

# マルチエージェント型マルチプレイヤーゲームにおける探索手法に関する研究

竹下 幸裕<sup>†1</sup> 橋本 剛<sup>†1</sup> 赤間 仁志<sup>†1</sup>

ポーカーやブリッジ、麻雀などのマルチプレイヤーゲームでは、局面の数が膨大になって探索が難しいため、あらゆるゲームで定番と呼べる手法が存在しない。エージェントが複数のマルチエージェントゲームでは、さらに探索が難しくなる。本稿ではマルチプレイヤー・マルチエージェントゲームである第21回全国高専プログラミングコンテスト競技部門を題材に、探索を利用した人工知能アルゴリズムを提案し、実装した。実験では、大会公式 AI との対戦で10戦10勝と高い性能を示した。約60チームが参加した大会では、準優勝という成績を収めた。

## A Study on Search Techniques for Multi Agent Multi Player Games

YUKIHIRO TAKESHITA,<sup>†1</sup> TSUYOSHI HASHIMOTO<sup>†1</sup>  
and HITOSHI AKAMA<sup>†1</sup>

There is no standard technique for multi-player games as Poker, Bridge and Mahjang because of its search difficulty. Search becomes more difficult for multi-agent games. This paper proposes AI algorithm using search for 21th National College of Technology Programming Contest, which is multi-player multi-agent game. Experiments of playing games against the contest official AI results high performance of 10 victories in 10 games. Our AI program resulted the second place among about 60 teams in the Contest.

<sup>†1</sup> 松江工業高等専門学校  
Matsue College of Technology

## 1. はじめに

強いゲーム AI を作成するには、毎回選択できる手の中から一番良いと思われる手を選ぶ必要があるが、手を選ぶ手法は様々である。たとえばチェスや将棋などでは MinMax 探索<sup>1)</sup> が基本である<sup>2)3)</sup>。囲碁も従来は MinMax 探索が基本であったが、近年はモンテカルロ木探索<sup>4)</sup> が成果を収めている<sup>5)</sup>。多人数ゲームではポーカーやブリッジ、麻雀などで研究が行なわれている<sup>6)7)8)</sup> が、定番と呼べる手法が存在しない。これは局面の数が膨大となって探索が難しいことと、各プレイヤーが均等に支配力を持つ場合に2プレイヤー以上に狙われると対処できなくなるなどが理由である。例として4人将棋が挙げられる<sup>9)</sup>。

先日開催された第21回全国高専プログラミングコンテスト(以下プロコン)の競技部門は、各3体のロボットを6チームが操作するマルチエージェントのマルチプレイヤーゲームである。複数プレイヤーが同時に操作するマルチエージェント対戦ゲームでは、参加者や操作する対象の多さに比例して考える局面が多くなり、AIにはそれに耐えうる思考が必要となる。本研究ではマルチプレイヤー・マルチエージェントゲームにおける探索を利用した人工知能アルゴリズムを提案する。そして提案内容を実装してプロコン競技部門に参加した。本稿では競技部門と実装内容について説明し、最後に結果と考察を示す。

## 2. プロコン競技部門

### 2.1 ルール説明

第21回プロコン競技部門『「水瓶の恵み」- 緑と水のネットワーク -』のルールを重要なものだけ抜粋して説明する。図1は実際の試合の画面である。ゲーム中はこの画面にフィールド上のロボットの位置や各チームの配水状態がリアルタイムに表示される。

#### ・概要

各3体のロボットを6チームが操作し、水瓶に入っている水を補給して六角形状のフィールドの各六角形セルへ配水する。配水したセルと配水セルによって囲まれた領域のセルは配水したチームの得点となり、基本的にこの得点を競う。図2は囲みセル判定のイメージである。図中の黄色のセルが黄チームの配水であるとする、黄色セルで囲まれた緑色のセルは黄チームの得点となる。

#### ・フィールド

フィールドの大きさは41x41で、1個1個が六角形のセルで構成されている。フィールドのうち右上と左下の一角をゲーム進行に関与しないセルとして無視するため、実際には六



図1 「水瓶の恵み」  
Fig.1 "Blessing of aquarium".

