

公立はこだて未来大学 2025 年度 システム情報科学実習 グループ報告書

Future University Hakodate 2025 Systems Information Science Practice
Group Report

プロジェクト名

世界最大級の国際展示に出展するミライノカーリング

Project Name

Curling of the Future: Participation in a Major International Expo

グループ名

世界最大級の国際展示に出展するミライノカーリング

Group Name

Curling of the Future: Participation in a Major International Expo

プロジェクト番号/Project No.

12

プロジェクトリーダー/Project Leader

山中将治 Masaharu Yamanaka

グループリーダー/Group Leader

田久保祐生 Yuki Takubo

吉田颯平 Sohei Yoshida

グループメンバ/Group Member

飯坂千尋 Chihiro Iisaka

瀧沼美紀 Miki Katanuma

相馬そのみ Sonomi Souma

高橋玄 Gen Takahashi

中西瞳俐 Airi Nakanishi

森田理央 Rio Morita

村松良祐 Ryosuke Muramatsu

指導教員

竹川佳成教授 姜南圭教授

Advisor

Prof. Yoshinari Takegawa Prof. Num-Gyu Kang

提出日

2026 年 1 月 21 日

Date of Submission

January 21, 2026

概要

本プロジェクトは、伝統的なスポーツであるカーリングに先端技術を融合させ、新たな体験価値を創出することを目的とする。具体的には、センサーを内蔵した物理デバイス（ストーン、ブラシ）、Unity ベースで制作した 3D 物理シミュレーターに戦略的な思考を持つカーリング AI を統合した「未来のカーリングシステム」を開発する。本システムは、プレイヤーの身体的アクションをリアルタイムでデジタル空間に反映させることで、戦術性と身体性が高度に絡み合う、没入型のスポーツエンターテインメントの実現を目指す。前期活動では、このコアコンセプトを実証するための基本設計を完了し、主要機能を実装した実動プロトタイプ of 構築に成功した。本取り組みは、新たなエンターテインメント市場の開拓に寄与すると同時に、テクノロジーを活用したスポーツ参加の新しい形を提案するものである。

キーワード カーリング, Unity, 物理シミュレーション, AI, センサ, UI/UX デザイン

(※文責: 飯坂千尋)

Abstract

This project aims to create a new experiential value by integrating advanced technology with the traditional sport of curling. Specifically, we are developing "the 'curling simulator of the future'" which integrates physical devices with built-in sensors (stones, brushes), a Unity-based 3D physics simulator, and a strategic curling AI. By capturing and reflecting players' physical actions in the digital space in real-time, this system seeks to provide an immersive sports entertainment experience where tactics and physicality are highly intertwined. In the first semester, we completed the basic design to demonstrate this core concept and a functional prototype was developed, demonstrating a working prototype with key features implemented. This initiative will not only contribute to pioneering a new entertainment market but also propose a new form of sports participation utilizing technology.

Keyword Curling, Unity, Physics Simulation, AI, Sensor, UI/UX Design

(※文責: 飯坂千尋)

目次

第 1 章	背景	1
1.1	テクノロジーとスポーツの融合	1
1.2	カーリングの課題と本プロジェクトの着想	1
第 2 章	関連研究	2
2.1	スポーツ体験のデジタル化	2
2.2	物理デバイスを用いたインタラクション	2
2.3	戦術シミュレーション	2
第 3 章	設計と実装	4
3.1	設計コンセプト	4
3.2	ハードウェア構成	5
3.3	機能	8
3.4	UI/UX およびデザイン制作	9
3.5	展示運用と体験マニュアル	10
3.6	操作デバイスの動作推定	11
3.7	スウィーピング判定	12
3.8	提示コンテンツと操作方法	12
第 4 章	実証実験	17
4.1	実験の目的	17
4.2	実験環境と評価方法	17
第 5 章	結果と考察	18
5.1	アンケート結果	18
5.2	体験価値に関する考察	19
5.3	システムの考察と開発プロセスの教訓	19
第 6 章	まとめと今後の課題	20
	参考文献	21

第 1 章 背景

1.1 テクノロジーとスポーツの融合

近年、XR (VR, MR, AR) やセンシング技術などの情報処理技術の進展に伴い、情報処理技術とスポーツを融合したスポーツテクノロジー (Sports Tech) に関する研究開発や製品開発が盛んである。スポーツテクノロジーは、アスリートのパフォーマンス向上だけでなく、スポーツ観戦の拡張や、新たなエンターテインメントの創出といった多岐にわたる応用が期待されている。特に、物理的な制約を超えて多くの人々がスポーツの魅力に触れる機会を提供するポテンシャルは、競技人口の拡大や、スポーツ文化の裾野を広げる上で極めて重要である。

1.2 カーリングの課題と本プロジェクトの着想

カーリングは、その高度な戦略性と繊細な身体技能から「氷上のチェス」とも称されるが、専用のアイスシートが必要となるため、誰もが容易に体験できるスポーツとは言い難い。氷の状態を読む経験や、正確なデリバリー技術の習得には長時間の訓練を要し、これが高い参入障壁となっている。

そこで本研究では、カーリング体験のハードルを下げ、カーリングの持つ身体性と戦術性を提供可能なカーリング体験システム「ミライノカーリング」の設計および実装を目的とする。

ミライノカーリングは、センサを内蔵した物理デバイス（実際の試合で使用されるストーンおよびブラシ）を用いてストーンの投擲やスウィーピングを体験できるシステムである。さらに、モニタ上には仮想的なカーリングリンクが表示され、体験者の操作に連動する仮想ストーンの挙動は、物理法則に基づいたストーンシミュレータによって制御される。加えて、戦術的な思考を体験するために、現在の局面の勝率や期待得点をもとに次手を推論する局面分析 AI 機能をもつ。

(※文責: 高橋玄)

第 2 章 関連研究

ミライノカーリングは、(1) スポーツ体験のデジタル化、(2) 物理デバイスを用いたインタラクション、(3) 戦術シミュレーションという 3 つの技術領域が融合したものである。以下、それぞれの関連研究について説明する。

