

不完全情報ゲームの研究

作田 誠

不完全情報ゲーム研究の動向を以下の内容でレビューする。まず不完全情報ゲームがどういうものを説明した後、研究の意義と重要性について触れる。次に研究手法として、ゲーム理論によるもの、相手モデル化によるもの、論理プログラミング、シミュレーションや探索を主体とした手法、完全情報問題として解く手法などを紹介する。最後に、スクラブ、ポーカーやブリッジ、麻雀、衝立将棋を始めとする主要な問題領域における現状と展望を示す。また新しいゲームであるDI将棋についても言及する。

キーワード：不完全情報ゲーム，ゲーム理論，最適戦略，相手モデル化，モンテカルロシミュレーション

1. 不完全情報ゲームとは

不完全情報ゲーム (imperfect-information game) とは、プレイする上で重要な何らかの情報がプレーヤに隠されているゲームである。ゲームの展開型すなわちゲーム木を考えたとき、あるゲーム局面においてあるプレーヤにとって識別できない可能なゲーム状態の集合をそのプレーヤの情報集合 (information set) と言うが、完全情報ゲームでは全プレーヤの全情報集合が要素1、すなわちゲーム状態が確定している。完全情報ゲーム以外を不完全情報ゲームと言い、要素2以上の情報集合を持つのが特徴である[23]。

例えばじゃんけんも、同時に出すのを相手に分からないようにして順番に出すと考えていいので、不完全情報ゲームである。間違いやすいのがバックギャモンやモノポリーなどさいころを使うような偶然要素の入るゲームで、これらは不完全情報ゲームでなく不確定ゲーム (game of chance, game with chance moves) と言い、チャンス手番を考えることで確定完全情報ゲームと似た取り扱いが可能である。

2. 不完全情報ゲーム研究の意義

不完全情報ゲームの研究には、人工知能分野あるいは広くソフトウェア技術にとってさまざまな挑戦課題がある。これらはコンピュータにとって、例えば嘘を見破ったり嘘をついたりするように、人間を理解でき、また人間の振りをできるようにするためには克服しな

ければならない必須課題である。

1. 不完全情報を取り扱う

そもそもコンピュータで不完全情報を取り扱うこと自体が難しい。プログラムは他プレーヤに関する不完全な情報あるいは他プレーヤからの自分に対する理解の情報をデータとして表現する必要がある。

2. 技術戦・先読み

比較的情報の不完全性の小さい問題領域では、完全情報問題ほど決定的ではないものの先読み探索に代表される技術的要素が重要である。

3. 情報戦

大部分のゲームでは得られる情報はプレーヤ毎に異なる。強いプレーヤはできるだけ相手プレーヤの情報を知り相手にはできるだけ自分の情報を与えない状況に導くことができる。

4. 心理戦・欺き

ブラフ (手が悪いのに強気に出ること) またはスロープレイ (手が良いのに弱気に見せかけること) など、プレーヤは他プレーヤを欺こうとする。強いプログラムは相手プレーヤの欺きをできるだけ看破し、逆に相手をはめる必要がある。

5. 相手モデル化

他プレーヤについて、どういう状況で何をやってくるかを正確に予想できればできるほどプログラムは強くなる。正確な相手モデル化により、相手の最適化されていない戦略につけこむことができる。また、相手が自分をどのようにモデル化してくるかが分かれば、その裏をかくこと

さくた まこと
福岡工業大学 情報システム工学科
〒811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1

もできる。

6. 協調・裏切り

多くの不完全情報ゲームはマルチプレーヤゲーム（本稿ではプレーヤが3人以上のものを指す）である。また、ゼロ和（一定和）でない一般和不完全情報ゲーム¹も存在する。これらのゲームでは、複数プレーヤによる動的な協調・裏切り戦略に柔軟に対応できることが必要となる。

上の項目中、2と3および4と5をそれぞれ技術戦および心理戦としてまとめてもいいだろう。なお、不完全情報ゲームは勝ち負けが確率の小さな違いでしか出てこないのが統計的に強さを調べにくい。また相手モデル化をするプログラムでは、特定の相手には勝率が良いが他の相手には悪いといった相性の問題も発生しやすい。その結果、不完全情報ゲームは完全情報ゲームに比べてプログラム評価がより難しい。

