Examensarbete

HÖGSKOLAN I SKÖVDE

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

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

Examensarbete inom huvudområdet Datavetenskap
Grundnivå 30 högskolepoäng
Vårtermin 2015

Johannes Qvarford

Handledare: Peter Sjöberg

Innehållsförteckning

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 tillvägagångsätt har presenterats (Schaeffer 1991). AI-agenten undersöker vilket drag som är bäst genom att internt utföra alla möjliga kombinationer av nästa x antal drag, gradera de resulterade lägena efter en heuristik och utvärdera vilket drag som leder till det bästa läget, givet att motståndaren spelar optimalt.

I det här arbetet appliceras en alternativ teknik för att utveckla en schackspelande AI-agent i hopp om att gynna forskningen om schack-AI. Tekniken heter *Case-based Reasoning* (CBR) och är en problemlösningsteknik som går ut på att basera lösningar på nya problem, på lösningar från tidigare, liknande 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 hänvisa till när den behöver lösa ett problem. Kopplat till schack kan ett problem vara ett läge och en lösning det drag som ska utföras i läget.

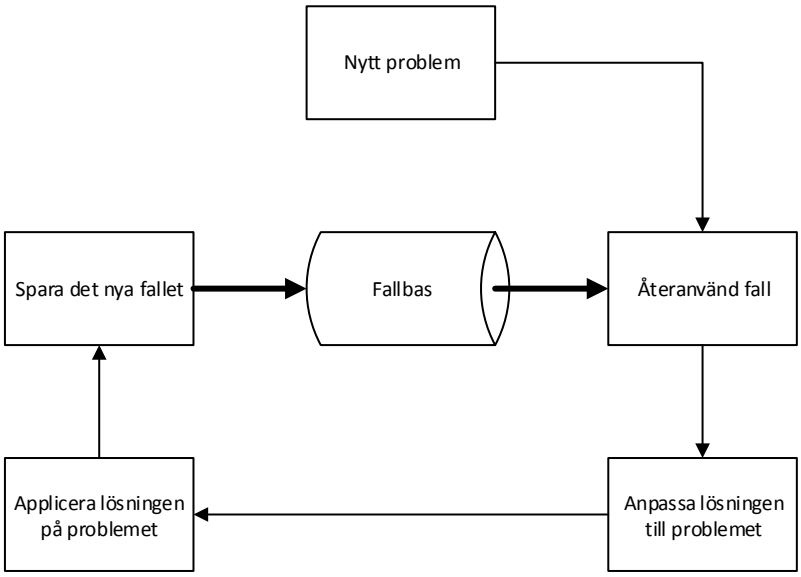
I det här arbetet ska lämpligheten att använda CBR med så kallad grund liknelse för att utveckla schackspelande AI-agenter utvärderas genom att skapa ett funktionsbibliotek av en CBR-baserad schackspelande AI-agent. AI-agenten kommer kunna basera sin fallbas på partier spelade av olika schackspelare. Det ska undersökas om AI-agenten spelar bättre med fallbaser baserade på partier spelade av bättre experter för att avgöra om en experts skicklighet kan överföras till skicklighet för AI-agenten. Undersökningen kommer utföras genom att låta AI-agenten spela mot sig själv flera gånger med olika fallbaser och notera hur många partier som AI-agenten vinner med respektive fallbas. Efter det kommer resultatet granskas för att dra en slutsats om AI-agenten spelar bättre med fallbaser baserade på bättre experter.

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 estimera 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*) **(Krit 1.1)** 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 är mer effektiv att implementera ur en prestandasynpunkt.

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. Det kan vara viktigt att den hämtade lösningen tillhör det mest lika problemet, men detta kan påverka systemets effektivitet. För att hitta det mest lika problemet och dess tillhörande lösning används ofta sekventiell sökning (Richter & Weber 2013). Eftersom problem kan likna varandra på olika sätt kan de ordnas efter olika kriterier och saknar en definitiv 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 får 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) **(Krit 1.2)**. 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 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 gemförde 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.