2.1 スポーツ体験のデジタル化

情報技術を用いてスポーツ体験を拡張する試みは数多く行われている。特に、Unity に代表されるゲームエンジンや VR(仮想現実) 技術は、物理的な制約を超えたスポーツシミュレーションを実現するために広く用いられている。例えば、Ishitoya らは実測されたカーリング石の軌道データを VR 技術で再現する手法を開発している [1]。このように特定の状況を切り出してトレーニングやエンターテインメントとして提供する研究は、カーリングの分野においても複数存在するが [2] [3]、これらの多くは VR ゴーグルとハンドコントローラによる操作が主であり、実際の石の重量感や実際のブラシでアイスを掃く身体性は考慮されていない。これに対し、本研究は、実際の石に近い重量感を持つ物理デバイスを直接操作する「タンジブル [4]」なインタラクションを取り入れている点で異なる。

2.2 物理デバイスを用いたインタラクション

スポーツ用具にセンサを搭載し、選手にフィードバックを与える研究も活発である。慣性センサ(以下、IMU (Inertial Measurement Unit) と記載する) に代表されるセンサの小型軽量化、精度向上は、人間の動作解析に大きな進歩をもたらした [5]。野球のバッティング練習 [6] や調理技能の習熟支援 [7] など、様々な応用が提案されている。本研究は、これらのセンサ技術やタンジブルユーザインタフェースの考え方を、一般の体験者がカーリングを楽しむエンターテインメントシステムに応用している点に特徴がある。投擲の速度や回転、スウィーピングの有無・回数といった人間のアクションを、単なるデータとして記録・分析するに留まらず、ゲーム内のオブジェクトにリアルタイムに反映させている。これにより、臨場感の高いインタラクティブなゲームシステムを実現している。

2.3 戦術シミュレーション

カーリングの戦略や戦術に関する定量的分析は古くから行われており [8]、近年では AI による戦術研究が盛んである。Baier らの研究 [9] や加藤らの研究 [10] は、AI の「強さ」の追求や、戦術の最適解を探ることに焦点を当てている。これに対し、本研究の貢献は、高度な戦術を持つ AI を、研究室レベルのシミュレーションに留めるのではなく、一般の体験者が対戦相手として楽しめる統合システムとして実装した点にある。体験者は自らの身体的な投擲によって AI の思考を引き出し、その応答を目の当たりにすることができる。これは、AI の戦術的意思決定を、より多くの人々が直感的に体感できる形で提示する新たな試みであり、スポーツ AI とのインタラクションの新しい形を提案するものである。

第3章 設計と実装

本章では、カーリング体験システム『ミライノカーリング』の設計コンセプト、ハードウェア構成、機能について詳述する。

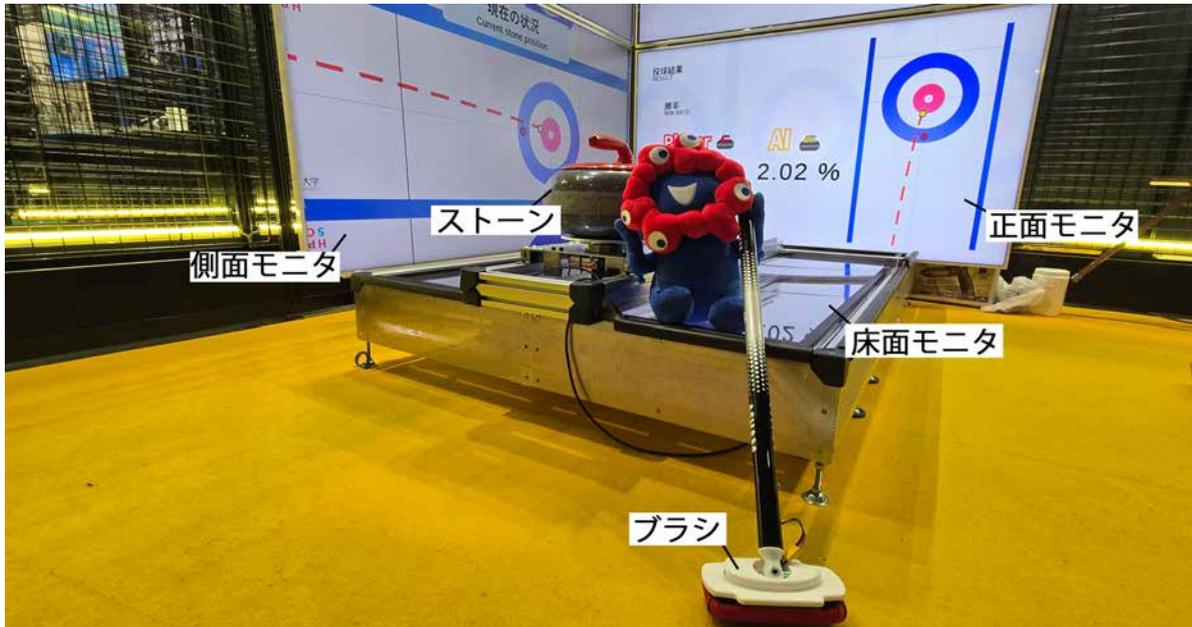


図1 ハードウェア構成

3.1 設計コンセプト

本システムの開発は、「カーリング未経験者でも、カーリングの本質的な面白さを短時間かつ手軽に深く体験できること」をコンセプトとした。我々はカーリングの本質を、(1)リアルなストーンやブラシを扱う身体性、(2)「氷上のチェス」と称される高度な戦術性、(3)チーム内での連携という3要素の融合であると定義した。このコンセプトを実現するため、体験は2人1組のチーム(投げ手と掃き手)で行う形式とし、これら3要素を提供するため、以下の4つの体験価値を核としてシステムを設計した。

- **リアルな用具に触れる体験価値:** VRコントローラではなく、実際のストーンとブラシを使用することで、カーリング特有の身体性を担保する。
- **AIと競い合う面白さ:** 初心者でも戦術立案を楽しめるよう、対戦相手として局面分析AIを導入する。これにより、体験者は自らのショットがAIの思考にどう影響を与えるかを直感的に学び、戦術的な面白さを体験できる。
- **チーム内での連携体験:** 体験を2人1組(投げ手と掃き手)に限定することで、実際の競技と同様に、コミュニケーションを取りながら戦術を決定し、ショットやスウィープを行う協調的な面白さを提供する。
- **リアリティの高いフィードバック:** 投げ手の投擲動作(速さ・回転)や掃き手のスウィーピン