このようにさまざまな課題を持つ不完全情報ゲームは、人工知能の研究対象として、強くて人間トップと互角以上に勝負するプログラムの開発、および、典型的な初級者・中級者プレーヤなど人間的な振る舞いをするプログラムの開発などに意義がある。不完全情報ゲームでは情報の不完全性の大小に応じてさまざまな解決手法が必要になる。不完全性が小さい領域では技術戦の要素が強く先読み探索が重要だが、不完全性が

大きい領域では心理戦の要素が強くゲーム理論や相手モデル化が重要になってくる。図1に代表的と思われる不完全情報ゲームとそのコンピュータによるプレイのために使われる手法を模式的にまとめてある。

3. 不完全情報ゲームに適用される手法

不完全情報ゲームに適用される手法には、完全情報ゲームにおけるゲーム木探索のような決定的なものなく、さまざまな手法が試されている。本節では代表的な手法を取り上げ説明する。

3.1 ゲーム理論の適用

ゲーム理論によると二人ゼロ和ゲームには均衡点が存在しゲームの値が一意に定まる。ゲームの解である最適混合戦略²は、二人の戦略を縦横に配置した利得行列（ゲームの標準型）を線形計画問題として解くことにより求まる。しかしこれはじゃんけんなど極めて単純なゲームでしか現実的でなく、実際にプレイされるゲームの多くでは不可能に近い。ただ、色々な工夫により単純化したゲームで最適戦略または近似最適戦略が求められている。

極めて単純化されたゲームでは古くから最適戦略が求められ報告されていたが、より複雑なゲームの解析は困難であった[19]。Kollerらは二人ゼロ和不完全情報ゲームを標準型より計算量の少ないシークエンス型に変換して解いて最適混合戦略を見つける新しいアルゴリズムを開発した[18]。これはゲームを標準型にしたときの行列サイズの指数関数的爆発を抑えるもので、彼らのGalaシステムに実装してポーカーのサブセット変種を解いた。得られた解はブラフやスロープレイが程よく混合されており、ゲームの心理学的側面が表現されていることは注目に値する。

このようにゲーム理論はある程度の成功を収めたが、大きな問題点が残る。第一の問題点は計算量が爆発する問題である。従来法より飛躍的に計算量を抑えたGalaシステムにおいても、変換される線形計画問題の大きさはゲーム木の大きさの多項式オーダーであるため、現在多くプレイされているポーカー変種をそのまま扱うのは不可能である。対処法として、Shiらは多くの類似の部分問題を一つのクラスにまとめることによりゲームを抽象化して近似最適解を求める手法を

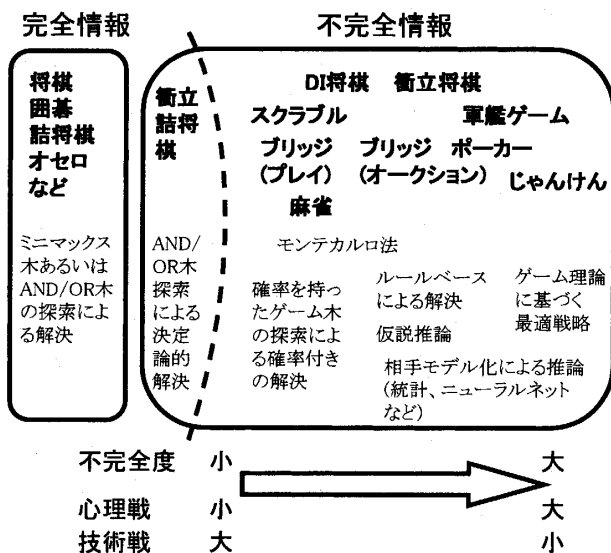


図1 代表的な不完全情報ゲームとその解決手法

¹ ゲームの結果を点数で表したとき全プレーヤの点数の総和が必ずゼロ（あるいは一定値）になるものをゼロ和（一定和）ゲームと言い、勝ち負けのつく多くのゲームが該当する。これに対して、総和が結果に応じて変わり得るものを一般和ゲームと言う。

² 両プレーヤが最善を尽くしたときの戦略で、複数の純戦略を一定の割合でランダム混合したもの。混合の割合が線形計画で求まる。

開発し、スケールダウンした数種の Texas Hold'em (ポーカーの一種) に適用して近似解を得た[35]。その後 Billings らは、フルスケールの二人プレイヤーの Texas Hold'em を抽象化しサイズを $O(10^{18})$ から $O(10^9)$ に落とし近似最適解を求めることに成功した。これにより彼らのプログラムは世界大会レベルになったという[3]。このような抽象化手法やゲーム木探索とゲーム理論的解析の複合手法は今後期待できると思われる。

