

「モノポリー」の思考アルゴリズムのための一検討

野中俊一郎

NTTデータ通信(株) マルチメディア技術センター
〒210-0913 神奈川県川崎市堀川町 66-2 興和川崎西口ビル 10F

あらまし

本研究は、米 Hasbro 社のボードゲーム「モノポリー」の最適な思考アルゴリズム実現を最終目的とする。このために必要な検討項目を確認し、それに基づきゲームの解析のために数学的モデル化を行い、各マスの停止率、各カラーグループの収益期待値、各権利書の売れるタイミング、などのパラメータをモデルを用いて定量化した。得られたパラメータを用いてコンピュータプレイヤーの定量的意思決定の手法を検討する。

A Study for "Monopoly" Game Playing Algorithm

Shun-ichiro NONAKA

Multimedia Technology Center, NTT Data Corporation
66-2 Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0913, Japan

Abstract

It is required that designing an optimal playing algorithm for the "Monopoly" game. We modeled the "Monopoly" game system as follows, landing frequencies, expected rents, and so on. Then, we studied the method for a numerical decision of AI player.

1. はじめに

人工知能を用いて思考ゲームの意思決定を行うアルゴリズムを設計する際に、局面から得られる情報をもとに形勢などを定量化した評価関数を求める手法がよく用いられる。この際、局面をできる限り正確に表現しうる評価関数を設計することが、適切な意思決定を行うために不可欠である。

評価関数を設計する際に、ゲームの勝利条件・目的から評価関数の構造自体も含めて学習を行うことにより構築する手法も研究されている[1]が、複雑な勝利条件・目的に対応するためには、エキスパートが構築した評価関数の構造を用いてその構造に含まれるパラメ

ータを学習させる手法が主流である[2]~[4]。

本稿では、「モノポリー」ゲームを題材とし、思考アルゴリズムについて検討することとした。モノポリーは複数人でダイスを使って各プレイヤーの資産を競う n 人零和完全情報ゲームで、展開に応じた資産の評価や交渉がキーポイントとなるゲームである。モノポリーは交渉という複雑な意思決定を含むため、検討結果はモノポリーの解法のみならず、さまざまな局面に対して有用であることが期待できる。

以下、2. でモノポリーの概要について述べる。3. でモノポリーの駒の移動および資産の流通に関するモデル化を行い、4. でまとめおよび今後の課題につい

て述べる。

2. 「モノポリー」ゲームの概要

モノポリーとは、米国 Hasbro 社のボードゲームで、これまでに 1 億セット以上が販売されている世界で最も普及しているボードゲームである。ボードの概要を図 1 に示す。2~8 人でゲームを行い（競技会などでは通常 5~6 人でゲームを行う）、技量のほかにダイスなど運の要素も含まれる n 人零和完全情報ゲームである。近年はパーソナルコンピュータや家庭用ゲーム機にも移植されており、これらにはコンピュータプレイヤーの思考アルゴリズムも搭載されている。以下、モノポリーのルール[5]の概要を記す。

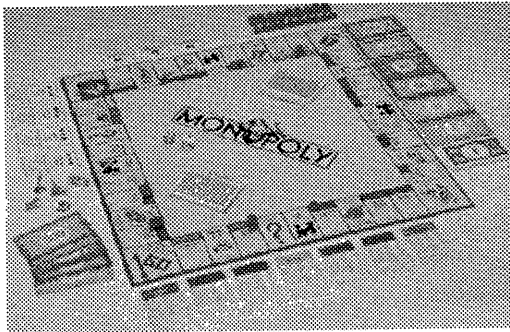


図 1 モノポリー盤

Fig.1 Board of Monopoly

- ゲームの目的は、資産を増やし他のプレイヤーを破産に追い込むこと。
- 各プレイヤーは自分の手番にダイスを二つ降り、目の合計だけ駒を進める。
- 駒は一周 40 マスのループを進み、一周回する毎に給料と呼ばれる収入がある。
- 40 マスのうち 28 マスが「土地」になっており、最初に止まったプレイヤーが土地の権利書を購入することができる。
- 他のプレイヤーの所有する土地に止まった場合は土地毎に定められたレンタル料を所有者に支払う。
- 大部分の土地は 2~3 の土地からなるカラーグループを構成しており、カラーグループ内の土地を一