グ回数をセンサで正確に捉え、遅延なくストーンシミュレータに反映させる。これにより、自身の身体操作とゲーム世界の出来事が直結しているという高い臨場感を提供する。

3.2 ハードウェア構成

図1に本システムのハードウェア構成を示す。以下、各ハードウェアについて説明する。

正面モニタ: 正面モニタは、体験エリアの正面に設置されており、75インチ（幅約1.7m、高さ約1m）の大型モニタである。投擲後のストーンがリンク上を滑走する様子などが表示される。なお、側面モニタおよび床面モニタのサイズは、正面モニタと同様に75インチである。

側面モニタ: 側面モニタは体験エリア横に設置される。投げ手の投擲スピードなどをリアルタイムに表示する。

床面モニタ: 床面モニタは、体験エリアの床面に設置される。体験システムを操作するための各種インタフェースが表示される。床面モニタは独自開発の専用フレームに格納されている。このフレームには床面モニタに加えて、画面へのタッチを検出するためのタッチセンサ^{*1}が設置されている。これにより75インチのモニタをタッチパネル化できる。また、床面モニタ上でスウィーピングを想定しており、ディスプレイを保護するために、透明な耐擦過処理したポリカーボネートプレートが設置されている。

物理ストーン: 実際の競技で用いられる公式ストーンが床面モニタ用フレーム上にある台座に固定されている。図2に示すように、投げ手はストーンの手柄を握り、手で押し出す動作によってストーンを投擲する。台座は全長1mの投擲レーンに固定されており、ストーンはこのレーン上を移動する。レーン表面にはオイルを塗布し、摩擦を低減することで、氷上におけるストーンの滑走特性を可能な限り再現している。投擲後、ストーンが回転しながら氷上を滑走する様子が正面モニタに表示される。同時に、台座上に設置されたストーンもモータ駆動によって同様の回転動作を行い、映像上の動きと同期して回転する。図4に示すように、台座の下部には投擲時の初速を計測するための6軸IMUセンサを内蔵する端末(M5StickC Plus2^{*2}、以下、M5と呼ぶ)を取り付けている。ストーンの回転(角速度)は、台座内部のモータに内蔵された角度センサによって計測される。M5は、IMUの計測値と角度センサの計測値をアプリケーションに送信するとともに、ストーンの回転を制御するための通信ユニット(CAN-BUSユニット^{*3})としても機能する。

物理ブラシ: スウィーピングを体験するため、寸法の異なる大人用(長さ120cm)と子供用(長さ90cm)の2種類のブラシを掃き手用に用意した(図3参照)。図5に示すように、各ブラシの持ち手上部には、スウィーピングの回数を計測するための端末(M5StickC Plus2)とバッテリーモジュールを搭載している。

(※文責: 山中将治)

^{*1} <https://www.greentouch.com.tw/product/infrared-touch-frame-75-inchestb.html>

^{*2} [ssci.to/9350](https://www.ssci.to/9350)

^{*3} [ssci.to/6618](https://www.ssci.to/6618)