第二の問題点は得られる最適解が必ずしも最強ではないという本質的な問題である。最適戦略は「相手が何をやってこようとも負けない」戦略であり、勝ちにくい戦略ではない。簡単のためじゃんけんを例にとると、最適戦略はグー・チョキ・パーを $1/3$ ずつの割合でランダムに混合するものであることは計算するまでもない。しかし世界じゃんけんプログラミングコンテストにおいて、最適戦略は中ほどの順位しかあげられなかった。上位プログラムは、優れた相手モデル化により、簡単なルールで着手を決定しているような弱いプログラムの着手を読んで打ち負けし点数を稼いだものであった。最適戦略は弱いプログラムに対しても強いプログラムに対しても互角程度の成績しかあげられなかった[4], [5]。このように実際に人間と同等以上のプログラムを作る上では、最適戦略は一つの材料にはなるものの、それ以外の要素が重要になってくる。

3.2 相手モデル化による推論

多くの不完全情報ゲームでは、相手モデル化によって相手プレイヤーのゲーム状態および行動を予測しその対策を立て行動することが極めて重要である。特に心理戦の要素の強いゲームほど重要性は増す。もっとも話はそう単純ではなく、相手モデル化をするプレイヤー同士が対戦する場合、『相手は《自分が A とすると考えて B としてくる》と考えると逆に C とする』だろうからそのまた逆の D とする』などという、いわば無限再帰の相手モデル化が起こる。行き着く先は最適戦略しかない。しかし、現状のゲームプログラミングでは高次の相手モデル化まで考えるレベルには至っていないと思われ、低次の相手モデル化が有効である。

最も簡単な相手モデル化は相手の数回の行動からパターンを見つけるもので、その発展形として行動履歴の統計的解析によるものがある。しかし、ゲーム状況をどのようなパラメータで表現するか、あるいはどの程度の期間の履歴データを集め解析すべきかなど難しい問題点が多い。

一般には相手モデル化は難しい機械学習の問題である。ノイズが多いこと、素早く学習して動的にモデルを変更する必要があることなどから、よく使われる学習アルゴリズムには適用限界がある。Billings らによるニューラルネットワークを使ったポーカーの相手行動のモデル化のチューニングはある程度の成功を収めている[6]。

3.3 論理プログラミングによる手法

行動指針が比較的規則化されているような問題領域では論理プログラミングによるアプローチも有効である。一般に、ボードゲームは終盤においても数え上げや探索によってしか解が得られないケースが多いが、カードゲームは論理的思考によって解決できるケースが多く論理プログラミングに適していると思われる。例えばブリッジのオークション部³において、人間パートナーと柔軟に協調できるように制約論理プログラミングによる仮説推論機構を使って相手の思考を読んでビッドさせる手法が開発されている[1], [2], [40]。今後、帰納論理プログラミングによって隠れている規則を見つけ出すような応用も可能ではないだろうか。

3.4 探索を主体とした手法

一般的に、より複雑・戦術的なゲームや情報の不完全性の少ないゲームの場合は、完全情報ゲームで決定的に使われている探索に似た手法が有効である。具体的には、ブリッジのプレイ部、スクラブル、麻雀などが該当する。

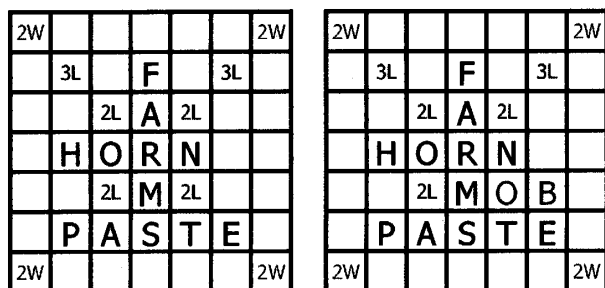
ブリッジのプレイ部は戦術的であり先読み探索によりかなり強いプログラムが作られている。ただし不完全情報なので、ノードを可能なハンドの集合として、ノード値をベクトルで表して完全情報のミニマックス探索に似た探索を行う vector minimaxing を始めとして種々の改良版が発表されている[12], [16]。また、モンテカルロ法を用いて繰り返し完全情報ゲームを解くことにより不完全情報ゲームの近似的な解を得ようとする手法によって強いプログラムが作られている[15]。この不完全情報ゲームを完全情報ゲームのシミュレーションによって近似する手法は問題点が多く指摘されている[12]が、ブリッジプレイ部が完全情報に似た探索ベースで近似的に解決できるため、parti-

