

## 人間と対戦可能なカーリングロボットに関する研究

上村 良介<sup>\*2</sup>, 河村 隆<sup>\*1</sup>, 田中 翔太<sup>\*3</sup>, 谷川 雄太<sup>\*4</sup>,  
志村 亮祐<sup>\*2</sup>, 宮坂 諭<sup>\*2</sup>, 飯塚 浩二郎<sup>\*1</sup>, 鈴木 智<sup>\*1</sup>

### Study on the curling robot will match with human

Ryosuke KAMIMURA<sup>\*2</sup>, Takashi KAWAMURA<sup>\*1</sup>, Syota TANAKA<sup>\*3</sup>, Yuta TANIKAWA<sup>\*4</sup>,  
Ryosuke SHIMURA<sup>\*2</sup>, Satoshi MIYASAKA<sup>\*2</sup>, Kojiro IIZUKA<sup>\*1</sup> and Satoshi SUZUKI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Shinshu Univ. Dept. of Textile Science and Technology  
3-15-1, Tokita, Ueda, Nagano, 386-8567, JAPAN

In this study, I have studied aiming to curling robot can win a human. In this paper, we manufacture of curling stone delivery robot, to construct a motion model of Stone, the manufacture of the simulator using the motion model of Stone and we experiment with stone delivery integration of these further. Results, curling stone delivery robot can perform a delivery reproducible, When the simulator was within the limits of the delivery parameter used abundantly by actual game, reality and a near result were obtained in general. Further, it was possible to integrate the curling stone delivery robot simulator and to deliver a stone any point.

**Key Words** : Curling, Ice, Friction, Robot, Simulator

### 1. 緒 言

人間の行動のうちでも高度なスキルを要するものの1つに、スポーツが挙げられる。このスキルは日常生活で利用するものより高度なものと考えられる。本研究では氷上のスポーツであるカーリングについて扱う。カーリングは「氷上のチェス」と呼ばれ、複雑な戦略と高度な技術を要するスポーツである。数手先の投球やフィールドの氷の状況を読み、リスクを考慮して戦略を立て、繊細な技術を必要とする投球を行う。日本ではマイナーなウィンタースポーツであったカーリングだが、2006年のトリノオリンピックにおける女子カーリングチーム「チーム青森」の活躍により、日本国内で広く認知された。

しかしその一方で、カーリングが日本でさらに普及するには多くの課題がある。その1つは、カーリングができる環境は他のスポーツに比べ、非常に限られていることである。カーリング専用のホールは日本に11カ所しかなく、通年で使用できるのは僅か2カ所だけである。仮に、カーリングホールが増えたとしても、まだ問題はあある。それは、カーリングシート（氷）の製作・整備が非常に難しいことである。シートの製作・整備は著しく緻密な作業であるため、経験豊富なアイスメーカー（整備士）が必要不可欠となる。また、整備におけるシートの評価基準も確立されておらず、アイスメーカーの勘に頼る部分が多い。これら維持・管理の難しさがカーリングホールの普及を妨げている一因でもある。

本研究では、人間と対戦し勝利することのできるカーリングロボットの開発を目的とする。そのために正確で再現性のある投球ロボットを製作し、実際の運動に則したシミュレータを開発する。人間との対戦を想定し、投球ロボットとシミュレータを用いて、戦略に基づくストーンの投球を可能にすることで目的の達成に近づける。

<sup>\*1</sup> 正員, 信州大学 (〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1)

<sup>\*2</sup> 学生員, 信州大学 繊維学部

<sup>\*3</sup> 太陽誘電

<sup>\*4</sup> 北陸電力

E-mail: kawamura@shinshu-u.ac.jp

シート上を移動するストーンの運動を解析することにより、ストーンの初速度と移動量の関係などのシート評価基準を設けることで、シート整備の自動化・精密化・簡素化が可能になり、アイスメーカーの負担を軽減することに繋がる。さらに今後、監督に現在の盤面における最適な投球を教え、選手にそのための投球スピードや方向などを指示することも考えられ、さらなるカーリング競技の発展に繋がると考えられる。

## 2. カーリングについて

### 2.1 カーリング概要

カーリングは、1チーム4人でプレーし、各チームが交互に目標の円（ハウス）に向かってストーンを滑らせる。両チーム合計で16投行う。お互いに8回目の投球が終了したとき、円の中心のより近いところにストーンがあるチームが得点する。これを1エンドとし、通常1試合では10エンド行い、総得点で勝敗を競う。