図2 物理ストーンを用いた投擲の様子



図3 大人用ブラシと子供用ブラシ

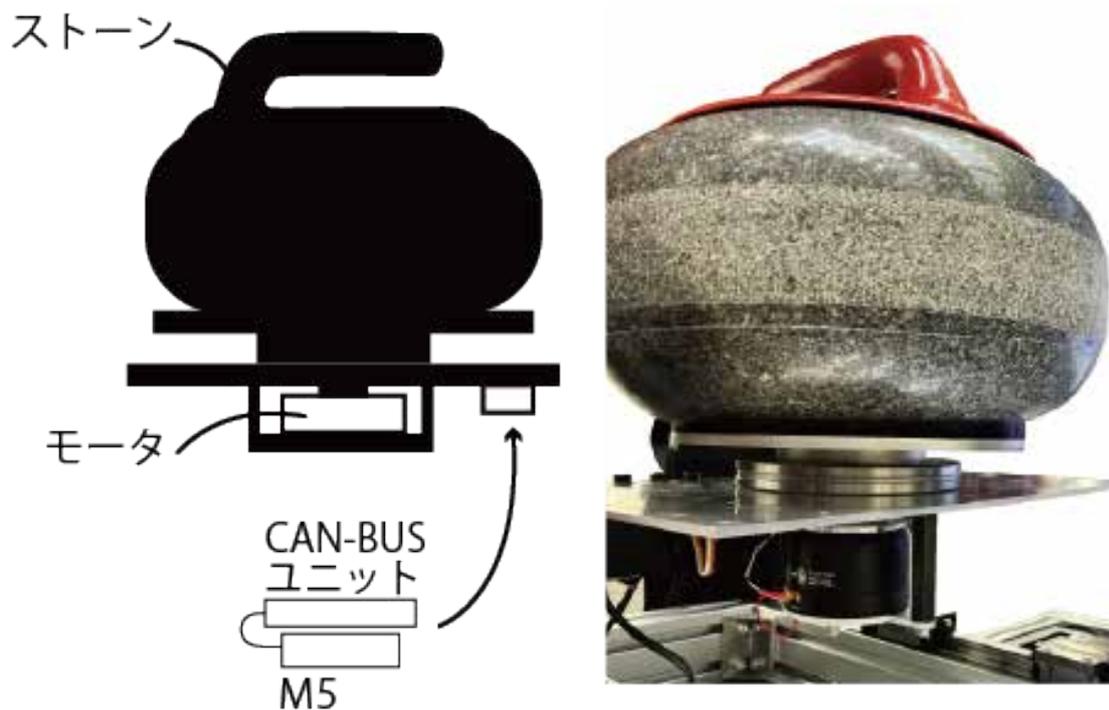


図4 物理ストーンと台座の内部構造

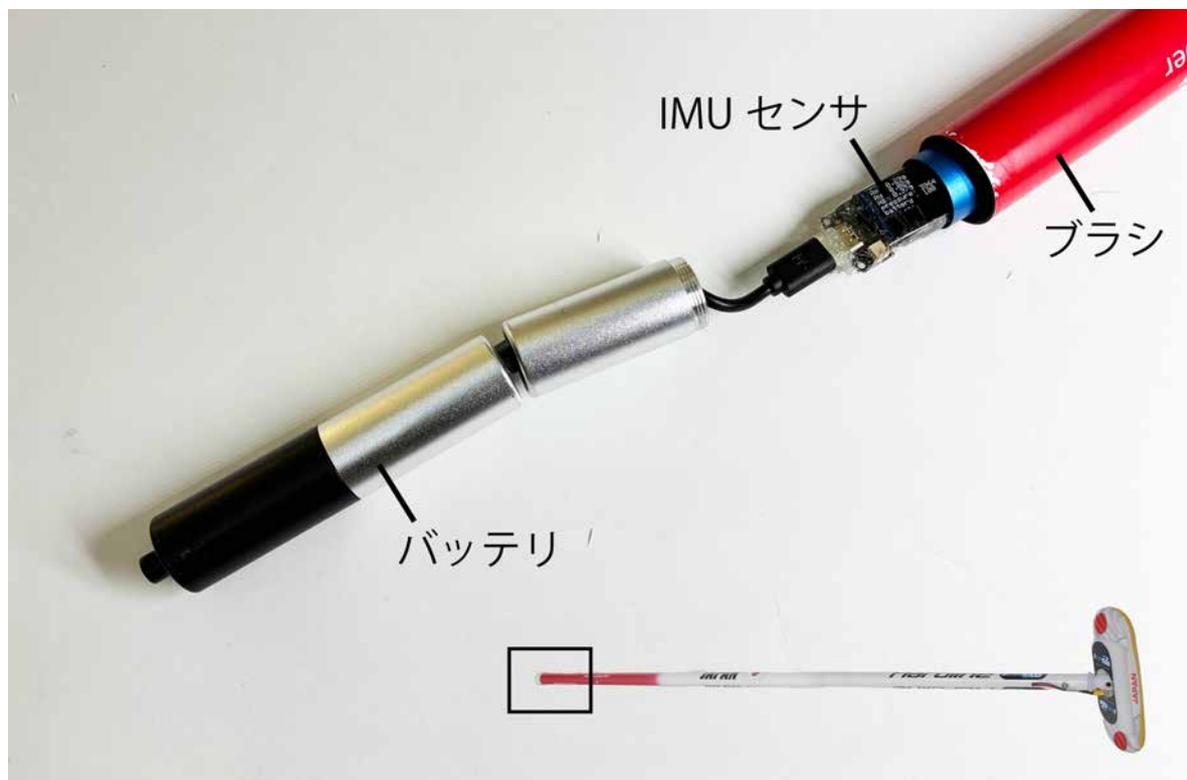


図5 物理ブラシの内部構造と IMU センサの配置

3.3 機能

本システムの各機能について図 6 をもとに説明する。なお、本システムの各種機能は、Windows 環境において Unity エンジン (Unity2022.3.0f1) を用いて開発した。また、デスクトップ PC (GALLERIA ZA9C-R49 (CPU : Intel Core i9-14900KF, GPU : NVIDIA GeForce RTX 4090 24 GB)) 上で動作している。

センサ情報集約機能: 物理ストーン (IMU, 角度センサ), 物理ブラシ (IMU), および床面モニタ (赤外線タッチセンサ) の各種入力デバイスから送信される情報を集約し、ノイズ除去といった処理を行う。

物理量推定機能: 集約されたセンサ情報に基づき、ストーンシミュレーション機能への入力パラメータとなる投擲初速, 投擲回転方向, スウィーピング回数を推定する。また, 床面モニタ上のタッチ位置を推定する。

ストーンシミュレーション機能: 投擲・スウィーピングの推定値に基づき, ストーンの運動や衝突などを物理演算し, ストーンの位置情報をフレームごとに更新する。本機能は, スウィーピングの効果を遅延なく描画に反映させるため, リアルタイムでの高速な計算が実行される。このストーンシミュレーション機能は, 文献 [?] をもとに実装した。

試合情報管理機能: 現在の試合モード, スコア, そして各ショットごとの結果 (ショット後の全ストーンの配置など) といった状態を保存・更新する。本システムではゲーム性を高める工夫として, 難易度に応じて異なる試合局面を再現する試合モード (チュートリアル, 簡単, 普通, やや難しい, 難しい) があり, これも本機能で管理される。モードごとに, 初期のストーン配置や目標得点などが異なり, 体験者は難易度の異なる多様な戦術的状况に挑戦できる。各モードは, 過去の実際の試合データに基づいた名場面 (例えば, 日本選手権 2024 決勝 SC 軽井沢 対 北海道銀行 第 10 エンド) をもとに設定した。

局面分析 AI 機能: 試合情報管理機能から現在の局面 (石の配置, エンド数, 点差など) を参照し, その局面における勝率 (最終的な勝利確率) と期待得点 (そのエンドの予測得点) を計算する。また, 次に投げるべき最適なショット (「次手」) を推論する。本機能は文献 [?, ?] をもとに実装した。

レンダリング機能: ストーンシミュレーション機能が算出したストーンの軌跡や, 勝率, 期待得点など, 各種情報を正面・側面・床面の各モニタに描画する。

モータ制御機能: ストーンシミュレーション機能の演算結果 (体験者および AI のショット) と同期し, 物理ストーンの台座に埋め込まれたモータを制御して, ストーン本体を自動回転させる。

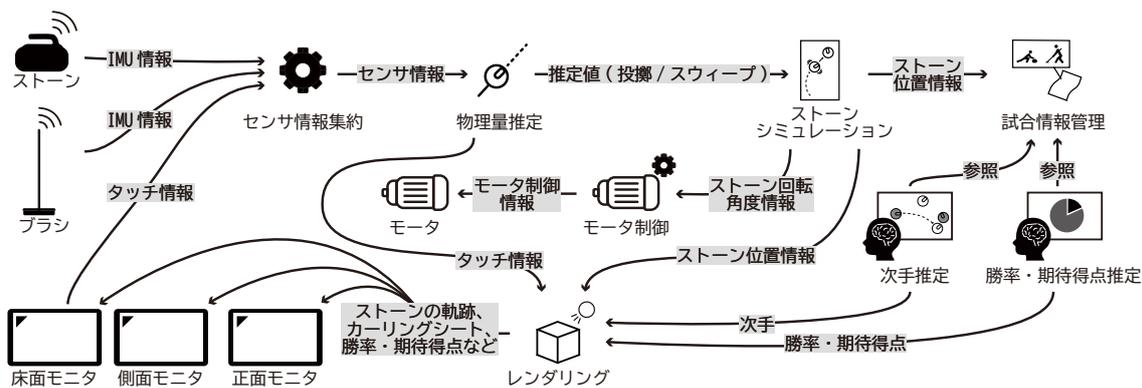


図6 システム構成図

(※文責: 中西瞳例)