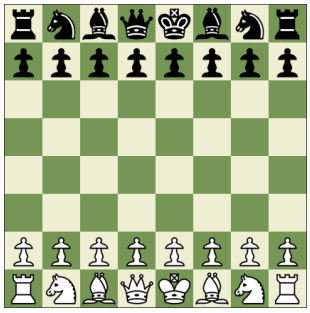
I Rubins (2013) arbete undersöks lämpligheten av att använda CBR för att utveckla en AI-agent som kunde spela olika Texas hold 'em varianter. AI-agenten kunde bestämma vilka bud den skulle ge baserat på vad andra spelare gjort i en pokertävling när de haft liknande kort på hand och på bordet. Den presterade 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) **(Krit 1.3)** använder i deras anordnade tävlingar (World Chess Federation 2014c). Schack är ett turbaserat 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.

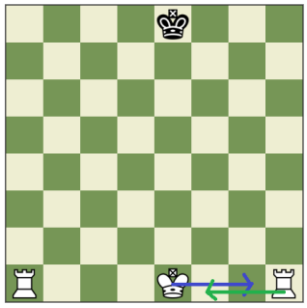
Bonden (♟) kan flytta sig ett steg rakt framåt (sett från den ägande spelarens håll), två steg rakt framåt om det är dess första förflyttning, eller ett steg diagonalt framåt om draget är ett fångande drag. Om en bonde når den sista raden sedd ur ägarens perspektiv, så kan den omvandlas till vilken annan pjäs som helst. 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.

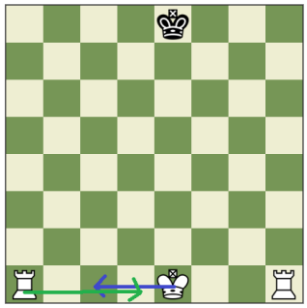
Springaren (♞) kan flytta sig två steg horisontellt eller vertikalt, och ett steg på den resterande axeln. Springaren kan flytta till en ruta även om det finns pjäser som blockerar vägen. Löparen (♝) kan röra sig diagonalt. Tornet (♜) kan röra sig horisontellt eller vertikalt. Drottningen (♛) kan antingen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

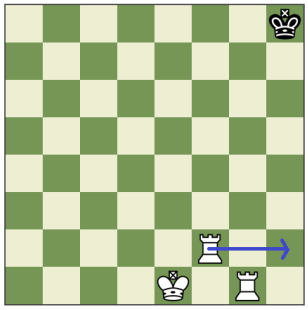


Figur 5 Bild som visar hur pjäserna flyttas när vit gör kort rockad.



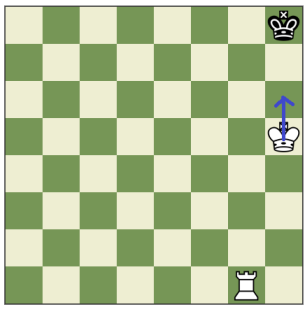
Figur 6 Bild som visar hur pjäserna flyttas när vit gör lång rockad.

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 allt eftersom 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 motspelare, vilket avgör troligheten att en av dem kommer vinna. Troligheten 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 troligheten är en procenthalt mellan 0 % och 100 % (uttryckt som 0 till 1), och skillnaden i rankning är ett tal mellan -800 och +800 (World Chess Federation 2014a). Om skillnaden i rankning är större eller lägre än +-800 är troligheten 100 % att spelaren med högre rankning vinner.

Hur mycket en spelares ranking 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.
- Troligheten 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 1-0, 0-1, eller ½-½ 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 Nxh3 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 motspelaren

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 **(Krit 1.4)**, där varje bit representerar on 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 sålla brädet med rutorna som de vita springarna kan hota, genom att utföra xor på brädet av vita pjäser **(**Laramée 2000b). Alfa-betasökning är en sökteknik för att undvika expansionen av grenar i ett träd, om det går att lista ut att motspelaren 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 användes 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 tillvägagångsätt 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 motspelare 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) (Rupert 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 tidsskrikt: 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 och besegrade den tidigare världsmästaren Stockfish 4, som hade en Elo-rankning av 3300 (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 (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 **(Krit. 1.5)**. Det finns flera saker som tyder på att CBR kan vara lämpligt för en schackspelande AI-agents beslutsfattande **(Krit. 1.6)**. CBR är en problemlösningsteknik **(Krit. 1.7)** baserad på att använda lösningar för problem för att lösa liknande problem. 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 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.

