

## 不確実性を含むカーリングにおける先読み手法の提案と有効性検証 A Look-ahead method for curling with the probabilistic aspects

加藤 修<sup>†</sup>  
Shu Kato

飯塚 博幸<sup>†</sup>  
Hiroyuki Iizuka

山本 雅人<sup>†</sup>  
Masahito Yamamoto

### 1. はじめに

カーリングは氷上のチェスと呼ばれる戦略性の高いスポーツである。試合では、ストーン配置、残り投球数、選手の力量、リンクのコンディションなど、さまざまな要因を考慮して次の投球の仕方、すなわち戦略を決定するが、戦略立案のスキルは主に選手自身の経験やコーチからの口伝により獲得されてきた。

近年、これまで経験的に決定していた戦略を、コンピュータシミュレーションによって支援するために、デジタルカーリングというカーリングシミュレータの開発が行われている[1][2]。ストーンを投球する初速度ベクトルと回転方向の入力に対し、コンピュータの物理シミュレーションにより投球後の状況を求めることが可能である。シミュレーションの精度が向上すれば、デジタルカーリングを用いた戦略支援が可能になると考えられる。

このような背景から我々はこれまでに、カーリングにボードゲームの探索手法を適用し、盤面のストーン配置や行われた投球数を局面、投球の初速度ベクトルと回転方向を候補手として不確実性を考慮したゲーム木を作成し、局面評価関数の評価値を最大にする戦略(手)を求める手法を提案した。そこでは、1手先の局面のみを評価して手を決定するカーリング AI「じりつくん」の開発を行った[3]。また、2015年3月に行われたデジタルカーリングの大会である第1回 UEC 杯では、6チーム中2位の結果であった。

一般的にボードゲームの探索手法では、探索の深さを増やすことでより適切な手を選択できることが知られている。一方、不確実性を含むゲームであるデジタルカーリングにおいて深く探索することの有効性は明らかでない。本研究では、探索の深さを増やすことで得点がどのように変化するか検証し、不確実性を含むカーリングにおける先読みの有効性を明らかにする。

### 2. カーリングのルール

カーリングは、2チームが交互にストーンを氷上で滑らせ、ハウスと呼ばれる円状領域の中心に近い場所を確保しあいながら得点を競うスポーツである。双方8個ずつのストーンを交互に投球し、計16個のストーンの投球後にハウスの中心に最も近いストーンを保有しているチームに得点の権利が与えられ、ハウス中央から相手チームのストーンまでの間にある自チームのストーンの数だけ得点が入る。この場合、相手チームは必ず0点となる。一般には得点計算の直前に投球するチームが有利であるため後攻側が有利となる。これを1エンドと呼び、通常の大会では10エンド終了後の総得点によって勝敗を競う。2エンド目以降は前エンドで得点したチームが先攻となるルールがあるため、状況によっては意図的に相手に1点を取らせて後攻権を得るといった戦略もありうる。投球

後は、ストーンが滑っている間にブラシを使いスウィーピング(氷面をこすこと)を行うことによりストーンの方向や速度の調整が可能で、この要素がカーリングをより一層奥深いものになっている。

### 3. デジタルカーリング

本論文では、電気通信大学の伊藤らのグループが開発した二人用のカーリングコンピュータゲームである「デジタルカーリング」を使用する。デジタルカーリングは、スポーツであるカーリングについて戦略のみを切り出し議論するための場を提供することを目的に開発された。プレイヤーは投球の初速度ベクトルおよび回転方向を決定する。デジタルカーリングは結果として生じる局面を計算し、プレイヤーに返すことでゲームが進行する。ただし現段階では、単純化のためスウィーピングについては考慮されておらず、また氷の摩擦係数は一定である。

デジタルカーリングは、物理シミュレータおよび乱数生成器から構成される。物理シミュレータは投球後のストーンの運動および衝突に関する物理演算を行い、次の局面を生成する。また、乱数生成器は、現実世界のカーリングにおける手ブレなどの不確実な要素を再現するため、プレイヤーが決定した手に加算される乱数を発生する。物理シミュレータは投球の初速度ベクトル、回転方向を入力とし、初速度ベクトルは実数値、回転方向は時計回り、反時計回りの2値、回転の強さは固定である。また、物理シミュレータは関数としてプレイヤーに提供されており、プレイヤーの手の決定において利用可能である。

プレイヤーが決定した初速度ベクトルへの乱数の加算は、 $x, y$  方向成分各々独立に行う。また、乱数は正規分布に従う。以降、この乱数を誤差乱数と呼ぶ。これにより、同一の手から異なる結果が生じる。誤差乱数の従う正規分布の標準偏差  $\sigma$  は、公式大会においては事前に公開されており、既知の情報として利用可能である。

### 4. ゲーム木探索

本研究では、カーリングにボードゲームの探索手法であるゲーム木探索を適用する。その際、プレイヤーがデジタルカーリングに与える初速度ベクトルと回転方向を候補手、盤面状態を局面とする。しかし、チェスや将棋などの一般的なボードゲームとは異なり、デジタルカーリングでは候補手の初速度ベクトルが実数値のため無限に存在する。また、候補手に加わる誤差乱数による結果の不確実性のため、候補手を1つに定めても投球の結果生成されうる局面は無限に存在し、単純にゲーム木を作成することはできない。提案手法は、候補手や生成されうる局面を有限個で代表させ、ミニマックス法によるゲーム木探索を近似的に行う。

