidigare bud från liknande händer.

I Rubins (2013) arbete undersöks lämpligheten av att använda CBR för att utveckla en AI-agent som kunde spela olika Texas hold 'em varianter. AI-agenten kunde bestämma vilka bud den skulle ge baserat på vad andra spelare gjort i en pokertävling när de haft liknande kort på hand och på bordet. Den presterade bortom förväntningar och lyckades vinna Annual Computer Poker Competition (ACPC) från 2009 t.o.m. 2012.

2.2 Schack

2.2.1 Regler

Reglerna i schack har utvecklats genom åren och än idag spelas tävlingar med små variationer. Reglerna i denna sektion är baserade på reglerna som schackorganisationen FIDE (World Chess Federation) använder i deras anordnade tävlingar (World Chess Federation 2014c). Schack är ett turordningsbaserat brädspel för två spelare där målet är att besegra sin motståndare. Spelet utspelar sig på en 8x8-rutors spelplan, där varje spelare kontrollerar varsin armé av spelpjäser – vit och svart. I Figur 3 visas en bild av spelplanen i början av spelet.



Figur 3 Bild av spelplanen i början av spelet.

Spelarna turas om att flytta spelpjäser i sina arméer. En spelare får bara flytta en spelpjäs per drag. Två pjäser av samma färg får inte ockupera samma ruta. Om en spelare flyttar en av sina spelpjäser på en ruta ockuperad av en motståndarpjäs, så fångas motståndarpjäsen och lämnar spelplanen för resten av partiet. Högst en pjäs i taget får ockupera en ruta, och en pjäs får generellt inte flytta till en ruta om andra pjäser står i vägen till rutan. Om en pjäs kan flytta till specifik ruta betraktas det som att pjäsen hotar rutan, eller pjäsen som står på rutan.

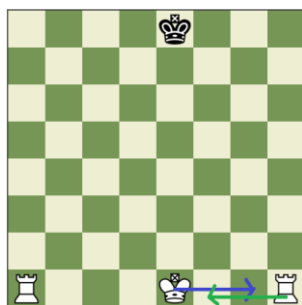
Bonden (♟) kan flytta sig ett steg rakt framåt (sett från den ägande spelarens håll), två steg rakt framåt om det är dess första förflyttning, eller ett steg diagonalt framåt om draget är ett fångande drag. Om en bonde når den sista raden sedd ur ägarens perspektiv, så kan den omvandlas till vilken annan pjäs som helst förutom en kung eller en bonde. Om en spelare flyttar en bonde två steg, så kan bonden betraktas som om den bara tog ett steg, om den fångas av en motståndarbonde nästa drag. Detta kallas *en passant* och är franska för "i förbifarten". En passant illustreras i Figur 4.



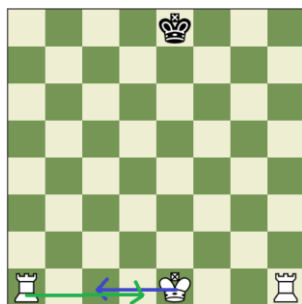
Figur 4 Bild av en passant. Om vit flyttar sin bonde två rutor framåt kan den svarta bonden fånga den genom att flytta till rutan som den röda pilen indikerar.

Springaren (♘) kan flytta sig två steg horisontellt eller vertikalt, och ett steg på den resterande axeln. Springaren kan flytta till en ruta även om det finns pjäser som blockerar vägen. Löparen (♞) kan röra sig diagonalt. Tornet (♖) kan röra sig horisontellt eller vertikalt. Drottningen (♑) kan antingen röra sig horisontellt, vertikalt eller diagonalt. Kungen (♔) kan röra sig ett steg horisontellt, vertikalt eller diagonalt.

En spelare kan göra så kallad rockad med sin kung och ett torn, om det inte finns några pjäser mellan tornet och kungen, varken tornet eller kungen har flyttats förut, och varken rutan som kungen står på, passerar eller landar på är hotad. Rockaden går till så att kungen flyttas två steg i tornets riktning, och tornet flyttas i kungens riktning så att den hamnar en ruta på andra sidan av kungens nya position. Figur 5 illustrerar hur detta kan se ut om den vita kungen gör rockad med det närmaste tornet, och Figur 6 illustrerar rockad med tornet längst bort. Detta kallas kort respektive lång rockad.

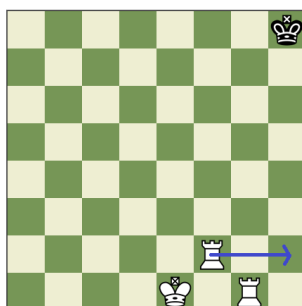


Figur 5 Bild som visar hur pjäserna flyttas när vit gör kort rockad.



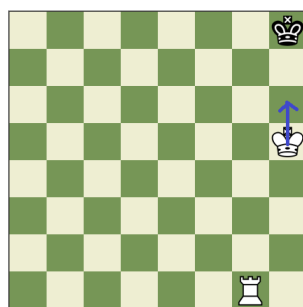
Figur 6 Bild som visar hur pjäserna flyttas när vit gör lång rockad.

En spelare får aldrig göra ett drag som leder till att motståndaren hotar spelarens kung. Om en spelare gör ett drag så att motståndarens kung hotas kallas det för schack. Detta gäller även om kungen hotas av pjäser som skulle lämna sin kung hotad om de flyttade från sin ruta. Om motståndaren inte kan följa upp med ett drag som försätter kungen ur schack vinner spelaren, vilket kallas för schack matt. Ett exempel av schack matt visas i Figur 7.



Figur 7 Bild som visar hur vit kan göra schack matt. Kungen hotas av tornet på andra raden, samtidigt som den inte kan flytta sig utan att fortfarande hotas.

Om motståndarens kung inte hotas, men samtidigt inte kan göra något drag utan att kungen hotas så blir det lika, vilket även kallas för remi. Ett exempel av remi visas i Figur 8.



Figur 8 Bild som visas hur vit kan göra remi. Den svarta kungen hotas inte, men samtidigt kan den inte flytta sig någonstans utan att hotas av tornet eller den vita kungen.

Det finns två regler för att avbryta partier som inte leder mot vinst för någon av spelarna. Den första regeln säger att spelet är oavgjort om ett läge upprepar sig tre gånger under ett parti. Den andra regeln säger att spelet är oavgjort om ingen spelare flyttar en bonde på 50 drag.

2.2.2 Elo-rankning

Elo-rankning är ett sätt att ranka schackspelare relativt till varandra, namngett efter dess skapare Arpad Elo (Elo 1978). Rankningssystemet har sedan dess används av schackorganisationer som FIDE (World Chess Federation 2014a). Enligt Elo-rankningssystemet rankas spelare i form av poäng. Rankningar av spelare uppdateras kontinuerligt allteftersom spelare spelar partier mot varandra i schacktävlingar. Hur mycket en spelares rankning påverkas av vinster och förluster beror på hur hög dess rankning är proportionerligt till dess motståndare, vilket avgör **sannolikheten** att en av dem kommer vinna. **Sannolikheten** att en spelare kommer besegra en annan spelare är baserat på skillnaden i deras rankning, men de exakta siffrorna är organisationsspecifika. T.ex. så anser FIDE att **sannolikheten** är en procenthalt mellan 0 % och 100 % (uttryckt som 0 till 1), och skillnaden i rankning är ett tal mellan -800 och +800 poäng (World Chess Federation 2014a). Om skillnaden i rankning är större eller lägre än +800 poäng är **sannolikheten** 100 % att spelaren med högre rankning vinner.

Hur mycket en spelares rankning påverkas av ett parti beräknas på följande sätt:

- För varje parti får en spelare 1, 1/2 eller 0 poäng om den vann, gjorde remi eller förlorade.
- **Sannolikheten** att en spelare skulle vinna (mellan 0 och 1) subtraheras från antalet poäng den fick. Detta tal kan bli 1 som mest och -1 som minst.
- Detta tal multipliceras med en koefficient mellan 10 till 40, baserat på hur många partier spelaren tidigare spelat, dess nuvarande rankning och ålder.
- Det slutgiltiga (möjligen negativa) talet adderas med spelarens nuvarande rankning, för att få dess nya rankning.

Detta system ser till att spelare inte går ner mycket i rankning om de inte förväntas vinna; en spelare kan inte ens minska i rankning om den förlorar mot en spelare med mer än 800 i rankning. Likaså kan en spelare inte gå upp i rankning om den bara besegrar spelare med mycket lägre rankning. Om en spelare gör remi med en motståndare med högre rankning går spelaren upp i rankning och motståndaren ner, vilket leder till att de närmar sig samma rankning om det kontinuerligt gör remi mot varandra.

2.2.3 Portable Game Notation

I artikeln *Standard: Portable Game Notation Specification and Implementation Guide* (1994) beskrivs PGN som ett format för att spara och beskriva schackpartier. Formatet blev snabbt populärt och idag finns det tusentals allmänt tillgängliga sparade partier på t.ex. FIDE:s hemsida. Ett PGN-dokument kan innehålla ett antal partier och varje parti innehåller metainformation om partiet och de drag som utfördes i partiet. Informationen kan gälla när eller var partiet spelades och av vilka. Dragen skrivs med algebraisk notation (AN).

AN är en notation som beskriver drag kortfattat till den grad att de inte är tvetydiga. Raderna numreras från vits synvinkel med bokstäver från a till h, och kolumnerna med siffrorna 1 till 8. En ruta på spelplanen kan då beskrivas med dess tillhörande rad och kolumn t.ex. e4 eller a2. Drag har ett prefix med stor bokstav som beskriver vilken sorts pjäs som flyttades. N för springare, R för torn, B för löpare, Q för drottning, K för kung, medan bonde saknar prefix. Detta följs av positionen som pjäsen flyttades till. Exempel: e4, Nf3, Bb5. Om draget är ett fångande drag så sätts ett x framför rutan som pjäsen flyttades till. De drag som leder till schack har ett plustecken som suffix. Kort rockad representeras med "O-O" och lång rockad representeras med "O-O-O".

I de fall då ett drag är tvetydigt, t.ex. om två springare på e4 respektive e6 kan flytta till c5, så följs pjäsbokstaven av radkoordinaten eller kolumnkoordinaten beroende på vilken som kan uttrycka draget unikt (Nee5 är inte unikt i detta fall, medan N4e5 är det). Efter det sista draget i partiet visas resultatet 1-O, O-1, eller 1/2-1/2 om vit vann, förlorade, respektive gjorde remi med svart. I Figur 9 visas ett exempel av ett parti beskrivet i PGN.

```
[Event "F/S Return Match"]
[Site "Belgrade, Serbia Yugoslavia|JUG"]
[Date "1992.11.04"]
[Round "29"]
[White "Fischer, Robert J."]
[Black "Spassky, Boris V."]
[Result "1/2-1/2"]

1. e4 e5 2. Nf3 Nc6 3. Bb5 a6 {This opening is called the Ruy Lopez.}
4. Ba4 Nf6 5. O-O Be7 6. Re1 b5 7. Bb3 d6 8. c3 O-O 9. h3 Nb8 10. d4 Nbd7
11. c4 c6 12. cxb5 axb5 13. Nc3 Bb7 14. Bg5 b4 15. Nb1 h6 16. Bh4 c5 17. dxe5
Nxe4 18. Bxe7 Qxe7 19. exd6 Qf6 20. Nbd2 Nxd6 21. Nc4 Nxc4 22. Bxc4 Nb6
23. Ne5 Rae8 24. Bxf7+ Rxf7 25. Nxf7 Rxe1+ 26. Qxe1 Kxf7 27. Qe3 Qg5 28. Qxg5
hxg5 29. b3 Ke6 30. a3 Kd6 31. axb4 cxb4 32. Ra5 Nd5 33. f3 Bc8 34. Kf2 Bf5
35. Ra7 g6 36. Ra6+ Kc5 37. Ke1 Nf4 38. g3 Nxb3 39. Kd2 Kb5 40. Rd6 Kc5 41. Ra6
Nf2 42. g4 Bd3 43. Re6 1/2-1/2
```

Figur 9 Ett schackparti i PGN-formatet. Notera att numreringen inte ökar för varje drag, utan varje par av drag.

2.2.4 Schack AI:s historia

Forskning inom schack AI tog fart efter att Shannon (1950) presenterade ett exempel på en schackspelande dator. Den var utformad så att den kunde bestämma ett drag att utföra baserat på vilket läge spelet var i och vilken färg den hade. Datorn försökte lista ut vilket drag som var bäst genom att internt göra alla möjliga kombinationer av drag ett antal drag i framtiden. Detta liknar förgreningen av ett sökträd, där varje drag är en kant och varje läge är en nod. Efter förgreningen så utvärderades lägena, och det drag som ledde till det garanterat bästa läget valdes. Med garanterat bästa menas att det ledde till det bästa läget givet att

motståndaren spelade så bra som möjligt. Sökalgoritmen som användes för att hitta det garanterat bästa läget kallas för minimax (McKinsey 1952). De flesta lägen går inte exakt att utvärdera om de inte är en vinst, förlust eller remi och därför används en heuristik. Heuristiken kan vara baserat på allt ifrån summan av spelarnas pjäsers värden till om det finns flera bönder av samma färg på samma kolumn (Shannon 1950). Ett läge representeras som en lista av 64 heltal, där varje heltal beskriver vilken pjäs av vilken färg som finns på en viss ruta, alternativt att rutan är tom.

Shannons exempel har förfinats på olika sätt genom åren. Bitboards är ett alternativt sätt att representera lägen i schack som är passande för att snabbt generera vilka drag som kan utföras ett givet läge (Slate & Atkin 1977). Det går ut på att lagra olika information av brädet i listor av 64 bitar, där varje bit representerar om en viss ruta uppfyller ett predikat specifikt för listan. Predikaten är ofta av formen "är rutan hotad av en pjäs av en viss typ" eller "har pjäsen på rutan en viss färg". Anledningen att bitboards är så användbara är att binära operationer mellan bitboards kan ge användbar information snabbt på hårdvara som har inbyggda operationer för 64-bitars register. T.ex. går det att sälla brädet med rutorna som de vita springarna kan hota genom att utföra xor på brädet av vita pjäser (Laramée 2000b). Alfabetasökning är en söktechnik för att undvika expansionen av grenar i ett träd, om det går att lista ut att motståndaren aldrig skulle besöka grenarna för att de inte är fördelaktiga nog (Frey 1983). Sökning används numera inte lika mycket under öppningar för att de har studerats i större utsträckning genom åren och har mer eller mindre "lösts" (Lincke 2001). Likaså har alla möjliga slutspel med ett lågt antal pjäser lösts genom att använda genererade slutspelsdatabaser (Heinz 1999). Trots alla förbättringar går det fortfarande inte att garanterat välja det bästa draget i varje läge med dagens schack-AI. Problemet är att söktiden är exponentiellt proportionerlig till djupen som söks i sökträdet. På grund av detta finns det ett väldigt stort antal möjliga lägen att undersöka för ett lågt antal drag. Shannon (1950) estimerar att antalet möjliga lägen är i närheten av 10^{54} och det skulle ta alldeles för lång tid för en dator att undersöka så många lägen.