### 2.2 カーリングシートの特徴

カーリングのシート（氷）にはスケートリンクとは異なる2つの特徴がある。1つ目は、氷温が通常のスケートリンクで一般的な $-6^{\circ}\text{C}$ 前後よりも高い $-3.3^{\circ}\text{C}$ 前後に設定されている事である。これにより適度にシート表面が融けやすくなり、ストーンが滑りやすくなる。2つ目は、シート上にペブルといわれる氷の粒が作られている事である。このペブルが競技に重要な影響を与える。ペブルの模式図を図1に示す。2時間半のプレー中にシートにできた霜やペブルの減り具合など、わずかな状況変化でストーンの滑りやすさや曲がり量も変化する。したがって、思い通りの目標地点へストーンを投球することは非常に困難なことであり、シートの状況を読む事が非常に重要となる。

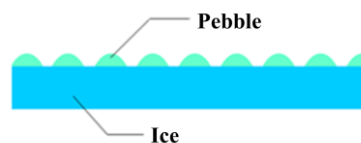


Fig. 1 Pebble schematic diagram

## 3. 投球ロボットの開発・評価

### 3.1 投球ロボットの開発

本研究で以前に開発した投球ロボットを改良し、従来よりも投球の精度や再現性を高めることで、人と対戦するという事に対してより実戦的な投球ロボットを製作した。投球ロボットの3D-CAD図を図2に示す。

本体の構成は大きく分けて、投球板、リニアガイド、フレーム、投球方向変化機構、押し出し機構、回転付加機構に分類される。投球板とフレームはアルミ製のものを使用した。カーリングホールでの本体固定は、ハックの取り付け穴を利用した。

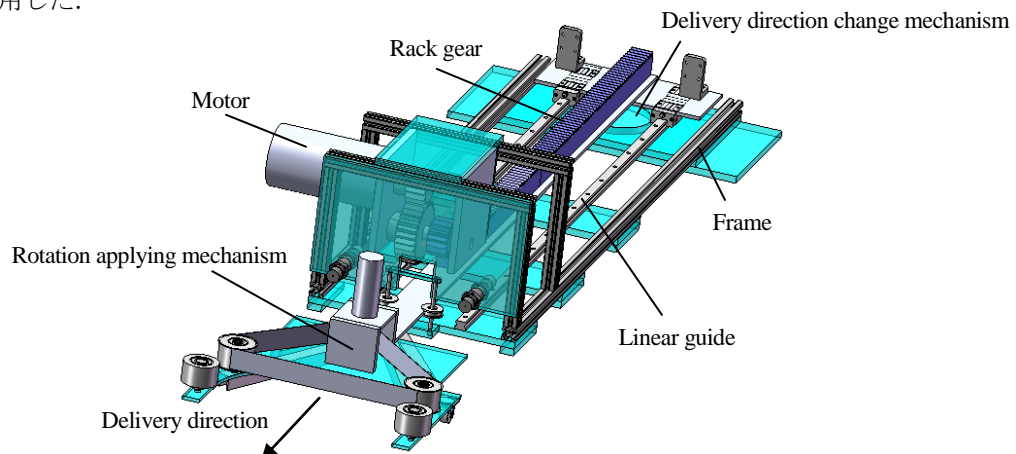


Fig. 2 3D-CAD diagram of the delivery robot

### 3・2 投球ロボットの評価 - 初速度のばらつき -

指令速度 2.35 m/s を投球ロボットに与えた時の、リリース時のモータ回転数とストーンの内速度を表 1 に示す。表 1 より、ほとんどの投球で指令初速度と同じ初速度を再現できていることがわかる。

Table 1 Stone initial velocity and motor speed at the time of stone release

Delivery	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Motor rotation [rpm]	1934	1935	1937	1936	1937	1939	1942	1939	1939	1935	1938	1936	1936
Initial velocity [m/s]	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.36	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.36

### 3・3 投球ロボットの評価 - 初角速度のばらつき -

回転付加用のモータに 8.4 V の電圧を印加した時の、リリース時のストーンの角速度の計測結果を表 2 に示す。表 2 より、最大 8 deg/s のずれがあるものの、ほぼ一定の初角速度で投球ができていることがわかる。

Table 2 Measurement result of the angular velocity of the stone at the time of stone release