3.4 UI/UX およびデザイン制作

本システムの開発では、3.3節で述べた機能実装と並行し、体験の質を向上させるためのデザイン制作も重要な要素であった。UI/UX デザイン、ロゴ、研究紹介資料、ゲームマニュアル資料の制作をデザイン班が担当した。

UI/UX デザイン: UI デザインは、「近未来的」かつ「ワクワクする」体験をコンセプトとした。メインカラーはカーリングのアイスを表現する青を採用した。フォントは視認性と先進性を両立するものを選定した。Figma 等のデザインツールを用いて、3.7節で詳述するタイトル画面、作戦画面、投擲・スウィープ画面、AI 思考画面までの一連の体験フローを設計し、イテレーションを重ねて改善を行った。

ロゴ・広報物デザイン: システムの顔となるロゴは、石の軌道や先進性をモチーフに制作した。また、EXPO 2025 大阪・関西万博で展示した研究紹介資料(図7)に加え、同様の内容をすべてイラスト化した漫画コンテンツ(図8参照)も作成した。ゲームマニュアル資料は待機列の来場者向けに制作し、これらも UI とデザインの一貫性を持たせることで、ブースへの誘引と体験者へのスムーズな操作説明、および待機時間の満足度向上をサポートした。

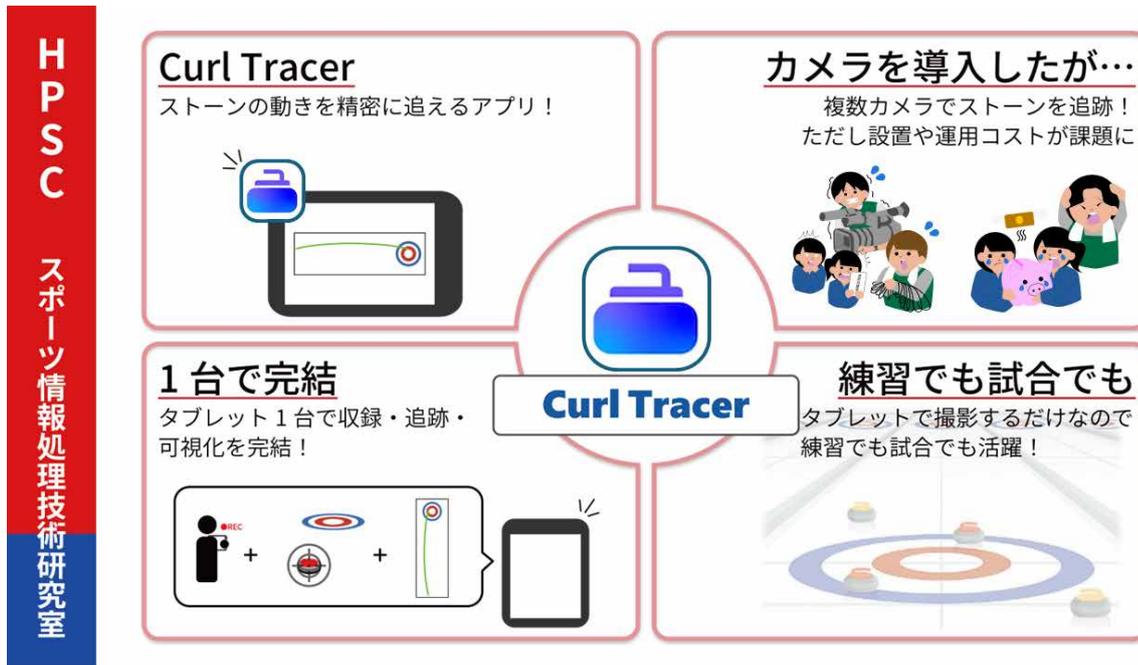


図7 研究紹介資料

HPSC 第2章「高精度カメラ、でも…問題が」

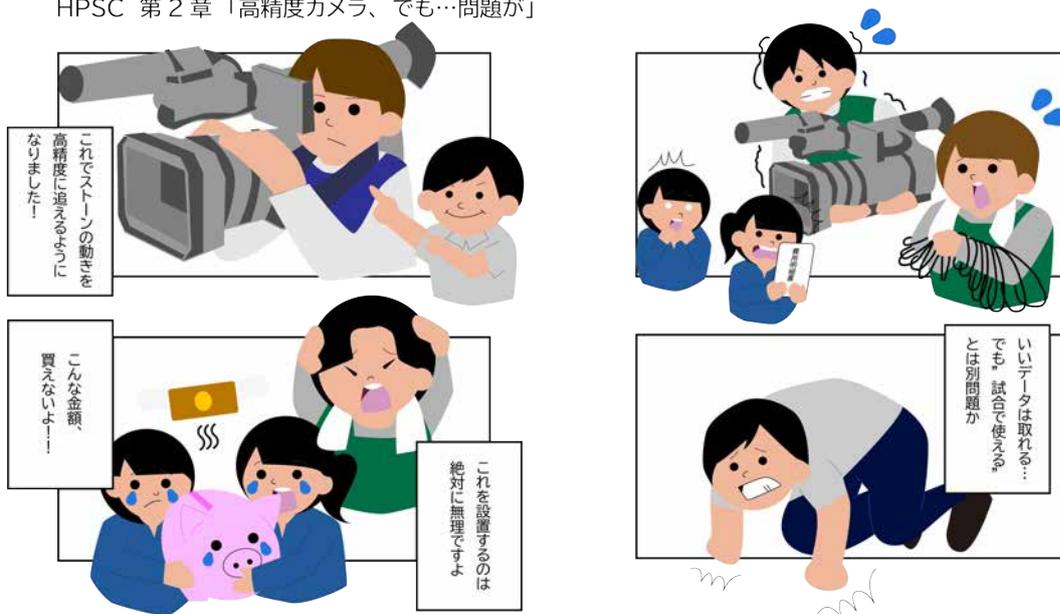


図8 漫画コンテンツ

3.5 展示運用と体験マニュアル

EXPO 2025 での円滑な展示運用と体験の質を担保するため、図9 来場者への説明フローを標準化したマニュアルを制作し、スタッフ間で共有した。マニュアルには、単なる操作説明だけでなく、混雑時の対応や来場者への配慮といった運用戦略も含まれる。