Schack benämndes ofta förr som "bananflugan av AI" (McCarty 1990). Liknelsen syftar på att bananflugor började användas inom biologisk forskning om genetik för att det var så lätt att föda upp dem. Likaså har schack ansetts vara ett spel med enkla regler och ett tydligt men svårnått mål, som kan användas som testramverk för att undersöka hypoteser (Simon & Chase 1973). Problemet var att forskning inom schack AI fokuserade mer på specifika tekniker för att förbättra Shannons (1950) exempel, medan alternativa tekniker fick mindre uppmärksamhet (Schaeffer 1991; Ensmenger 2012). Därför anser Schaffer (1991) att schack bör överges som testramverk för AI och fokus bör förflyttas till spelet go. Trots detta har ett antal alternativa tillvägagångssätt presenterats genom åren. Gould & Levison (1991) presenterar i sitt arbete en schackspelande AI-agent vid namn *Morph*. Morph utmärks av att den under ett antal spelade partier lär sig associera mönster av schackformationer med drag som bör utföras. Likt AI-agenten i detta arbete är den baserad på tanken att liknande problem har liknande lösningar. Morph skiljer sig dock från AI-agenten i detta arbete eftersom den börjar med väldigt lite kunskap, och lär sig genom att spela partier. Morph lärde sig att utföra olika attacker, men kunde inte alltid lista ut hur den kunde avsluta dem och vinna de partier den deltog i.

Innan persondatorer blev vanliga byggdes ofta maskiner som endast kunde spela schack. Dessa maskiner behövde en mänsklig operatör som kunde berätta för maskinen vad dess motståndare gjorde för drag och kunde utföra maskinens egna drag (Greenblatt, Eastlake &

Crocker 1969). Idag har schackmaskiner i stort bytts ut mot schackmotorer och operatörer mot grafiska och textbaserade användargränssnitt implementerade som mjukvara på persondatorer. Det finns ett antal kommunikationsprotokoll som används för att kommunicera mellan schackmotorer och användargränssnitt. XBoard (Mann & Muller 2009) är ett kommunikationsprotokoll baserat på användargränssnittet med samma namn och *Universal Chess Interface* (UCI) (Huber 2006) är ett nyare alternativ till XBoard.

Ända sedan schackmaskinen Deep Blue besegrade den dåvarande världsmästaren Kasparov (Campbell, Hoane & Hsu 2002) har schackmotorer och schackmaskiner mer och mer används för att utmana varandra istället för mänskliga spelare. De flesta schackmotorer kan nu för tiden besegra stormästare utan specialanpassad hårdvara. Pocket Fritz 4 är exemplarisk i att den implementerades på en telefon och samtidigt vann Mercusor Cup 2009, en av de enda tävlingarna på senare tid som tillåtit både mänskliga spelare och schackmotorer som deltagare (Chess News 2009). Varje år hålls World Computer Chess Championship (WCCC) av International Computer Game Association (ICGA) som är en tävling för schackmotorer. Tillställningen hålls inte bara för att utse en vinnare, men även för att dela teknisk kunskap med ICGA:s tidskrift: ICGA Journal, som presenterar analyser av partier mellan spelare i spel som schack och go. Det finns även en annan tävling vid namn Thoresen Chess Engines Competition (TCHE) där de bästa schackmotorerna spelar mot varandra under långa perioder, vilket kan ses live på deras hemsida (<http://tcec.chessdom.com/live.php>). I januari 2015 blev Komodo 8 den nya världsmästaren bland schackmotorer när den uppnådde en Elo-rankning av 3320 poäng och besegrade den tidigare världsmästaren Stockfish 4, som hade en Elo-rankning av 3300 poäng (Anthony 2014). Detta är högt jämfört med den nuvarande mänskliga världsmästaren Magnus Carlsen, som i början av februari 2015 bara hade en Elo-rankning av 2865 poäng (World Chess Federation 2015).

3 Problemformulering

3.1 Problemformulering

AI för schack är ett forskningsområde som har fått mycket uppmärksamhet. Trots detta är schack ett olöst problem – det finns ännu ingen beprövat teknik att garanterat besegra en motståndare, som samtidigt går att implementera på existerande hårdvara. Det kan därför vara värt att undersöka hur väl alternativa AI tekniker kan appliceras på schack, i hopp om att närma sig en lösning. Det finns flera saker som tyder på att CBR kan vara lämpligt för en schackspelande AI-agents beslutsfattande. **CBR är en problemlösningsteknik baserad på idén att liknande problem har liknande lösningar, vilket innebär att lösningar på tidigare problem kan användas för att lösa nya problem, givet att problemen är tillräckligt lika.** Detta innebär att alla möjliga fall inte behöver finnas i dess fallbas för att AI-agenten fortfarande ska kunna lista ut vilket drag som är bäst att utföra i ett visst läge, givet en tillräckligt bra liknelsemetod och anpassningsmetod. Med CBR behöver det därför inte finnas fall för alla möjliga 10^{54} lägen, eftersom flera av dem teoretiskt kan härledas. Det kan även visa sig att en **CBR-baserad schackspelande** AI-agent kan spela lika bra som experten dess fallbas är baserade på, vilket kan användas för att utveckla schack-AI med varierbar eller flexibel svårighetsgrad.

AI-agenten tillsammans med en fallbas kallas för ett beteende. Denna definition av beteende innebär att uttryck som "två beteende spelar mot varandra" betyder "AI-agenten spelar mot sig själv med olika fallbaser" och "ett beteende spelar" betyder "AI-agenten med en viss fallbas spelar". Ett beteendes expert definieras som experten som AI-agents fallbas är baserad på.

I detta arbete undersöks det om CBR med grundlig likhet passar för en schackspelande AI-agents beslutsfattande. Ordet passar innebär att beteenden med bättre experter spelar bättre. Om så är fallet skulle det gå att med en liten felmarginal förutse hur bra AI-agenten skulle spela beroende på dess fallbas. Ett exempel där denna information är användbar är ett schackspel som har en AI-agent med justerbar svårighetsgrad. AI-agentens beslutsfattande skulle kunna vara baserad på CBR med grundlig likhet och den skulle kunna använda fallbaser baserade på bättre experter på högre svårighetsgrader.

En spelare anses spela bättre om den har en högre Elo-rankning. Det anses att ju större skillnaden i Elo-rankning är mellan två spelare desto större är sannolikheten att spelaren med högre Elo-rankning skulle vinna ett framtida parti mellan dem. FIDE (2014a) har definierat en tabell för att översätta mellan sannolikhet att vinna och skillnad i Elo-rankning. Ett beteende förväntas dock inte spela lika bra som **dess expert** och det är svårt att förutse hur tabellen skulle kunna översättas från skillnader i Elo-rankning av experterna till skillnader i Elo-rankning för beteendena. T.ex. så anser FIDE (2014a) att om skillnaden i Elo-rankning mellan två spelare är 193 poäng så är det 75 % chans att den högre rankade spelaren kommer vinna i ett framtida **parti; de exakta sannolikheterna förväntas inte gälla för beteendena.** Beteendena behöver inte heller uppfylla några skicklighetskrav gentemot Elo-rankade spelare, dvs. de måste inte spela lika bra, bättre eller sämre än en spelare med en viss Elo-rankning. AI-agenten bör dock vinna oftare med fallbasen baserad på den högre rankade spelaren, vilket kräver att beteendena kan spela så bra att de kan besegra varandra. Eftersom Elo-rankningar inte alltid stämmer exakt och ständigt förändras tillåts det att ett beteenden vars expert har lägre Elo-rankning vinner oftare mot ett beteende vars expert har högre Elo-rankning om skillnaden i rankning är mindre än 100 poäng. **Anledningen till att 100 poäng används är att FIDE (2014a) anser att 100 poäng skillnad i Elo-rankning innebär att sannolikheten är**

ungefär 64 % att den högre rankade spelaren kommer att vinna ett framtida parti. Det är högre än 50 %, så det är liten risk att den lägre rankade spelaren har tur och det är inte överdrivet högt. Eftersom inga absoluta skicklighetsgrad ställs på beteendena så innebär det att i exemplet med AI-agenten med varierbar svårighetsgrad så är resultatet av det här arbetet inte nödvändigtvis tillräckligt för att avgöra om den kan implementeras på ett tillfredställande sätt, om dess användare vill ha en utmaning. Det är fullt möjligt att beteendena går att rangordna men att de alla spelar sämre än en nybörjare. Det krävs mer forskning om beteenden kan uppnå viss skicklighet som förväntas av deras potentiella motståndare. Om grundlig likhet passar för en CBR-baserad schackspelande AI-agents beslutsfattande så bör det gå att rangordna ett antal beteenden, där ett högre rangordnat beteende vinner oftare mot ett lägre rangordnat beteende, givet att den största skillnaden i beteendenas experters Elo-rankningar är minst 100 poäng. Rangordningen bör även stämma överens med rangordningen av beteendenas experters Elo-rankningar. Det beteende vars expert har högst Elo-rankning bör ha högst rangordning av beteendena till exempel.

Det går teoretiskt redan att skapa en AI-agent med tidigare beprövade tekniker som spelar schack perfekt; problemet är att det skulle ta flera år att beräkna vilket drag som bör utföras i varje läge. Att undersöka om AI-agenten kan prestera väl utan resursbegränsningar är därför inte intressant. För att AI-agenten ska vara av användning måste den kunna implementeras på konsumenthårdvara och utföra drag under tidspress likt dagens schackmotorer. Tidskravet som AI-agenten förväntas följa är samma som spelare i FIDE-tävlingar förväntas följa. I FIDE-tävlingar får en schackspelare 90 minuter på sig att utföra sina första 40 drag (World Chess Federation 2014b). För att problemet ska anses löst måste det även gå att lösa med expertdata som finns tillgängligt i nuläget.

3.2 Metodbeskrivning

För att besvara frågeställningen har ett funktionsbibliotek skapats av en schackspelande AI-agent baserad på CBR, som kan använda olika fallbaser. Anledningen att ett funktionsbibliotek används är att det skulle vara för tidskrävande att för hand analysera den stora mängden expertdata som AI-agenten kommer använda och dra slutsatser om beteendenas prestation.

För att besvara frågan i problemformuleringen spelar beteendena ett antal matcher mot varandra för att avgöra vilka beteenden som är bättre mot andra beteenden. Fördelen med denna metod är att det var just genom vinster mot i huvudsak lägre rankade spelare och förluster mot i huvudsak högre rankade spelare som beteendenas experter fick sina Elo-rankningar. En nackdel med denna metod är att den inte ger ett diskret värde på ett beteendes skicklighet, utan skickligheten är bara i relation till andra beteenden. Det finns även en risk att det kan ta för lång tid att samla in tillräckligt mycket information i undersökningen för att dra en pålitlig slutsats. Ett alternativ vore att undersöka beteendenas skicklighet i matcherna genom att mäta deras genomsnittliga fördel över motståndaren med hjälp av en heuristik. En heuristik är dock bara en approximation och är nödvändigtvis inte korrekt. Det finns dessutom ingen perfekt heuristik för schacklägen i nuläget. Istället för att låta beteendena tävla mot varandra så kan de tävla mot riktiga rankade spelare. Baserat på resultatet går det att avgöra hur bra de är relativt varandra. Problemet med denna metod är att det inte ställs några krav på hur bra beteendena måste spela, vilket innebär att väldigt många spelare av olika skicklighet måste spela mot dem för att garanterat få en uppfattning av deras skicklighet. Beroende på hur bra beteendena spelar så finns det kanske inte tillräckligt bra eller dåliga

spelare för att ge en uppfattning på hur relativt bra de spelar gentemot varandra. T.ex. om alla beteenden spelar sämre än en nybörjare så finns det inga personer tillgängliga som skulle kunna vinna över vissa och förlora mot andra, även om beteendena faktiskt spelar relativt bra gentemot varandra. Det kan vara värt att komplettera den valda metoden med denna metod, men det har inte gjorts i detta arbete. Ett annat alternativt sätt att utföra undersökningen är att låta experter observera några få partier spelade av respektive beteende och ranka dem efter experternas utlåtanden. Denna metod har dock nackdelen att det kan vara svårt att göra expertutlåtanden baserat på så lite information.

Metoden går ut på att låta beteenden spela partier mot varandra och analysera partiernas resultat. För varje parti får ett beteende poäng gentemot ett annat beteende; ett om det vann, ett halvt om det blev lika och noll om det förlorade. Efter att alla har spelat ett antal partier mot varandra så räknas poängen. Beteendena rangordnas sedan på ett sådant sätt att ett högre rangordnat beteende fått högre poäng mot ett lägre rangordnat beteende. Varje beteendes rangordning måste stämma överens med rangordningen av dess experts Elo-rankning relativt de andra experternas Elo-rankningar för ett positivt resultat.

AI-agenten kan konfigureras med vikter så att olika aspekter av likhet prioriteras mer andra, dvs. att vissa aspekter av likhet påverkar den totala likheten olika mycket. Ett antal konfigurationer av vikter används för att undersöka om någon eller några aspekter av likhet ger bättre resultat. Det räcker med att en konfiguration av vikter ger ett positivt resultat för att resultat av problemet ska anses som positivt. Anledningen till att olika viktkonfigurationer används är att utforska problemformuleringens fråga till en större grad. Om en viss konfiguration ger ett nekande resultat så kan det antingen innebära att olika aspekter värderas fel eller att svaret på frågan är nekande. Syftet är att konfigurationerna ska täcker upp tillräckligt många olika likhetsaspekter och kombinationer av likhetsaspekter så att resultatet av undersökningen blir pålitligt. Anledningen till att bara en konfiguration behöver ge ett positivt resultat är att viktkonfigurationerna representerar flexibla implementationsval och likt andra implementationsval förväntas det att vissa ger bättre resultat än andra.