角形のフィールドとなる。

・初期配置

初期配置は各チームのロボットと地形がフィールドの中心を軸に点対称となるよう設定される。

・ゲーム内時間

ゲーム内の単位時間は1/60秒であり、これが1フレームと定義され、全ての動作の基準となる。また、180フレーム(3秒)を1セッションとしており、1セッションごとに次のセッションの命令を送信する。

・ロボットの行動

ロボットは水瓶での給水、6方向への移動、セルへの配水、敵配水の吸い取りができ、ロボットに命令することで実行される。それぞれの動作には実行時間が設定されており、行動後は実行時間が経過するまで次の行動ができない。本稿では、ロボットに命令することを将棋や囲碁にならって「手を選ぶ」と表現する。実行時間は表1の値となっており、配水<水瓶給水<移動の順に大きくなり、敵配水の吸い取りは移動と同じ時間がかかる。

・セルの種類

図3はロボットとセルのルールをまとめたものである。セルの種類には、平地、荒地、壁、水瓶がある。平地は特別な変化がない。荒地は行動時間が長くなる。壁はロボットが進入できない。水瓶は水を補給することができる。

・試合時間

試合時間は5~15分の間であり、試合当日に決定される。

表1 行動と実行時間

Table 1 Action and execution time.

行動	実行時間 [フレーム]
移動	40
吸い取り	40
水瓶給水	24
配水	19

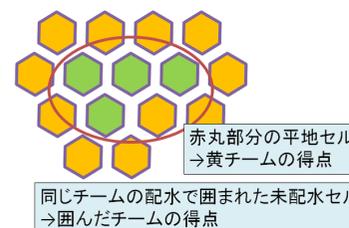


図2 囲みセルの判定

Fig.2 Decision of enclosed cells.

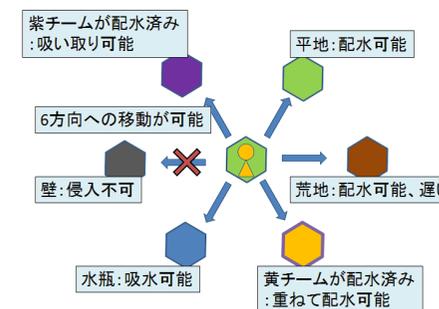


図3 ロボットとセルのルール

Fig.3 Rules on robots and cells.

・使用できる機材

参加者が用意するのはロボットに命令を送るクライアントだけであり、サーバは運営側が用意する。また、思考と命令に使えるマシンはひとつのチームにつき1台のみである。この他のルールの詳細は、公式サイト<sup>\*1</sup>を参照していただきたい。

3. 探索手法

3.1 今回使用した探索のアイデア

基本的な探索方法は、各ロボット毎のしらみつぶし探索である。与えた最大深さ(探索閾値)まで探索を行なうと探索を打ち切り、評価関数を計算し、評価値が最大となる手をルート局面で選択する。評価関数については4章で述べる。

\*1 全国高等専門学校プログラミングコンテスト - Official Site <http://www.procon.gr.jp/>

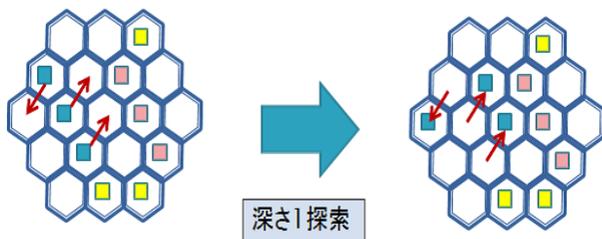


図 4 探索局面数を減らす工夫 (1)

Fig. 4 An idea for decreasing search positions (1).

今回の競技では 1 体のロボットが 7 種の手を打つことができ、そのロボットを 6 チームが 3 体ずつ所有している。しらみつばし探索するには、7 の 18 乗をさらに深さで累乗した数の局面を探索しなくてはならない。このままでは深さ 1 の探索でも難しいため、いくつかのアイデアを利用して探索する局面の数を減らした。

(1) 敵のロボットは動かないと仮定し、自チームのロボット 3 体のみを探索する。図 4 は (1) の工夫について表している。図 4 で自チームのロボットを青とすると、探索時には青チームだけを動かし、敵チームのロボットである黄や赤は動かさない。

(2) 探索するときはロボットを 1 体ずつ動かし、並列化処理で同時に 3 体分の探索を行なう。図 5 は (2) の工夫について表している。図 5 のように、ひとつのロボットを探索するとき他のロボットは動かないと仮定する。たとえばロボット A を探索するとき、ロボット B と C は動かないと仮定する。