³ ブリッジは2対2のチーム戦で、カードが配られた際に自分のチームが何の切り札で何トリック取れるか宣言し合い一番高い宣言を採用するオークション(あるいはビッド)を行う。その後のプレイ部で実際にカードを出し合って勝負する。

tion search⁴[14]などの探索効率化が大きく効いて性能が上がっていると考えられる。また、人間上級者がやるような自分側の手について相手側に間違っただイメージを持たせるような騙しプレイにも対応できるような探索法も発表されている[17]。

スクラブルはクロスワードを対戦型にしたようなゲームで、プレイヤーは盤上にあるアルファベットに数個のアルファベットピースをつなげて置いて新しい単語を作っていく。プレイヤーには新しく置いたマスのボーナス点と作った単語の点数が加算される。最後に最も点数の高いプレイヤーが勝ちとなる。最初アルファベットピースはすべて伏せられ各プレイヤーはその中から7枚を手を持って開始する。図2に例を示す。今左図の状態ではBとOのピースを持っているプレイヤーに手番が回ってきたとする。ここで右図のようにOとBを置くと、横向きにMOB、縦向きにNOTとBEができる。点数は (M 3点+O 1点×2+B 3点)+(N 1点+O 1点×2+T 1点)+(B 3点+E 1点)=8+4+4=16点となる。なお、左図で2Lと記されているマスはそのマスに置いたピースは点数が2倍されることを表す。同様に3Lはそのマスのピースの点数が3倍される。一方、2Wのマスのマスにピースを置くと単語全体の点数が2倍される。各プレイヤーは、場に残っているピースおよび他プレイヤーの手にあるピースの情報は分からない。スクラブルは情報の不完全性が小さく、単語データベースとモンテカルロ法による完全情報ゲーム木の浅い先読み探索によって強いプログラムが作られている[34]。

カードゲームの所で後述するが、麻雀においてもモンテカルロシミュレーションによって打ち方や牌読み



左: 手番局面 右: O,Bを置いた後

図2 スクラブルの例

⁴ 多くのカードゲームでは弱いカードは何を持っていようが大勢に影響ないことが多い。区別する必要がないそのような複数のゲーム状態をまとめて取り扱って探索を効率化する手法が partition search である。

の研究が行われ成果をあげている[38], [39]。

3.5 完全情報問題に変換して解く手法

不完全情報の占める割合が極めて限定された問題領域では情報集合を探索節点 metaposition として完全情報問題と考えると解ける場合がある。作田らは問題局面以外玉方の駒を見ない状態で玉を詰ませる「衝立詰将棋」問題を、完全情報問題として効率的な AND/OR 木探索アルゴリズムを使って解くことに成功した[31]。探索節点は複数の可能局面を含み、その局面数も一定でないため、探索において探索節点数をできるだけ少なくすることと各節点の可能局面数の爆発を抑えることという二要素のバランスを取ることが重要であった。この手法では確率によらない決定論的な解が得られるが、適用領域が極めて限定され、ほとんどの不完全情報問題では解なしになってしまうのが面白くないところである。

4. 研究の現状と今後の展開

主要なゲームを取り上げ現状と今後の展望を述べる。世界で多くの人が熱心にプレイしているゲームほど研究のインパクトは大きい。

4.1 カードゲーム

ブリッジは最も盛んに研究されてきた。Frankらおよび上原らの一連の研究は評価されている[40]。プレイ部はモンテカルロ法による完全情報ゲームの先読みシミュレーションを使う手法が主流である。オークション部はビディングシステムをルールベース(データベース)で持つ手法が多く、ルールベースにモンテカルロ法による先読みシミュレーションを組み合わせる手法も用いられている。1997年からコンピュータブリッジの世界大会が開催されており、最初の数年間は Throop による Bridge Baron や Ginsberg による GIB などが強かったが、最近ではオランダの Kuijff らによる Jack が優勝している(表1参照)。Jack とオランダの人間トッププレイヤー達との対戦も行われており、優秀な成績を収めているようである。プログラムの強さが世界チャンピオンクラスに達するのも近いと思われる。