I detta arbete kommer det undersökas om CBR med grundlig (i motsatt till djup) liknelse och anpassning passar för en schackspelande AI-agents beslutsfattande **(+"och i så fall, till viken grad", men jag vet inte hur jag ska ranka hur bra det passar.)**. Med grundlig menas att implementationen av liknelse och anpassning inte kräver djupare kunskaper schack som vanliga strategier. Ett exempel på grundlig liknelse är om två lägen är lika om de generellt innehåller samma pjäser på samma rutor. Ett exempel på en strategi är skolmatt, där en spelare gör matt under mittspelet genom försöka fånga motspelarens kung när den gjort rockad. 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 denna sorts likhet är att det finns så många olika strategier i schack som kan användas för att avgöra likhet och anpassning. Det begränsar även AI-agenten till strategier som tidigare upptäckts och definierats. Hsu (1991) har även berättat att användandet av rigida strategier gjorde att schackmaskinen *Deep Thought*, föregångaren till *Deep Blue* (Campbell, Hoane & Hsu 2002) spelade sämre. Det är inte säkert att grundlig liknelse ger bättre resultat, men det är ett mindre område och är därför enklare att undersöka till fullo än djup liknelse.

(Krit 1.9, känns som det blir lättare att läsa med flera paragrafer, även om de passar ihop?)

Att grundlig likhet passar för en CBR-baserad schackspelande AI-agents beslutsfattande innebär att AI-agenten generellt spelar bättre med fallbaser baserade på bättre experter. Om AI-agentens prestation med en viss fallbas kallas för ett beteende, kan det även uttryckas som att beteenden baserade på bättre experter bär spela bättre. Om så är fallet skulle det gå att med en liten felmarginal förutse hur bra AI-agenten kommer 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 experten det är baserad på 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, vilket inte är något som förväntas gälla för fallbaserna. 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. Eftersom Elo-rankningar inte alltid stämmer exakt och ständigt förändras tillåts det att den vinner oftare med fallbasen baserad på den lägre rankade spelaren om skillnaden i rankning är mindre än 100 poäng. Detta innebär att i exemplet med programmet som hade en AI-agent med varierbar svårighetsgrad är resultatet av det här arbetet inte nödvändigtvis tillräckligt för att tekniken som undersöks ska vara av användning för programmet. Det är fullt möjligt att beteendena går att rangordna men att de alla spelar sämre än en nybörjare och det krävs mer forskning om beteenden kan uppnå viss skicklighet som förväntas av motståndaren. Om grundlig likhet passar för en CBR-baserad schackspelande AI-agents beslutsfattande så borde därför följande gälla:

- Det går att rangordna ett antal fallbaser där en högre rangordnad fallbas vinner oftare mot en lägre rangordnad fallbas givet att den största skillnaden i fallbasernas experters Elo-rankningar är minst 100.
- Varje fallbas rangordning stämmer överens med rangordningen av dess experts Elo-rankning relativt de andra experternas Elo-rankningar.

AI-agenten som presenteras i arbetet kan förbättras på flera sätt. **(Krit. 1.8)** För att kunna hantera större mängder fall kan alternativa fallrepresentationer och mer effektiva hämtningsmetoder undersökas. Förbättringar av liknelsemetoden och anpassningsmetoden kan leda till att mer passande drag utförs i olika lägen. Alternativa sätt att skapa fallbaser kan även undersökas, som att handplocka specifika fall baserat på olika kriterier, använda fall från olika experter i en fallbas, eller att generera fall istället för att basera dem på expertdata. Den grundliga liknelsen kan även kompletteras med eller vägas mot djup liknelse. **(Behövs detta nu när jag ska skriva en ”Framtida Arbeten” sektion?)**

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. För att CBR ska vara av användning måste därför AI-agenten 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).