知識レベルに応じた説明フロー： 来場者のカーリング知識を把握し、そのレベルに応じて説明内容を調整した。具体的には、初心者には基本的なルールや得点計算の仕組みを丁寧に説明

し、経験者には説明を省略するなど、理解度に応じた情報提供を行った。これにより、来場者がゲーム体験時に不明点を抱えないよう配慮した。

混雑緩和と体験誘導: 混雑時には、来場者に「チュートリアル」モードを推奨することで、他の難易度選択肢（名場面モード）によるプレイ時間の長期化を防ぎ、ブースの回転率を維持するよう努めた。

操作や専門用語の事前解説: ゲームの流れを解説する際には、投球方法における「ドロー」と「テイク」の違い、ストーン投擲時のスピード調整、スウィープを開始する適切なタイミングなどについても説明した。これにより、参加者がゲーム体験をスムーズに行えるよう配慮した。

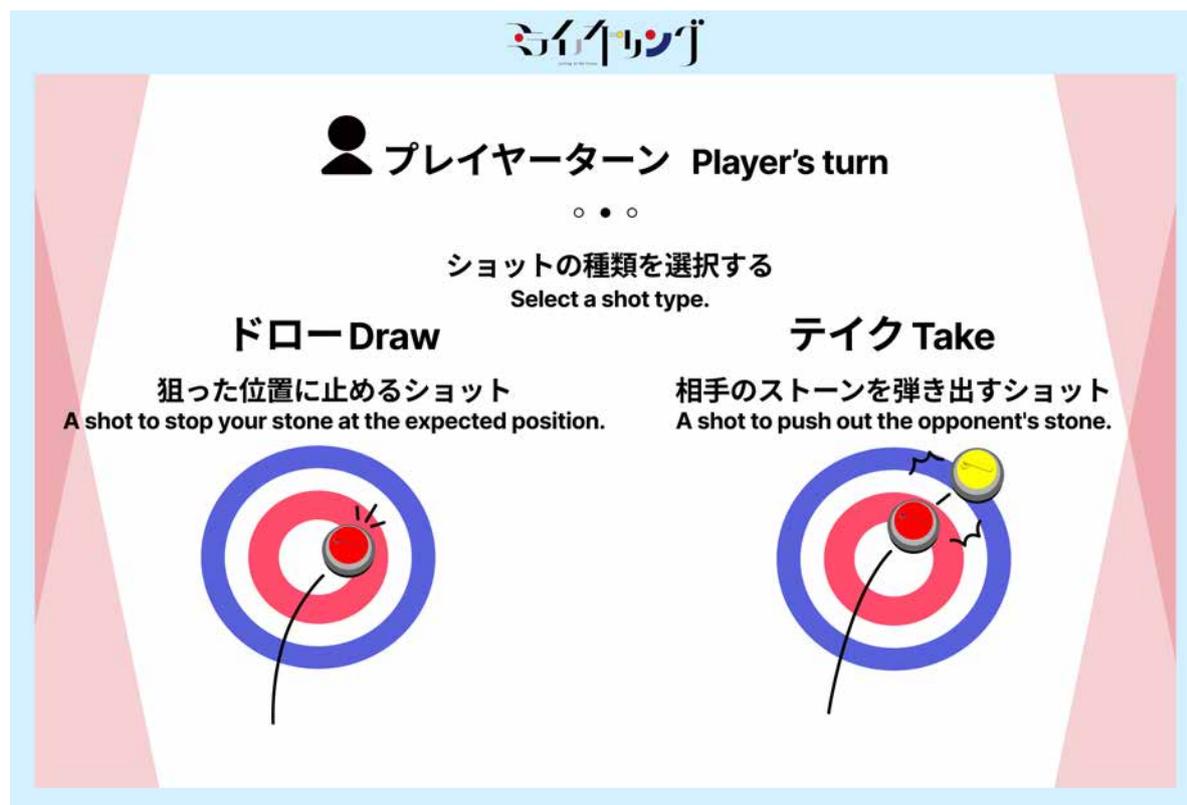


図9 体験マニュアル資料

(※文責: 相馬そのみ)

3.6 操作デバイスの動作推定

投擲初速と回転の推定

物理ストーンを固定する台座に搭載された IMU センサデータから、加速度ベクトル $\mathbf{a}(t) = (a_x(t), a_y(t), a_z(t))$ が時系列データとして得られる。ストーン投擲初速の推定は、IMU の加速度データを台形則で数値積分することで行った。サンプリングされた時刻 t_i における加速度を \mathbf{a}_i 、重力加速度を g とすると、投擲初速 \mathbf{v}_{init} は次式で与えられる。

$$\mathbf{v}_{\text{init}} \approx \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\mathbf{a}_i g + \mathbf{a}_{i+1} g}{2} \cdot \Delta t_i \quad (3.1)$$

ここで、 $\Delta t_i = (t_{i+1} - t_i)$ はサンプリング間隔である。

また、鉛直軸周りの角速度は、モータに内蔵された角度センサの値の差分から推定した。サンプリング時刻 t_i におけるモータの角度を θ_i とすると、角速度 $\omega(t)$ は以下のように近似できる。

$$\omega(t) \approx \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\Delta t_i} \quad (3.2)$$

物理量推定機能では、蓄積された N 個のパケットのうち、絶対値が最大となる角速度の値をストーンの回転速度として採用した。

3.7 スウィーピング判定

ブラシに内蔵された IMU センサデータから、スウィーピングの有無を判定し、そのスウィーピング回数に応じて物理シミュレータ内の摩擦係数を動的に変化させる。まず、ローパスフィルタを適用した加速度ベクトル $\hat{\mathbf{a}}_t$ のノルム (合成加速度) $a_t = \|\hat{\mathbf{a}}_t\|_2$ を算出する。複数のブラシが使用される場合は、その最大値 $a_t = \max\{a_t^{(A)}, a_t^{(Cf)}, \dots\}$ を採用する。次に、静止時の基準値 a_{base} との差分 $d_t = |a_t - a_{\text{base}}|$ を計算し、チャタリング抑制のためヒステリシス付きのしきい値判定を行う。

