

実環境データに近づける デジタルカーリングのシミュレータの改良

上原 嘉織^{1,a)} 伊藤 毅志^{1,b)}

概要: カーリングをコンピュータ上で再現し、カーリングの AI 開発や戦術支援に役立てるために、当研究室ではデジタルカーリングを提案してきた。デジタルカーリングは、その開発当時、石の挙動についての実環境データが不足していたため簡易な実装とされたが、この実装は実際のカーリングを再現できていない部分も多かった。今後、デジタルカーリングを実際のカーリングの戦略支援などの研究に応用していくためには、これを改良し、実環境データに近づけることが不可欠である。そこで、本研究では、近年発表された石の挙動に関する実環境データを参考に、スクラッチガイドモデルに基づくシミュレータと独自のシミュレータを実装し、実環境データと比較を行った。その結果、独自のシミュレータの方が実環境データに近いことを示した。加えて、このシミュレータを用いた新しいデジタルカーリングの提案も行う。

キーワード: デジタルカーリング, 実測データ, スクラッチガイドモデル, シミュレータ

Improving the Simulator of Digital Curling to Get Closer to Actual Measurement Data

KAORU UEHARA^{1,a)} TAKESHI ITO^{1,b)}

Abstract: We have proposed "Digital Curling" to simulate the behavior of curling stones on PC and to use it for AI development and strategic support in curling. At the time of its first development, digital curling was a simple implementation due to the lack of actual measurement data on stone behavior, so it was not able to reproduce actual curling in many areas. In order to apply digital curling to research on strategic support for actual curling, it is essential to improve it and make it closer to the actual measurement data. In this study, we implemented the simulator based on a scratch-guide model and an original simulator, and compared them with actual measurement data, using recently published actual measurement data on stone behavior as a reference. As the result, it was shown that the original simulator was closer to the actual measurement data. In addition, we propose a new "Digital Curling" using this simulator.

Keywords: digital curling, actual measurement data, scratch-guide model, simulator

1. はじめに

氷面上で2チームが交互に石を滑らせるカーリングは二人零和完全情報不確定ゲームに分類されるスポーツである。カーリングの試合に勝つためには石を狙った位置に投げる技術だけでなく、試合を見通した戦略性が必要とされ

る。そこで、カーリングの AI 開発や戦術議論を行うことを目的として、デジタルカーリング*¹ が当研究室で開発された [1], [2]。これはカーリングをコンピュータ上で再現するソフトウェアであり、これを用いたカーリング AI の強さを競う大会が開催されるなど、デジタルカーリングはカーリング AI の発展に大いに貢献した。

カーリングを再現するには石の挙動のダイナミクスを実

¹ 電気通信大学
The University of Electro-Communications

a) uehara@minerva.cs.uec.ac.jp

b) taito@mbc.nifty.com

*¹ デジタルカーリング:
<http://minerva.cs.uec.ac.jp/cgi-bin/curling/wiki.cgi>

装する必要があるが、カーリングにおける石の挙動のダイナミクスについては未だ定説が無い。また、デジタルカーリング開発当時は十分な実環境データも存在しなかった。そのため、デジタルカーリングの実装は石の挙動を簡易な式と仮定して行われた。その結果、デジタルカーリングにおける石の挙動は実際のカーリングと異なり、デジタルカーリング上で開発されたカーリング AI や議論された戦術を実際のカーリングに直接適用できないという問題が発生した。

そこで、本研究では、デジタルカーリングを実際のカーリングに近づけるため、現在までに行われたカーリング実験で得られた実環境データに可能な限り近い石の挙動を持つカーリングシミュレータを実装することを目的とする。

2. カーリングの物理と先行研究

2.1 カーリングとカール現象

カーリングにおいてプレイヤーに投げられた石は次第に進行方向を変え、投げた方向の延長上から逸れていく。この現象はカールと呼ばれる [3]。カールはカーリングにおいて欠かせない要素であり、例えば事前に盤面上に置かれた石の向こう側に回り込むようなショットを可能にするなど、カーリングというスポーツをテクニカルで面白いものになっている。

カールはカーリング専用の特殊な石とそれを滑らせる氷面の相互作用によって発生すると考えられる。ここでカーリングで使用される石と氷面について触れておく。

2.2 カーリングの石と氷面

カーリングで使用される石は花崗岩を削りだして作られた本体の上にプラスチック製のハンドルが取り付けられた構造になっている。石の下部は中央が窪んでおり、ランニングバンドと呼ばれる環状の部分のみが氷と接する (図 1)。ランニングバンド表面は意図的に粗く仕上げられており、これがカールに大きな影響を及ぼしていることが分かっている [4], [5], [6]。

石を滑らせる氷面にも職人によって特殊な加工が施されている。氷面の作成処理についての詳細は省くが、その処理の最終段階において専用の噴霧器によって氷面に水滴が噴霧され、この水滴が氷面上で凍ることによって凹凸が形成される。この凸の部分はペブルと呼ばれ、観測によって平均直径 4mm 程度の錐台形をしていることが分かっている [7]。ペブルには石と氷面の摩擦を減らす効果があり [8]、またペブルの有無によって石のカールも大きく変化することが分かっている [4]。