表1 最近のコンピュータブリッジ世界選手権の結果

	2003年	2004年	2005年	2006年
1位	Jack	Jack	Jack	Jack
2位	Bridge Baron	Bridge Baron	WBridge5	Micro Bridge
3位	Micro Bridge	Micro Bridge		WBridge5
	WBridge5	WBridge5		Q-Plus

3.1節で触れたように、ポーカーは比較的簡単な不完全情報ゲームとして以前から研究されてきた。最近では Billings らによる研究が顕著である。彼らのプログラム *Poki* はゲーム理論的に求めた近似最適戦略を取り入れることにより世界大会レベルまで強くなったという [3]。しかし相手モデル化において柔軟に自分のスタイルを変え相手の変化に対応することなど課題は残っている。

マルチプレーヤゲームの Hearts および Spades の研究も始まっている。これらには Bridge と同様のモンテカルロ法による先読みシミュレーションが有効なようである。しかし多人数のため minimax 探索ではなく枝刈りの困難な \max^n 探索 [22] を適用せざるを得ず、その効率的探索法が研究されている [37]。他にブラックジャックのプレーヤデータを集計してスキルを見積もる研究 [41] もある。

麻雀も広義ではカードゲームに属する。麻雀には商用ソフトウェアが多くあるが、それらの詳細な中味などは発表されていないようである。面白い研究として、麻雀の試合を観戦し実況するシステムが発表されている [13]。エンタテインメント性のある、ゲームへの新たな取り組みとして注目される。最近、インターネット麻雀のデータの統計的解析とモンテカルロシミュレーションによる合理的打ち方の研究が「とつげき東北」氏によって発表されている [38], [39]。氏の研究により今まで通説とされてきた打ち筋が否定されるなど麻雀界に新風を吹き込み、残っている牌を当てるテストでコンピュータが人間を抑えてトップになるなど成果をあげているようである。状況に応じた打ち方の研究では純戦略に相当するものが対象になっているが、ほとんどのケースで明快な結果が出ている。麻雀の場合多くの状況で「ここではこの打ち方をすべきだ」という純戦略が有効で、相手モデル化や混合戦略を考慮する余地がないのかもしれない。しかし麻雀も不完全情報ゲームである以上、さらに研究を進めると相手モデル化が有効なケースも出てくるはずで、その際には近似最適混合戦略を求めることが必要になると思われる。

今後は Magic: The Gathering などトレーディングカードゲームなども研究対象として面白いのではないかと思う。

4.2 ボードゲーム

ここでは、ボード内に配置されている駒などの位置情報が隠されているゲームを不完全情報ボードゲーム

と記す。このようなゲームには位置確定（あるいは宝探し）問題が包含されている。

軍艦ゲーム（または潜水艦ゲーム）は最も基本的な不完全情報ボードゲームだが、最近研究が始められ、終盤は船の可能配置を数え上げ最も配置数の多いマス攻撃すれば効率的であることが確認された [32]。ゲームの一局面を図 3 に示す。

複雑なゲームでは相手の駒が見えない状態で審判を介して将棋を指す衝立将棋およびそのチェス版である Kriegspiel [24], [20], [21] があるが、これらの研究の多くは最終盤を対象としたものである [9], [11], [30], [31]。最近 Bolognesi らは情報集合を探索節点 metaposition とする探索手法 [29] と評価関数を組み合わせ、Kriegspiel の KR vs. K, KQ vs. K, KBB vs. K, KP vs. K などの相手が単独 King の終盤を適切にプレイできることを示している [7], [8]。ゲームを初期局面から最後までもっともらしくプレイできるプログラムの研究も始まっている。指し手評価によるコンピュータプレーヤの実装 [25], [26], [27] や相手玉の存在確率分布を用いた評価関数の研究 [36] が行われている。プログラムの強さはまだ人間上級者レベルには遠く、強化は今後の課題である。