(3) 未配水のセルに必ず配水を行なう (戦略上常に配水を行なう方が有利と考え、2 回配水を基本とする)。探索は 6 方向の移動のみになる。図 6 は (3) の工夫について表している。図 6 のように未配水セルに移動するときは、移動後に 2 回の配水を行なうようにする。

以上を表 2 にまとめる。表中のロボは同時に探索するロボットの数、手数はロボット 1 体につき探索する手の数、局面数は深さ 1 あたりで探索する子ノード数、深さは制限時間 3 秒で探索可能な深さである。このとき、探索する局面数は 6 を深さで累乗した数になる。これらの工夫を AI に実装した。

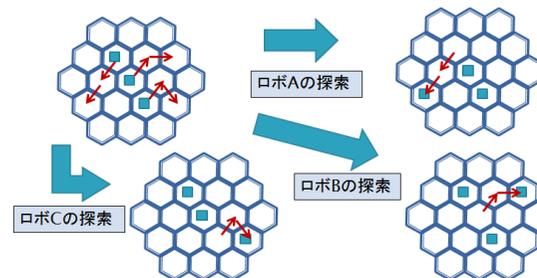


図 5 局面数を減らす工夫 (2)

Fig. 5 An idea for decreasing search positions (2).

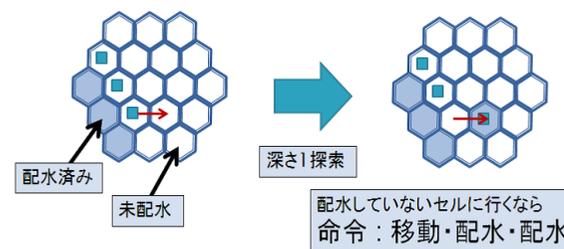


図 6 局面数を減らす工夫 (3)

Fig. 6 An idea for decreasing search positions (3).

表 2 工夫のまとめ

Table 2 A list of ideas.

工夫	ロボ	手数	局面数	深さ
	18	7	$1.6 \times 10^{15}$	0
(1)	3	7	343	1
(2)	1	7	7	4
(3)	1	6	6	12

### 3.2 探索の実装

今回は前項のとおり、自分のロボットについて1体ずつ探索した。

閾値は探索時間2秒以下を目指して調整した。ルール上は3秒以内であるが、3秒いっぱい使ってしまうと送信時や処理時の誤差などによって3秒を超えてしまう危険性があるため、余裕をもたせた。本番では実際に3秒前後で送信していたチームがトラブルを起こしていた。

実際には移動方向を4回分決定した。1回の移動ごとに2回の配水を行なう(終盤は1回)ため、表2のように深さ約12の探索が実現した。

#### ・探索の工夫

今回のルールでは前述のように未配水のセルに必ず配水した方が有利になると判断したため、その場合は必ず配水するようにした。このことで配水を考慮する必要がなくなり、実際には手は6方向の移動のみ探索した。他にも、ロボットが直前にいた場所へ戻る手は無駄であるため、選択する手の候補から外した。

#### ・細かい調整

序盤の1セルへの配水量は2にして、吸い取りによる被害を抑えた。これは配水よりも吸い取りの方がフレーム数を多く消費し有利になると判断したためである。

一度敵の配水を吸い取ったら、そのセルの配水が空になるまで吸いつくした。敵の配水が残っているうちはそのセルは敵の得点になってしまうため、これは一度でも吸い取りを狙った場合は極端に多い配水量でないかぎり吸いつくす方が有利になると判断したためである。

また、今回の競技では、開始直後に水瓶へ直行して試合中に使う水を補給しておけばふたたび補給するために移動するコストがかからず有利だと判断したので、開始直後に各ロボットから水瓶への最短経路を調べ、終了時に余るぐらいの水を補給した。このため序盤は配水セルの数で他チームに出遅れるが、代わりに後半に巻き返す展開が多かった。水瓶が壁に囲まれて実質使用できなかつたり、直線的に進んで到達できない場合もあったので水瓶への最短距離を調べるのは重要な作戦のひとつであった。

### 4. 評価関数

図7は評価関数のイメージである。評価基準は、ルール上得点になるものを重視し、その他にも有利になると考えたものを付け加えた。今回のルールでは配水したセルの数と配水で囲んだ領域が得点となるため、自分のセルがあれば評価値を1個あたり20増やし、敵のセルがあれば評価値を1個あたり10減らした。1セルに2配水あれば、評価値を1増やし

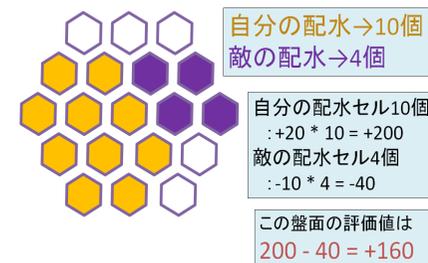


図7 評価関数のイメージ

Fig.7 An image of evaluation function.