人のプレイヤーが独占して所有するとそのカラーグループに対し追加投資（「家」の建築という形をとる）が可能になり、追加投資によりレンタル料が大幅に増加する。

- 基本的に「追加投資」を行わないとレンタル料が給料を上回らず、従って他のプレイヤーを破産に導くことができない。
- プレイヤー同士で交渉をすることにより、土地の権利書と現金を双方の決めた条件で交換することができる。
- 土地以外のマスには「刑務所へ戻る」マスやカードを引きその指示に従うマスなどがあり、カードには特定のマスへ移動するものなどもあるため、駒が止まる確率はマスによって異なる。

モノポリーは、以上のような特徴を持つゲームである。そのため各プレイヤーは勝利を満了するために、各自の資産に応じたカラーグループに投資をすることを念頭に他のプレイヤーと交渉を行い、局面を有利に展開させようと努めることになる。

3. モノポリーのモデル化

3.1 本研究の目標と位置づけ

モノポリーの「セオリー」については、多くの検討例がある[6]~[12]が、これらはエキスパートの経験に可能な範囲の定量的な解釈を加える方針をとっており、最適な思考アルゴリズムの実現に際し、十分な検討が行われているとはいえない。また、コンピュータによるモノポリー思考アルゴリズムの実装としては、パーソナルコンピュータ[13]や家庭用ゲーム機[14]をプラットフォームとする製品がある。後者は、エキスパートの経験を数表として思考アルゴリズムに実装してあるため、コンピュータプレイヤーのレベルが比較的高く、人間のエキスパートに勝つこともある。

本研究では、これらを踏まえ、

- ・ 形勢を数表でなく評価関数で表す
- ・ 思考アルゴリズムに戦略（投資・交渉）を持たせる

ことを最終目標に置く。

さて、2. で示したモノポリーの概要から、モノポリ

一の最適な思考アルゴリズムを検討するには、
(A) ゲームの状況に応じて変化する権利書の価値の推定

(B) 「家」の建設などの判断

(C) 交渉の判断

について、可能な限り定量的な検討を行う必要があることがわかる。

本稿では、主として(A)についての検討を行う。

権利書の価値の検討のためには、

(1) 各マスに駒が止まる確率

(2) 各カラーグループ毎の投資と収益期待値の関係

(3) 各権利書の売れる時期

(4) 各カラーグループの相互の状態と勝率の関係

の検討が必要となるが、本稿では以下(1)~(3)について述べる。

3.2 各マスの停止率

各マスに駒が止まる確率（以下「停止率」とする）については、いくつかの示唆[6]および検討例[7][8][10]があるが、いずれもボード一周あたりの停止率を求めている。しかし、思考アルゴリズムの検討のためには、ダイス一投あたり、または手番毎の停止率がより重要となる。以下、ダイス一投あたりの各マスの停止率を求める。

モノポリーの駒の移動には、

- ・ダイス2個を振り、目の合計だけ駒を進める。
- ・駒が止まったマスが「カード」のマスの場合はカードを1枚引き、指示に従う。
- ・ゾロ目の場合には手番が継続し、再度同じプレイヤーがダイスを振り駒を進める。
- ・ゾロ目が三度続く、「刑務所へ行く」のマスに止まる、「刑務所へ行く」のカードを引く、のいずれかに該当する場合は、駒を刑務所へ移動し、手番を終了する。
- ・駒が刑務所にあるプレイヤーは、ダイスを振る前に以下のいずれかを選択する。

A.\$50支払い、駒を「刑務所見学」に動かす。

B.支払いをしない代わりにゾロ目でなければ駒は移動しない。

- ・上記 B.を選択した場合、三回の手番にわたって続

けてゾロ目がでない場合は、\$50支払って三度目の目だけ駒を進める。

以上のルールから、各プレイヤーがダイスを振る時点で取りうる状態の数は、プレイヤーが刑務所で A.と B.をいずれを選択するかで異なり、その選択毎に停止率も求める必要がある。各プレイヤーがダイスを振る時点で取りうる状態の数 S は、A.の場合 117(Go to Jail を除く 39 のマス毎に「通常」「ゾロ目 1 回目」「ゾロ目 2 回目」の 3 状態がある)、B.の場合は 120 (A.に加えて「刑務所 1 回目」「刑務所 2 回目」「刑務所 3 回目」の状態が加わる)である。