3.2 Metodbeskrivning

Ett funktionsbibliotek ska skapas 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 AI-agentens prestation med en given fallbas.

För att undersöka om AI-agentens skicklighet är relativ till skickligheten av experten som dess fallbas är baserad på, ska olika beteenden tävla mot varandra. Här används ordet beteende för att mena hur AI-agenten agerar med en viss fallbas; AI-agenten ska alltså tävla mot sig själv med olika fallbaser. För varje parti får ett beteende poäng gentemot ett annat beteende; 1 om det vann, ½ om det blev lika och 0 om det förlorade. Efter att alla har spelat ett antal matcher mot varandra ska poängen räknas och beteendena rangordnas. Om CBR med grundlig liknelse och anpassning passar för en schackspelande AI-agents beslutsfattande måste följande gälla:

- Det går att rangordna beteendena, där ett högre rangordnat beteende alltid får högre poäng mot ett lägre rangordnat beteende givet att den största skillnaden i beteendenas experters Elo-rankningar är minst 100.
- Varje beteendes rangordning stämmer överens med rangordningen av dess experts Elo-rankning relativt de andra experternas Elo-rankningar.

(Upprepning av problemet, känns nödvändigt för att det finns en del ändringar från den ursprungliga formuleringen.)

AI-agenten ska kunna konfigureras med vikter så att olika aspekter av likhet värdesätt mer andra. Ett antal konfigurationer av vikter ska användas 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. **(Nämner att jag ska använda vikter, men det är bara för att jag i efterhand vet att olika definitioner av likhet ställs mot varandra i implementationen.)**

Expertdata från olika experter ska komma från drag som experten utfört i olika lägen i tidigare partier. En allmänt tillgänglig databas av sparade schackpartier ska användas som källa för expertdata.

Ett möjligt problem med undersökningen är att det inte är säkert att en delmängd av en spelares historik av spelade schackpartier visar hur den fick sin rankning. Om en större andel av de partier som experten vunnit gentemot de partier som den förlorat skulle finnas tillgängliga kan AI-agenten spela bättre än förväntat med expertens fallbas. Motsatsen är lika möjlig. Det finns även en risk att olika experter har olika många 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.

Det finns en risk att det kan ta för lång tid att samla in tillräckligt mycket information i undersökningen för att dra en pålitlig slutsats. Ett 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.

Att bara ta hänsyn till resultatet av partierna kan ge en falsk bild av hur väl ett beteende presterar. 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

kommer flera partier analyseras för att upptäcka mönster i hur AI-agenten beter sig och varför, men det kommer inte påverka deras rangordning i resultatet av undersökningen.

4 Implementation

(Jag använder just nu både ordet funktion och ordet algoritm på flera ställen. Jag skulle kunna använda algoritm överallt men det känns ofta enklare att diskutera funktioner. Är det förvirrande?)

Produkten som beskrevs i metoden har implementerats som ett funktionsbibliotek skrivet i programmeringsspråket C# 4.0 och kompilerat mot plattformen .NET 4.5. Produkten är en schackspelande AI-agent, men att bara presentera hur den är implementerad skulle ge en otydlig bild av sammanhanget den kan användas i och därför presenteras mer än bara AI-agentens implementation. Det delar som presenteras men inte är del av AI-agenten kommer användas i studien.

De flesta datastrukturer i biblioteket kan inte muteras, 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 mutation. Enhetstest 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 att alla algoritmer som de testar korrektheten av fungerar, men det tros vara en liten risk att både algoritmerna och enhetstesten har skrivits fel.