た。3配水以上は2配水と同じ評価にした。また、自分以外のロボットと配水セルの奪い合いになると他のロボットに後れをとり不利になるため、5セル以内に他のロボットがいればロボット同士の距離が近いほど評価値を減らした。

## 5. 結果

### 5.1 実験結果

#### 5.1.1 公式AIを使った実験

開発中には公式から配布されたサーバ(表示も兼ねるのでビジュアライザとも呼ぶ)と、独自に開発したサーバを併用した。<sup>\*1</sup> 今回の競技はフィールドの形やロボットの配置、敵の思考などの影響が大きく、定量的な結果が得られないため、実戦で結果を出す必要があった。そこで、AI開発中にサーバを用いた公式AI相手の実験を行なった。図8は試合終了時のビジュアライザの例である。公式AIは数十種類用意されていた。このAIは本戦の予選で2位に入るほどの強さであった。実験では、このうち5体を対戦相手に選んで、大会で使ったAIと10回対戦させた。使用した公式AIの番号はすべての試合で共通である。また、1試合ごとにフィールド上のセルとロボットの配置を変えた。実験の試合結果は表3の通りである。表中の松江AIは松江チームが大会で使用したAIで、それ以外はその番号の公式AIである。カッコ内の数字は得点セルである。得点セルが同じチームは総配水量の多い方が上位になっている。

\*1 配布元: プロコン公式サイト <http://www.procon.gr.jp/modules/procon21/>

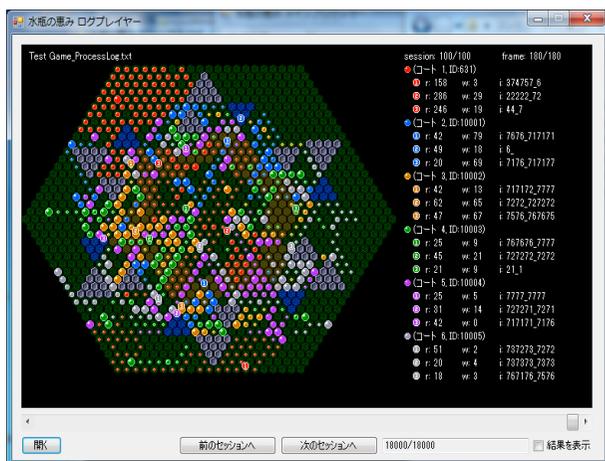


図 8 実験の終了画面例

Fig. 8 An example of ending position of the experiment.

表 3 実験結果

Table 3 Results of the experiment.

試合	1 位	2 位	3 位	4 位	5 位	6 位
1 回戦	松江 AI(251)	AI-5(115)	AI-4(97)	AI-3(90)	AI-1(82)	AI-2(78)
2 回戦	松江 AI(268)	AI-5(93)	AI-4(63)	AI-3(59)	AI-2(57)	AI-1(56)
3 回戦	松江 AI(143)	AI-4(106)	AI-3(91)	AI-5(74)	AI-1(71)	AI-2(51)
4 回戦	松江 AI(185)	AI-3(43)	AI-1(41)	AI-2(41)	AI-5(38)	AI-4(31)
5 回戦	松江 AI(103)	AI-4(42)	AI-1(40)	AI-2(36)	AI-5(35)	AI-3(35)
6 回戦	松江 AI(168)	AI-4(69)	AI-2(67)	AI-1(59)	AI-3(43)	AI-5(42)
7 回戦	松江 AI(270)	AI-2(115)	AI-4(112)	AI-1(111)	AI-5(90)	AI-3(88)
8 回戦	松江 AI(92)	AI-1(69)	AI-5(63)	AI-4(57)	AI-3(50)	AI-2(38)
9 回戦	松江 AI(161)	AI-2(92)	AI-1(79)	AI-4(65)	AI-3(51)	AI-5(42)
10 回戦	松江 AI(213)	AI-5(93)	AI-3(68)	AI-4(63)	AI-1(57)	AI-2(34)

表 4 1 回戦の結果

Table 4 Standings of the first round.