<sup>†</sup>北海道大学

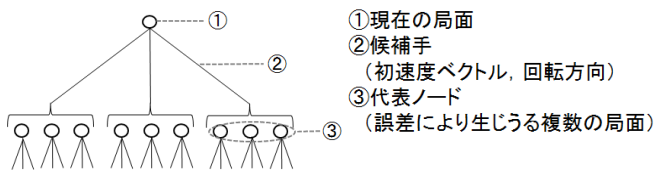


図 1 代表ノードを用いたゲーム木

表 1 歩との対戦結果

	深さ 1	深さ 2
エンド数	100	100
総得点	-133	-51
平均得点	-1.33	-0.51
スチール成功回数	12	39
スチールによる得点	14	56
スチールによる平均得点	1.17	1.44
スチール失敗回数	88	61
スチール失敗による失点	147	107
スチール失敗による平均失点	1.67	1.75

#### 4.1 候補手の生成

候補手はプレイヤーがデジタルカーリングに与える投球の初速度ベクトルと回転方向で定義される。初速度ベクトルは実数値で無限に存在するため、 $x$ ,  $y$  方向成分、共に間隔  $\sigma$  で離散化する。また回転方向は時計回り、反時計回りの両方で生成する。

#### 4.2 代表ノードを用いたゲーム木の生成

1 つの候補手から生成される局面が無限に存在するため、候補手をエッジ、局面をノードとしたゲーム木を作成することが不可能である。そこで図 1 のように、1 つの候補手から生成されるノードを有限個のノードで代表させる。代表ノードは、候補手の初速度ベクトルにいくつかの誤差を加えて物理シミュレーションを実行し生成された局面集合である。この際に初速度ベクトルの  $x$ ,  $y$  方向成分へ加える誤差は、各々独立に  $\sigma$  の整数倍とし、元の初速度ベクトルからの差分ベクトルの大きさが  $3\sigma$  以下となる範囲とする。回転方向は元の候補手と同一とする。ここで、各代表ノードの生起確率は誤差乱数の従う確率分布が既知であり近似的に求めることが可能であるため、候補手の評価値は各代表ノードの期待値により計算する。作成した代表ノードは次の深さでの親ノードとなる。また、各候補手の代表ノードの多くは互いに重複しているため、再利用することで計算時間を大幅に削減することが可能である。

#### 4.3 局面評価関数

各ストーンの得点への結びつきやすさ、はじき出されにくさなどは盤上の位置や、他のストーンとの位置関係により変化する。本研究では前者の得点に関わる評価指標を得点力  $S$ 、後者のはじき出されにくさに関する評価指標を頑健性  $R$  と定義し、各ストーンの  $S$  と  $R$  の積の総和を局面評価値  $e$  とする。また、 $S$  と  $R$  は複数の評価指標の線形結合で定義され、 $S$  はハウス中央からの順位の評価指標  $N$ 、盤上の位置の評価指標  $P$ 、 $R$  は周囲のストーンと

の位置関係の評価指標  $G$ 、最低限確保される頑健性の定数  $B$  からなる。式 (2) (3) の  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  は結合の重みである。

$$e = \sum S \times R \quad (1)$$

$$S = w_1 N + w_2 P \quad (2)$$

$$R = w_3 G + B \quad (3)$$

局面評価関数は葉ノードの評価に使用するが、後攻 8 投目投球後の局面のみ得点により評価する。

## 5. 実験

本実験では、ではじりつくんの探索の深さを増やすことによる得点の変化を実験から求め、不確実性を含むカーリングにおける先読みの有効性を明らかにする。

### 5.1 実験設定

1 手先の局面を評価して探索を行った場合と、2 手先の後攻投球後の局面を評価して探索を行った場合を比較する。比較は、第 1 回 UEC 杯で優勝したモンテカルロベースの AI「歩」との対戦により行う。エンド数は 100 回とする。

カーリングでは、必ず後攻の 8 投目の後に得点計算が行われるため、後攻投球後の局面の方が、先攻投球後の局面に比べ得点計算時の状況に近く、局面の評価が比較的容易であり、2 手先の局面評価による探索は先攻であるときにより効果的であると考えられる。このため、対戦は常にじりつくんを先攻とする。

### 5.2 実験結果・考察

結果を表 1 に示す。ここで、スチールとは本来不利である先攻側が点を得ることである。

カーリングは後攻有利のため総得点は負の値（失点）であるが、探索の深さを 2 にすることで総得点が増加した。ここから、カーリングにおける深さ 2 の探索による先読みの有効性が明らかとなった。一方で、スチールの成功回数は 3 倍以上と大きく増加したものの、スチールによる平均得点については 20% ほどしか増加していない。スチール失敗時についても、同様の傾向がみられる。この理由として、カーリングにおいてスチールで 2 点以上を得ることの難易度が非常に高いためであると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、探索の深さの異なるじりつくんと歩との対戦により、先攻時において不確実性を含むカーリングの先読みの有効性を明らかにした。

今後は、ゲーム木探索における枝刈りや、機械学習による評価関数のパラメータチューニングを目指す。

### 参考文献

- [1]北清勇磨, 岡田雷太, 伊藤毅志. デジタルカーリングサーバーの提案と紹介. 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-GI-31, No. 2, pp. 115 (2014).
- [2]デジタルカーリング Web サイト  
<http://minerva.cs.uec.ac.jp/curling/wiki.cgi>.
- [3]加藤 修, 飯塚 博幸, 山本 雅人, 戦略の不確実性を考慮したカーリング AI の開発, 人工知能学会研究会資料—知識ベースシステム研究会 (第 104 回), pp. 7-12 (2015)