Expertdata från olika experter kommer från drag som experten utfört i olika lägen i tidigare partier. En allmänt tillgänglig databas av sparade schackpartier används som källa för expertdata. Skillnaden mellan två experters Elo-rankningar är aldrig lägre än 100 poäng. Anledningen att tidigare spelade partier används är att det finns mycket fler partier tillgängliga än antalet som skulle hinna produceras specifikt för arbetet. De är även gratis tillgängliga och saknar upphovsrätt. Experternas prestationer och resultat under tidigare utförda schackpartier ledde till deras Elo-rankningar, så det är naturligt att använda dessa partier för att representera dem. Även om många partier från experterna används så är det inte garanterat att alla partier som experterna har spelat finns tillgängliga, vilket innebär att partierna inte ger en helhetsbild av hur experterna fick sina respektive Elo-rankningar. Om en större andel av de partier som experten vunnit gentemot de partier som den förlorat skulle finnas tillgängliga så borde AI-agenten kunna spela bättre än förväntat med expertens fallbas. Motsatsen är lika möjlig. Det finns även en risk att olika experter har olika många tillgängliga sparade partier procentuellt gentemot hur många partier de spelat för att ha fått sin rankning. Detta skulle kunna ge dem en oproportionerligt mindre fallbas gentemot andra än de teoretiskt skulle kunna haft, än om alla deras partier varit tillgängliga i databasen. Ett alternativ till att använda inspelade partier är att låta experterna delta i en personlig undersökning där de presenteras med olika lägen och måste välja vilket drag de skulle utföra i respektive läge. Ett stort problem med detta alternativ är att det skulle ta väldigt lång tid att

samla in data av relativ storlek till deras tidigare partier. Om mängden insamlad data inte är av samma storleksordning som redan tillgänglig data är det osannolikt att de insamlade data skulle vara pålitligt relativt redan tillgänglig data.

Att bara ta hänsyn till resultatet av partierna kan ge en falsk bild av hur bra ett beteende spelar schack. Det går att basera beteendens rangordning på fler viktiga aspekter som hur bra pjäsbyten den gör (om den offrar en bonde för en drottning t.ex.), hur snabbt den avancerar sin armé eller hur bra den spelar i öppningar, mittspel och slutspel. Av denna anledning analyseras flera partier för hand för att upptäcka mönster i hur AI-agenten beter sig och varför. Det är möjligt att strängt definiera och undersöka hur AI-agenten presterar, men det löper risken att missa essensen av bra schackspelande; det är möjligt att t.o.m. en nybörjare kan se att ett beteende spelar bra eller dåligt trots att mätdata indikerar motsatsen. Om bra schackspelande gick att definiera koncist i dagsläget skulle schack inte vara ett olöst problem. Handanalysen kan därför inte ge ett lika väldefinierat resultat som poängmätningen. Syftet med handanalysen är främst att undersöka anledningen till poängmätningens resultat och hur pålitligt det är. Anledningen till att handanalysen utförs trots att det inte påverkar resultatet är att det är enklare dra slutsatser om AI-agentens eventuella styrkor och svagheter genom att studera partierna, annars måste dessa slutsatser härledas från implementationen vilket innebär att de kan bli mindre specifika och pålitliga.

4 Implementation

funktionsbiblioteket som beskrevs i metoden har skrivits i programmeringsspråket C# 4.0 och har kompilerats mot plattformen .NET 4.5. Funktionsbiblioteket innehåller en implementation av AI-agenten, men att bara presentera AI-agentens implementation skulle ge en otydlig bild av sammanhanget den kan användas i. Därför presenteras mer än bara AI-agentens implementation. De delar som presenteras men inte är del av AI-agenten används i undersökningen, som utförs med hjälp av ett program.

De flesta datastrukturer i biblioteket kan inte förändras (engelska: *mutate*), vilket innebär att för att t.ex. utföra ett drag på ett läge så måste ett nytt läge skapas. Detta har gjort det enklare att skriva korrekt kod och tagit bort många svårigheter med att utföra beräkningar parallellt. Bara på de områden i koden där prestanda är kritiskt tillåts förändring. Enhetstest (engelska: *unit test*) med testbiblioteket NUnit 3.0 har skrivits för att försäkras om att koden ständigt fungerar, trots förändringar och optimeringar. De flesta testerna berör bara implementationerna av schackalgoritmerna. Testerna garanterar inte korrektheten av alla testade algoritmers implementation, men det anses vara en liten risk att både algoritmerna och enhetstesten har skrivits fel. T.ex. om det är 1 % chans att en metod eller enhetstest av en metod är fel implementerad av misstag så är det 0,01 % chans att både metoden och enhetstestet är felskrivet, vilket är det enda fallet då ett implementationsfel inte skulle upptäckas. Om en felskrivning har gjorts i metoden så kommer testet misslyckas, om en felskrivning har gjorts i testet så kommer testet misslyckas eftersom att den korrekta metoden anses vara implementerad fel enligt det felaktiga testet.

För att beskriva funktioner som används i implementationen används matematiska funktionsdefinitioner och signaturer som definierat av Holmos (1960). Funktionssignaturer är av formen $F: A \rightarrow B$ där F är namnet på funktionen, A är domänen (mängd av alla möjliga argument) och B är målmängden (alla möjliga resultat är en delmängd av målmängden). En konvention i rapporten är att namn på mängder och funktioner börjar med stor bokstav medan element, argument och variabler börjar med liten bokstav.

4.1 Schack

I den här sektionen beskrivs implementationen av diverse datastrukturer och algoritmer som valts för att implementera de schackrelaterade delarna av AI-agenten och undersökningen.

Det finns inte många avvägningar för val av schackalgoritmer och datastrukturer. Det går inte att implementera schack mer eller mindre korrekt på grund av dess stränga regler, så de enda avvägningarna att ta hänsyn till är prestanda, minneskrav och enkelhet att implementera, förstå och utbygga. I sin artikelserie beskriver Laramée (2000a; 2000b; 2000c; 2000d; 2000e; 2000f) olika datastrukturer och algoritmer som kan användas för att implementera en schackspelande AI-agent. Det framhävs av hans presentation att det generellt finns vissa schackrelaterade datastrukturer och algoritmer som är enkla att implementera och andra som kan implementeras mer effektivt. I det här arbetet används främst de enkla datastrukturerna och algoritmerna eftersom det förväntas att AI-agenten hinner bestämma drag med de tidskrav som ställs på den, oavsett val av schackrelaterade algoritmer och datastrukturer. Det innebär inte att implementationerna av de valda algoritmerna inte kan behöva optimeras, bara att funktionsbiblioteket antagligen inte kommer hindras av dem för att uppfylla sina prestandakrav. Valen lär ha mindre prestandapåverkan än för andra vanliga schackspelande

AI-agenter, eftersom deras flaskhals är generering och utförande av drag i sökträd (Slate & Atkin 1977), medan det förväntades att funktionsbibliotekets flaskhals är hämtningen av fall från AI-agentens fallbas.

4.1.1 Parti

Schack är ett spel mellan två agenter (beteenden i det här arbetet) som har ett definitivt slut. Agenterna turas om att göra ett drag i taget i ett parti. Efter varje drag kan resultatet av partiet vara bestämt eller inte. Partiet fortsätter tills resultatet är bestämt. Ett resultat är ett element i mängden $Resultat = \{Obestämt, Lika, VitVinst, SvartVinst\}$, och resultatet av ett läge kan ges av funktionen $ResultatAvLäge: Läge \rightarrow Resultat$. Varje parti börjar alltid i samma läge men ändras beroende på agenternas beslut. Ett drag är ett beslut som kan utföras i ett positivt antal möjliga lägen och mängden av alla drag representeras med symbolen $Drag$. Alla drag kan inte utföras i alla lägen, så funktionen $GiltigaDrag: Läge \rightarrow PowerSet(Drag)$ ger en mängd av alla giltiga drag som kan utföras i ett givet läge. Funktionen $UtförDrag: Läge \times Drag \rightarrow Läge$ kan ge ett läge där ett visst giltigt drag har utförts på det givna läget. Genom att utföra ett drag på det resulterade läget av $UtförDrag$ och sedan på resultatet av det draget osv. kan ett parti spelas. Beteendena kan ses som funktioner som översätter ett läge till det giltiga drag som agenten anser bör utföras i läget, dvs. funktionssignaturen för beteendena är: $Beteende: Läge \rightarrow Drag$. Med detta i åtanke kan ett schackparti implementeras med följande algoritm:

1. Initiera det nuvarande läget till det ursprungliga läget och låt den nuvarande agenten vara agenten som spelar vit.
2. Låt den nuvarande agenten besluta ett drag att utföra givet det nuvarande läget.
3. Utför draget på det nuvarande läget.
4. Om resultatet av partiet är obestämt, byt ut den nuvarande agenten mot den andra och gå till steg 2, annars är algoritmen slutförd.

4.1.2 Bräde

Representationer av bräden kan variera beroende på vad de behöver användas till mest. Behöver delar av implementationen ofta ta reda på vad som finns på en viss ruta, eller är det vanligare att fråga vilka pjäser som finns på brädet och deras respektive rutor? Representationer som fokuserar på att besvara dessa frågor är rutcentrerade eller pjäscentrerade enligt Chess Programming Wiki (CPW) (2013a). Ett exempel på en pjäscentrerad representation är pjäslistor. Pjäslistor är ett par av listor, en per spelare, som innehåller par av pjästyp och rutindex, som indikerar vilka rutor som respektive spelares pjäser står på (Chess Programming Wiki 2013b). En annan pjäscentrerad representation är bitboards (Slate & Atkin 1977) som presenterades i sektion 2.2.4. En rutbaserad representation är 8x8 Board (Shannon 1950; Chess Programming Wiki 2014a) som representeras med en 64-elementslista av heltal likt den representation som används i det här arbetet. En annan rutbaserad representation är 10x12 Board (Chess Programming Wiki 2014b) som representeras med en 120 elementslista. Anledningen att använda ett större bräde är att springardrag alltid kan utföras även om de landar utanför brädet. Detta innebär att dessa drag kan sällas bort i ett senare skede av draggenereringen, vilket kan ge en prestandavinst över 8x8 Board. Ingen av dessa har en speciell fördel över de andra förutom potentiella minneskrav att lagra och hur effektiv draggenererings- och dragutförandealgoritmen kan implementeras. Som nämnt tidigare förväntas prestandaförbättringarna vara oviktiga för detta arbete och därför valdes 8x8 Board för att den ansågs lättast att implementera.

Ett schackbräde representeras med en 64-elementslista av bytes, där varje element representerar vad som finns på rutan indikerad av dess plats listan. **a1** är den första rutan, b1 den andra, a2 den nionde och h8 den 64:e, dvs. $(rad - 1) * 8 + kolumn$ avgör vilken plats i listan som en viss rutas innehåll är lagrat på. Mängden giltiga index för rutor kan då definieras som $RutIndex = \{n \mid n \in \mathbb{N} \wedge 1 \leq n \leq 64\}$. Det som kan finnas på en ruta är en pjäs med en färg och typ, eller avsaknaden av en pjäs. För att skilja på olika sorters pjäser och avsaknaden av en pjäs används heltal där varje unikt värde representerar en unik pjäs- och färgkombination alternativt avsaknaden av en pjäs, som Shannon (1950) gjorde i sin beskrivning av en schackmaskin. I det här arbetet är heltalet en byte där den första biten representerar om det finns en pjäs på rutan, de tre följande bitarna representerar **pjästypen, den femte biten representerar färgen på pjäsen och de tre sista bitarna är oanvända. Eftersom ett pjäsinnehåll inte tar upp mer än en byte spelar skillnader mellan lilla endian och stora endian arkitekturer ingen roll. Den i:te biten är även samma på alla arkitekturer och har det numeriska värdet $2^{(i-1)}$** . Eftersom tre bitar används för att representera typen kan det finnas upp till åtta olika pjästyper, men det krävs bara sex stycken för schack. De är bonde, torn, springare, löpare, drottning och kung, där bonde representeras av $(000)_2$, torn representeras av $(001)_2$ osv.. Mängden *RutInnehåll* kan därför beskrivas som alla unika positiva heltal som får plats i fem bitar och bildar det tomma rutinnehållet eller en giltig färg och typ kombination. Notera att det tomma rutinnehållet antar att de resterande bitarna för färg och typ är noll, så det finns bara ett heltal som representerar ett tomt rutinnehåll. Funktionen ***InnehållerPjäs: RutInnehåll* \rightarrow *Boolean*** säger om ett givet rutinnehåll är en pjäs. Funktionen ***PjäsFärg: RutInnehåll* \rightarrow *Färg*** ger färgen för ett rutinnehåll givet att det innehåller en pjäs, där $Färg = \{Vit, Svart\}$. ***PjäsTyp: RutInnehåll* \rightarrow *Typ*** ger pjästypen för ett rutinnehåll givet att det innehåller en pjäs, där $Typ = \{Bonde, Torn, Springare, Löpare, Dam, Kung\}$. Funktionen ***InnehållPåRuta: Bräde* \times *RutIndex* \rightarrow *RutInnehåll*** ger innehållet på en viss ruta för ett visst bräde.

4.1.3 Läge

Ett läge i schack representeras med ett bräde och diverse bokföringsinformation för speciella regler. Representationen av bokföringsinformationen är baserad på representationen som Shannon (1950) använde i sitt arbete. Det senaste draget sparas för att avgöra om en passant är giltigt. Det hålls reda på om kungarna och tornen har flyttat på sig för att avgöra om rockad är giltigt. Ett heltal används för att hålla reda på antalet drag sedan en bonde flyttade sig för att upptäcka om ett läge är remi efter 50 drag utan en flyttad bonde. Alla tidigare brädformationer sparas i en ordbok från lägen till antal gånger de skett under partiet för att upptäcka om en brädformation upprepat sig tre gånger vilket skulle innebära remi. Efter att ett drag har utförts indexeras ordboken med den nya brädformationen och ökar antalet kopplat till den. Om det är första gången brädformationen skett sätts antalet till ett istället. Läget håller även reda på färgen av den nuvarande spelaren och byter färg efter varje drag. Med denna information går det att avgöra resultatet i ett visst läge med följande algoritm:

1. Är den nuvarande spelaren i schack och har inga giltiga drag att utföra? I så fall är resultatet att den nuvarande spelaren har förlorat.
2. Annars, är den nuvarande spelaren inte i schack men den har samtidigt inga giltiga drag? I så fall är resultatet remi.
3. Annars, har ingen bonde flyttats på 50 drag? I så fall är resultatet remi.