チーム	得点セル	順位
松江	212	1 位
公式 AI	189	—
奈良	118	2 位
和歌山	69	3 位
富山	40	4 位
津山	30	5 位

表 5 準々決勝の結果

Table 5 Standings of the quarter-final.

チーム	得点セル	順位
松江	251	1 位
豊田	211	2 位
東京	132	3 位
大島商船	131	4 位
都立(品川)	74	5 位
阿南	73	6 位

実験の結果、10 戦すべてで松江 AI が 1 位になった。公式 AI は 5 体ともフィールドの形によって順位が変動していた。この実験で、開発した AI は公式 AI 相手に安定した強さを発揮することが分かった。

## 5.2 大会の結果

試合時間は決勝戦以外が 5 分、決勝戦のみ 7 分であった。

下のそれぞれの表は松江チームが参加した各試合の結果である。チームはチーム名、得点セルは直接配水したセルと囲みで得たセルの合計数、順位は試合での順位を示す。

表 4 は 1 回戦の結果である。1 回戦のうち、松江チームが参加した試合は不具合で再試合になった。このため組み合わせが変更になり、運営側の用意した AI が試合に参加した。公式 AI を除いた上位 2 チームが勝ち抜けて準々決勝に進み、負けた場合は敗者復活戦へ進んだ。表 5 は準々決勝の結果である。上位 2 チームが勝ち抜けて準決勝に進んだ。

表 6 は準決勝の結果である。上位 3 チームが勝ち抜けて決勝に進んだ。松江チームと豊田チームは得点セルが同点だったため、ルール通りに総配水量の多さで順位が判定され、202 と 156 で松江が 3 位になった。表 7 は決勝の結果である。上位 3 チームが入賞した。ハノイ国家大学はオープン参加であったため、国内大会の順位は表のようになる。

表 8 は松江チームの本戦結果である。

これらの表のとおり、プロコン本戦では、約 60 チーム中準優勝の好成績を収めた。

## 6. 考 察

### 6.1 競技全般

今回の試合に使用されるフィールドは 41x41 の 1681 セルだが、ゲーム上無視する空白セルも含まれるため実際に試合に関わるのは約 1200 セルである。よって、2 チーム勝ち抜けの場合約 400 セルを、3 チーム勝ち抜けの場合約 300 セルを取得すれば確実に勝ち抜ける

表 6 準決勝の結果

Table 6 Standings of the semi-final.

チーム	得点セル	順位
長野	200	1 位
群馬	161	2 位
松江	153	3 位
豊田	153	4 位
仙台 (広瀬)	119	5 位
大連	107	6 位

表 7 決勝の結果

Table 7 Standings of the final.

チーム	得点セル	順位
石川	211	1 位
ハノイ	210	—
松江	174	2 位
長野	133	3 位
群馬	112	4 位
近畿大学	93	5 位

表 8 松江チームの結果

Table 8 Results of the team Matsue.

試合	得点セル	順位
1 回戦	212	1 位
準々決勝	251	1 位
準決勝	153	3 位
決勝	174	2 位

ことができた。しかし実際にそこまでの得点を取ることはなく、後半になって他チームとの吸い取り合いが激しくなると上位でも得点セルが 200 セルを割り込む試合があった。

### 6.2 配水方式

各チームの配水は、囲んで得点を稼ぐチームと近くのセルに配水していく（ベタ塗りする）チームで大別された。囲み得点を稼いだチームは、他のチームのロボットの動きが遅い、もしくは吸い取りによる妨害がなければ囲みを成立させることができ、大量の得点を得ていた。しかし囲み領域はそれを構成する配水セルが 1 個でも吸い取られれば得点にならないため、吸い取り合う混戦になると得点を取れなくなった。

一方、ベタ塗りするチームは囲み得点を稼ぐチームとは正反対の結果が出ていた。敵の吸い取りによる妨害が少ない試合では大量得点を稼げずに不利になったが、各チームの吸い取り合いが激しくなる試合では安定して得点を稼いだ。