2.3 スクラッチガイドモデル

カールのメカニズムを解明すべく、現在までに多くのモデルが提唱されてきたが、カーリングにおける石の挙動を

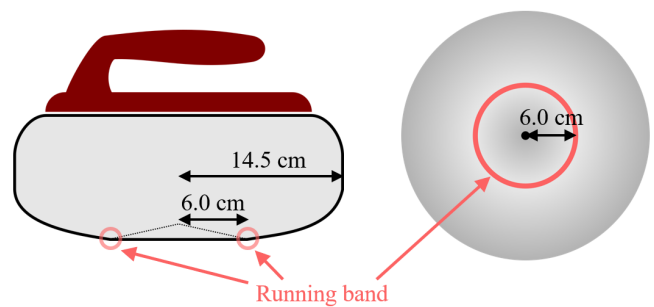


図 1 カーリングの石の模式図。(左) 石を横から見た模式図。(右) 石を下から見た模式図。赤色の部分はランニングバンド (幅: 0.6cm)。

Fig. 1 A curling stone. The left figure is the view of the stone from the side. The right figure is the view of the stone from the bottom. Running band is shown in red. Its width is 0.6cm.

十分な精度で予測できるモデルは未だ存在しない。この理由は、カールが他に類を見ない物理現象であること、ミクロな物理現象に由来すること、また観測対象となる氷面は刻一刻と変化するため観測が容易でないことが大きい。

比較的实验結果に即したモデルとして、スクラッチガイドモデル [6], [9] がある。スクラッチガイドモデルは石のカール距離^{*2} がランニングバンド表面の粗さと大きな関係を持つという実験的事実 [4], [5], [6] を説明する。

スクラッチガイドモデルは石の進行方向前方のランニングバンドが氷を削ることのできるスクラッチ (ひっかき傷) が石の進行方向後方のランニングバンドに引っ掛かることによって、石の進行方向に対し横向きの力が発生し、カールが発生するというモデルである (図 2 参照)。

Nyberg ら [6] によって提唱されたこのモデルは数式での説明を欠くものであったが、後に Honkanen ら [9] によって、石の進行方向後方のランニングバンドに発生する横向きの力は、進行方向前方のランニングバンドによって作られるスクラッチと進行方向後方のランニングバンドの進行方向のなす角を θ として

$$F_T \approx C\theta \quad (1)$$

とされた (図 3 参照)。ここで F_T は横方向の力、 C は定数であり、式は θ が小さいときの近似である。

本研究では 2 つのシミュレータを新たに実装したが、その一つはスクラッチガイドモデルに基づいて、足りない点を次節で説明する実環境データで補う形で実装した。

*2 氷面に平行な面を成すように x, y 軸を設け (x, y 軸は直交する)、 y 軸方向に石を投げた際の石の発射点から停止点までの x 軸方向の変位をカール距離とする。カール距離は 1 回のショット全体のカールの大きさを表す量で、実測の容易さから多くの論文で用いられている。なお、基本的に石の初速が大きくなる (石の滑动距離が長くなる) ほどカール距離は大きくなるため、すべてのショットのカール距離を一概に比較できない点に注意が必要である。

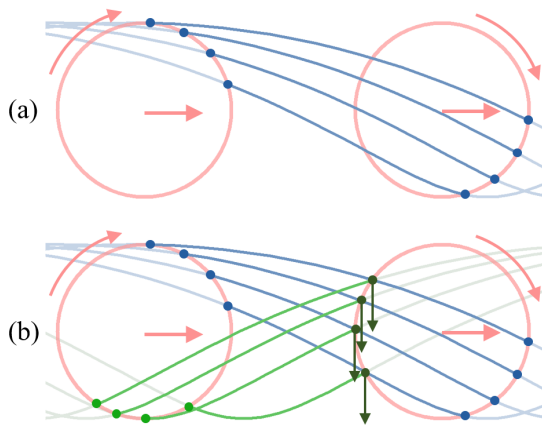


図 2 スクラッチガイドモデルの模式図。(a) 右方向に進む石の前方のランニングバンド（ピンク色の円）の4点で作るスクラッチ（青色の曲線）が (b) 緑色の軌跡に沿って進む石の後方のランニングバンドと交差した際に横向き力が発生する。

Fig. 2 Schematic diagram of scratch guide model. (a) The running band (pink circles) in front of a stone makes scratches on a ice sheet (blue curves). (b) When the running band behind the stone (its trajectories are green curves) crosses the scratches, lateral forces are caused.

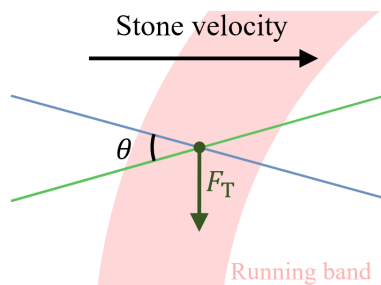


図 3 スクラッチガイドモデルにおける進行方向横向き力。ランニングバンド前方によって作られたスクラッチ（青色の線）と緑色の軌跡を通るランニングバンド後方が交差したときに横向き力 F_T が発生する。

Fig. 3 In scratch guide model, lateral force is caused where scratches made by the running band in front of a stone (blue line) cross the running band behind the stone (its trajectory is green line).