Delivery	1	2	3	4	5
Initial angular velocity [deg/s]	54.6	55.4	57.4	51.2	59.6

## 4. シミュレータの開発・評価

### 4・1 ストーン運動モデルの構築

ストーンをモデルを図 3 に示す。ストーンと氷の接触面は図 3 の黒色部分である。本研究では、質量が接触面に分布していると仮定する。全体の質量  $m$ 、接地面積  $S$ 、外半径  $r_1$ 、内半径  $r_2$ 、摩擦係数  $\mu$ 、微小角度  $d\theta$ 、微小半径  $dr$  とする。前野紀一の研究<sup>(1)</sup>によると、摩擦係数は、進行方向前部と後部で異なり、進行方向の前部の摩擦係数  $\mu_F$  と後部の摩擦係数  $\mu_R$  が、氷の融解温度、周囲の水蒸気圧等様々な要因により変化し、 $\mu_F < \mu_R$  の関係になると推測している。しかし、現時点ではデータがないため、正確な値を計算することができない。

そこで本研究では、 $\mu_F:\mu_R=1:15$  の比率の定数として扱うことにした。これは、シミュレーション結果が、実際のストーンの動きと最も近い結果になるためである。微小部分ごとに並進速度  $\vec{v}$  と回転速度  $r\omega$  の合成速度  $\vec{v}_a$  を求め、そこから  $\vec{v}_a$  の角度  $\alpha$  を求める。ストーンにかかる摩擦力は、微小部分の摩擦力の合計であるため、微小時間ごとのストーン全体にかかる摩擦力  $f$  は次の式(1)、式(2)で与えられる。これより、微小時間ごとの速度、座標を求めることができる。

$$f_x = \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{m}{S} \cdot g \cdot \mu \cdot (-\sin \alpha) \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad (1)$$

$$f_y = \int_0^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{m}{S} \cdot g \cdot \mu \cdot \cos \alpha \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad (2)$$

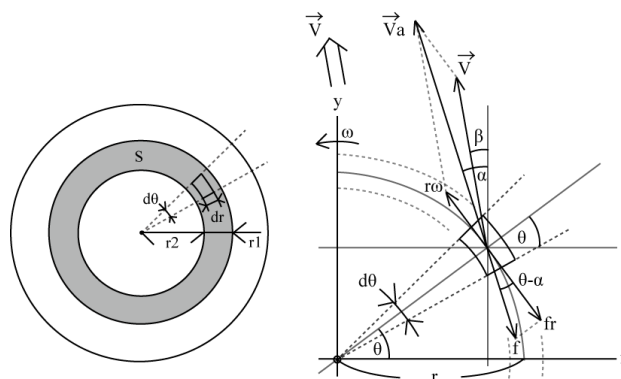


Fig. 3 Model of Stone

また、回転に加わるトルク  $T$  も同様に、微小部分ごとの  $T$  の合計となるため次の式(3)で求めることができる。

$$T = \int_0^\pi \int_{r_2}^{r_1} \frac{m}{s} \cdot g \cdot \mu \cdot r \cdot \sin(\alpha - \theta) \cdot r \cdot d\theta \cdot d + \int_\pi^{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{m}{s} \cdot g \cdot \mu \cdot r \cdot \sin((\theta - \pi) - \alpha) \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad (3)$$

慣性モーメント  $I=r^2m/2$  より、角加速度は  $a_r = T/I$  と求めることができる。これより微小時間ごとの角速度、回転座標を求めることができる。

#### 4.2 シミュレータの開発

本研究で開発したプログラムの1投分のフローチャートを図4に示す。開発にはjavaの統合開発環境であるNetBeansを利用し、先ほどの運動モデルを基にプログラムを記述した。

