GPCC 報告 (2015 年)

Games and Puzzles Competitions on Computers

http://hp.vector.co.jp/authors/VA003988/gpcc/gpcc.htm

藤波順久*

1　2015 年の課題

2015 年の GPCC では、以下の課題を取り上げた。

ガイスター　二人で行うボードゲームである。6 × 6 の盤にそれぞれ 8 個の駒を以下のように配置する。

←▼▼▼▼→ 矢印は出口
∗▼▼▼▼∗
∗∗∗∗∗∗
∗∗∗∗∗∗
∗▲▲▲▲∗
←▲▲▲▲→

駒は赤 4 個、青 4 個で、相手の駒の色は色は見えない (駒を取ると見られる)。初期配置でどこに赤と青を置くかは自由に決められる。自分の番では駒を前後左右に 1 マスずつ動かす。相手の駒と同じマスに動かすと、取ることができる。以下のどれかを満たすと勝ちである。

- 自分の赤い駒を全て相手に取らせる
- 相手の青い駒を全て取る
- 敵陣の出口に青い駒を置いた状態で自分の番になる (脱出する)

対戦型 2048　元々は一人で行うゲームだが、ルールを変更して、攻撃側と守備側で戦うようにしたものである。4 × 4 の盤を使う。各マスは空か、2 の冪の数が置かれている。攻撃側は好きなマスに 2 を置く。守備側は上下左右のどれかの向きを選び、すべての数をその方向に動けるだけ動かす。

- もし同じ数がその方向に 2 個並んだ場合は、2 倍の数 1 個に置き換え、空いたマスはつめる。
- 3 個並んだ場合は、奥の 2 個を置き換える。
- 4 個並んでいる場合は、それぞれ 2 個ずつを置き換える。連鎖はしない。

盤が何も変わらない方向を選ぶことはできない。動かせなくなったら (16 マスすべて埋まり、縦横に同じ数字がないなら) 試合終了である。これを攻守を 1 回ずつ行い、点数の多い方が勝ちとする。

点数計算は、数を置き換えるたびに、生成された数を守備側の得点として加算するものとする。

*株式会社ソニー・コンピュータエンタテインメント、GPCC chair

2　2015 年の進展

ガイスターについては、千日手を防ぐため、先手後手を合わせて 254 手目に後手が指して上の条件を満たさなかった場合は、引き分けとすることが提案された。また、対戦プロトコルの提案があったが、プログラムを作成したとの報告はなかった。

対戦型 2048 は以下の進展があった。

- 9 月 4〜6 日開催の夏のプログラミング・シンポジウムのお題のひとつとして採用された。電気通信大学の寺田実さんによる、その概要を 3 節に示す。詳細は、2015 年夏のプログラミング・シンポジウム報告集の、「対戦型 2048」を参照してほしい。
- 高知工科大学大学院の岡和人さんらが、網羅的解析により、双方が協力してなるべく早く動かせなくなるまでの手数が 51 であることを示した。また、既存の評価関数を用いる MiniMax プレイヤ、UCT を使った単純なモンテカルロ木探索プレイヤ (MCTS)、局面の合流を考慮したモンテカルロ木探索プレイヤ (MCTS2) を作って各組み合わせで 80 回ずつ対戦させ、後ろのものほど高い得点が得られることを示した。詳細は高知工科大学紀要の「対戦型 2048 の網羅的解析とモンテカルロ木探索プレイヤ」(`http://hdl.handle.net/10173/1298`) を参照してほしい。
- 同じく岡和人さんが TD 学習プレイヤを作成し、第 57 回プログラミング・シンポジウムで発表予定である。その概要を 4 節に示す。詳細は予稿集の「『2048』プレイヤの評価関数:1 人プレイと対戦プレイでの評価」を参照してほしい。

2014 年の問題であるが、**マクマホンスクウェアの貼り付け**は、2015 年 1 月 6 日から 27 日にかけて、chair の藤波順久が計算した。問題とその結果を 5 節に示す。

3　対戦型 2048（寺田実さん）

3.1　対戦型のアイデア

3.1.1　守備側と攻撃側

オリジナルの 2048 では, 新規に生成されるタイルの位置と値 (2 または 4) はランダムに選ばれた. この新規タイルの位置を相手プレーヤが選択できるようにする, というのが対戦型のアイデアである. 対戦型 2048 においては, 従来のプレーヤ (タイルを移動する側) を守備側とし, 新規タイルの出現位置を指定する側を攻撃側とする.