4. Annars, har det nuvarande brädesformationen uppstått totalt tre gånger under partiet? I så fall är resultatet remi.
5. I annat fall är resultatet obestämt.

4.1.4 Drag

Ett drag representeras med två rutindex, det första för att identifiera vilken pjäs på brädet som ska flyttas och det andra för att identifiera vart på brädet pjäsen ska flyttas till. Utöver det kan ett drag innehålla en pjästyp som indikerar vilken pjästyp en bonde ska omvandlas till när den når sista raden sedd från ägarens perspektiv. En trippel av frånrutindex, tillrutindex och möjlig omvandlingstyp är en vanlig representation av drag inom schackprogrammering (Chess Programming Wiki 2014c). Om en rockad- och en passantindikator inte lagras explicit i draget så får det plats i två bytes; de första sex bitarna lagrar frånrutindex, nästa sex lagrar tillrutindex följande tre lagrar omvandlingspjästypen och den sista biten är ledig. Även om det förväntas att många drag kommer behöva lagras i minnet samtidigt när AI-agenten använder stora fallbaser, så bör den totala storleken vara mycket mindre än minnet som krävs för alla bräden. Utöver frånrutindex, tillrutindex och omvandlingstyp kan även pjäsen som flyttades lagras, och pjäsen som eventuellt fångades. På så vis behövs inte tillhörande läge finnas tillgängligt för att få den informationen, vilket kan vara användbart för att ångra drag i funktionsbiblioteket, om detta skulle krävas.

Funktionen $FrånRuta: Drag \rightarrow RutIndex$ ger rutindex för pjäsens ruta och funktionen $TillRuta: Drag \rightarrow RutIndex$ ger rutindex för rutan som pjäsen ska flyttas till. $ÄrOmvandling: Drag \rightarrow Boolean$ säger om ett drag är en omvandling och $OmvandlingPjäsTyp: Drag \rightarrow Typ$ ger pjästypen att omvandlas till för ett drag, givet att draget är en omvandling. För att skapa drag kan funktionerna $SkapaFrånTillDrag: RutIndex \times RutIndex \rightarrow Drag$ och $SkapaFrånTillOmvandlingDrag: RutIndex \times RutIndex \times Typ \rightarrow Drag$ användas. Rockad och en passant representeras med två rutindex likt andra drag, som gör dem unikt identifierbara som rockad och en passant men bara i specifika lägen. En passant representeras som en förflyttning för bonden till rutan som motståndarens bonde hoppade över. Rockad representeras som en förflyttning av kungen två steg åt vänster eller höger för lång respektive kort rockad. Eftersom kungen kan flytta på sig och ersättas med en annan pjäs på dess ursprungliga ruta, kan samma drag vara rockad i ett läge och en vanlig förflyttning eller fångande drag i ett annat. T.ex. om den vita kungen är på e1 kan den göra rockad med draget e1c1; i ett annat läge där det står en vit drottning på e1, tolkas draget istället som en förflyttning av drottningen till c1. I den senast nämnda situationen är rockad dock inte giltigt för att kungen flyttat på sig, så det går att härleda att draget inte är rockad. Funktionen $ÄrRockad: Drag \times Läge \rightarrow Boolean$ säger om ett drag är rockad i ett visst läge och funktionen $RockadSida: Drag \times Läge \rightarrow RockadSida$ ger vilken sida rockaden är på där $RockadSida = \{Vänster, Höger\}$. Funktionen $ÄrEnPassant: Drag \times Läge \rightarrow Boolean$ säger om ett drag är en passant i ett givet läge. Att låta rockad och en passant dela representation med förflyttningar och fångande drag har haft fördelen att förenkla definitionen av likhet mellan drag, vilket används inom anpassningsfunktionen i sektion 4.2.5.

För att utföra en förflyttning eller ett fångande drag så töms källrutan (innehållet byts ut av avsaknaden av pjäs) och destinationsrutan skrivs över med det innehållet som fanns på källrutan. En passant utförs likadant, förutom att rutan som den fångade bonden stod på töms. Rockad utförs som en förflyttning av kungen två steg till vänster och en förflyttning av det vänstra tornet tre steg till höger för lång rockad, eller en förflyttning av kungen två steg till

höger och en förflyttning av det högra tornet två steg till vänster för kort rockad. Efter det sker diverse bokföring för att avgöra giltigheten av drag och resultatet av partiet. Det beskrevs mer detaljerat i sektion 4.1.3.

För att generera giltiga drag måste följande steg utföras:

1. Sök igenom brädet efter pjäser med samma färg som den nuvarande spelaren.
2. För varje pjäs, placera alla drag som pjäsen kan utföra i en lista, ignorera om det finns pjäser på vägen som blockerar och skulle göra draget ogiltigt.
3. Ta bort de drag som är ogiltiga för att de blockeras av pjäser på vägen.
4. Ta bort de drag som är ogiltiga för att motståndaren kan fånga den nuvarande spelarens kung nästa drag. För att undersöka om så är fallet, utför draget, generera drag för motståndaren men hoppa steg 4 och 5 och undersök om den nuvarande spelarens kung fångas i ett av dragen. Om så är fallet är draget ogiltigt.
5. Ta bort rockaddrag om rutan som kungen måste korsa är hotade av motståndaren. Om det inte är giltigt för kungen att gå till den korsade rutan är rockaden inte giltig heller.
6. De resterande dragen är de giltiga dragen.

Den här draggenereringsalgoritmen är vad CPW definierar som en laglig draggenereringsalgoritm (Chess Programming Wiki 2015). Utöver lagliga draggenereringsalgoritmer finns det pseudolagliga draggenereringsalgoritmer där det inte undersöks om ett drag lämnar kungen hotad, utan det undersöks i dragutförningsalgoritmen. Det finns optimerade algoritmer för att generera drag i speciella situationer; om t.ex. kungen är hotad är de enda giltiga dragen dem som fångar pjäsen, blockerar den förutsatt att den inte är en springare eller flyttar kungen ur vägen. Eftersom AI-agenten inte genererar många drag i sökträd till skillnad från de flesta schackmotorer så är pseudolaglig draggenerering och flera andra draggenereringstekniker inte användbara. Istället utförs ett drag i taget och varje drag måste vara giltigt. Speciella optimeringar kan göras till algoritmen för att förbättra dess prestanda i vissa situationer, men detta anses inte behövas.

4.2 CBR

De CBR-relaterade delarna av **funktionsbiblioteket** beskrivs i denna sektion. De inkluderar domänen av problem som CBR-modellen löser, fallbasrepresentation, översättning från pgn-partier till en fallbas, och en algoritm för att lösa ett problem.

4.2.1 Problem och lösning

En essentiell del av CBR-modellen är domänen av problem som försöker besvaras (Richter & Weber 2013). I arbetet behöver den schackspelande AI-agenten lösa problem av formen "Vilket drag ska utföras i ett visst läge?". Det anses då rimligt att ett problem representeras som ett läge och en lösning som ett drag. De är dock inte den enda domän av problem som CBR-modellen kan tänkas användas till. Den kan besvara problem som "vilka x antal drag ska utföras i sekvens av den nuvarande spelaren från ett visst läge?", men det är möjligt att inte alla framtida drag kommer vara giltiga beroende på vad motståndaren gör. Schackpartier påverkas dessutom väldigt mycket beroende på vad motståndaren gör; om motståndaren lämnar sin drottning öppen att fångas är det ofta bra att fånga den, men att motståndaren skulle göra en sådan tabbe är svårt att förutse. Av denna anledning är det inte användbart att beräkna drag i förväg och det tros inte heller replikera avsikterna av experterna på ett bra sätt.

4.2.2 Fallbas

Ett fall representeras som ett par av ett problem med dess lösning. Fall lagras sekventiellt som en lista i en fallbas. För att översätta en lista med pgn-partier för en viss expert till en fallbas används följande algoritm:

1. Skapa en tom lista med fall.
2. Ta ett parti från listan av partier. Om det inte finns några partier kvar, använd listan med fall för att bilda en fallbas och avsluta algoritmen.
3. Identifiera vilken av spelarna som är experten genom att undersöka namnet på den vita spelaren och den svarta spelaren.
4. Spela partiet och för varje drag som experten utför, lagra draget och läget det utfördes i som ett fall i listan av fall.
5. Gå till steg två.

Som en optimering utförs algoritmen parallellt där varje tråd samlar fall från ett antal tilldelade partier. Partierna fördelas jämt på trådarna med hjälp av funktionen `System.Linq.IParallelEnumerable.SelectMany` i .NET-biblioteket PLINQ, som använder lika många trådar som det finns kärnor tillgängliga på datorn som kör programmet. `SelectMany` väntar även på alla trådar och aggregerar deras resultat innan fallen returneras till den som anropande funktionen. En annan optimering är att bara den information i ett läge som används av AI-agenten lagras i fallbasen, vilket är brädet och färgen på spelaren som utförde draget.

När algoritmen utförs lagras identiska fall i fallbasen lika många gånger som de uppstår under partierna. Även med optimeringen är resultatet av algoritmen deterministiskt; samma partier i samma ordning ger samma fall i samma ordning. Samma partier i olika ordning ger samma fall i olika ordning. Ordningen påverkar dock inte vilket fall som väljs enligt hämtningsalgoritmen, vilket beskrivs i sektion 4.2.4.

4.2.3 CBR-process

Som nämnt i sektion 2.1 finns det en process för att lösa problem med CBR (Richter & Weber 2013). Denna process används även av AI-agenten för att lösa problem. Processen kan beskrivas såhär:

1. Hämta ett fall från fallbasen, där fallets problem är mest likt problemet som ska lösas.
2. Anpassa fallets lösning till problemet som ska lösas.
3. Skapa ett fall av problemet som skulle lösas tillsammans med den anpassade lösningen och lagra det i fallbasen.
4. Den anpassade lösningen är lösningen på problemet. Den kan nu appliceras av AI-agenten.

AI-agenten utför alla steg utom det tredje, för att det inte ska undersökas i det här arbetet om AI-agenten kan bli bättre på att spela schack allt eftersom den spelar flera partier. I den här sektionen ska steg ett och steg två förklaras djupare.

En lista med 3 vikter används för att konfigurera AI-agentens beslutsfattande. Alla vikter är reella tal inom $[0,1]$. Vikterna används för att prioritera olika delar av likhet mellan drag och används inom anpassningsmetoden. Vikternas roll förklaras djupare i sektion 4.2.5. Vissa delar av AI-agenten är beroende av slump för att den ska fatta varierade beslut. AI-agenten använder därför en intern pseudoslumpgenerator initierad av ett slumpfrö. Slumpfröet är ett heltal som påverkar sekvensen av slumpmässiga tal som pseudoslumpgeneratoren producerar.

Funktionen $SkapaBeteende: Fallbas \times ViktLista \times Slumpfrö \rightarrow Beteende$ skapar ett beteende (en funktion från läge till drag) givet en fallbas, en viktlista och ett slumpfrö.

4.2.4 Hämtning

Hämtning av ett fall från en fallbas går till på följande sätt:

1. Skapa en lista av fall med de mest lika problemen.
2. Ta ett fall från fallbasen som inte undersökts än.
3. Jämför likheten mellan problemet som ska lösas och fallets problem.
4. Om experten spelade motsatt färg när fallet ursprungligen utfördes än beteendet gör nu, gå till steg 8.
5. Om listan är tom, lägg till fallet i listan.
6. Om fallets problem har haft högst likhet hittills, töm listan och lägg till fallet.
7. Om likheten istället är av samma värde som likhet av de mest lika problemen, lägg till fallet i listan.
8. Om det fortfarande finns fall som inte undersökts, gå till steg 2.
9. Generera ett slumpmässigt heltal från och med ett och till och med antalet fall i listan.
10. Indexera listan med det genererade talet; fallet som finns på den platsen är fallet som ska användas.

Det finns ett antal konsekvenser med denna algoritm. Först och främst väljs ett fall slumpmässigt av ett antal fall vars problem alla har högst likhet. Det innebär att om det finns identiska fall med identiska problem bland de valda fallen, så har de större chans att väljas. Anledningen att denna metod används är att det anses naturligt att om en expert har gjort samma val fler gånger, så är det en större chans att den skulle göra det igen. Den valda likhetsfunktionen ger likhet på en diskret skala, och därför finns ingen risk för flyttalsfel när likheternas värden jämförs. De fall som utfördes av beteendets expert i partier när den spelade motsatt färg ignoreras. Eftersom en och samma fallbas används per expert oavsett vilken färg som den representerar, så innehåller alla fallbaser partier utförda av deras respektive experter när de spelade både svart och vit. Anledningen till att fall spelade under fel färg ignoreras, är att fallens drag med stor sannolikhet bara skulle vara vettiga om spelaren spelade rätt färg, eftersom spelaren annars inte skulle kunna flytta pjäserna i fallens drag. Området som draget utfördes i har även med större sannolikhet flera pjäser av motståndarens färg, vilket gör det svårt att hitta ett passande drag att anpassa till. Det skulle även vara möjligt att byta färger på pjäserna och spegelvända brädet för sådana fall, men detta har inte undersökts.

Likhet mellan problem dvs. lägen, definieras som den summerade likheten av rutinnehåll på respektive läges bräden. Likhet mellan rutinnehåll är som följer:

- 4 om båda pjäserna inte finns (rutorna är tomma) eller om pjäserna finns och har samma färg och typ.
- 3 om pjäserna finns och har samma färg men inte typ.
- 2 om bara en pjäs finns.
- 1 om pjäserna finns och har samma typ men inte färg.
- 0 om pjäserna har olika färg och typ.