松江チームは前述のように探索を利用しており、近場で配水できる場所には配水し、さらに囲み領域ができれば高評価になるように評価関数を作った。配水方式の差は試合が進むごとに出てきており、準決勝あたりからはどのチームも妨害を作戦に組み込んだため、得点差も縮まっていった。

### 6.3 自動操作と手動操作

優勝チームである石川高専は、事前に手動操作のみで戦略を立てていたが、試合直前に AI と手動操作を組み合わせることを決め、決勝戦ではその手法を使った。石川高専チームは AI による判断を人間の直感的な判断で補う形をとり、局面に対して柔軟な対応をとった。これが優勝を決めた要因であると思われる。しかしこの事は、言いかえれば石川高専チームの AI の不完全さを表わしており、マルチプレイヤー・マルチエージェントゲームで強い AI を作ることの難しさを表わしているといえる。参加チーム全体でも手動操作と自動操作の割合はバラつきがあり、AI による自動操作と手動操作のどちらかが優れているとは言い切れない。

### 6.4 吸い取りによる妨害

試合時間の後半になるほど配水できるセルは無くなっていき、どのチームも妨害するようになった。吸い取りによって囲みを崩すことができれば得点を大きく落とすことができる。それは自分のチームにとっても同様なので、囲みセルを崩されないような対策が必要だった。一方、吸い取りは配水よりも大きなコストがかかるため吸い取ったチーム以外には余裕を与えてしまうというデメリットがある。

決勝では、石川高専チームやハノイ国家大学チームは上位チームの得点セルを減らすことに専念していた。松江チームは試合時間 5 分頃に 1 位になっており、残り 2 分の大半を石川チームとハノイチームに狙われることとなった。さらに松江チームはロボットの初期位置が石川チームとハノイチームに挟まるように配置されてしまっていた。1 章で、マルチプレイヤーゲームの特徴として「各プレイヤーがゲームに対しての支配力を均等に持っている場合、2 プレイヤー以上に狙われると対処できなくなる」と書いたが、決勝戦の残り 2 分でそれが実証された。

結果論では終了直前まで 2~3 位に潜伏しておけばよかったが、仮にその方法を取ったとき 1 位の妨害を考えるチームがいなかったら、今度は追い上げが足りず 1 位になれないという問題が発生する。こればかりはお互いの作戦の相性次第で結果が決まってしまう。

## 7. ま と め

今回の研究では、探索と評価関数にマルチプレイヤー・マルチエージェントゲーム向けの工夫を提案し、それをプロコン競技部門用の AI に実装し、大会に参加した。結果、準優勝という好成績を収めることができた。これは本稿で提案した探索手法により、試合中のあらゆる状況に対して柔軟に対応できた結果であると思われる。

## 参 考 文 献

- 1) Shannon, Claude E.: Programming a Computer for Playing Chess, Philosophical Magazine Ser.7, Vol.41 No.314 (2009).
  - 2) David Levy, Monty Newborn, How Computers Play Chess, Computer Science Press (1991).
  - 3) Hiroyuki Iida, Makoto Sakuta, and Jeff Rollason, Computer Shogi, Artificial Intelligence 134, pp. 121-144 (2002).
  - 4) L. Kocsis and C. Szepesvari, Bandit Based Monte-Carlo Planning, LNCS vol.4212 (ECML 2006), pp. 282-293 (2006).
  - 5) 中村貞吾, コンピュータ囲碁, 人工知能学会誌, Vol.24(3), pp. 341-348 (2009).
  - 6) D. Billings, A. Davidson, J. Schaeffer, D.Szafron, The challenge of poker, Artificial Intelligence 134, pp. 201-240 (2002).
  - 7) 小田和友二, 埴敏博, 上原貴夫, コンピュータブリッジのプレイヤーモデルに基づく並列ゲーム木探索, 情報処理学会研究報告.GI, [ゲーム情報学], pp. 75-82 (2006).
  - 8) 北川竜平, 三輪誠, 近山隆, 麻雀の牌譜からの打ち手評価関数の学習, 第12回ゲームプログラミングワークショップ2007, pp. 76-83, Nov. (2007).
  - 9) N. Sasaki, M. Hirasawa, Tsuyoshi Hashimoto, Hiroyuki Iida, Jos Uiterwijk and Jaap van den Herik, Hira, a Four-handed Shogi Program. Advances in Computer Games 9, pp. 247-259 (2001).
-