För att beskriva funktioner som används av 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). T.ex. funktionssignaturen för absolutbeloppet av ett heltal kan skrivas som $Abs: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{N}$, där $\mathbb{Z}$ är mängden heltal och $\mathbb{N}$ är mängden positiva heltal. En funktionssignatur för en funktion som tar flera argument kan skrivas som följer: $F: A1 \times \mathrm{A2} \rightarrow \mathrm{B}$ där $A1$ är domänen för första argumentet och $A2$ är domänen för det andra. Egentligen är $A1 \times \mathrm{A2}$ en mängd av alla ordnare par där det första elementet kommer från $A1$ och det andra från $A2$, så funktionen tar ett par som argument. Funktionsdefinitioner skrivs såhär: $F(a_1, a_2 \ldots a_n) = U$ där F är namnet på funktionen, a_i är det i:te argumentet till funktionen och U är ett uttryck av argumenten till funktionen och ett antal konstanta beståndsdelar. En konvention i rapporten är att mängder och funktioner börjar på stor bokstav medan element, argument och variabler börjar på liten bokstav. **(Overkill? Jag vill inte vara övertydlig, men även om alla i klassen har gått diskret matte så tror jag inte de skulle komma ihåg detta (vilket inte jag gjorde tills jag läste på lite).)**

4.1 Schack

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

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) olika datastrukturer och algoritmer som kan användas för att implementera en

schackspelande AI-agent. Det framhävdes 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 optimeras, bara att implementationen inte lär 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 implementationens flaskhals är hämtningen av fall från AI-agentens fallbas.

(I den här och CBR sektionen använder jag en hel del funktionssignaturer för olika funktioner. Några är nödvändiga för att kunna definiera likhet, medan andra inte är det. Ha med/ta bort de överflödiga? Personligen tycker jag att de förbättrar klarheten, och gör det enklare för folk att implementera arbetet.)

4.1.1 Parti

Schack är ett spel mellan två agenter som har ett definitivt slut. Agenterna turas om att göra ett beslut i taget i ett parti. Efter varje beslut 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 $GiltigaDrag: Läge \rightarrow \{drag_1, drag_2 \dots drag_n\} \subset Drag$ 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. Agenterna kan ses som funktioner som översätter ett läge till det giltiga drag som agenten anser bör utföras i läget, dvs. $Agent: Läge \rightarrow Drag$. 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

Ett bräde i schack 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 och den femte biten representerar färgen på pjäsen. 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 det 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 $Typ = \{Bonde, Torn, Springare, Löpare, Dam, Kung\}$. Funktion $InnehållPåRuta(Bräde, RutIndex) \rightarrow RutInnehåll$ ger innehållet på en viss ruta för ett visst bräde.

Enligt Chess Programming Wiki (CPW) (2013a) kan vanliga brädrepresentationer delas in i två kategorier: pjäscentrerade och rutcentrerade. Ett exempel på en pjäscentrerad representation är pjäslistor. Pjäslistor är ett par av listor, en per spelare med 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 sållas 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.

4.1.3 Läge

Ett läge i schack representerades med ett bräde och diverse bokföringsinformation för speciella regler. Ett läge håller även reda på vilken den nuvarande spelaren är, vilket ändras efter varje drag. 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. Varje gång ett drag utförts ökas antalet förutsatt att det inte var en bonde som flyttades, i annat fall sätts antalet till noll. 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 drag den kan utföra? I så fall är resultatet att den nuvarande spelaren har förlorat.
2. Annars, är den nuvarande spelaren inte i schack men den kan samtidigt inte utföra något 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 heltal, det första för att identifiera rutan på brädet för den pjäs som ska flyttas och det andra för att identifiera rutan som 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. 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 $SkapaFrånTillDrag(RutIndex, RutIndex) \rightarrow Drag$ och $SkapaFrånTillOmvandlingDrag(RutIndex, RutIndex, Typ) \rightarrow Drag$ användas.

Rockad och en passent representeras med två heltal likt andra drag, som gör dem unikt identifierbara som rockad och en passent 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 $ÄrRockad(Drag, Läge) \rightarrow Boolean$ säger om ett drag är rockad i ett visst läge och funktionen $RockadSida(Drag, Läge) \rightarrow RockadSida$ ger vilken sida rockaden är på där $RockadSida = \{Vänster, Höger\}$. Funktionen $ÄrEnPassant(Drag, Läge) \rightarrow Boolean$ 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.