Likheten har alltså en målmängd av diskreta heltal från och med 0 till och med 256 ($64 \cdot 4$). Tanken med denna definition av likhet är att identiska lägen är 100 % lika och lägen som skiljer sig med bara några få flyttade pjäser fortfarande är lika. Lägen är även lika om det

generellt men inte alltid finns pjäser av samma färg på i samma platser. Detta innebär att lösningarna, dvs. dragen, i fallen har en större chans att vara giltiga för det nya läget, för att det är en större chans att källrutan har en pjäs med samma färg och typ, att rutorna på vägen är tomma och att destinationsrutan har den förväntade färgen, alternativt att den är tom i båda problemen. I ett fall där en drottning fångar en motståndarlöpare ökar sannolikheten att hämta fallet om drottningen och löparen står på samma rutor i respektive problem och om rutorna mellan dem är tomma i respektive problem. Något som liknelsefunktionen inte tar hänsyn till, är likheter mellan förskjutna lägen, dvs. lägen där en eller flera pjäser i respektive problem inte är på samma rutor, men på närliggande rutor. Denna likhet är dock mycket mer prestandatung; istället för att bara jämföra innehållet på respektive ruta kräver denna likhet en sökning efter en liknande pjäs för varje ruta. **Om den alternativa likheten ska användas tillsammans med den valda problemlikheten så måste de respektive delarna även viktas vilket ökar antalet dimensioner av konfigurerbarhet med ett och leder till att fler konfigurationer måste undersökas.** Det finns även en del oklarheter med den alternativa likheten. Förskjuts rutor runt när de korsar kanter? Vad händer om ett antal rutor verkar vara förskjutna en viss bit medan andra en annan bit? Vad händer om flera rutor egentligen är förskjutna ett långt avstånd, men det finns matchande pjäser mycket närmare vissa rutor än de egentliga rutorna? Kan vissa områden av brädet vara förskjutna men inte andra? Hur påverkar områdesförskjutningar den totala likheten? Det finns många aspekter att ta hänsyn till med denna alternativa likhet och många av dem är svåra att rationalisera. För att inte riskera att de valda aspekterna av likheten ger ett dåligt resultat på grund av dåliga implementationsval måste flera av aspekterna kunna konfigureras; för de flesta aspekter är det tursamt nog bara ett lågt antal diskreta värden. Det byggs dock upp och leder till en kaskad av möjliga konfigurationer som måste undersökas för att täcka alla möjligheter. Det är inte realistiskt genomförbart att undersöka den här definitionen av problemlikhet inom arbetets tidsram. Att bara använda en sorts primitiv problemlikhet ger sämre förutsättningar att hitta liknande problem, men det är oklart hur mycket avsaknad av förskjutningsdetektion påverkar dessa förutsättningar.

4.2.5 Anpassning

När ett fall har hämtats kan det behöva anpassas till det nuvarande problemet. Eftersom antalet giltiga lösningar alltid är mycket mindre än antalet lösningar som kan representeras, så väljs den giltiga lösning som är mest lik fallets lösning. Det kan vara fördelaktigt att föranpassa lösningen baserat på identifierade skillnader i problemen, innan det jämförs med de giltiga lösningarna. Det är dock svårt att argumentera för vilka skillnader som är relevanta för att anpassningen ska ge en så passande lösning som möjligt. Om problemen t.ex. skiljer sig för att pjäsen som fångas i det fallets läge är förskjuten, bör den fångade pjäsen fortfarande fångas, eller hängde dragets relevans på att den specifika destinationsrutan ockuperades? Av denna anledning används ingen föranpassning.

Likhetsfunktioner och distansfunktioner i den här sektionen har målmängden $[0, 1]$. Ett högt tal indikerar hög likhet eller hög distans (låg likhet) beroende på om funktionen är en likhetsfunktion eller en distansfunktion. I denna sektion indikerar invertering att översätta från ett likhetsvärde till ett distansvärde eller tvärt om. T.ex. om likheten är 0,3 skulle distansvärdet vara 0,7 ($1 - 0,3$). I sektionen betyder även normalisering att överföra ett tal från ett intervall $[0, r]$ till $[0, 1]$ genom att dividera talet med r .

Drag liknar varandra efter två olika liknelser: inverterat avstånd och innehåll. Den totala liknelsen är summan av de två viktade liknelserna. Anpassningslikhetsfunktionen har följande

signatur: *Anpassningslikhet: Drag × Drag × Bräde × Bräde × ViktLista* → [0, 1] . En lista med tre vikter används av denna funktion. Den första bestämmer hur mycket inversavståndligheten gentemot innehållligheten påverkar den totala likheten. Den andra vikten delegeras till avståndlighetsfunktionen och den tredje delegeras till innehållslikhetsfunktionen. De två dragen i signaturen är ett av de giltiga dragen och falllets drag, bräderna är det nuvarande brädet och falllets läges bräde och viktlistan är AI-agentens viktlista. Om d_1 och d_2 är dragen, b_1 och b_2 är bräderna, v är viktlistan, L är avståndlighetsfunktionen, A är avståndsfunktionen och I är innehållsfunktionen kan avståndlighetsfunktionen beskrivas såhär: $L(d_1, d_2, b_1, b_2, v) = v_1 * (1 - A(d_1, d_2, v_2)) + (1 - v_1) * I(d_1, d_2, b_1, b_2, v_3)$.

Avstånd mellan drag är baserat på det normaliserade manhattanavståndet (Cormen, Leiserson, Rivest & Stein 2009) mellan rutorna som pjäserna flyttade ifrån och rutorna de flyttade till. Manhattanavståndet mellan två rutor är antal rader adderat med antalet kolumner som måste korsas för att nå den ena rutan från den andra. Manhattanavståndet har alltså målmängden [0, 14], för att 14 är det största manhattanavståndet i schack. Att normalisera manhattanavståndet gör målmängden till [0, 1]. En vikt används för att prioritera avstånd mellan källrutor respektive destinationsrutor, den var ursprungligen den andra vikten i viktlistan. Funktionen har signaturen: *Avstånd: Drag × Drag × Vikt* → [0, 1]. Om d_1 och d_2 är dragen, v är vikten, A är avståndsfunktionen, *FrånRuta* är F , *TillRuta* är T och det normaliserade manhattanavståndet är M kan funktionen skrivas såhär: $A(d_1, d_2, v) = v * M(F(d_1), F(d_2)) + (1 - v) * M(T(d_1), T(d_2))$.

Innehåll är baserat på likheten av respektive drags flyttade och eventuellt fångade pjäs. För att se vilken pjäs som flyttades och eventuellt fångades i ett drag behövs brädet som draget utfördes på. Likheten mellan potentiella pjäser är samma som användes för likhet mellan rutinnehåll för hämtningslikhet i sektion 4.2.4 och benämns med namnet *RutinnehållsLikhet*. En vikt används för att prioritera likhet på källrutor respektive destinationsrutor, den var ursprungligen den tredje vikten i viktlistan. Funktionen har signaturen: *Innehåll: Drag × Drag × Bräde × Bräde × Vikt* → [0, 1]. De två dragen i signaturen är dragen som ska jämföras och bräderna är de bräden som respektive drag utfördes på. Om d_1 och d_2 är dragen, b_1 och b_2 är bräderna, v är vikten, *Rutinnehållslikhet* är R , *FrånRuta* är F , *TillRuta* är T , *InnehållPåRuta* är P och innehållsfunktionen är I kan innehållsfunktionen beskrivas såhär:

$$I(d_1, d_2, b_1, b_2, v) = v * R(P(b_1, F(d_1)), P(b_2, F(d_2))) + (1 - v) * R(P(b_1, T(d_1)), P(b_2, T(d_2)))$$

Tanken med denna definition av draglikhet är att försöka identifiera vilket drag som har ett syfte så likt falllets drag som möjligt. Ett drag kan vara viktigt för att en viss pjäs på en viss ruta eller närliggande ruta flyttades, att den flyttades till en viss ruta eller i närheten av en viss ruta, att den flyttade pjäsen var av en viss typ, att den fångade pjäsen var av en viss typ eller någon kombination av dessa kriterier. Likhetsfunktionen ökar därför chansen att ge högre likhet för drag som har liknande syfte.

4.3 Sammanfattning av hur partier spelas

För att spela ett parti mellan två beteenden behöver deras respektive fallbaser skapas. Beteendena öppnar varsin dedikerad pgn-formaterade fil, läser in olika lägen och vilka drag deras experter gjorde i lägena och lagrar dessa som fall i deras fallbaser. Beteendena blir

tilldelade ett slumpfrö som de kan använda för att generera pseudoslumpmässiga tal. Både beteenden får samma slumpfrö, och de får även dela på en viktkonfiguration.

Ett nytt ursprungligt läge skapas och det beteendet som spelar vit tillfrågas vilket drag som ska göras i det nuvarande läget. Beteendet söker igenom sin fallbas efter det fall vars problem är mest likt det nuvarande problemet; om det finns flera fall som har samma likhetsgrad så väljs en av dem slumpmässigt. Problem anses lika om innehållet på respektive problems brädens rutor är lika varandra. Den summerade likheten av rutornas innehåll är den totala problemlikheten. När ett fall har hämtats från fallbasen så anpassas lösningen. Lösningen anpassas genom att ändra draget till det giltiga drag som lösningen liknar mest. Drag liknar varandra mer delvis ju kortare avståndet är mellan deras käll- och destinationsrutor och även hur lika innehållet är på respektive drags käll- och destinationsrutor. När draget har anpassats är det nya draget det drag som beteendet beslutat sig för att göra. Draget appliceras på läget för att skapa ett nytt läge. Det undersöks sedan i det nya läget om partiet är avslutat för att någon har vunnit, eller att det blivit remi. Om så är fallet, så avslutas partiet, annars går turen över till det andra beteendet som nu får en chans att göra ett drag. Beteendena turas om att göra drag tills partiet är avgjort.

5 Utvärdering

I den här sektionen presenteras undersökningen som har utförts på funktionsbiblioteket för att besvara problemet som ställs i arbetet. I sektion 5.1 presenteras hur undersökningen utfördes, i sektion 5.2 presenteras en sammanställning av resultatet, sektion 5.3 innehåller en analys av resultat och i sektion 5.4 presenteras de slutsatser som kan dras i relation till arbetets fråga.

5.1 Om undersökningen

Undersökningen utfördes av ett datorprogram som spelar ett antal schackpartier mellan beteenden. För varje kombination av beteenden spelades ett antal ronder, vilket upprepades för varje viktkonfiguration. Undersökningen producerade en pgn-databasfil med ett antal dokumenterade partier, där varje parti har ett antal attribut som beskriver det. De första attributen är vilka experters beteenden som spelade partiet och vilken av dem som spelade vilken färg. De resterande attributen är vilken rond som partiet spelades i och vilken viktkonfiguration som användes av beteendena. Inga partier har exakt samma attribut, utan minst ett av attributen skiljer sig alltid mellan partier. Varje parti innehåller även om beteendena följde tidskravet från problemformuleringen i sektion 3.1. Tidskravet var att vardera beteendes 40 första drag måste utföras inom 90 minuter (totalt 180 minuter för båda).

Sju beteenden användes i undersökningen. Expertdata för varje beteende baserades på en pgn-databasfil innehållande partier som en viss expert tidigare spelat. Alla pgn-databasfiler har hämtats från www.chess-db.com; varje spelare på den hemsidan har en egen sida där det går att ladda ner deras spelade partier. En tabell över experterna visas i Tabell 1. Informationen om experterna inklusive pgn-filerna över deras sparade partier hämtades 2015-05-04. Det är värt att notera att skillnaden i Elo-rankning mellan två experter med närliggande Elo-rankning i alla fall är lite högre än 100 poäng.

Tabell 1 Tabell över experterna som användes i undersökningen.

Namn	Elo-Rankning
Andreas Hirsch	1994
Johan Andersson	2101
Sinan Younus Abdulrazzaq Abaeji	2211
Arturo Vidarte Morales	2320
Joerg Wegerle	2430
Michael Prusikin	2535
Evgeny Postny	2645

För att alla beteenden ska få chans att möta alla så delas de upp i ett antal kombinationer i form av ordnade par. Ett beteende kombineras aldrig med sig själv. Eftersom det finns sju

beteenden, så finns det alltså $7 * 6 = 42$ stycken kombinationer. Ordningen spelar roll, så varje kombination har en motpart med samma beteenden i motsatt ordning.

För varje kombination spelas tre ronder. Ordningen av beteendena avgör vilken färg beteendena spelar i dessa ronder. Det första beteendet spelar vit och det andra spelar svart. Eftersom varje kombination har en motpart så spelar två beteenden mot varandra i totalt sex partier, tre ronder där beteende x spelar vit och tre ronder där beteende x spelar svart. Med hjälp av dessa sex ronder går det att avgöra vilket av de två beteendena som spelar bäst. För varje vinst får det vinnande beteendet ett poäng och för remi får båda spelarna ett halvt poäng. Den som fått högst poäng efter de sex partierna vinner den så kallade uppgörelsen. Eftersom ronder från två kombinationer används för varje uppgörelse så finns det hälften så många uppgörelser som kombinationer. Alla uppgörelser med samma viktkonfiguration tillsammans bildar en rangordningsmätning. Totalt är det 21 uppgörelser per rangordningsmätning och sex partier per uppgörelse, vilket innebär att det är $21 * 6 = 126$ partier per rangordningsmätning.

Ett beteende med en högre rankad expert förväntas förlora ett parti eller göra remi ibland, så det krävs mer än ett parti mellan två beteenden för att avgöra vilken som spelar bäst. I sektion 3.1 förklarades det att en högre rankad spelare inte är garanterad att vinna mot en lägre rankad spelare och att chansen är ungefär 64 % om det bara är 100 poängs skillnad i rankning (World Chess Federation 2014a). 0,64 är lite mindre än $2/3$ och om sannolikheten vore $2/3$ att beteendet med den högre rankade experten skulle vinna så borde en uppgörelse sluta med resultat 4-2. Beteendet med den högre rankade experten behöver dock inte vinna så storslaget, det räcker med att resultatet blir $3\frac{1}{2}$ - $2\frac{1}{2}$. Antalet ronder borde därför räcka för att avgöra vilket beteende som spelar bäst. Detta gäller för par av beteenden vars experters Elo-rankningar skiljer sig med ungefär 100 poäng; om skillnaden är större så är det ännu större chans att beteendet med den högre rankade experten kommer vinna. Allt detta är baserat på FIDE:s Elo-rankningsregler och sannolikhetsberäkningar av vinst mellan spelare med olika Elo-rankningar, så det finns en risk att det inte stämmer exakt. Dessa sannolikhetsberäkningar används dock för att beräkna hur mycket spelares Elo-rankning ändras beroende på resultatet av ett parti. Systemet är därför självreglerande efter tillräckligt många partier. Om en annan sannolikhetskalkyl hade använts av FIDE så skulle spelares Elo-rankningar ha anpassats efter den alternativa kalkylen.