衝立版ゲームのバリエーションとして、飯田らは DI (Dynamic-Information) 将棋および DI チェスを考案した。これらは衝立版ゲームと似ているが、自分の駒の利きのあるマスが見えるので駒が取れることが分かる [33]。図 4 に人間同士が対戦した DI 将棋の一局面 (16 手目先手番) を示す。図 5 はそこから進んだ 20 手目の局面だが、先手は 17 手目以降 5 五飛 (王手) - 5 二歩 - 1 五角 (王手) - 3 三桂と進んだことを分かっており、相手の玉形をほぼ把握できている。先手は 21 手目からは読み切りで、3 三同角成 - 同銀 - 同馬 - 4 二金 - 4 三桂 - 4 一玉 - 3 一飛と進めて詰ませた。DI 版ゲームは 2 節で触れた情報戦の要素を強く持ち興味深い。DI 将棋で得られる情報は衝立将棋の

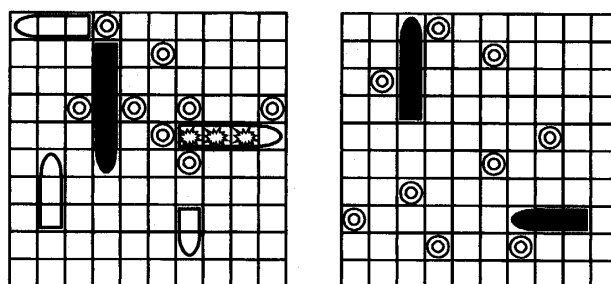


図 3 軍艦ゲームの一局面 (左: 自軍, 右: 相手軍)

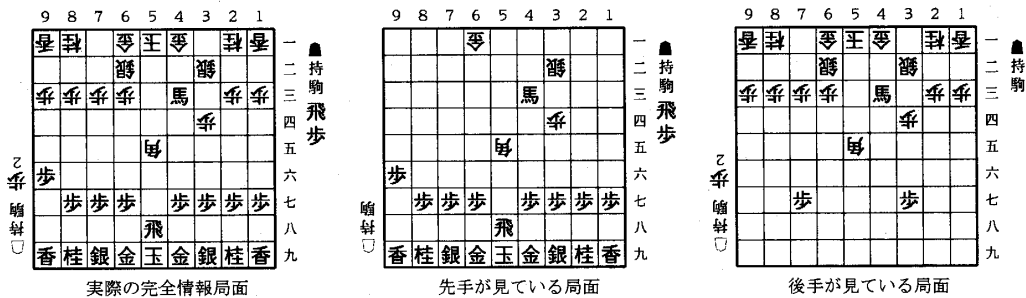


図4 DI将棋の例 (16手目の局面)

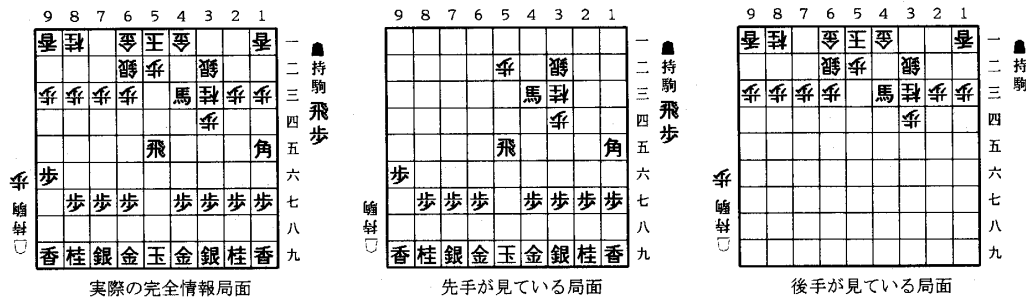


図5 DI将棋の例の続き (20手目)

情報のスーパーセットになっているため、上述の衝立将棋コンピュータプレーヤはDI将棋もプレイすることができる。しかし相手駒情報を総合し相手陣形を推測する機能を持つ強いプログラムの開発は今後の課題となっている。

人間プレーヤを集め増加させることを目的に、衝立将棋やDI将棋をインターネット上でプレイできるWebサイトの開発[28]も行われている。今後Webサイト上での活発な対戦が期待される。

4.3 その他のゲーム

じゃんけん (RoShamBo) は最もシンプルなゲームだが、1999年、2000年、2003年に世界じゃんけんプログラミングコンテストが開催され、プログラミングの対象として奥深いものであることを示している[4], [5], [10]。

スクラブルではSheppardによるプログラムMAVENが既に世界チャンピオンレベルにあるという[34]。ただ、情報の不完全性が小さいゲームで、手段としてはデータベースやモンテカルロ法によるゲーム木探索など完全情報ゲームと大きくは変わらないアプローチで強いプログラムができてしまうので研究の面白みは少ないのではないだろうか。

参考文献

[1] 安藤剛寿, 小林紀之, 上原貴夫: コンピュータブリッジのビッドにおける協調と競合, 電気情報通信学会論文誌,

Vol. J 83-D-I, No. 7, pp. 759-769 (2000).