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 får det plats i två bytes; de första sex bitarna lagrar frånrutindex, nästa sex lagrar tillrutindex och de resterande fyra lagrar omvandlingspjästypen. Även om det förväntas att många drag kommer behöva lagras i minnet samtidigt när AI-agenten använder stora fallbaser, så lär 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 implementationen, om detta skulle krävas.

För att generera giltiga drag utförs följande steg:

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 skippa 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 ett giltigt drag 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 (2015_x) definierar som en laglig draggenereringsalgoritm. 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 draggeneringstekniker 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.

För att utföra en förflyttning eller ett fångade 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.

4.2 CBR

De CBR relaterade delarna av implementationen 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. 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. Konsekvenserna av dessa beslut diskuteras djupare i sektion 4.2.4, där det beskrivs hur hämtning är implementerat och hur det påverkas av algoritmen.

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.

AI-agenten utför alla steg utom tre, 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 inom [0,1]. Vissa delar av AI-agenten är beroende av slump för att den ska fatta varierade beslut. AI-agneten använder därför en intern pseudoslumpgenerator initierad av ett slumpfrö. Slumpfröet är ett heltal som påverkar sekvensen av slumpmässiga tal som pseudoslumpgeneratorn producerar. Funktionen

$SkapaAiAgent$: $Fallbas\ x\ ViktLista\ x\ Slumpfrö \rightarrow AiAgent$ skapar en AI-agent (en funktion från läge till drag) givet en fallbas, en viktlista och ett slumpfrö.

4.2.4 Hämtning

Hämtning av ett fall från 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 fallet ursprungligen utfördes av en spelare med en färg olik den nuvarande spelaren, 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 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 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 sak 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 inte utfördes av en spelare med samma färg som den nuvarande spelaren ignorerar. Anledningen är att fallets drag med stor sannolikhet bara skulle vara vettigt om det var spelarens tur, eftersom den annars inte kan flytta pjäsen i fallets drag. Området som dragets utfördes i har även med större sannolikhet flera pjäser av motståndarens färg.

Likhet mellan problem dvs. lägen, definieras som den summerade likheten av eventuella pjäser på respektive läges bräden. Likhet mellan eventuella pjäser 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*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 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.

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 tidigare fallet 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 än 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: $Anpassningslikhet: Drag\ x\ Drag\ x\ Bräde\ x\ Bräde\ x\ ViktLista \rightarrow [0, 1]$. De två dragen i signaturen är ett av de giltiga dragen och fallets drag, brädena är det nuvarande brädet och fallets läges bräde och viktlistan är AI-agentens viktlista. Funktionen set ut såhär: **(det blir svårt att läsa utan radbyten vid rätt ställen. Ha kvar radbyten eller inte?)**:

$$AnpassningsLikhet(aDrag, bDrag, aBräde, bBräde, vikter) =$$
$$vikter_1 * \big(1 - Avstånd(aDrag, bDrag, vikter_2)\big) +$$
$$(1 - vikter_1) * Innehåll(aDrag, bDrag, aBräde, bBräde, vikter_3)$$

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 $[0, 1]$. Vikten av avstånd mellan källrutor respektive destinationsrutor kontrolleras av en vikt. Funktionen har signaturen: $Avstånd: Drag\ x\ Drag\ x\ Vikt \rightarrow [0, 1]$. Funktionen är som följer:

$$Avstånd(aDrag, bDrag, vikt) =$$
$$vikt * NormaliseratManhattanAvstånd\big(Frånruta(aDrag), Frånruta(bDrag)\big) +$$
$$(1 - vikt) * NormaliseratManhattanAvstånd(TillRuta(aDrag), TillRuta(bDrag))$$

