

2.4 不完全情報ゲーム研究の現状

石巻専修大学理工学部情報電子工学科

作田 誠

sakuta@isenshu-u.ac.jp

■ 不完全情報ゲームとは

不完全情報ゲーム (imperfect-information game) とは、プレイヤーにプレイする上で重要な何らかの情報が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イヤー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イヤーの情報集合 (information set) というが、完全情報ゲームでは全プレイヤー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いい、要素 2 以上の情報集合を持つのが特徴である。

たとえばじゃんけんも、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) といい、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。

なお本稿では原稿の制限のため引用できなかった文献が多くあるが、大部分は文献 4) ~ 6) から迎れるのではないかと思うので興味を持たれた方は当たっていただきたい。

■ 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、たと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イヤーに関する不完全な情報あるいは他プレイヤー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イヤーごとに異なる。強いプレイヤーはできるだけ相手プレイヤー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、プレイヤーは他プレイヤーを欺こうとする。強いプログラムは相手プレイヤー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

他プレイヤーについて、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イヤーゲーム (本稿ではプレイヤーが 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、複数プレイ

★1 ゲームの結果を点数で表したとき全プレイヤー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) ゲームといい、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いう。

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で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・中級者プレイヤなど人間的な振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。なお、このほかにも多くのカードゲームや麻雀など複雑なゲームもある。麻雀には商用ソフトウェアが多くあるが、それらの詳細な中身などは発表されていないようである。

■ 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、2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きわ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、いろいろ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。

ある程度の成功

きわ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。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

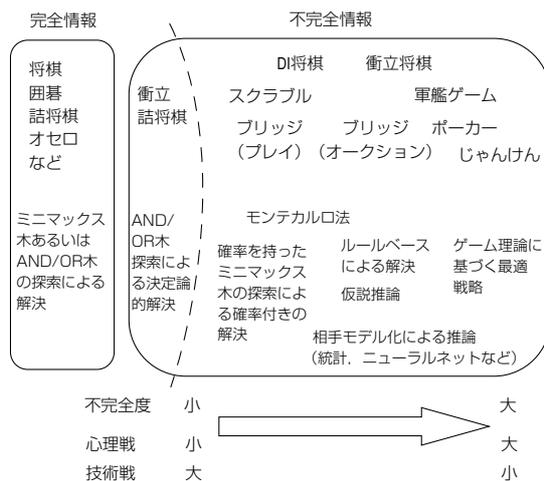


図-1 代表的な不完全情報ゲームとその解決手法

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³⁾。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値する。

問題点

上記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1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1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。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が、現実にプレイされているゲームについて満足のいく近似解を得るまでには程遠い。

第2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負けぬ」戦略であり、勝ちにいく戦略ではない。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

^{★2} 両プレイヤー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。

Game Informatics

2W					2W
	3L	F	3L		
		2L A 2L			
	H O R N				
		2L M 2L			
	P A S T E				
2W					2W

左：手番局面

2W					2W
	3L	F	3L		
		2L A 2L			
	H O R N				
		2L M O B 2L			
	P A S T E				
2W					2W

右：O, B を置いた後

図-2 スクラブルの例

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1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。

■ 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きわめて重要である。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おり、リアルタイムのニューラルネットワークシステムで実験しているという⁵⁾。

■ 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。たと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⁶⁾。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。

■ 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、スクラブルやブリッジのプレイ部が相当する。

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枚を手にとって開始する。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。

★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。

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。スクラブルは不完全な情報量が少なく、単語データベースと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⁵⁾。

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¹⁾。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²⁾。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¹⁾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、*partition search*^{★4}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。

■ 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きわめて限定された問題領域では情報集合を探索節点として完全情報問題と考えることができる。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⁴⁾。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 2 要素のバランスをと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、適用領域がきわめて限定され、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。

■ 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。

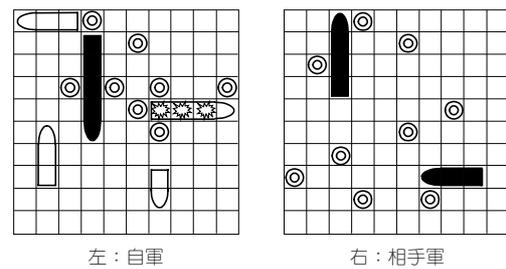


図-3 軍艦ゲームの一局面

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。

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⁶⁾。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。現在最も強いとされるプログラム Ginsberg による GIB は強いマスターレベルまで達しており、5 年以内には世界チャンピオンクラスのプログラムが現れるのではないかと予想される。