プレイヤーが、時間 T において各状態 s ($1 \leq s \leq S$) である確率を $P_s(T)$ とし、ベクトル $P(T)$

$$P(T) = (P_1(T), P_2(T), \dots, P_S(T)) \quad (1)$$

但し、

$$\sum_{s=1}^S P_s(T) = 1 \quad (2)$$

を用いて、

$$P(T+1) = A P(T) \quad (3)$$

を満たす行列 A を作る事ができる。この時行列 A の m 行 n 列の要素は、状態 n から状態 m に遷移する確率となるので、プレイヤーの刑務所での選択を決定すれば、ルールから一意に定めることができる。ゲームスタート時の時間 $T=0$ とし、「Go」のマスの状態を状態 $s=1$ とおけば、

$$P(0) = (1, 0, \dots, 0) \quad (4)$$

となり、ダイス T 投目の各マスに止まっている確率ベクトル $P(t)$ を

$$P(T) = A^T P(0) \quad (5)$$

により求めることができる。

ここで、ダイスを十分多くの回数振った後の状態を考える。状態遷移を表す行列 A が複数の系に分割されないなどの条件を満たせば、 $T \rightarrow \infty$ のとき $P(T)$ は一定の値 P に収束する（証明は省くがモノポリーの場合も収束する）。

このとき、

$$(A - E)P = 0 \quad (6)$$

(但し E は単位行列) と

$$\sum_{s=1}^S P_s = 1 \quad (7)$$

を満たす P を求める問題となるが、(A-E) の一番上の行の成分をすべて 1 に置き換えた行列 B を用いて、

$$P = B^{-1} (1, 0, \dots, 0) \quad (8)$$

を解くことにより、P を求めることができる。また、ここで得られる P は「ダイス一投毎」の停止率であるが、正規化を施すことにより「手番毎」「一周回毎」などの停止率を求めることができる。

このようにして求めた、各マス毎の停止率を図 2 に示す。また、各カラーグループ毎の停止率を図 3 に示す。

図 2 から最も止まりやすい場所 (刑務所を除く) は「イリノイ通り」であること、図 3 から「刑務所」～「刑務所へ行け」の間に位置するオレンジ・レッドのカラーグループの停止率が高いこと、などがわかる。