En rangordningsmätning görs per viktkonfiguration. Det nämndes tidigare i sektion 3.2 att flera viktkonfigurationer skulle utvärderas i undersökningen. Information om partierna från en rangordningsmätning är tillräckligt för att avgöra om dess tillhörande viktkonfiguration ger ett positivt eller negativt resultat. Den första vikten indikerar hur mycket inverterat avståndslighet påverkar den totala likheten, gentemot innehållslighet. Om vikten är t.ex. 0,7 så står inverterat avståndslighet för 70 % av den totala likheten medan innehållslighet står för 30 %. Den andra vikten indikerar hur mycket det inverterade avståndet mellan källrutor påverkar den inverterade avståndsligheten, gentemot det inverterade avståndet mellan destinationsrutor. Den tredje och sista vikten indikerar hur mycket innehållslighet på källrutor påverkar den totala innehållsligheten, gentemot innehållsligheten på destinationsrutor. Totalt fem viktkonfigurationer användes i undersökningen, vilket innebär att antalet spelade partier i undersökningen är $126 * 5 = 630$. Viktkonfigurationerna visas i Tabell 2.

Tabell 2 Tabell över viktkonfigurationerna som användes i undersökningen.

Vikt 1	Vikt 2	Vikt 3
0,5	0,5	0,5
0,8	0,8	0,5
0,8	0,2	0,5
0,2	0,5	0,8
0,2	0,5	0,2

Syftet med den första viktkonfigurationen är att undersöka om alla delar inom draglighet bör ha lika stor vikt. Syftet med de resterande fyra är att undersöka om någon specifik del av draglighet ger bättre resultat. Fördelningen mellan högt prioriterat (0,8) och lågt prioriterat (0,2) gjordes för att klart prioritera den ena över den andra i de flesta lägen och samtidigt undvika att bara en aspekt av likhet tas hänsyn till. Dessa fem konfigurationer valdes för att ge varje del av likhetsanpassning en stor roll i varsin konfiguration, med undantag av den första som ger alla delar lika stor roll. I den andra och den tredje konfigurationen värderas inverterat avståndslighet över innehållslighet gentemot i den fjärde och den femte där motsatsen värderas. I den andra värderas avstånd mellan källrutor och i den tredje värderas avstånd mellan destinationsrutor. I den fjärde värderas likhet mellan innehåll på källrutor och i den femte värderas likhet mellan innehåll på destinationsrutor. Syftet med att använda dessa konfigurationer är inte baserat på tron att just dessa konfigurationer har störst chans att ge ett positivt resultat, utan att de underlättar att hitta den eller de konfigurationer som skulle kunna ge bäst resultat. Om konfiguration två och tre ger bättre resultat än konfiguration ett så innebär det antagligen att inverterad avståndslighet bör värderas mer än innehållslighet, men inte exakt hur mycket. Att hitta en perfekt konfiguration är inte målet med att undersöka flera konfigurationer, utan det är att hitta spår av dess existens och få en ungefärlig uppfattning om hur den kan se ut. Att hitta en perfekt konfiguration skulle ta alldeles för lång tid i det här arbetet eftersom att det finns så många möjligheter. Anledningen att viktvärden som 0,8 och 0,2 används istället för 1,0 och 0,0 är för att undvika risken att en aspekt av likhet ger ett bättre resultat när den värderas högt, men att resultatet avtar kraftigt efter en viss punkt. Konfigurationer som använder viktvärdeskombinationer av 1,0, 0,5, och 0,0 kallas här för extrema konfigurationer, förutom den första valda konfigurationen som visserligen bara innehåller 0,5 men är samtidigt balanserad. Säg att de extrema viktkonfigurationerna 1,0, 1,0, 0,5 och 1,0, 0,0, 0,5 ger ett sämre resultat än 0,5 0,5 0,5. Frågan är om anledningen till det dåliga resultatet berodde på att inverterad avståndslighet värderades för mycket, eller om det inte borde ha värderats alls? Genom att ta ett kortare steg mot total inverterad avståndslighet så lär det bli mer uppenbart. Det är fullt möjligt att någon av de absoluta konfigurationerna producerar ett bättre resultat, men då borde resultatet från de valda konfigurationerna åtminstone peka åt det hållet. De valda konfigurationerna ger alltså en mindre risk att resultatet blir svårtydligt, samtidigt som det inte blir lika uppenbart om det är bäst att använda extrema konfigurationer. Det bästa vore om både de valda konfigurationerna och de extrema konfigurationerna kunde ha testats, men det gick inte på grund av tidsbrist.

Programmet som användes för att utföra undersökningen är skrivet i programmeringsspråket C# 4.0 och kompilerat mot plattformen .NET 4.5. Undersökningen utfördes på en dator med en åttakärnig Intel Core i7-3770 processor på 3,40 GHz. Datorn hade tillgång till 8GB RAM och använde operativsystemet Windows 8.1 Pro. .NET implementationen som användes var Microsoft .NET Framework 4.5. Alla partier i en **uppgörelse** utförs på en tråd, vilket gör att flera **uppgörelser** partier kan spelas parallellt på en flerkärnig processor och ge en stor prestandavinst gentemot om de alla utfördes på en tråd. Denna optimering gör att undersökningen som bäst kan utföras lika många gånger snabbare som det finns kärnor på datorn som undersökningen utförs på. Det innebär även att ordningen som partierna spelas och lagras i resultatfilen inte är deterministiskt. För varje parti tilldelas varje **beteende** ett slumpfrö som är samma som rondnumret - 1. Syftet är att olika ronder mellan samma **kombination av beteenden** under samma förhållanden inte ska se likadana ut och producera identiska partier.

5.2 Resultat

Resultatet från undersökningen består av väldigt många dokumenterade partier. I denna sektion presenteras en sammanfattning av resultatet. Sammanfattningen är tillräcklig för att besvara problemformuleringens fråga och resultatet kan nästan replikeras exakt med hjälp av den dokumenterade implementationen. Ett program skrevs i programmeringsspråket C# för att utföra sammanfattningen, kompilerat mot plattformen .NET 4.5. En tabell över sammanfattningen visas i Tabell 3. Sammanfattningen visar följande för varje **rangordningsmätning**:

- För vilken konfiguration som rangordningsmätningen gäller. **Det skulle utföras en rangordningsmätning per konfiguration, vilket beskrevs i sektion 5.1.**
- Huruvida tidskravet klarades för alla partier.
- Rankningsindex av fallbaserna i den längsta ordningen, där **beteendet med** den högst rankade experten har index 1 och den lägst rankade experten har index 7. En ordning är sådan att för **alla beteenden** i ordningen så är **beteendet** antingen sist eller så **vann den mot beteendena** senare i ordningen. T.ex. om den längsta ordningen är 1, 2, 3 så innebär det att beteendet med den högst rankade experten vann över beteendet med den näst högst rankade experten, som vann över beteendet med den tredje högst rankade experten. Det innebär även att beteende 1 vann över beteende 3. Om ett beteende inte deltar i den längsta ordningen så innebär det att den inte passar någonstans i ordningen. Den kan ha vunnit mot ett beteende tidigare i ordningen, men förlorat mot ett beteende senare i ordningen, vilket bryter mot villkoret för **beteendenas ordning.**
- Huruvida ordningen stämmer överens med ordningen av **beteendenas** respektive experters Elo-rankningar, **dvs. om ordningen är 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7.**
- Procentuella antalet partier som en av spelarna vann, dvs. som inte slutade i remi.

Tabell 3 Tabell över resultatet för varje individuell konfiguration.

Konfiguration	Klarade tidskrav	Längsta ordning	Samma ordning som Elo-rankning	% vunna partier
0,5 0,5 0,5	Ja	6, 7, 5, 1, 4	Nej	6
0,8 0,8 0,5	Ja	1, 4, 2, 5, 3, 6	Nej	14
0,8 0,2 0,5	Ja	1, 5, 2	Nej	7
0,2 0,5 0,8	Ja	5, 7, 6, 4, 2, 1	Nej	10
0,2 0,5 0,2	Ja	2, 1, 7, 6	Nej	8

5.3 Analys

En handanalys av ett antal partier utfördes för att bedöma hur bra AI-agenten spelar med olika fallbaser för olika konfigurationer. Programmet ChessPad 2 användes för att visualisera partierna. Analysen gick ut på att studera en rond för varje uppgörelse, och mentalt notera för varje parti hur bra respektive beteende spelade och vilken konfiguration som användes i varje parti. Detta gjordes för att få en överblick över om det finns något samband över hur bra beteenden spelar baserat på deras experters Elo-rankning och om experterna spelade noterbart mer balanserat med vissa viktkonfigurationer. Under handanalysen noterats saker som om en expert gjorde väldigt bra eller dåliga drag och om dragen visade sig vara långsiktigt bra. Det noterades även om beteendena generellt avancerade sina pjäser för att ta kontroll över mitten av spelplanen, fånga motståndarens pjäser, omvandla bönder till andra pjäser, hota kungen och göra schack matt.

Att bara observera en av sex ronder per uppgörelse innebär att alla observerade partier använde samma slumpfrö. Det är möjligt att vissa beteenden presterar annorlunda baserat på vilken rond de spelar och att detta inte framgår i handanalysen. Eftersom bara en rond observerades per uppgörelse så observerades båda spelarna i uppgörelsen med specifika färger, dvs. en spelade vit och en spelade svart, men det observerades inte hur de spelade i de motsatta färgerna i uppgörelsen. Det fanns inte tid att studera alla partier, så antalet observerade partier behövde minskas på något sätt. Valet att bara studera en rond per uppgörelse är fördelaktigt gentemot att inte studera partier från vissa viktkonfigurationer eller beteenden. Kriterierna som användes under handanalysen är luddiga, bara en del av partierna analyserades och resultatet av handanalysen är inte strikt dokumenterad från parti till parti. Analysen är dessutom personlig och saknar expertutlåtanden och auktoritet. Av dessa anledningar kan det vara svårt att upprepa handanalysen och fastställa hur pålitlig den är. Handanalysen påverkar därför inte resultatet, utan används snarare för att förklara varför resultatet blev som det blev, vilket nämndes i sektion 3.2.

Analysen visar att alla beteendena spelar med låg skicklighet oavsett konfiguration. I början av partierna spelar AI-agenten som förväntat, men väldigt snabbt börjar den göra drag som skiljer sig från vanliga öppningar. Beteendena fångar nästan aldrig pjäser och verkar inte

kunna lista ut hur **de** ska vinna. I de få fall **de** vinner verkar det mer som en tursam slump än ett resultat av strategiskt tänkande.

Anledningen **till** att **beteendena** presterar så dåligt verkar vara för att **de** inte har något mål att sträva efter. T.o.m. nybörjare vet t.ex. att det är nästan alltid är fördelaktigt att fånga en högt värderad pjäs om spelaren bara förlorar en lägre värderad pjäs (Shannon 1950). **Ett vanligt scenario är att ett av beteendena lämnar en högt värderad pjäs utan skydd, vilket motståndarbeteendet ignorerar. De spelar alltså dåligt genom att göra misstag och genom att inte utnyttja motståndarens misstag. Beteendena** verkar inte heller avancera bönder i hopp om att omvandla dem, **de** försöker inte ta kontroll över mitten av brädet och inte heller flytta ut de högt värderade pjäserna. **Beteendena** agerar då och då som **de** försöker uppfylla något av dessa mål och ibland vinner **de** t.o.m. Det sker dock så sällan att **de** antagligen kunde ha utfört slumpmässiga drag och vunnit lika ofta. De gånger **ett beteende** vinner är det ofta inte svårt **för det andra beteendet** att undvika, men eftersom även **det beteendet spelar dåligt så lyckas det** inte göra det.

Beteendena fastnar ofta i en cykel där de flyttar varsin pjäs fram och tillbaka tills samma brädformation upprepat sig tre gånger vilket innebär remi enligt reglerna. Detta verkar logiskt givet hur likhet är implementerat; om **ett beteende** hamnar i ett läge med samma brädformation som ett tidigare läge så borde **beteendet** välja samma fall från fallbasen och göra samma drag, givet att det inte finns flera fall att välja på. Detta leder dock till att de flesta partier slutar i remi och gör de svårt om omöjligt att rangordna hur bra **beteendena spelar**.

Ingen av konfigurationerna verkar ge ett bättre resultat än någon annan, åtminstone inte på ett sätt som går att identifiera från resultatet. Ingen av ordningarna stämmer och många partier slutar i remi. Ordningarna är dock väldigt olika och verkar inte alls vara baserade på fallbasernas respektive experters Elo-rankningar. **Det gick antagligen att producera så långa ordningar främst för att tillräckligt många partier inte slutade i remi.**

Oavsett konfiguration klarades tidskravet med mycket tid över. Faktum är det bara krävdes 20 minuter för att utföra alla 630 partier i undersökningen. Eftersom körningen av undersökningsprogrammet utfördes på en dator med en åttakärnig processor, skulle undersökningen ta ungefär 160 minuter att utföra om partier utfördes sekventiellt på en tråd. Ett genomsnittligt parti tar då ungefär 15 sekunder. Ett parti bör generellt ta som längst 180 minuter för att varje spelare ska få 90 minuter att utföra sina första 40 drag. Ett genomsnittligt parti utförs alltså 720 gånger så snabbt som krävs enligt tidskravet. Vissa partier utfördes under 80 drag medan andra utfördes över 80 drag. Partier mellan fallbaser med fler fall tog generellt längre tid.

5.4 Slutsatser

Som nämnt i sektion 3.1 **var** problemställningen om CBR med grundlig likhet är passande för en CBR-baserad schackspelande AI-agent. **Om grundlig likhet passade för en CBR-baserad schackspelande AI-agents beslutsfattande så behövde det gå att rangordna ett antal beteenden, där ett högre rangordnat beteende vunnit oftare mot ett lägre rangordnat beteende, givet att den största skillnaden i beteendenas experters Elo-rankningar var minst 100 poäng. Rangordningen borde även ha stämt överens med rangordningen av beteendenas experters Elo-rankningar.**

Givet resultatet i undersökningen är svaret nekande. Trots att skillnaden i Elo-rankningar mellan närliggande experter aldrig var lägre än 100 poäng så gick det inte att få en konsekvent ordning av alla experter med någon av konfigurationerna. De ordningar som producerades med olika konfigurationer matchade heller inte ordningen av experternas Elo-rankningar.