盤面は空白の状態からスタートし, 攻撃側がタイルを置くことでゲームを開始する. これ以降ふたりのプレーヤが交互に手番をおこない, 守備側がゆきづまった (オリジナル 2048 と同様, タイルの移動ができなくなった) 時点で試合を終了する. 守備側はそこまでの得点を得る.

これを攻守交替して 2 回行い, 得た得点の多いプレーヤを勝ちとする.

3.1.2　新規タイルの値

攻撃側が新規タイルを置くときに, タイルの値をいくつとするかについて, ルール上の判断が必要である. オリジナルでは, 新規タイルの値は 90% の確率で 2, 10% で 4 がランダムに選ばれる.

	プログラム	スコア
第一試合	三廻部さん (2 限定)	2688
	三好さん (2 限定)	16760
第二試合	寺田 (2,4 任意)	1040
	八木原さん (2,4 任意)	1256
第三試合	三好さん (2 限定)	504
	山口さん (2,4 任意)	12640
決勝	八木原さん (2,4 任意)	1652
	山口さん (2,4 任意)	2776

表 1: 対戦結果

プログラムのあとの括弧内は, 攻撃側が置ける新規タイルの種類に関するものである (3.1.2 参照).

これについて, 当初の考えでは, プログラミングを容易にする観点から, 新規タイルは 2 に限定することにしていた.

しかし, この制限は守備側を著しく有利にし, 試合を長引かせる原因にもなりうる. そこで, シンポジウム会場では, 新規タイルとして 2 と 4 のいずれかを攻撃側が自由にえらべるルール拡張も実験的に実装してみた.

3.2　夏のシンポジウムでの対戦結果

作成したプレーヤプログラムの対戦を 2015 年 夏のシンポジウム会場で二日目の夜に行った. 対戦には 5 名が参加し, トーナメント方式で実施した. 前節で述べたとおり, 攻撃側が新規に置けるタイルの値について 2 のみに限定するルールと 2, 4 を任意に選択できるルールが併存している. 今回の対戦でも 5 名中 2 名が「2 限定ルール」, 3 名が「2, 4 任意ルール」でのプレーヤを作成した.

対戦結果を表 1 に示す. 山口さん作成のプログラムが優勝となった.

3.3　いただいたご意見など

シンポジウム会場でいただいたご意見には以下のようなものがあった.

- プログラム構成に関して
  - 標準入出力によるプレーヤプログラムとのインタフェースもあるとよい
- 初期盤面を空白で開始することについて
  - 最初の 2 枚のタイルはランダムに置くのはどうか
  - 最初の 2 枚のタイルを攻撃側が続けて置くのはどうか
- 4 のタイルを無制限に置けるのは攻撃側を有利にしすぎる
  - 置くことのできる 4 の枚数に上限を設ける
  - 2 を一定枚数置くと 4 のタイルが手に入る
  - 盤面上のタイルの最大値を守備側が更新したら 4 が一枚手に入る

4　TD 学習に基づくプレイヤの実装（岡和人さん）

（一人）「2048」では TD 学習を用いたプレイヤが有効であることが知られている（M. Szubert and W. Jaśkowski, “Temporal Difference Learning of N-Tuple Networks for the Game 2048,” *2014 IEEE Conference on Computational Intelligence and Games*, pp. 1–8, 2014.）。そこで、TD 学習によって得られる評価関数を用いる「対戦型 2048」のプレイヤを作成し、既存プレイヤと比較した。

本研究の TD 学習を用いるプレイヤでは、特徴点数 6 の部分評価関数を 10 個用い、盤面評価関数を構成する。あらかじめ（一人）「2048」における実験によって調査した分散の値をもとに、盤面をバランス良くカバーするように特徴点集合を選択した。用いた部分評価関数の特徴点集合を図 1 に示す。