$$h_t = \begin{cases} 1, & d_t > T_{\uparrow} \\ 0, & d_t < T_{\downarrow} \\ h_{t-1}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで $h_t = 1$ はスウィープ中、 $h_t = 0$ は停止状態を示し、 $T_{\uparrow}, T_{\downarrow}$ はそれぞれ判定の上限・下限しきい値である。スウィープ中 ($h_t = 1$) にカウンタ S_t を上限 S_{max} までインクリメントし、この値 (スウィーピングの回数を示す指標) を用いて有効摩擦係数 $\mu_{\text{eff}}(t)$ を決定する。

$$\mu_{\text{eff}}(t) = \mu_0(1 - \gamma S_t) \quad (3.4)$$

ここで μ_0 は基準摩擦係数、 γ は 1 カウントあたりの摩擦低減率である。

3.8 提示コンテンツと操作方法

本システムの提示コンテンツや操作方法について説明する。なお、以下の説明順は、カーリング体験の進行フローに対応している。

A. タイトル・チュートリアルフェーズ: 体験の開始時、正面・側面モニタには、図 10 に示すタイトルロゴと遊び方の簡単な説明が表示される。アニメーションにより、投げ手にはストーンの持ち方、掃き手にはスウィーピングの動作といった各役割の基本的な身体操作を解説し、スムーズな体験導入を促す。体験者はここでプレイする試合モード (難易度) を選択し、その後ペアで床面モニタのスタートボタンに触れることでゲームが開始される。

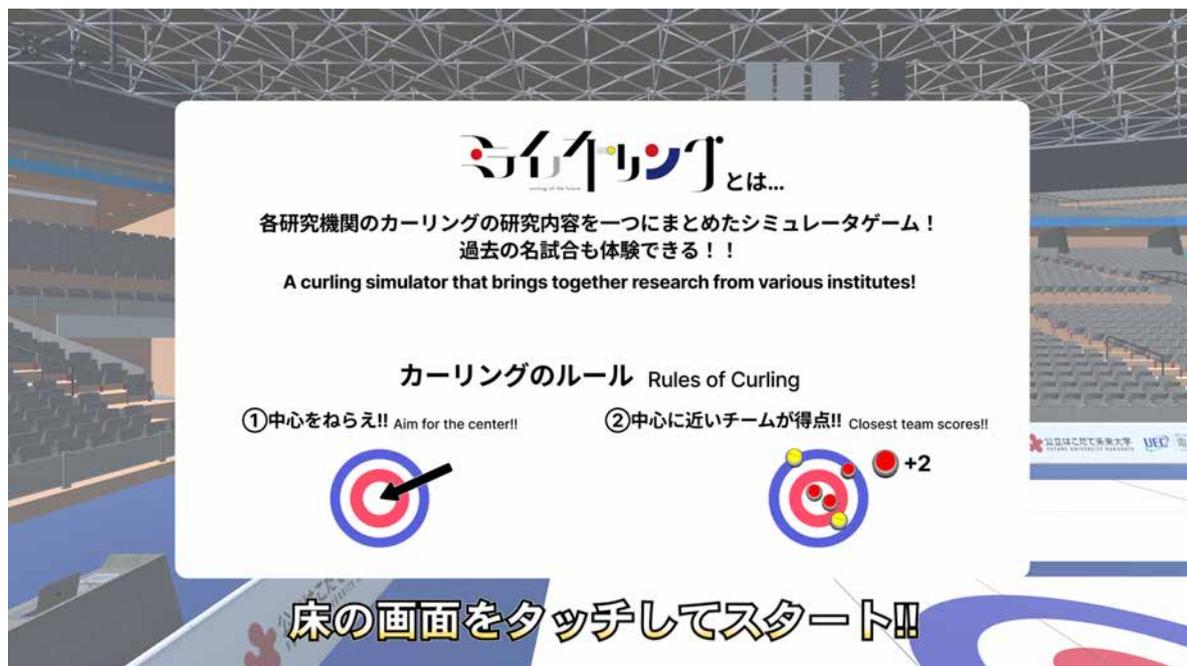


図 10 タイトル画面

B. 戦術立案フェーズ: 体験者の投擲ターンになると、床面モニタが作戦画面に切り替わる。投げ手と掃き手は盤面を見ながらショットの種類（ドロー/テイクアウト）、目標地点、そしてストーンの回転方向（時計回り/反時計回り）を体験者同士で協議する。掃き手はブラシを用いて床面モニタ上の項目を選択することで、各パラメータを指定する。このとき、目標地点を選択すると、ストーンシミュレーション機能が、その地点への投擲を想定してストーンの軌道をリアルタイムに推定し、その結果をもとに軌道を表示する。また、図 12 に示すように、側面モニタには局面分析 AI 機能が算出した現在の局面における勝率および期待得点が表示される。体験者はこれらの情報を参照しながら、目標地点やショット種類などの選択項目を適宜修正し、最終的な戦術を決定する。本システムは、このようにカーリング競技における戦術決定のプロセスを簡易的に体験できるよう設計されている。