2.4 カーリングの実測研究

鹿野、亀田らは自動追尾型トータルステーションを用いて、3つの条件（ランニングバンドが粗い通常の石で氷面にペブルがある場合、ランニングバンドが滑らかな石で氷面にペブルがある場合、ランニングバンドが粗い通常の石で氷面にペブルが無い場合）で石を滑らせ、平均0.4s間隔で石の座標を測定した [4]。また測定された座標データから石の速度に対する動摩擦係数を算出した [8]。更に同氏らは石に取り付けた小型加速度計を用いて石の回転速度を計測した [10]。

本論文で実装したシミュレータは上記実験結果のうち一般的なカーリングにおける条件（ランニングバンドが粗い

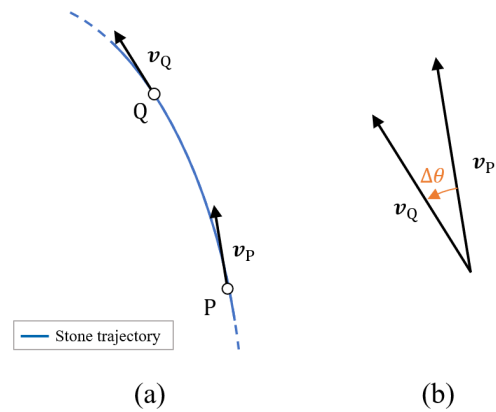


図 4 カーリング速度 (3 節参照)。

Fig. 4 Curl velocity (see section 3).

通常石で氷面にペブルがある場合) の実験結果に基づいている。

3. カーリングの大きさを表す物理量

石が発射されてから停止するまでのある時点における石の曲がりの大きさを表す量としてカーリング比 [11], [12] がある。カーリング比は測定の時間間隔によって変わるため、例えば 1000fps のシミュレータと 20fps の測定結果のカーリング比は直接比較できない。そこで、測定の時間間隔によって変わらない石の曲がりの大きさを示す量として、**カーリング速度**という物理量を新たに定義することにした。カーリング速度の定義を次に示す。

時刻 t_P における石の速度を v_P 、時刻 $t_Q = t_P + \Delta t$ における石の速度を v_Q とする (図 4 (a))。 v_P と v_Q の成す角を $\Delta\theta$ とする (図 4 (b))。カーリング速度 Ω を

$$\Omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

として定義する。カーリング速度はスカラー量であり、単位は $\text{rad/s} = 1/\text{s}$ である。カーリング速度の符号については、正のときは左方向へのカーリング、負の時は右方向へのカーリングとする。

カーリング速度は任意の曲線の曲がりを表す量である曲率への変換が容易に行える。ある時点の石のカーリング速度を Ω 、石の速さ (速度ベクトルの大きさ) を v とすると軌跡の曲率 χ (単位: $1/\text{m}$) は次の式で計算できる。

$$\chi = \frac{\Omega}{v} \quad (3)$$

カーリング速度は自動車のステアリング制御の分野におけるヨーレートと同様の意味を持つ量である。ヨーレートという言葉のヨー角の変化量というニュアンスはカーリングの場合石の回転と紛らわしいため、新たにカーリング速度と呼ぶことにした。

4. カーリングシミュレータの実装

本研究では、デジタルカーリングのシミュレータを改良

するため、2つの異なるシミュレータを実装した。一つ目はスクラッチガイドモデルの足りない点を実環境データで補う形で実装したシミュレータ (以下 *SG* と呼ぶ)、二つ目は実環境データに基づいて新たに考案したモデルを実装したシミュレータ (以下 *New* と呼ぶ) である。

実装した両シミュレータともに、フレームレートは1秒あたり1000フレームとし、石どうしの衝突は2D剛体物理演算ライブラリ Box2D*3を用いて完全弾性衝突として処理した。

シミュレーションは、フレーム毎に次に示す流れで処理を行っている。

- (1) すべての石に対し現在の速度と角速度を Box2D から取得する。
- (2) Box2D から取得した速度と角速度をもとに次のフレームにおける速度と角速度を更新する。
- (3) 更新された速度と角速度を Box2D に戻し石の移動と衝突を処理する。

以下では実装した2つのシミュレータ (*SG*, *New*) のそれぞれについて速度と角速度の更新処理の詳細を述べる。また、比較のために従来のデジタルカーリングにおけるシミュレータ (以下 *Legacy* と呼ぶ) における処理も説明する。なお、石の移動と衝突の処理については Box2D が処理しているため、本論文では述べない。

4.1 スクラッチガイドモデルに基づいた実装

この節ではシミュレータ *SG* についてフレーム毎にすべての石に対して行われる処理の詳細を述べる。この処理は速度と角速度で別々に行っているため、それぞれ説明を行う。

4.1.1 速度の更新

2.3節で説明した通り、スクラッチガイドモデルでは、石のランニングバンドの前方部分が氷面を削った際にできるスクラッチが石の後方部分のランニングバンドと接触したときに、石の進行方向に対し横向きの力が発生すると考える (図2, 図3)。従って、ランニングバンドによる氷面のスクラッチを再現する必要がある。これは、石のランニングバンドと氷面の両方を離散化することで実装した。