また、これらの値は $T \rightarrow \infty$ の収束値であるが、ゲームの中盤を迎えるダイス 10 投目～20 投目の理論的平均

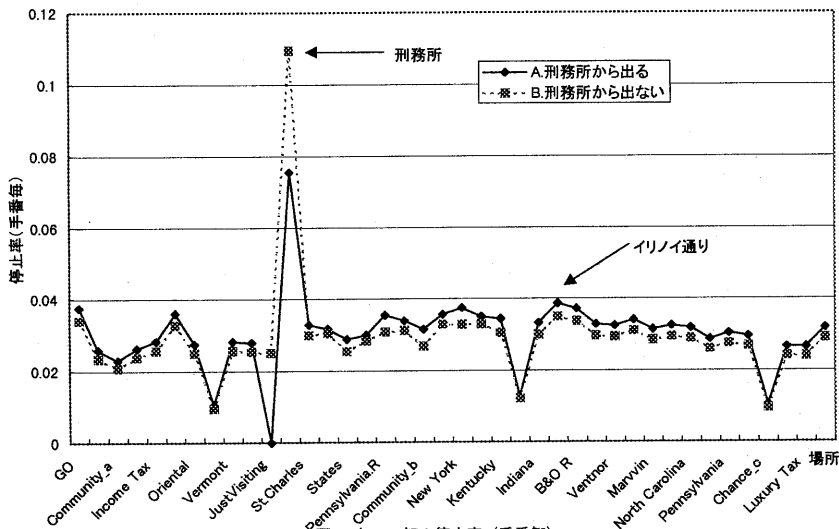


図2 各マス毎の停止率 (手番毎)
Fig.2 Landing Frequencies of Selected Monopoly Squares

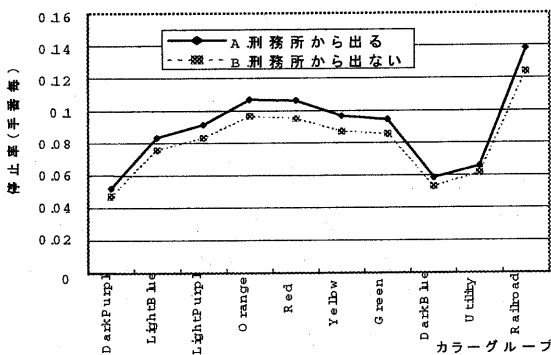


図3 カラーグループ毎の停止率 (手番毎)
Fig.3 Landing Frequencies of Selected Color-group

確率を求めたところ、収束値と比べて 3% 程度の誤差に収まることがわかり、実際のゲームの中でもほぼ理論的な収束値に収束していると考えてよいことがわかった。

3.3 各カラーグループの収益期待値

以上で求めた各カラーグループの停止率を用いて、各カラーグループの投資額と収益期待値の関係を求めることができる。「刑務所から出ない」場合の結果を図 4 に示す。

図 4 の結果から、給料などによる手番あたりの収入期待値約 \$37 に満たないカラーグループ (電力水道、

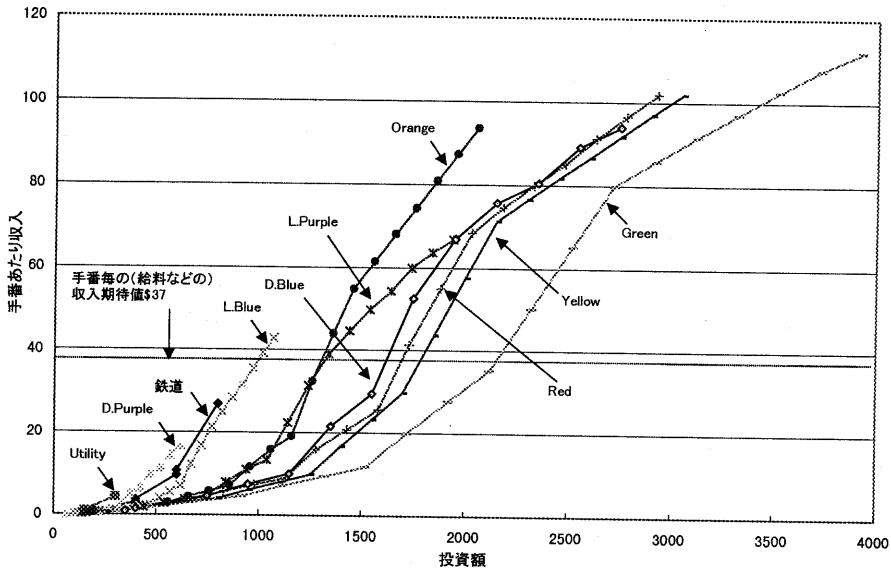


図4 カラーグループ毎の収益期待値
Fig.4 Expected Rents

ダークパープル、鉄道)では基本的には勝てないことがわかる。また、勝つために十分な収入を確保するには、他プレイヤーとの交渉によりカラーグループを揃え、\$1500~2000程度の投資を行う必要がある事がわかる。図4の投資額は定価により算出されているが、エキスパートプレイヤー間の交渉においては、この収入期待値に近い値になるような価格の調整が行われていると考えられる。

3.4 各権利書が場に出るタイミング

これまでの結果から、勝つためには他プレイヤーとの交渉によりカラーグループを揃え、ある程度の投資を行う必要があることがわかった。しかし、カラーグループを揃えるためには、カラーグループのすべての土地が売れている(=場に出ている)必要がある。そこで、各権利書が場に出るタイミングを調べる。

5人のコンピュータプレイヤーによるシミュレーションを100万ゲーム分繰り返して、各カラーグループ毎の売切Turnなどの平均値を求めた。ここで、Turnとはプレイヤーの手番を指し、1番スタートの最初の手番を第1Turn、5番スタートのプレイヤーの最初の手番を第5Turnとする。「平均売切Turn」は当該カラーグループの全ての権利書が売切れる平均Turn、

「Last1Turn」は、そのカラーグループの売残り権利書が1枚のときの売切れるまでの平均Turn数を指す。

「平均売切順位」は、電力水道とダークパープルを除く8つのカラーグループ(鉄道を含む)を対象に「何番目に売切れたか」を順位付けした平均値、「売残率」は当該カラーグループの「平均売切順位」がゲーム参加人数(ここでは5)を越える割合を指す。結果を表1に示す。