[2] 安藤剛寿, 関谷好之, 上原貴夫: コンピュータブリッジのビッドにおけるパートナーシップ, 電気情報通信学会論文誌, Vol. J 81-D-II, No. 10, pp. 2366-2375 (1998).

[3] Billings, D., Burch, N., Davidson, A., Holte, R., Schaeffer, J., Schauenberg, T. and Szafron, D.: Approximating Game-Theoretic Optimal Strategies for Full-scale Poker, *Proceedings of the 2003 International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-03)*, pp. 661-668 (2003).

[4] Billings, D.: The First International RoShamBo Programming Competition, *ICGA Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 42-50 (2000).

[5] Billings, D.: Thoughts on RoShamBo, *ICGA Journal*, Vol. 23, No. 1, pp. 3-8 (2000).

[6] Billings, D., Davidson, A., Schaeffer, J. and Szafron, D.: The challenge of poker, *Artificial Intelligence*, Vol. 134, No. 1-2, pp. 201-240 (2002).

[7] Bolognesi, A. and Ciancarini, P.: Computer Programming of Kriegspiel Endings: the case of KR vs. K, *Advances in Computer Games 10* (van den Herik, H. J., Iida, H. and Heinz, E. (eds.)), Kluwer, pp. 325-342 (2003).

[8] Bolognesi, A. and Ciancarini, P.: Searching over Metapositions in Kriegspiel, *Computers and Games 2004* (van den Herik, H. J., Björnsson, Y. and Netanyahu, N. S. (eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3846, Springer, pp. 246-261 (2006).