具体的には、まずランニングバンドに沿って円周上に等間隔に大きさの無い点を100個配置し (これらの点を以下ランニングバンド点と呼ぶ)、それらの点が縦横3mmの格子状に区切られた氷面を通過する際にその移動方向を記録する (格子1つに対し1つのスクラッチ方向を記録する)。モデルの条件から、氷面の格子に対してスクラッチ方向を記録するのは石の前方のランニングバンド点のみとした。そして、石の後方のランニングバンド点とスクラッチが記録された格子上を通過する際に式(1)に則って横方向の力

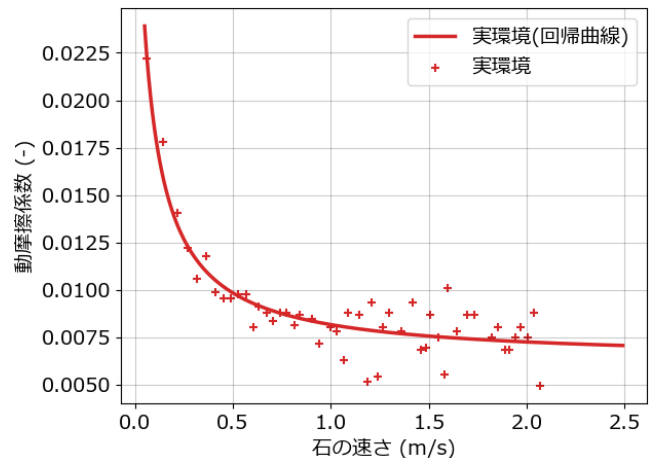


図5 石の速さに対する動摩擦係数。式(4)で示される回帰曲線も併記している ($R^2 = 0.85$)。実測データは [8] から引用した。

Fig. 5 Friction coefficient versus velocity of stones. Regression curve is indicated by eq. 4. The actual data is adapted from [8].

を計算する。モデルの条件から、横方向の力の計算は石の後方のランニングバンドに対してのみ行う。なお、式中の定数 C については最終的なシミュレーション結果が実際のカーリングにおける石の軌跡 [4] に近づくように手動で調整した。最終的に、石の後方のランニングバンド点に対する横方向の力を全て合算し、石に対する横方向の力とした。

これだけでは石の進行方向逆向きに発生する摩擦力の大きさが未定で、速度の更新ができなため、[8] に示された実環境データに基づいて動摩擦力を計算した。

具体的には、まず [8] で示された石の速さに対する動摩擦係数のデータの回帰曲線を求めた。求めた回帰曲線の式を次に示す。

$$\mu(v) = \frac{0.00200985}{v + 0.06385782} + 0.00626286 \quad (4)$$

ここで μ は石の動摩擦係数、 v は石の速さである。実環境データとその回帰曲線を図5に示す。そして、式(4)にシミュレーション中の石の速さを代入し動摩擦力 F_F を次の式で計算した。

$$F_F = \mu(v)g\Delta t \quad (5)$$

ここで $g = 9.80665\text{m/s}^2$ は重力加速度、 $\Delta t = 0.001\text{s}$ は1フレームの時間である。

式(1)で計算した横方向の力による加速度と式(5)で計算した動摩擦力による加速度を速度ベクトルに直接足し込むと、横方向に加えられた力が若干加速に働くため、シミュレーション結果から計算される摩擦係数と式の摩擦係数との間にずれが生じる。このずれを解消するため、横方向の力の大きさに応じて進行方向逆向きの力の大きさを逆算し調整している。

4.1.2 角速度の更新

角速度については実環境データが十分でないため、現状

*3 Box2D: <https://box2d.org/>

ではある程度実環境データに近づく程度で妥協している。

石の角速度は、石の速さから角加速度を求める式 (6) から算出した角加速度 α を毎フレーム適用し更新した。

$$\alpha = -\text{sgn}(\omega) \cdot \frac{0.025}{\max(v, 0.001)} \quad (6)$$

ここで v は石の速さである。また、式中の関数 sgn は次の式で表される関数である。

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x > 0) \\ 0 & (x = 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (7)$$

式 (6) はシミュレーション結果と [10] の実環境データの角速度を比較し、ある程度近い挙動をするものとした。なお、この処理だけでは角速度が 0 に近づいた際に安定しないため、角速度の符号が入れ替わる瞬間に角速度を 0 とする処理を行っている。

4.2 実環境データに基づいた新しい実装

スクラッチガイドモデルに基づくシミュレータは石の軌跡や石の総回転数に対するカール距離の観点で実環境データと違いが生じたため（これについては 5.1 節で述べる）、より実環境データに即したシミュレータを実現すべく新たにシミュレーションモデルを考案、実装した。これをシミュレータ *New* と呼ぶ。

シミュレータ *SG* 同様、シミュレータ *New* についても速度と角速度で別々の処理を行っている。なお、角速度については *SG* と同様の処理を行っている (4.1.2 節参照)。