Alla beteendena presterar dåligt och verkar inte försöka uppfylla några djupare schackrelaterade mål som att fånga värdefulla pjäser eller vinna partier. Detta leder till att väldigt många partier slutar i remi och de få gånger ett beteende vinner så liknar det en slump. Det går därför inte att rangordna dem på ett trovärdigt sätt om bara resultatet av partierna tas i beaktning. Även handanalyserats ger intrycket att beteendena inte spelar noterbart bättre eller sämre än varandra.

Anledningen till att svaret blev nekande ligger antagligen främst i användandet av grundlig likhet, inte CBR generellt. León-Villagrà och Jäkel (2013) har tidigare visat att schackspelare inte tänker och kommer ihåg lägen och drag visuellt, utan mer abstrakt. Det har även visat sig att bättre spelare kan komma ihåg lägen utan att ha sett dem i mer än fem sekunder (De Groot 1965) och de kan även rekonstruera presenterade lägen snabbare (Simon & Chase 1973). Detta pekar mot att bättre spelare kommer ihåg lägen på andra sätt än nybörjare, som inte kräver memorering av alla pjäser och deras exakta positioner. I Bellamy-McIntyres arbete (2008) visade det sig att CBR inte är passade för att göra bud i bridge, baserat på tidigare bud för tidigare händer. Bellamy-McIntyre resonerade att anledningen att det inte fungerade bra var för att spelare normalt inte baserar bud på bud från tidigare händer, utan med hjälp av ett regelbaserat system. Likaså kan grundlig likhet ha gett ett dåligt resultat i schack för att det inte replikerar människors tankesätt tillräckligt bra.

Innebörden av drag kan skilja sig mycket mellan visuellt lika lägen. Definitionen av problemlikhet hjälper alltså inte med att hitta liknande lägen. Att liknande problem har liknande lösningar är en grundpelare i CBR (Richter & Weber 2013). Om problemlikheten har en dålig definition så går det inte att hitta ett liknande problem i fallbasen och lösningen på det funna problemet är antagligen inte likt lösningen på problemet som skulle lösas.

Med en mer abstrakt problemrepresentation, lösningsrepresentation, problemlikhet, anpassningsmetod och eventuellt expertdatakälla skulle beteendena möjligen kunna spela bättre med olika skicklighet som matchar experternas relativa skicklighet. Det är dock inte helt klart om det i nuläget går att skapa AI-agenter som använder mönsterigenkänningstekniker som CBR och kan spela lika bra eller i närheten av lika bra som dagens bästa schackspelare. Från Shannons (1950) schackmaskin har det tagit flera årtionden av forskning för att skapa schackmotorer som idag kan besegra de bästa mänskliga spelarna (Anthony 2014). Kanske behövs det därför mer forskning om mönsterigenkänning inom schack för att mönsterigenkänning ska ge lika bra resultat som brute-force sökning. Det kan även vara så att brute-force sökning i sig kan implementeras mer effektivt än mönsterigenkänning och att datorer måste utföra beräkningar snabbare och ha tillgång till mer minne innan mönsterigenkänning är en användbar teknik för skickligt schackspelande.

En anledning till att resultatet blev negativt kan vara för att skillnaden mellan ett bra och ett dåligt drag i schack är väldigt stort och att schackspelare förväntas göra bra drag väldigt ofta. Trots tidspress på i genomsnitt ett antal minuter per drag är det viktigt att undvika dåliga drag, annars kanske spelet slutar innan tiden ens blir relevant. I ett tidigare arbete har CBR använts till att kontrollera en AI-motståndare i Warcraft 3 (Wender och Watson 2014) med lyckat resultat. I Warcraft 3 utförs beslut i realtid, hela 30 beslut per sekund. På grund av spelets

korta betänketid, många mekaniker och mekanikernas komplicerade samband förväntas det att varken mänskliga spelare eller AI-agenter i Warcraft 3 gör lika bra beslut lika ofta som krävs i schack. Med CBR kan det vara svårt att garanterat göra tillräckligt bra beslut i schack tillräckligt ofta, åtminstone i nuläget.

Under undersökningen slutade många partier i remi och den ledande orsaken var att beteendena konstant flyttade varsin pjäs fram och tillbaka i vissa situationer. Det sker för att samma fyra fall hämtas från fallbaserna av beteendena två gånger i rad. I det första fallet flyttar beteende ett fram en pjäs, i det andra flyttar beteende två fram en pjäs, i det tredje flyttar beteende ett tillbaka samma pjäs som den tidigare flyttade fram och i det fjärde flyttar beteende två tillbaka samma pjäs som den tidigare flyttade fram. Efter att de första fyra fallen har valts så ställs beteende ett inför samma situation som i början och tvingas därför göra samma sak, detsamma gäller beteende två. Problemet är att situationerna är likadana ur beteendenas perspektiv, eftersom problemlikhet bara tar hänsyn till hur den nuvarande brädformation ser ut, inte hur många drag som har gjorts eller om beteendet varit i samma situation tidigare. Det är värt att nämna att det inte alltid är en dålig strategi för en av spelarna att göra remi genom upprepning. Om en av spelarna har övertaget och hamnar i en cykel den inte kan undvika är det i motståndarens intresse att fortsätta cykeln och acceptera remi eftersom den annars skulle riskera att förlora. Det går alltså inte alltid att anta att beteendena vill undvika remi; det måste undersökas för ett visst beteende om det kan och vill fortsätta cykeln. För att göra detta måste det gå att identifiera att ett beteende är i en cykel, men det är svårt att uttrycka det med grundlig likhet. I ett läge med en viss brädformation är det bra att göra ett visst drag, i ett annat läge med samma brädformation ska möjligen ett annat drag utföras – hur upptäcks och rättfärdigas detta med grundlig likhet? Även om det skulle kunna gå att undvika cykler som är ofördelaktiga och avbrytbara för minst ett av beteendena så är det oklart om det skulle leda till mer skicklighet hos beteendena. Det skulle ge beteendena mer tid att spela och möjligen vinna partier, men hur mycket tid de behöver är oklart och 50-dragregeln förhindrar att de kan spela allt för länge utan att göra framsteg. 50-dragregeln säger att om ingen spelare flyttar en bonde på 50 drag så blir det remi.

6 Avslutande diskussion

6.1 Sammanfattning

Arbetet utfördes för att undersöka om en schackspelande AI-agent vars beslutsfattande är baserat CBR med grundlig likhet kan spela bättre med fallbaser baserade på spelare med högre Elo-rankning. En AI-agent implementerades som ett funktionsbibliotek för att besvara frågan. Undersökningen gick ut på att låta AI-agenten spela mot sig själv med olika fallbaser ett antal gånger. Samma partier utfördes flera gånger för att undersöka om olika inställningar i AI-agenten påverkade resultatet på ett märkbart sätt. AI-agenten presterade dåligt och vann nästan aldrig några partier oavsett fallbas. De få gånger AI-agenten vann verkade det slumpartat med vilken fallbas den vann. Det gick därför inte att rangordna fallbaserna så att fallbaser baserade på högre rankade experter spelade bättre.

6.2 Diskussion

Det verkar som om inget arbete tidigare har berört applicering av CBR på schack-AI tidigare så ur den synvinkeln är arbetet unikt. Arbetet utfördes dels för att besvara frågan som ställdes i problemformuleringen men även för att agera som språngbräda för **andra arbeten** runt hur CBR kan appliceras för schack-AI. Det är värt att undersöka tekniken för att det gett positivt resultat i flera domäner (Wender och Watson 2014; Rubin 2013) även om det inte varit så i alla (Bellamy-McIntyre 2008). Schack har flera gånger tidigare använts som testramverk för hypoteser (Simon & Chase 1973) vilket dock avtagit med åren (Schaeffer 1991; Ensmenger 2012). Att inte lämna möjligen användbara tekniker utforskade är viktigt för att förbättra schack-AI, oavsett om det gäller att skapa schack-AI som kan spela med en given skicklighet eller schack-AI som kan spela med så hög skicklighet som möjligt.

Slutsatsen på arbetet är pålitligt. Eftersom arbetet är beroende av tillgängligheten av experters spelade partier skulle resultatet och slutsatsen kanske varit annorlunda om arbetet utfördes igen i framtiden. Då skulle det kanske finnas många fler partier per expert tillgängliga, vilket skulle gjort att beteendena kunde spela bättre med mer skicklighetsvariation, men det är bara **spekulationer**. Även om inte alla möjliga implementationsval har undersökts för domänen grundlig likhet är resultatet trovärdigt. Anledningen är att de alternativa implementationsvalen inte tillför något som kan bidra med att lösa fundamentala problem med implementationen och bör därför inte ge annat än ett nekande resultat oavsett. **Ett exempel är att det är svårt om omöjligt att skapa en passande problemlikhet för schack med grundlig likhet, och utan en bra problemlikhet faller allt annat samman. Att beteendena lätt hamnar i situationer där de flyttar varsin pjäs fram och tillbaka och orsakar remi är ett annat problem.**

Det finns ett antal alternativa sätt som problemlikhet kunde ha implementerats **inom grundlig likhet**. Två exempel är att förskjuta pjäserna på ett utav fallens bräden och sedan jämföra likhet eller att mäta det genomsnittliga lägsta avståndet från varje ruta på ett falls bräde och den närmaste rutan på det andra fallets bräde som har likadant innehåll. Dessa två alternativ måste dock visa att de kan lösa följande problem för att vara av intresse att undersöka. Anta att det finns en drottning som den nuvarande spelaren kan fånga utan att förlora någon värdefull pjäs och vars fångning inte verkar påverka den nuvarande spelaren negativt i det långa loppet. Även en nybörjare skulle fånga drottningen eftersom det är viktigt i schack att fånga så många värdefulla pjäser som möjligt och samtidigt undvika att ens egna värdefulla

pjäser fångas (Shannon 1950). Varken den nuvarande problemlikheten eller alternativen ger dock en större sannolikhet att välja ett fall med ett läge där en värdefull pjäs fångas utan negativa konsekvenser, än mindre att en lämplig anpassningsmetod kan anpassa fallets drag till exakt rätt drag. Det mest uppenbara vore att ge större likhet mellan lägen där spelaren kan göra fallets drag utan några negativa konsekvenser i den nära framtiden, men denna likhet är utanför grundlig likhet och därför inte intressant att undersöka i detta arbete. Det är möjligt att experten kan ha stött på exakt samma problem eller ett problem som är tillräckligt likt och AI-agenten skulle därför kunna utföra det korrekta draget. Problemet är ovissheten att ett tillräckligt likt problem har skett, eftersom likheten att det går att fånga en pjäs utan negativa konsekvenser är svår att uttrycka med grundlig likhet. AI-agenten kan och bör utföra fel drag ibland eftersom det är mänskligt att fela, men i undersökningen skedde det så ofta att det gav intrycket att AI-agenten spelade sämre än en nybörjare oavsett fallbas. Detta är bara en av många svårlösta situationer som kan ske. Vad händer när fördelarna inte är så uppenbara? Hur ska beteendena kunna lista ut hur schack matt kan utföras? Även om beteendena skulle kunna kringgå dessa problem, hur ska de dessutom kunna spela olika bra baserat på deras experters skicklighet? Det kan argumenteras att denna slutsats kunde härledas utan att göra undersökningen i första taget. Slutsatsen hade dock möjligen inte gällt om det praktiska förutsättningarna var annorlunda, t.ex. om det fanns många fler partier tillgängliga för alla experter vilket skulle ge större chans att liknande situationer hade skett för experten. Resultatet från undersökningen styrker uppfattningen att det finns ett fundamentalt problem med schackspelande AI-agenter vars beslutsfattande är baserat på CBR med grundlig likhet. Det fundamentala problemet med grundlig problemlikhet gör det osannolikt att resultatet kan ändras genom att ändra andra aspekter av implementationen som att undersöka alternativa anpassningsmetoder eller utforskade viktkonfigurationer.

Ett problem med metoden för att skapa fallbaser från tidigare partier är att en hel del information går förlorad. Ett ensamt drag i ett visst läge säger inte så mycket och det är ibland oklart varför det utfördes. Genom att undersöka i vilket samband ett drag utfördes i så går det att identifiera vilken del i spelarens strategi den tillhörde och hur denna strategi kan överföras till beteendet. Det är dock svårt nog att identifiera innebörden av enskilda drag med grundlig likhet och det vore ännu svårare att definiera vad en strategi är, hur de kan representeras, om de kan avbrytas om motståndaren gör något oväntat osv. Det är antagligen bättre att använda abstrakt likhet för att identifiera dragsekvenser och deras relationer.

Expertdata som användes i undersökningen är inte perfekt. Pgn-databasfilerna som finns tillgängliga för nedladdningar på www.chess-db.com innehåller antagligen inte alla partier som experterna har spelat och olika partier har spelats vid olika tillfällen när experterna var olika skickliga. Om en expert har Elo-rankning x och spelade på ett visst sätt när den hade en lägre Elo-rankning y, bör dessa beslut beaktas? Experten kanske fick Elo-rankning x för att den slutade göra de misstag den gjorde när den hade Elo-rankning y. Det finns dock inte möjlighet att vara kräsen eftersom det finns så få partier tillgängliga för varje spelare och antalet minskar kraftigt med spelarnas rankning. För spelare runt Elo-rankning 2000 poäng finns det ofta bara 50-100 tillgängliga partier, medan det finns över 1000 partier tillgängliga för Evgeny Postny som har en Elo-rankning av 2645 poäng. Detta kan dock vara en konsekvens av att högre rankade spelare har spelat flera partier. Eftersom det inte finns något självklart sätt att få ut en spelares sanna potential ur en delmängd av dess spelade partier förblir bristande expertdata ett problem för att kunna rangordna beteenden efter experternas Elo-rankningar, speciellt för experter med Elo-rankningar lägre än 2000 poäng.

Arbetet är av samhällsnytta då det visar att CBR med grundlig likhet inte alltid är passande för schackspelande AI-agenters beslutsfattande. Detta kan vara av användning inom AI för att besluta vilken teknik som bör användas för en viss AI-agents beslutsfattande. Det kan även användas som grund i andra arbeten för att undersöka liknande problem som kan leda till bättre schack AI eller AI generellt. Det kanske visar sig att någon form av CBR är passande för schack-AI och det här arbetet kan visa vad som inte fungerar, vilket leder till att industrin undersöker andra sätt att applicera CBR. Arbetet kan även användas för att härleda praktikaliteten av grundlig likhet i andra domäner. Om det t.ex. visar sig att typen av beslut som görs i spelet go liknar de som görs i schack kan det kanske härledas att grundlig likhet inte passar för go. Arbetets användbarhet för samhället sträcker sig därför till gränserna av schack, brädspel, spel och AI.