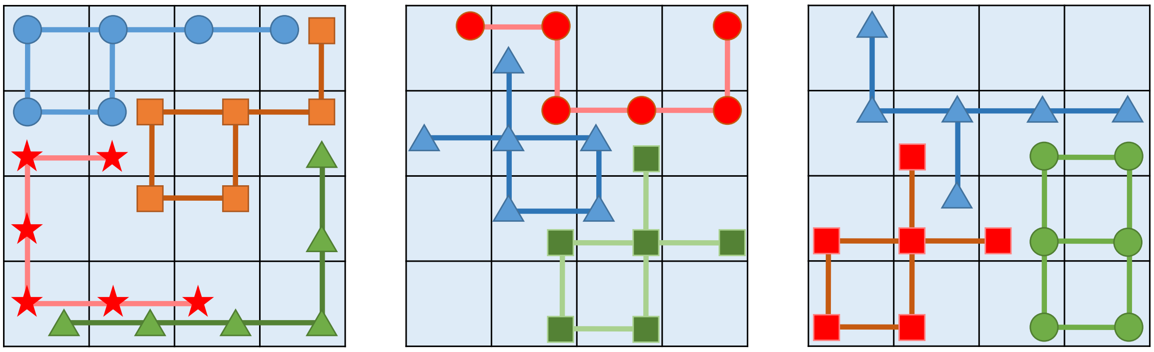

図 1: 用いた部分評価関数 10 個の特徴点集合

簡単に TD 学習を用いたプレイヤの強さを示す。ランダムに 2 を置くプレイヤと対戦し、5 万ゲームを学習したのち、プレイヤ MiniMax、プレイヤ MCTS と対戦することを 10 回行った。プレイヤ MiniMax は、評価値を MiniMax 法を用いて探索するプレイヤである。評価値は探索する深さまでで得られる得点とした。探索の深さは 1〜3 とした。プレイヤ MCTS はモンテカルロ木探索を用いるプレイヤである。1 手毎のプレイアウト回数を 1000 回、ノード展開の閾値は 10 回とし、UCT を用いてプレイアウトするノードを決定する。

実験の結果を図 2 に示す。プレイヤ TDL が他のプレイヤに大きな差をつけて勝った。詳細は、プログラミング・シンポジウムの予稿を参照していただきたい。

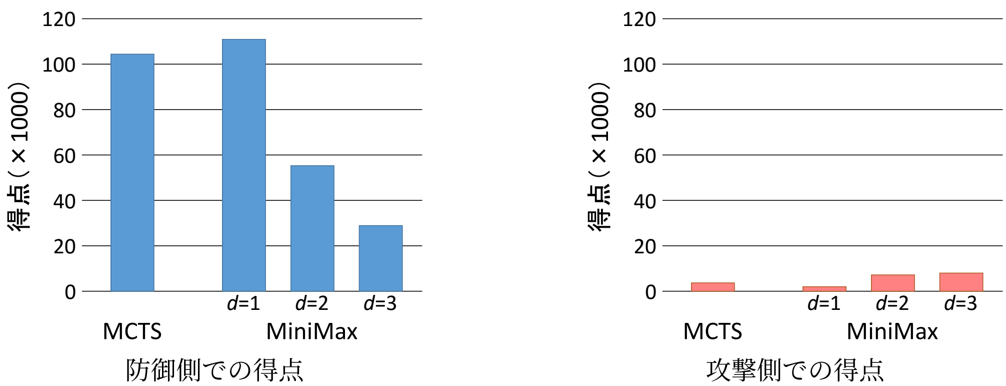

図 2: プレイヤ TDL の性能

5　マクマホンスクウェアの貼り付け

5.1　問題

2014 年の問題である「マクマホンスクウェアの貼り付け」は、マクマホンスクウェアを $2 \times 2 \times 2$ キューブの正方形に貼り付け、解が唯一になるようなパズルを作る問題である。

マクマホンスクウェア (MacMahon squares) は、MacMahon の 3 色四角形 superdomino とも呼ばれ、以下のようなもので、24 種類ある。

- 正方形の 4 辺を 3 色で塗り分ける (使わない色や何度も使う色があってよい)
- 回転して同じになるものは同じ塗り方とみなす

一方、$2 \times 2 \times 2$ キューブは、ルービックキューブの小型版で、面を回して行ける状態は約 367 万通りである。

この問題では、マクマホンスクウェア 24 種を、$2 \times 2 \times 2$ キューブの表面の 24 個の正方形に一つずつ貼って、隣の正方形 (直角に接する正方形を含む) と接する辺同士の色が一致するようにする。しかも、すべて一致するのは、約 367 万通りの状態のうち一通りしかないようにする (つまり、$2 \times 2 \times 2$ キューブの面を回すと、最初の状態以外では必ずどこかの接する辺同士の色が異なるようにする)。