4.2.1 速度の更新

シミュレータ *New* では式 (4), (5) で求めた摩擦力和 3 節で述べたカール速度が分かれば石の速度を更新できるという点に着目している。

式 (5) で求めた摩擦力を F_F 、現在の石の速さを v とすると、次のフレームにおける石の速さ v' は

$$v' = \max\left(0, v - \frac{F_F \Delta t}{m}\right) \quad (8)$$

として求められる。ここで $m = 19.96\text{kg}$ は石の質量、 $\Delta t = 0.001\text{s}$ は 1 フレームの時間である。更に、現在の石の速度を v 、カール速度を Ω とすると、カール速度の定義より次のフレームにおける石の速度 v' は

$$v' = v' \begin{bmatrix} \cos(\Omega \Delta t) & -\sin(\Omega \Delta t) \\ \sin(\Omega \Delta t) & \cos(\Omega \Delta t) \end{bmatrix} \frac{v}{v} \quad (9)$$

として計算できる。式 (9) のカール速度 Ω は最終的なシミュレーション結果を [4] で示された実際の石の軌跡データに合わせるために次の式で計算した。

$$\Omega = \text{sgn}(\omega) \cdot 0.0082 \cdot v^{-0.80} \quad (10)$$

ここで、 ω は石の角速度である。

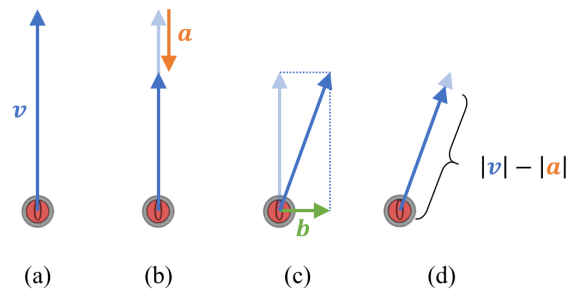


図 6 従来のデジタルカーリングにおけるシミュレータの実装 (4.3.1 節参照)

Fig. 6 Implementation of a simulator in the previous Digital Curling (see section 4.3.1).

4.2.2 角速度の更新

シミュレータ *New* における角速度の更新はシミュレータ *SG* (4.1.2 節) と同様の処理を行っている。

4.3 従来のデジタルカーリングにおける実装

ここで、比較のために従来のデジタルカーリングにおけるシミュレータの実装について触れる。なお、デジタルカーリングは北清ら [1] によって開発された後、森ら [2] によって修正されたが、石の挙動を司るシミュレータ部分は北清らの実装から本質的には変更されていない。

4.3.1 速度の更新

従来のデジタルカーリングでは、開発当時十分な実環境データが無かったためシミュレーションモデルは簡単なものと仮定された。具体的には、フレーム毎に以下の処理が行われる (図 6 参照)。

- (1) 現在の石の速度を v とする (図 6 (a)).
- (2) v に対し逆方向に一定の加速度 a を加える (図 6 (b)).
- (3) 更に v に対し横向きに一定の加速度 b を加える (図 6 (c)).
- (4) 得られた速度ベクトルの方向をそのままに、大きさを $|v| - |a|$ とし、次のフレームの石の速度とする (図 6 (d)).

4.3.2 角速度の更新

角速度については、石の速さが 0 より大きいときは維持、石の速さが 0 になったときに 0 にするという処理を行っている。

5. 実装したシミュレータの評価

実装したシミュレータを評価するため、シミュレーション結果を実際のカーリング場で採られた実験データ (実環境データ) と比較した。また、シミュレーションの実行速度の比較も行った。なお、比較のため従来のデジタルカーリングにおけるシミュレータ (*Legacy*) のシミュレーション結果も載せている。

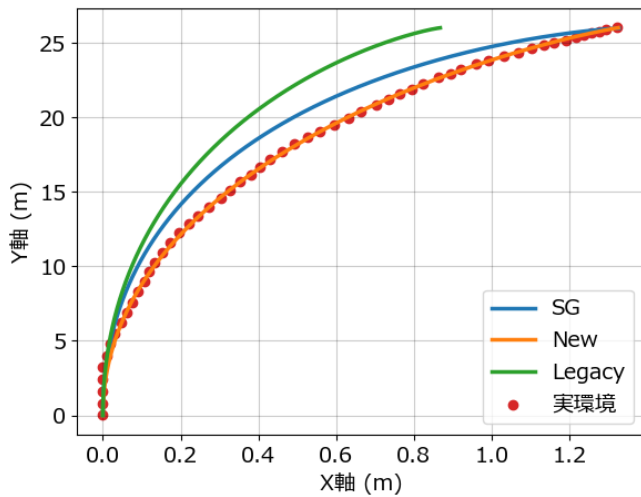


図 7 石の軌跡の比較. 実環境データは [4] から引用した.

Fig. 7 Comparison of trajectories of stones. The actual data is adapted from [4].

5.1 実環境データとの比較

5.1.1 軌跡の比較

石の軌跡の比較を図 7 に示す. 比較対象の実環境データは [4] から引用した. この実験の設定について次に示す.

- シミュレーション, 実環境データともに座標 (0, 0) から y 軸正方向に石を発射した際の軌跡である.
- シミュレータ *SG* と *New* の軌跡は初速 2.01m/s, 初期角速度 -1.57rad/s とした際のシミュレーション結果である.
- シミュレータ *Legacy* の軌跡は初速 25.01m/s, 初期角速度 -1.57rad/s とした際のシミュレーション結果である. *Legacy* では動摩擦係数が非常に大きく設定されており, 他シミュレータと同じ初速では到達距離が短くなってしまったため初速を大きく設定している. なお, この設定は石の停止点の y 座標が実環境データと一致するようにしたものである.