Att göra det lättare och mindre resurskrävande att ta informerade beslut för att utveckla AI-agenter kan leda till att AI-agenterna gör bättre beslut. Vad bättre innebär beror på vad målet är som AI-agenten ska uppfylla. Målen kan vara bra eller dåliga och samhället kan påverkas starkt beroende på vilka mål som AI-agenterna försöker uppnå. Vissa mål kan verka positiva ur en kortsiktig synpunkt, men ha långsiktiga negativa konsekvenser. En AI-agent i ett spel kan ha som mål att underhålla spelaren, men för mycket underhållning kan få spelaren att ignorera andra aspekter av sitt liv den värderar som sin familj eller hälsa. Det är viktigt att kritiskt utvärdera vilka mål som är önskvärda för samhället och för att kunna göra det krävs kunskap. Det yttersta syftet med arbetet är att sprida kunskap och det är inte värt att offra möjligheten för etiska informerade beslut genom att förhindra oetiska informerade beslut.

Det finns en risk att arbetet innehåller fel eller är missvisande, vilket kan få folk att göra felaktiga antaganden om olika delar av arbetet som förvränger sanningen. Forskare som förlitar sig på att slutsatsen av arbetet stämmer kan överge ambitioner av hur väl grundlig likhet kan användas, trots att det kan vara väldigt passande på ett sätt som inte undersöktes eller märktes av resultatet. Denna oavsiktliga missvisning kan leda till att framsteg inom t.ex. forskningsområdet schack tar längre tid än om arbetet hade utförts utan fel eller inte alls. Denna försening kan innebära förlust av tid och resurser som kunde ha använts till att förbättra mänskligheten. Det är därför inte helt säkert att arbetet är av samhällsnytta.

För att göra det så lätt som möjligt att upprepa arbetet och undersökningen presenterades den relevanta hårdvaran och mjukvaran som användes i **funktionsbiblioteket** och undersökningens programs implementation i sektion 5.1. Kompilerade versioner av **funktionsbiblioteket** och programmen som användes i undersökningen finns tillgängliga och även deras källkod. Eftersom pseudoslumpmässiga tal används i **funktionsbiblioteket** och undersökningen är det viktigt att rätt version och implementation av .NET används för att upprepa resultatet exakt. I **funktionsbiblioteket** och undersökningsprogrammet används nämligen System.Random objekt och det är implementationsspecifikt vilka sekvenser av nummer de produceras för ett givet slumpfrö. De slumpfrön som används är deterministiska, vilket innebär att resultat är deterministiskt för en viss version av en viss implementation av .NET. Ordningen som partierna spelas i och lagras i filen är inte deterministiskt, men det är alltid samma partier. Ett slumpfrö för en viss fallbas i ett visst parti är rondnumret - 1, vilket nämndes i sektion 5.1.

Undersökningen har utförts på experter som endast valdes för deras Elo-rankningar. Experterna har inte kontaktats för explicit samtycke att deras partier kan användas i undersökningen. För att ha kunnat delta i diverse tävlingar som partierna utfördes i måste

experterna dock ha tillåtit att arrangörerna dokumenterat, sparat och eventuellt publicerat partierna. De partier som användes i undersökningen har varit publikt tillgängliga och saknar upphovsrätt. Av denna anledning borde experterna inte ha något emot att deras partier användes i undersökningen.

6.3 Framtida arbete

I arbetet finns det ett antal olika implementationsval som inte har undersökts, t.ex. så undersöks inte problemlikheten att förskjuta en av lägenas brädes pjäser ett steg åt ett visst håll och sedan jämföra likheten mellan dem med nuvarande problemlikhet. Ett annat exempel på problemlikhet är att för varje ruta på ett av problemens bräden beräkna inversavståndet till närmaste ruta på det andra brädet som har samma eller tillräckligt likt innehåll och sedan summera alla inversavstånd. En annan detalj som kan varieras är antalet fall som hämtas från fallbasen under hämtningen. De mest lika fallen kan hämtas och det fall vars drag har högst likhet med ett av dragen kan väljas, medräknat straffpoäng om fallets problem har låg likhet med det nuvarande problemet gentemot de andra valda fallens problem. Det kan undersökas om det går att extrahera mer information från en pgn-databas än bara en samling lägen och dragen som utfördes i varje parti. T.ex. om experten i ett fall fångar en drottning utan negativa konsekvenser kan många fler fall med olika bräden och samma drag genereras för att öka chansen att rätt drag väljs när AI-agenten hamnar i en liknande situation. Med alla dessa val måste det finnas många fler vikter och viktkonfigurationer som kan undersökas.

Eftersom resultatet av arbetet antagligen inte kan påverkas genom att ändra implementationen inom problemets domän bör framtida arbete främst baseras på alternativa närliggande problem. Undersökningen visade att implementationen inte var dyr att implementera **prestandamässigt**, vilket innebär att det finns gott om rum i framtida arbete att använda algoritmer och tekniker som är dyrare att implementera **prestandamässigt**.

Istället för att försöka rangordna fallbasernas skicklighet efter deras respektive experters skicklighet kan syftet med AI-agenten vara att spela så skickligt som möjligt. Detta är av intresse inom schack-AI dels för underhållning men även för att förstå hur skickliga schackspelare tänker och ge en djupare förståelse av schacks essens.

Istället för grundlig likhet kan mer komplicerade och omfattande likheter undersökas. Det går möjligtvis även att identifiera mönster i hur experterna spelar och skapa en AI-agent som kan uppfatta och utföra dessa mönster, med detta arbete som grund. Tekningen Case-based Planning (CBP) (Spalazzi 2001) kan vara av användning för att undersöka detta. Dessa påbyggnader av arbetet skulle vara av intresse inom AI för utveckling av AI-agenter med justerbar skicklighetsnivå.

Det är möjligt att CBR:s största problem är dess rigida struktur. Strukturen kan hålla tillbaka tekniken och förhindra den från att ge lika bra resultat som brute-force sökning för schack. Strukturen kan ändras genom att tillåta att problems lösningar används för att jämföra problemens likhet, eller att brute-force sökning görs på de mest lika problemen och deras lösningar för att ta hitta den bästa lösningen. CBR skulle då agera som ett filter för brute-force sökning, vilket kan minska dess söktid. Frågan är om dessa ändringar är av nytta eller skulle ge ett sämre resultat. CBR är mer än delarna det är uppbyggt av och små ändringar kan påverka hela metodiken starkt på olika sätt som inte är helt uppenbara i nuläget. Dessa ändringar lägger även mindre vikt på beteendenas fallbaser, så det finns en risk att deras relativa skickligheter inte skulle matcha deras experters relativa skickligheter lika bra. Det

skulle dessutom vara förvånansvärt om schack var så speciellt att CBR skulle kräva modifikationer för att fungera tillsammans med schack. Om dessa förändringar inte ger ett förbättrat resultat kan det ifrågasättas om CBR bör användas för schack. Av dessa anledningar är det värt att undersöka hur bra CBR för schack fungerar om CBR-strukturen ändras och hur bra resultat CBR kan ge om det kombineras med andra tekniker som brute-force sökning.

Referenser

- Anthony, S. (2014). *A new (Computer) Chess Champion is Crowned, and the Continued Demise of Human Grandmasters*. <http://www.extremetech.com/extreme/196554-a-new-computer-chess-champion-is-crowned-and-the-continued-demise-of-human-grandmasters> [2015-03-19]
- Bellamy-McIntyre, J. (2008). *Applying Case-Based Reasoning to the Game of Bridge*. Diss. University of Auckland, New Zealand.
- Chess News (2009). *Breakthrough Performance by Pocket Fritz 4 in Buenos Aires*. <http://en.chessbase.com/post/breakthrough-performance-by-pocket-fritz-4-in-buenos-aires> [2015-03-19]
- Chess Programming Wiki (2013a). Board Representation. <https://chessprogramming.wikispaces.com/Board+Representation> [2015-04-30]
- Chess Programming Wiki (2013b). Piece-Lists. [https://chessprogramming.wikispaces.com/Board+ Piece-Lists](https://chessprogramming.wikispaces.com/Board+Piece-Lists) [2015-04-30]
- Chess Programming Wiki (2014a). 8x8 Board. <https://chessprogramming.wikispaces.com/8x8+Board> [2015-05-04]
- Chess Programming Wiki (2014b). 10x12 Board. <https://chessprogramming.wikispaces.com/10x12+Board> [2015-05-04]
- Chess Programming Wiki (2014c). Encoding Moves. <https://chessprogramming.wikispaces.com/Encoding+Moves> [2015-05-04]
- Chess Programming Wiki (2015). Generating Moves. <https://chessprogramming.wikispaces.com/Move+Generation> [2015-05-04]
- Cormen, T. H., Leirson, C. H., Rivest, R. L. & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms (3rd ed.)*. London: MIT Press.
- De Grott, A., D. (1965) *Thought and choice in chess*. The Hague: Mouton.
- Elo, A. E. (1978). *The Rating of Chess Players, Past and Present*. New York: Arco Publishing.
- Ensmenger, N. (2012). Is Chess the Drosophilia of Artificial Intelligence? A Social History of an Algorithm. *Social Studies of Science*, 42(1) ss. 5-30.
- Frey, P. W. (1983). The Alpha-Beta Algorithm: Incremental Updating, Well-Behaved Evaluation Functions, and Non-Speculative Forward Pruning. *Computer Game-Playing*. ss. 285-289. Chichester: Ellis Horwood Limited Publishers.
- Gould, J. & Levinson, R. A. (1991). *Method integration for experience-based learning*. California: University of California.
- Greenblatt, R. D., Eastlake, E. D. & Crocker, D. S. (1969). *The Greenblatt Chess Program*. <http://hdl.handle.net/1721.1/6176> [2015-02-08]

- Heinz, E. A. (1999). Endgame databases and efficient index schemes. *ICCA Journal*, 22(1), ss. 22-32.
- Holmos, P. R. (1960). *Naive Set Theory*. New York: Litton Educational Publishing, Inc.
- Hsu, F. (1991). "Expert Inputs" are sometimes harmful. I *IJCAI-91, Proceedings of the Twelfth International Conference on Artificial Intelligence*. Sydney, Australia.
- Huber, R. (2006). *Description of the universal chess interface (UCI)*. <http://download.shredderchess.com/div/uci.zip> [2015-02-08]
- Laramée, F. D. (2000a). *Chess Programming Part I: Getting Started*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-i-getting-started-r1014 [2015-03-30]
- Laramée, F. D. (2000b). *Chess Programming Part II: Data Structures*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-ii-data-structures-r1046 [2015-03-19]
- Laramée, F. D. (2000c). *Chess Programming Part III: Move Generation*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-iii-move-generation-r1126 [2015-03-30]
- Laramée, F. D. (2000d). *Chess Programming Part IV: Basic Search*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-iv-basic-search-r1171 [2015-03-30]
- Laramée, F. D. (2000e). *Chess Programming Part V: Advanced Search*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-v-advanced-search-r1197 [2015-03-30]
- Laramée, F. D. (2000f). *Chess Programming Part VI: Evaluation Functions*. http://www.gamedev.net/page/resources/_/technical/artificial-intelligence/chess-programming-part-vi-evaluation-functions-r1208 [2015-03-30]
- León-Villagrà, P. & Jäkel, F. (2013). Categorization and Abstract Similarity in Chess. I *CogSci 2013*. Berlin, Germany.
- Lincke, T. R. (2001). Strategies for the Automatic Construction of Opening Books. I *CG 2000, Second International Conference*. Hamamatsu, Japan 26-28 oktober 2000, ss. 74-86. DOI: 10.1007/3-540-45579-5_5
- Mann, T. & Muller, H. G. (2009). *Chess Engine Communication Protocol*. <http://www.gnu.org/software/xboard/engine-intf.html> [2015-02-09]
- McCarty, J. (1990). Chess as the Drosophilia of AI. *Computers, Chess, and Cognition*, ss. 227-237. New York: Springer.
- McKinsey, J. C. C. (1952). *Introduction to the Theory of Games*. Santa Monica: The Rand Corporation.
- Rubin, J. (2013). *On the Construction, Maintenance and Analysis of Case-Based Strategies in Computer Poker*. Diss. University of Auckland, New Zealand.

- Richter, M. M., & Weber, R. O. (2013). *Case-Based Reasoning: A Textbook*. Berlin: Springer.
- Schaeffer, J. (1991). Computer Chess: Science of Engineering? I *IJCAI-91, Proceedings of the Twelfth International Conference on Artificial Intelligence*. Sydney, Australia.
- Scott, B. (2002). The Illusion of Intelligence. I Rabin, S (red.) *AI Game Programming Wisdom*. Massachusetts: Charles River Media, ss. 16–20.
- Shannon, C. E. (1950). Programming a Computer for Playing Chess. *Philosophical Magazine*, 41(314).
- Simon, H. A. & Chase, W. G. (1973) Skill in Chess. *American Scientist*, 61(4), ss. 393-403.
- Spalazzi, L. (2001). A Survey on Case-Based Planning. *Artificial Intelligence Review*, 16(1), ss. 3–36.
- Standard: Portable Game Notation Specification and Implementation Guide* (1994).
<http://www6.chessclub.com/help/PGN-spec> [2015-02-16]
- Wender, S. & Watson, I. (2014). *Integrating Case-Based Reasoning with Reinforcement Learning for Real-Time Strategy Game Micromanagement*. Diss. University of Auckland, New Zealand.
- World Chess Federation (2014a). *FIDE Rating Regulations Effective From 1 July 2014*.
<http://www.fide.com/fide/handbook.html?id=172&view=article> [2015-02-09]
- World Chess Federation (2014b). *General Rules and Recommendations for Tournaments: Time Control*. www.fide.com/component/handbook/?id=39&view=category [2015-02-09]
- World Chess Federation (2014c). *Laws of Chess: For competitions Starting On or After 1 July 2014*. <http://www.fide.com/fide/handbook.html?id=171&view=article> [2015-02-09]
- World Chess Federation (2015). *Top 100 Players February 2015 – Archive*.
<https://ratings.fide.com/toparc.phtml?cod=341> [2015-03-19]