このような貼り方はいくつあるかを求めるのが問題である。

5.2　計算方法

マクマホンスクウェアを $2 \times 2 \times 2$ キューブの正方形に、辺の色が合うように貼り付けるだけなら、単純な探索問題である。例えば図 3 のように $2 \times 2 \times 2$ キューブの 24 個の小正方形と 48 本の辺に番号をつけて、小正方形と辺の対応表を作り、小正方形にマクマホンスクウェアを色が合うように貼っていけばよい。

貼り方には以下の対称性がある。

- 全体の回転 (24 通り)
- 鏡像 (2 通り)
- 色の交換 (6 通り)

最大で 288 倍も無駄な探索をしてしまうおそれがあるため、以下のようにして無駄を省いている。

- 辺の色を 0,1,2 で表すとすると、4 辺とも 0 のものを 0 番の小正方形に固定することで、全体の回転の対称性を除く。
- 鏡像および色の交換の対称性を除くため、貼り方同士の順序を導入する。ここでは 48 本の辺の色に関する辞書式順序を用いた。そして、探索で見つかった貼り方について、鏡像変換または色の交換、あるいはその両方 (色を交換した場合は、新たに 4 辺とも 0 になったものが 0 番の小正方形の位置に来るように回転させる) を行ったものと比べて、この順序で最小になっている場合だけ、正規化された貼り方として扱い、解が唯一であることの確認対象とする。
- 探索の浅い段階で決まっている辺の色だけでも、正規化された貼り方になりえないことがわかった場合は、そこでバックトラックする。

```
                   +----0---+----1---+
                   |        |        |
                   7    0   8    1   2
                   |        |        |
                   +---11---+----9---+
                   |        |        |
                   6    3  10    2   3
                   |        |        |
 +----7---+----6---+----5---+----4---+----3---+----2---+----1---+----0---+
 |        |        |        |        |        |        |        |        |
12  11   19  10   18    9  17    8  16    7  15    6  14    5  13    4  12
 |        |        |        |        |        |        |        |        |
 +---27---+---26---+---25---+---24---+---23---+---22---+---21---+---20---+
 |        |        |        |        |        |        |        |        |
28  19   35  18   34  17   33  16   32  15   31  14   30  13   29  12   28
 |        |        |        |        |        |        |        |        |
 +---47---+---46---+---45---+---44---+---43---+---42---+---41---+---40---+
                   |        |        |
                  46  23   38  22   43
                   |        |        |
                   +---39---+---37---+
                   |        |        |
                  47  20   36  21   42
                   |        |        |
                   +---40---+---41---+
```

図 3: 2 × 2 × 2 キューブの展開図の小正方形と辺につけた番号

次は、解が唯一である、つまり面を回して行ける約 367 万通りの状態のうち、色が合う状態が一つだけであることの確認である。予備調査を行ったところ、4 分の 3 程度の割合で解が唯一であることがわかった。つまり、単純に約 367 万通りの状態を全部調べると非常に時間がかかる。

そこで、こちらも探索を使うことにした。2 × 2 × 2 キューブの 8 個の小立方体を、マクマホンスクウェアを貼った状態 (それぞれ 3 面にマクマホンスクウェアが貼られている) でいったんばらばらにし、隣の小立方体の辺と色が合うように順に置いていくのである。なお、回転に制約があるので、最後の 1 個の小立方体の向きは自動的に決まる。全部色が合う小立方体の置き方が一通りであるとわかったら、その貼り方を出力する。

5.3 結果

条件を満たす貼り方の数は 16015260609 通り (160 億 1526 万 0609 通り) であった。ただし、前小節で述べた対称性を除いている。

各貼り方は 2 × 2 × 2 キューブの 48 本の辺の色を 0,1,2 で表して、ファイルに記録した。何番目の貼り方かも含めて、貼り方一つ当たり 70 文字程度である。出力ファイルは合計約 1.2TB であった。

対称性を除く処理と似た処理で、自分自身と対称性がある貼り方かどうかを調べられる。元の計算と同時に調べたところ、2977 通り見つかった。いずれも、立方体の対角線を軸とする 3 回対称の位置にある辺の色を順繰りに交換するものであった。