表1 カラーグループ別権利書の売れるTurn
Tbl.1 Sold turns of Monopoly Color-group

順位	ColorGroup	平均売切Turn	Last 1Turn	平均売切順位	売残率
*	Utility	42.8	28.4	4.75	30%
1	Orange	48.4	28.2	3.99	30%
2	LightBlue	49.7	34.9	3.98	31%
3	Red	51.3	28.2	4.26	33%
4	LightPurple	53.7	32.7	4.35	36%
5	DarkBlue	57.6	32.6	4.68	39%
6	Railroad	57.9	27.7	4.75	42%
7	Yellow	59.7	31.4	4.85	42%
*	DarkPurple	63.0	39.5	5.43	51%
8	Green	63.2	31.7	5.15	48%

各権利書が売れる Turn の分布は 3.2 で求めた各マスの停止率をパラメータとしたポワソン分布に近似できるので、各カラーグループの売切 Turn の標準偏差は、「Last1Turn」の値とほぼ等しくなる。これらの結果を用いて、まだ売切れていないカラーグループの価値を推定することができる。

また、場に出るカラーグループ数と Turn 数の関係を表 2 に示す。

表 2 場に出るカラーグループ数と Turn 数

Tbl.2 Number of Color-groups vs. Turns

2	3	4	5	6	7	8
28.4	36.6	44.9	54.1	65.5	81.6	112.4

表 2 から最初のカラーグループが売切れてから、6 色目まではほぼ 10Turn (自分の手番 2 回分) 毎にカラーグループが売れていくことがわかります。この結果から、5 人ゲームだと 5~6 色が売切れる 60Turn (自分の手番 12 回、ボードを約 2 周半) 前後には交渉が活発となる中盤を迎えることがわかる。

4. まとめ

モノポリーの最適な思考アルゴリズムを設計するために、各マスの停止率、各カラーグループの収益期待値、各カラーグループが場に出る時期、について解析を行い、それらの定量化を行った。

これらを用いた、各権利書の価値の定量化、「家」の建設などの判断、交渉の判断、についての検討を行い、思考アルゴリズムを実装評価することが今後の課題である。

謝辞 本研究において、有益な議論・資料などにより、第 8 代モノポリー世界チャンピオン百田郁夫氏ほか、たくさんのかたにご協力いただきました。深く感謝いたします。

参考文献

[1] 堀之内剛史, 河口信夫, 稲垣康善: 遺伝的プログラミングを用いたゲームの局面評価関数の学

習, 信学技報, AI96-45(1997).

- [2] A.L.Samuel: Some studies in machine learning using the game of checkers, IBM J. Res. Dev., Vol.3, pp.210-229 (1959).
- [3] K.Lee and S.Mahajan: The development of a world class Othello program, Artificial Intelligence, Vol.43, pp.21-36(1990).
- [4] G.Tesauro: Practical issues in temporal difference learning, Machine Learning, Vol.8, pp.257-277(1992).
- [5] 1997 年度モノポリー日本選手権大会公式ルールブック, ハズブローージャパン(1997)
- [6] Maxine Brady: The Monopoly Book, David McKay Company(1974).
- [7] Kaz Darzinskis: Winning Monopoly, Harper & Row(1987)
- [8] Philip Orbanes: The Monopoly Companion, Bob Adams(1988)
- [9] 亀和田俊明: 快楽モノポリー講座, TBSブリタニカ(1988)
- [10] アスキー・ボードゲーム・アソシエーション: モノポリーにもものすごく強くなる本, アスペクト(1990)
- [11] 百田郁夫: 世界チャンピオンが教えるモノポリー, ネスコ(1990)
- [12] ザ・モノポリーゲーム 2 完全ガイド, アスペクト(1995)
- [13] モノポリー CD-ROM, ハズブローージャパン(1996)
- [14] ザ・モノポリーゲーム 2, トミー(1994)

†) MONOPOLY™ ゲームボードの特徴あるデザイン, 4 つの角, そしてボードと駒の各構成は Hasbro Inc. の不動産ゲームとゲーム装備の商標です。