Innehåll är baserat på likheten av respektive drags flyttade och eventuellt fångade pjäs. För att se viken 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. Funktionen har signaturen: $Innehåll: Drag\ x\ Drag\ x\ Bräde\ x\ Bräde\ x\ Vikt \rightarrow [0,1]$. De två dragen i signaturen är dragen som ska jämföras och brädena är de bräden som respektive drag utfördes på. För att förenkla läsbarheten har ett antal funktionsnamn förkortats. $FrånRuta$ har förkortats till FR, $TillRuta$ har förkortats till TR och $InnehållPåRuta$ har förkortats till IPR. Funktionen är följande:

$$Innehåll(aDrag, bDrag, aBräde, bBräde, vikt) =$$

$$vikt * RutInnehållsLikhet\left(IPR\left(aBräde, FR(aDrag)\right), IPR\left(bBräde, FR(bDrag)\right)\right) +$$

$$(1 - vikt) * RutinnehållsLikhet\left(IPR\left(aBräde, TR(aDrag)\right), IPR\left(bBräde, TR(bBräde)\right)\right)$$

Tanken med denna definition av draglikhet är att försöka identifiera vilket drag som har ett syfte så likt fallets 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.

5 Utvärdering

[Kapitlet *utvärdering* ska innehålla en presentation av den genomförda undersökningen, en analys av utfallet och de slutsatser som kan dras därav.

Kapitlet kan variera ifråga om struktur beroende på projektets utformning.

]

5.1 Presentation av undersökning

5.2 Analys

5.3 Slutsatser

6 Avslutande diskussion

6.1 Sammanfattning

[

Här sammanfattas rapporten som helhet från frågeställning till slutsats. En läsare som vill få en snabb överblick av uppsatsen ska kunna gå direkt från kapitel ett till kapitel sex.

]

6.2 Diskussion

[I diskussionskapitlet sätts problemet och resultatet i ett större sammanhang utanför examensarbetets specifika problemformulering. Det är viktigt att koppla till andras arbete - till exempel centrala artiklar som används i bakgrundskapitlet.

Diskutera resultatets trovärdighet. Lyft fram faktorer som påverkar trovärdigheten. Diskutera utifrån den genomförda studien.

Diskussionskapitlet är även en lämplig plats för att ta upp de saker som täcks av kriteriet ”Rapporten innehåller en diskussion kring relevanta samhälleliga och etiska aspekter på arbetet”. Välj några av nedanstående aspekter och diskutera dem i relation till ditt arbete. Beroende på typen av arbete varierar vilken typ av aspekter som är relevanta att undersöka, om man till exempel gjort ett spel eller en illustration som innehåller människor kan genus och kulturella aspekter vara intressant medan samhällelig nytta blir intressant om man har utvecklat en algoritm eller ett program.

- Etiska aspekter
- Forskningsetiska aspekter hos arbetet eller undersökningsmetoden
- Samhällelig nytta hos arbetet
- Genus och/eller kulturella aspekter

]

6.3 Framtida arbete

[I det framtida arbetet ska en hypotetisk fortsättning på examensarbetet diskuteras. Detta gäller både i det korta perspektivet - om arbetet skulle fortsätta några extra dagar eller månader. Projektet ska även sättas in i ett större sammanhang och ses ur ett bredare perspektiv. Till exempel om ett företag skulle kunna fortsätta på examensarbetet och driva resultatet vidare för att bygga ett komplett spel. Detta kan med fördel relateras till det större sammanhanget som diskuteras i diskussionsdelen.]

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]

Board Representation. (i. d.). I Chess Programming Wiki.

Bellamy-McIntyre, J. (2008). *Applying Case-Based Reasoning to the Game of Bridge*. Diss. University of Auckland, New Zealand.

Campbell, M., Hoane, A. J. & Hsu, F. H. (2002). Deep Blue. *Artificial intelligence*, 134(1), ss. 57-83.

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 [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]

Cormen, T. H., Leirson, C. H., Rivest, R. L. & Stein, C. (2009). *Introduction to Algorithms (3rd ed.)*. London: MIT Press.

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]

Harkness, K. (1973). *Official Chess Handbook*. New York: David McKay Co.

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]

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.

Oxford Dictionaries (2010). *Oxford Dictionary of English (3. ed.).* Oxford: Oxford University Press.

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.

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.

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 (2011). *FIDE Tournament Rules*. http://www.fide.com/component/handbook/?id=20&view=category [2015-03-18]

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]