ゲーム理論の章で触れたように、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。しかし彼らが述べているように、彼らのプログラム *Poki* はかなり強くはなったのだがチャンピオンクラスの間人レベルには程遠く、柔軟に自分のスタイルを変えたり相手の変化に対応することなど残る課題は多い。

他にブラックジャックの研究もある。また、麻雀も広義ではカードゲームに属するが研究が多く発表されることを期待する。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。

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

★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。そのような区別する必要がない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。

Game Informatics

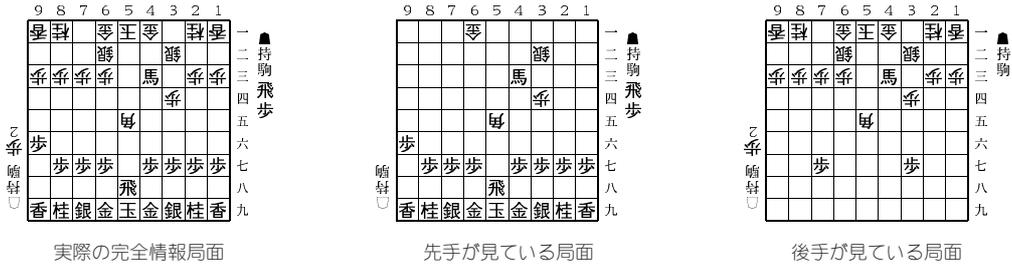


図-4 DI将棋の例 (16手目の局面)

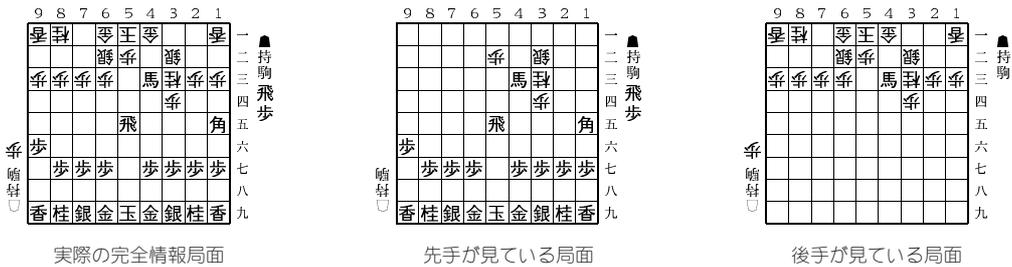


図-5 DI将棋の例の続き (20手目)

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を攻撃すれば効率的であることが確認された。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 があるが、これらの研究はいずれも最終盤を対象としたものしかない。また、最近飯田らは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。

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版ゲームは研究の意義の章で触れた情報戦の要素を強く持ち興味深い。これら衝立やDIゲームを初期局面から不完全情報のまま最後までもっともらしくプレイできる強いプログラムの開発は今後の課題である。

その他のゲーム

スクラブルではSheppardによるプログラム MAVEN がすでに世界チャンピオンレベルにあるという⁵⁾。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。

なお本稿ではゼロ和（一定和）ゲームの研究について触れてきたが、一般和ゲームに関する研究では、たとえば、繰り返し囚人のジレンマゲームを進化と学習のモデルを構築し振舞いを調べたものなどがある。

参考文献

- 1) 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).
- 2) Ginsberg, M. L.: GIB: Steps Toward an Expert-Level Bridge-Playing Program, Proceedings of IJCAI-99, pp.584-589 (1999).
- 3) Koller, D. and Pfeffer, A.: Representations and Solutions for Game-Theoretic Problems, Artificial Intelligence, Vol.94, No.1, pp.167-215 (1997).
- 4) 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 (Jan. 2002).
- 5) Schaeffer, J. and van den Herik, J. (eds.): CHIPS CHALLENGING CHAMPIONS, Elsevier Science (2002).
- 6) 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).

(平成15年5月15日受付)