- [9] Ciancarini, P., Libera, F. D. and Maran, F.: Decision Making under Uncertainty: A Rational Approach to Kriegspiel, *Advances in Computer Chess 8* (van den Herik, H. J. and Uiterwijk, J. W. H. M. (eds.)), Drukkerij Van Spijk B. V., Venlo, The Netherlands, pp. 277-298 (1997).
- [10] Donkers, J.: Open Championship Computer Roshambo 2003, [http://www.cs.unimaas.nl/~donkers/games/roshambo03/\(2003\)](http://www.cs.unimaas.nl/~donkers/games/roshambo03/(2003)).
- [11] Ferguson, T. S.: Mate with bishop and knight in Kriegspiel, *Theoretical Computer Science*, Vol. 96, pp. 389-403 (1992).
- [12] Frank, I. and Basin, D.: Search in games with incomplete information: A case study using bridge card play, *Artificial Intelligence*, Vol. 100, No. 1-2, pp. 87-123 (1998).
- [13] 藤澤瑞樹, 齋藤豪, 奥村学: 情報量の異なる複数の視点を考慮した実況解説の自動生成, *人工知能学会論文誌*, Vol. 19, No. 6, pp. 483-492 (2004).
- [14] Ginsberg, M. L.: Partition Search, *Proceedings of AAAI-96*, pp. 228-233 (1996).
- [15] Ginsberg, M. L.: GIB: Steps Toward an Expert-Level Bridge-Playing Program, *Proceedings of IJCAI-99*, pp. 584-589 (1999).
- [16] 小林紀之, 安藤剛寿, 上原貴夫: 不完全情報ゲームにおける推論とプレーのアルゴリズム, *情報処理学会研究報告 2000-GI-2*, pp. 55-62 (2000).
- [17] 小林紀之, 上原貴夫: コンピュータブリッジによるディセプティブプレイ, *情報処理学会論文誌*, Vol. 43, No. 10, pp. 3056-3063 (2002).
- [18] Koller, D. and Pfeffer, A.: Representations and Solutions for Game-Theoretic Problems, *Artificial Intelligence*, Vol. 94, No. 1, pp. 167-215 (1997).
- [19] Kuhn, H. W.: Simplified two-person poker, *Contributions to the Theory of Games I* (Kuhn, H. W. and Tucker, A. W. (eds.)), Princeton University Press, pp. 97-103 (1950).
- [20] Li, D. H.: *Kriegspiel-Chess Under Uncertainty*, Premier Publishing Company, Maryland (1994).
- [21] Li, D. H.: *Chess Detective: Kriegspiel Strategies, Endgames and Problems*, Premier Publishing Company, Maryland (1995).
- [22] Luckhardt, C. and Irani, K.: An algorithmic solution of N-person games, *Proceedings AAAI-86*, Philadelphia, PA, pp. 158-162 (1986).
- [23] Owen, G.: *Game Theory*, Academic Press, New York, third edition (1995).
- [24] Pritchard, D. B.: *The Encyclopedia of Chess Variants*, Games & Puzzles Publications, Godalming, UK (1994).
- [25] 作田誠: 衝立将棋システムの開発, *ゲーム学会第1回合同研究会研究報告*, pp. 47-50 (2003).
- [26] 作田誠: 不完全情報ゲームのクライアント・サーバ型ゲームシステムと人間用クライアントおよびコンピュータクライアントの開発, *第8回ゲーム・プログラミング・ワークショップ 2003*, pp. 98-101 (2003).
- [27] 作田誠: 衝立将棋コンピュータプレイヤにおける駒組み評価, *エンタテインメントコンピューティング 2004 論文集*, pp. 149-154 (2004).
- [28] 作田誠: 不完全情報将棋 Web サイトの開発, *ゲーム学会第3回合同研究会研究報告*, pp. 27-30 (2005).
- [29] Sakuta, M. and Iida, H.: Solving Kriegspiel-like Problems: Exploiting a Transposition Table, *ICGA Journal*, Vol. 23, No. 4, pp. 218-229 (2000).
- [30] Sakuta, M. and Iida, H.: Solving Kriegspiel-like Problems: Examining Efficient Search Methods, *Computers and Games: Second International Conference* (Marsland, T. and Frank, I. (eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2063, Springer-Verlag, pp. 55-73 (2001).
- [31] 作田誠, 飯田弘之: 不確定性を持つ問題を解くための AND/OR 木探索—衝立詰将棋を題材として, *情報処理学会論文誌*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-10 (2002).
- [32] Sakuta, M. and Iida, H.: Evaluation of Attacking and Placing Strategies in the Battleship Game without Considering Opponent Models, *Proceedings of 1st International Forum on Information and Computer Technology*, Shizuoka University, Hamamatsu, Japan, pp. 80-85 (2003).
- [33] Sakuta, M., Taketoshi, M., Kajihara, Y. and Iida, H.: Chess-like Games of Screen Type and Dynamic Information, *Workshop in Computer Olympiad 2002*, Universiteit Maastricht, The Netherlands (2002).
- [34] Sheppard, B.: World-championship-caliber Scrabble, *Artificial Intelligence*, Vol. 134, No. 1-2, pp. 241-275 (2002).
- [35] Shi, J. and Littman, M. L.: Abstraction Methods for Game Theoretic Poker, *Computers and Games: Second International Conference* (Marsland, T. and Frank, I. (eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2063, Springer-Verlag, pp. 333-345 (2001).
- [36] 柴原一友, 鈴木彰, 乾伸雄, 小谷善行: 衝立将棋における王の存在確率分布を用いた評価関数設計, *第9回ゲーム・プログラミングワークショップ 2004*, pp. 96-99

- (2004).
- [37] Sturtevant, N.: Current Challenges in Multi-player Game Search, *Computers and Games 2004* (van den Herik, H. J., Björnsson, Y. and Netanyahu, N. S. (eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3846, Springer, pp. 285-300 (2006).
- [38] とつげき東北: とつげき東北 HP, <http://www.interq.or.jp/snake/totugeki/> (-2006).
- [39] とつげき東北: 科学する麻雀, 講談社 (2004). 講談社現代新書 1765.
- [40] 上原貴夫: コンピュータブリッジ, 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 3, pp. 385-392 (2001).
- [41] Wolfe, D.: Distinguishing Gamblers from Investors at the Blackjack Table, *Computers and Games: Third International Conference, CG 2002, Edmonton, Canada, July 25-27, 2002, Revised Papers* (Schaeffer, J., Müller, M. and Björnsson, Y. (eds.)), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2883, Springer-Verlag, pp. 1-10 (2003).