実験結果から, ショットの軌跡はシミュレータ *New* が最も実環境データに近いことが分かる. シミュレータ *SG* では石の停止点の実環境データとほぼ同じ位置になっているが, これはシミュレータ *SG* の実装において横方向の力を決める式 (1) の定数 C をこの実験設定において石の停止点の実環境データに近づくように設定したためである. *SG* は滑り始めの曲がり小さく, 停止直前の曲がりが大きくなりすぎることが分かった. また, *Legacy* では全体的に石の曲がり小さいことが分かった.

5.1.2 動摩擦係数の比較

石の動摩擦係数の比較を図 8 に示す. 図 8 から *Legacy* を除き, 図 5 を重ねたものを図 9 に示す.

シミュレータにおける動摩擦係数 μ は比較対象の実環境データ ([8] より引用) と同様に式 (11) で算出された石の速さから式 (12) を用いて計算された.

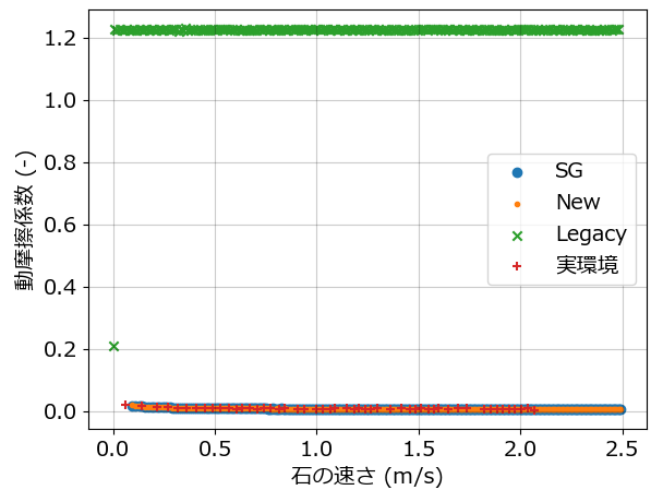


図 8 石の動摩擦係数の比較. 実環境データは [8] から引用した.

Fig. 8 Comparison of friction coefficient. The actual data is adapted from [8].

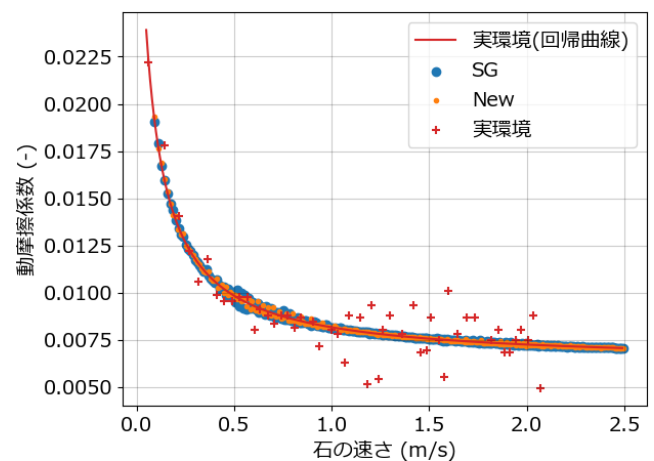


図 9 石の動摩擦係数の比較. 実環境データは [8] から引用した.

Fig. 9 Comparison of friction coefficient. The actual data is adapted from [8].

$$v_i = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\mu_i = -\frac{v_{i+1} - v_i}{g\Delta t} \quad (12)$$

実験結果から, シミュレータ *SG* および *New* における石の速度に対する動摩擦係数は実環境データの回帰曲線に従っていることが分かる.

シミュレータ *Legacy* では非常に大きい動摩擦係数が採用されていることが分かる. このため, 従来のデジタルカーリングでは実際のカーリングの約 10 倍の速度でショットを行っており, これが実際のカーリングと大きく異なる点の一つであった.

5.1.3 角速度の比較

石の角速度の時間遷移の比較を図 10 に示す. 比較に用いた実環境データは亀田ら [10] の実験結果を引用した.

亀田らは石の初速を 2.1m/s, 初期角速度を 1.57rad/s として測定を行った. シミュレーションにおいては, 亀田ら

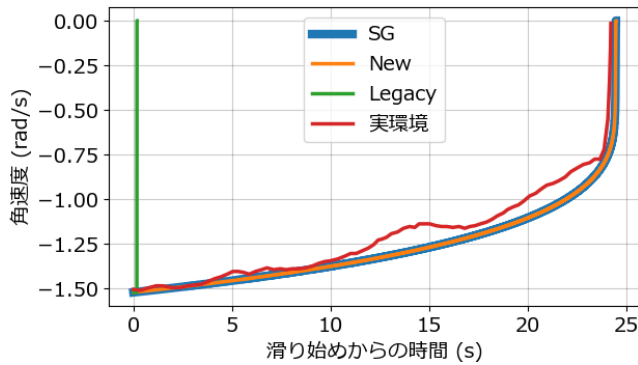


図 10 石の角速度の時間遷移の比較. 実環境データは [10] から引用した.