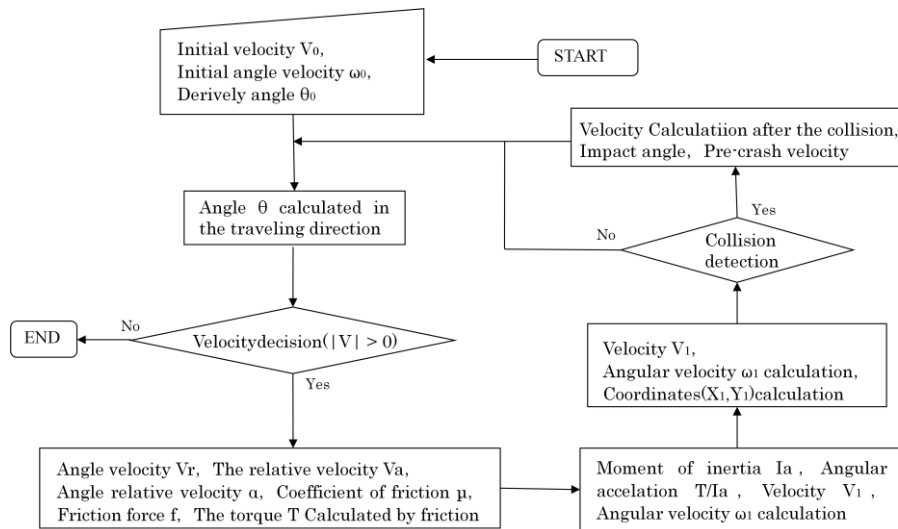


Fig. 4 Flowchart of 1 minute investment

#### 4.3 カールの評価

ストーンが曲がる様子をカールと表現する。図5は回転初速度による軌跡の違いを示している。(0,0)が投球点である。

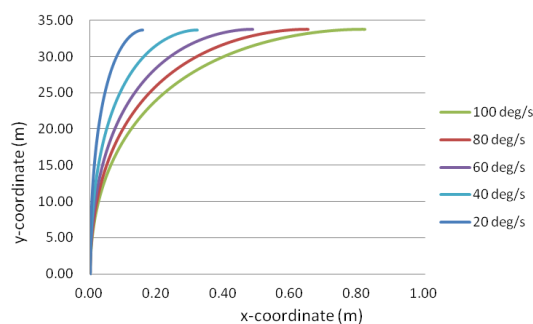


Fig. 5 Difference in the trajectory by Initial angular velocity

本シミュレータでは、回転初速度に依存してカールの量が変化した。カールは回転初速度が少ないほど小さくなり、多いほど大きくなった。先行研究より、一定の範囲では回転初速度に依存してカールするが、回転初速度が極端に少ない場合カールは安定せず、反対に極端に多い場合、直進性が増すことが分かっている。これより、一定の範囲以外では結果と一致しないことがわかる。

これは、摩擦係数  $\mu$  を定数として扱っていることが原因だと考える。前野紀一の研究<sup>(1)</sup>によると、摩擦係数は氷の融解温度、周囲の水蒸気圧等様々な要因により変化するものと解説している。また、対馬勝年の研究<sup>(2)</sup>によると、摩擦係数は微小部分の速度に依存して変化するものと解説している。

さらに現実に近いカールを実現するためには、摩擦係数が様々な要因によって変化することを考慮する必要がある。しかし、カーリング競技ではカールを安定させるため、50~90 deg/s 程度の回転初速度が主に使われているため、カーリング競技の戦略を考える上では、本シミュレータは有効であると考えられる。

#### 4・4 回転速度の評価

図6は初速度 2.4 m/s、初角速度 55 deg/s を与えた場合の実測値とシミュレータの角速度の比較を示している。

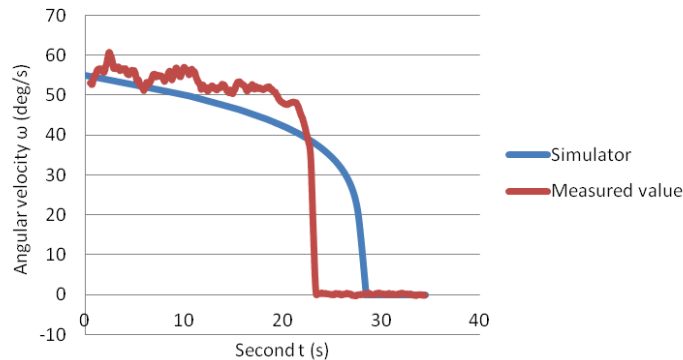


Fig. 6 Comparison of the angular velocity of the simulator and the actual measured value

図6より、速度が大きい部分は実測値の結果にシミュレータの結果にほぼ追従している。しかし、速度が小さい部分では実測値の値が急激に下がっている。これは、速度が遅くなると予測していない物理的な現象が起これ、摩擦係数が急激に大きくなったためだと考えられる。さらに現実に近い運動に近づけるには、速度が大きい時は摩擦係数は定数で扱っても問題ないが、速度が小さい時は摩擦係数を変化させる必要がある。

### 5. 投球ロボットとシミュレータの統合

人と対戦する前段階として、目標とする位置を決め、投球ロボットとシミュレータを用いて投球を行う。その結果について記述する。

#### 5・1 投球実験

ハウスの中心（ティー）を目標に、投球ロボットでストーンを打ち出す。ただし、ストーンの初速度はシミュレータが指示する。詳しい実験手順を以下に示す。

1. 適当な初速度でストーンを投球する
2. 停止位置と指令初速度をシミュレータに入力し、現在の摩擦係数を計算する
3. 2の摩擦係数を用いてティーにストーンを停止させるための初速度（計算指令初速度）をシミュレータで計算する
4. 計算結果から3%減じた速度を実指令初速度とする（後述）
5. 4の初速度を用いて、投球ロボットで投球させる
6. 以下2~5を繰り返して、目標の位置に近づける