Fig. 10 Comparison of time transition of angular velocity of stones. The actual data is adapted from [10].

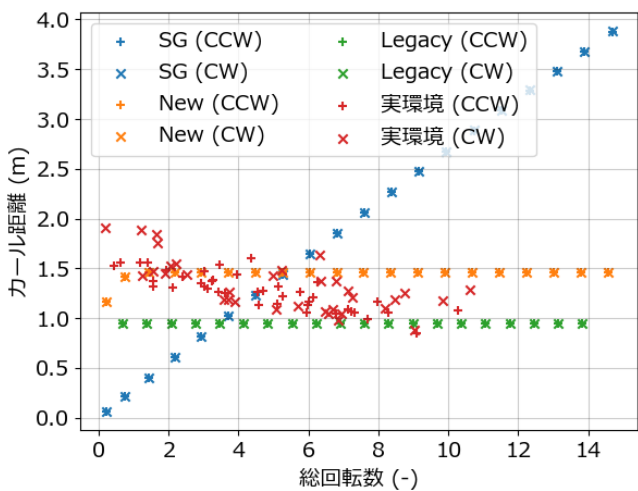


図 11 総回転数に対するカール距離の比較. 実環境データは [13] から引用した.

Fig. 11 Comparison of curl distance versus total number of rotations. The actual data is adapted from [13].

の論文の図を読み取ったところ初期角速度が -1.52rad/s であったため、この値を初期角速度とした。また、石の初速については石の発射から停止までの時間が亀田らのデータとほぼ等しくなるように 2.01m/s とした。

実験結果から、シミュレータ *SG* および *New* における石の角速度の時間遷移は *Legacy* と比較してある程度実環境データに近づいたと言える。

5.1.4 総回転数に対するカール距離の比較

石の総回転数（石を発射してから停止するまでの回転回数）に対するカール距離の比較を図 11 に示す。

比較に用いた実環境データは服部ら [13] の実験結果から引用した。服部らは石の停止位置までの距離が 28.3m となるように初速を調整し、様々な初期角速度で石を投げ、石の総回転数に対するカール距離を計測した。シミュレーションでは服部らの実験条件に倣い、石の発射位置から停止位置までの距離が $28.3 \pm 0.05\text{m}$ となるように初速を調整し、様々な初期角速度で石を投げカール距離を計測した。

表 1 シミュレータ毎の実行時間の比較.

Table 1 Comparison of execution time for each simulator.

| シミュレータ | 1 フレームあたりの実行時間 (μs) |
|---------------|----------------------------------|
| <i>SG</i> | 7.707 |
| <i>New</i> | 0.6602 |
| <i>Legacy</i> | 0.4942 |

実環境データでは総回転数とカール距離に若干の負の相関が見られるが、シミュレータ *SG* は明らかに正比例であり大きく異なる。また、シミュレータ *New* と *Legacy* では処理上角速度の符号しか見ないため、角速度とカール距離の相関はほとんど無い。なお、*New* で総回転数が小さいときにカール距離が小さくなっているのは石が滑っている間に角速度が 0 になるためである。

5.2 実行速度の比較

各シミュレータにおけるシミュレーションの実行速度を比較するため、各シミュレータで 5.1.1 節 (図 7) の実験設定と同様のショットを 100 回行った際の 1 フレームあたりの実行時間の平均値を表 1 に示す。

計算が単純な *Legacy* が最も速く、氷面のスクラッチの再現などで計算が複雑な *SG* が最も遅いという結果になった。

5.3 スクラッチガイドモデルの考察

5.1.1 節 (図 7) より、シミュレータ *SG* では実環境データと比較して石の曲がり具合が合わないことが分かった。また、5.1.4 節 (図 11) より、実際のカーリングでは石の総回転回数が増えるとカール距離が小さくなるのに対し、シミュレータ *SG* では石の総回転回数に比例してカール距離が増加することが分かった。これらの点から、[9] で示された石の横方向の加速度の大きさについての近似式 (式 (1)) は不十分であると考えられる。

5.4 デジタルカーリングの改良

5.1.1 節 (図 7) より、シミュレータ *New* における石の軌跡は実環境データを十分に再現していると言える。また、5.1.2 節 (図 9) より、石の動摩擦係数も実環境データの回帰曲線とほぼ一致している。5.2 節 (図 1) より、1 フレームあたりのシミュレーションの実行時間も従来のシミュレータの 1.34 倍程度である。以上の点から、デジタルカーリングの改良版にはシミュレータ *New* を使用することを予定している。なお、5.1.4 節 (図 11) で触れたように、石の総回転数の増加に対するカール距離の減少は再現できていないため、この点は今後改善していきたい。

従来のデジタルカーリングのシミュレータと比較して新たなシミュレータ (シミュレータ *New*) が実際のカーリングに近づいた点を次にまとめる。

- 石の速度：まだ実際のカーリングとの比較が十分で無

いが、石の動摩擦係数が実際のカーリングに近づいた。これによって、従来のシミュレータでは実際のカーリングの約 10 倍の初速で石を発射していたところ、新たなシミュレータでは実際のカーリングと同じ初速で石を発射できるようになった。

- 石の角速度：まだ実際のカーリングとの比較が十分で無いが、石の角速度の時間遷移は従来よりは実際のカーリングに近づいた。
- 石の軌跡：まだ実際のカーリングとの比較が十分で無いが、石の軌跡は従来のシミュレータより実際のカーリングに近づいた。

全体的に、実際のカーリングのデータと比較可能なレベルまでシミュレータを実環境データに近づけることができた。

6. まとめと課題

本研究では、デジタルカーリングのシミュレータを実際のカーリングに近づけるため、2つのシミュレータを実装した。1つ目のシミュレータは比較的实际のカーリングの実験データに即したモデルであるスクラッチガイドモデルをカーリングの実測実験で得られたデータで補うことで実装した。このシミュレータによるシミュレーション結果と実環境データを比較した結果、スクラッチガイドモデルの近似式では十分に実環境データを再現できないことが確認された。

2つ目のシミュレータは実環境データを解析した結果を用いて新たなシミュレーションモデルを立て、それを実装した。このシミュレータは現在得られているカーリングの実環境データにある程度近づけることができた。しかし、実環境の再現性という点で次に示すような多くの課題が残されている。

- 全体的に実環境データの量が十分でなく比較が十分で無い。
- 総回転数の増加に対するカール距離の減少が再現できていない。
- 実環境で未計測のパラメータがある（石どうしの反発係数および摩擦係数）。
- スウィープや石の通過によって発生する氷面の変化や、氷面の場所による石の滑りの変化を無視している。

これらの課題は、昨年 10 月にオープンした研究優先シートを備えるアルゴグラフィックス北見カーリングホール*4で行われる実験結果をもとに改善していく予定である。

7. 今後のデジタルカーリングの展開

新しいデジタルカーリングは新たな拡張を可能とすべく根本的なソースコードの設計から見直しを行っている。こ

こで、従来のものと比較して新しいデジタルカーリングで刷新される点を次に列挙する。

- 本研究の成果を利用して、実測データに近いストーンの挙動を再現したカーリングシミュレータを提案する。
 - ビルドツールとして CMake*5を用いることで様々なプラットフォーム（Windows, Mac, Linux）で動作可能とする。
 - 通信に TCP/IP を用いることで遠隔対戦を可能とする。
- 新しいデジタルカーリングは現在実装作業中であるが、作業が完了し次第公開し、これを用いたカーリング AI 大会も開催していく予定である。

参考文献

- [1] 北清勇磨, 伊藤毅志: カーリングの戦略を支援するシステムの提案と構築, The 18th Game Programming Workshop 2013 (2013).
- [2] 森健太郎, 伊藤毅志: 条件の変更にロバストなデジタルカーリングの改良, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.11, pp.2085-2092 (2019).
- [3] Braghin, F., Maldifassi, S., Melzi, S. and Sabbioni, E.(Eds.): The Engineering Approach to Winter Sports, Maeno N.: Chap.10 Curling, pp.327-347, Springer (2016).
- [4] 鹿野大貴, 亀田貴雄, 佐渡公明, 原田康浩: 氷上を進むストーンの曲がり幅に対するストーンのランニングバンドの表面粗さ, 氷面, 角速度の影響, 雪氷研究大会 (2019・山形) (2019).
- [5] 亀田貴雄, 鹿野大貴, 原田康浩, 柳敏, 佐渡公明: 氷上を滑るストーンの曲がり幅に対するランニングバンドの表面粗さとその面積の重要性, 雪氷研究大会 (2020・オンライン) (2020).
- [6] Nyberg, H., Alfredson, S., Hogmark, S. and Jacobson, S.: The asymmetrical friction mechanism that puts the curl in the curling stone, *Wear*, Vol.301, pp.583-589 (2013).
- [7] 柳敏, 鹿野大貴, 亀田貴雄, 原田康浩, 佐渡公明: カーリング・リンクの氷面のレプリカを用いたペブルの形状測定, 雪氷研究大会 (2019・山形) (2019).
- [8] 鹿野大貴, 亀田貴雄, 佐渡公明: 氷上を進むストーンの運動の解析, 雪氷研究大会 (2019・山形) (2019).
- [9] Honkanen, V., Ovaska, M., Alava, J.M., Laurson, L. and Tuononen, J.A.: A surface topography analysis of the curling stone curl mechanism, *Sci. Rep.*, Vol.8, No.8123 (2018).
- [10] 亀田貴雄, 鹿野大貴, 白川龍生: 氷上を進むストーンの加速度および角速度の特徴, 雪氷研究大会 (2019・山形) (2019).
- [11] 前野紀一: カーリング・ストーンの運動とカールのメカニズム, 日本機械学会シンポジウム; スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012 講演論文集, No.205, pp.199-204 (2012).
- [12] 前野紀一: カーリング・ストーンの運動とカールのメカニズム (2) (カール比・スウィーピング・ペブル密度), 日本機械学会 (No. 13-34) シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013 講演論文集, No.303 (2013).
- [13] 服部一裕, 徳本大, 柏崎耕志, 前野紀一: カーリング実験 201403: カール距離の精密計測, 雪氷研究大会 (2014・八戸) (2014).

*4 アルゴグラフィックス北見カーリングホール:
<https://www.kitami-curlinghall.info/>

*5 CMake: <https://cmake.org/>