ただし、変更する投球パラメータはストーン初速度のみとし、投球方向、ストーンの回転方向、回転付加電圧は変えずに一定で行う。

予備実験の結果、シミュレータの計算指令初速度で投球すると、目標停止位置をオーバーする現象が確認できたため、計算された初速度から一定割合（今回は約3%）を減じた値を実指令初速度とした。これはシミュレータ内で摩擦係数を計算する際、ストーンの移動距離をリリースポイントから停止位置までの直線距離としているため、移動距離を実際よりも小さく見積もっていることに原因があると考えられる。これにより、シミュレータ内では摩擦係数を実際よりも大きく計算することになり、その摩擦係数を利用し指令速度を計算することにより、計算指令速度が必要な初速度よりも大きくなることがわかった。

## 5・2 実験結果・考察

実際にカーリングホールで行った実験の測定結果を示す。全部で3投行った。なお、投球角度は左に $2^\circ$ 傾け、ストーンは右回転とし、回転付加モータへの印加電圧は8.4Vとした。印加電圧を8.4Vとしたのは、実際の競技でストーンに加える回転の目安である、停止までに約2.5~3.5回転という値に合致させるためである。ストーンの停止位置を図7に、停止座標とシミュレータの指令速度、ストーンリリース時の初速度と角速度を表3に示す。

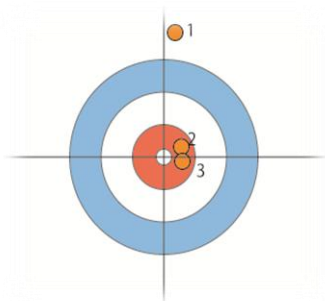


Fig. 7 Stone stop position

Table 3 Stone initial velocity, initial angular velocity and Stone stop position

Times	Calculation instruction initial velocity [m/s]	Actual instruction initial velocity [m/s]	Measured initial velocity [m/s]	Initial angle velocity [deg/s]	Stop position (X, Y)
1	None	2.45	2.45	57.4	(22, 234)
2	2.37	2.30	2.30	51.2	(34, 19)
3	2.30	2.25	2.25	59.6	(36, -8)

実指令初速度と実測初速度にずれはなく、正確な投球ができた。また1投目以降すべての投球において、ほぼ目標地点に投球できた。ストーン初速度と停止位置のデータを基に、シミュレータを用いて投球ロボットにフィードバックをかけた投球することは有効であるといえる。しかし、前述のようにシミュレータの計算指令初速度が大きくなるという問題もある。解決策としては、今回のようにシミュレータの計算指令初速度よりも3%程度落とした値で投球することや、カメラでストーンの軌跡を撮り、シミュレータに移動距離をフィードバックすることなどが考えられる。本実験において、投球のパラメータとして与えたのは初速度のみだった。今後、更にデータを集め、カール距離に影響する初角速度やストーンの軌跡を決める投球角度を投球パラメータとしてシミュレータに与えることで、思い通りの投球が可能となり、人との対戦に近づくことができる。

## 6. 結 語

投球ロボットの製作、運動モデルの構築、モデルを用いたシミュレータの製作、さらにそれらの統合と投球実験を行い、以下のことを確認した。

- ・ 投球ロボットは再現性のある投球を行うことができた
- ・ シミュレータは実際の競技で多用される投球パラメータの範囲内であれば概ね現実と近い結果が得られた
- ・ シミュレータと投球ロボットを統合し、任意の点にストーンを投球することができた
- ・ 今後さらに投球ロボットの改良をおこない、様々な投球のデータを集めてシミュレータにフィードバックできれば、人間チームと対等に対戦できるカーリングロボットシステムの構築が可能である

## 文 献

- (1) 前野紀一, “カーリング・ストーンがカールするメカニズム-蒸発摩耗モデル”, 氷雪研究大会, (2009)
- (2) 対馬勝年, “テレビ中継画面からカーリング・ストーンの摩擦測定とカールの説明”, 氷雪研究大会, (2010)
- (3) 上村良介, 河村隆, 谷川雄太, 田中翔太, 玉置康人, “人間と対戦可能なカーリングロボットに関する研究-ロボットによる投球実験-”, JSME 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, (2012)