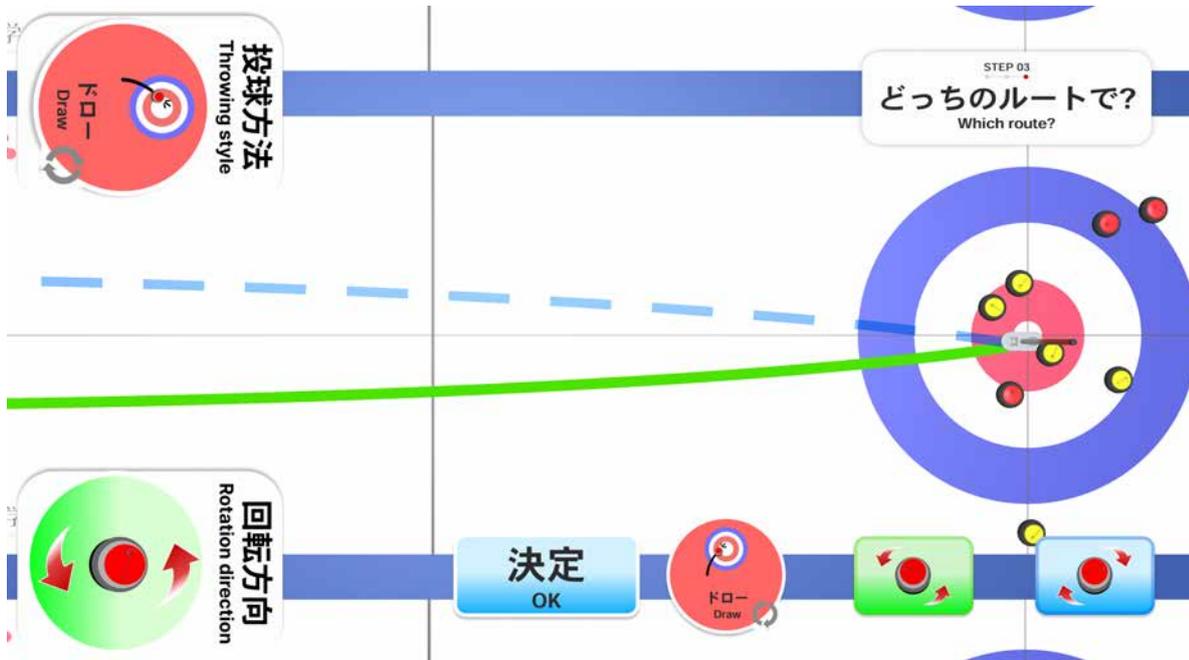


図 11 作戦画面

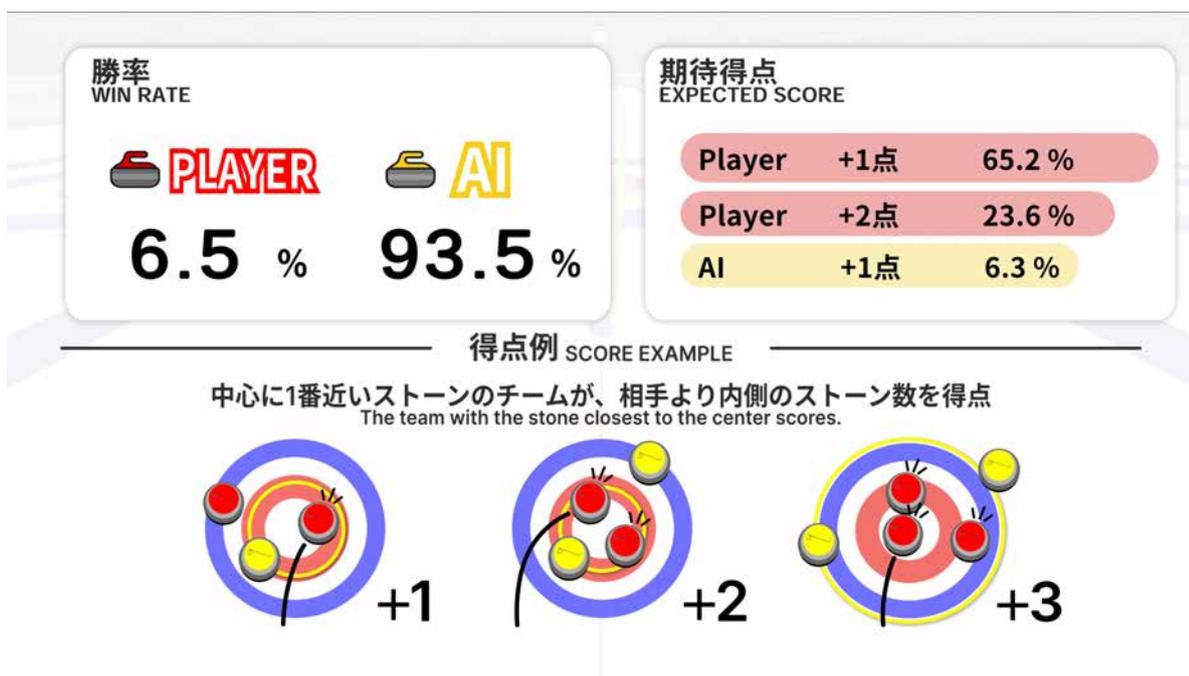


図 12 作戦画面に表示される勝率・期待得点の例

C. 投擲・スウィーピングフェーズ: 投げ手が物理ストーンを投擲する。目標地点に到達するために必要な投擲速度は、図 11 に示す作戦画面（床面モニタ）上で確認した軌道をもとに、図 13 のように床面モニタ上に表示される。投げ手はこの情報を参照しながら投擲を行うことで、ストーンの初速を直感的に理解できる。また、投擲スピードは側面モニタにもリアルタイムに表示される。ストーンシミュレーション機能の演算結果をもとに、画面内にある仮想的なストーンオブジェクトがリンク上を滑走する様子が正面モニタに表示される。ストーンの回転は、台座内部に搭載されたモータによって再現されており、物理ストーンの回転と正面モニタ上の仮想ストーンオブジェクトの回転は同期している。加えて、(1) ストーンが

Curling of the Future: Participation in a Major International Expo

ホッグラインを越え、かつ (2) その時点でのストーンの現在位置が、目標地点への推定軌道よりも (Unity 座標系の Z 軸方向において) 手前 (後ろ) にある場合、図 14 に示すように、正面モニタに「Yep!!」という文字が表示される。これは掃き手へのスウィーピング開始の合図となる。この一連の身体的アクションの連携 (チーム内での連携体験) と、操作に対するデジタルな反応の連動性 (リアリティの高いフィードバック) こそが、本システムが提供する重要な体験価値である。



図 13 投擲画面



図 14 スウィープ画面

D. AI 思考フェーズ: 投擲後、攻守が交代し AI のターンとなり、図 15 に示すように、正面モニタには AI の思考中であることが示される。思考時間はショットによって変化するが、思考

Curling of the Future: Participation in a Major International Expo

時間の最大は 10 秒である。思考後、AI のショットが正面モニタに表示される。この思考時間は意図的に長めにするように設定している。これは AI が人間のように思考しているという印象を与え、対戦相手としての存在感を高めることを狙っている。また、人間のショットに誤差が生じるように、AI のショットにもランダムな誤差を導入するよう設計した。これにより、より現実的な試合展開が再現され、ゲーム性の向上が期待できる。



図 15 AI 思考画面

(※文責: 田久保祐生)

第 4 章 実証実験

本章では、提案システムの有効性を検証するために実施した実証実験の目的、環境、および評価方法について述べる。

4.1 実験の目的

開発した『ミライノカーリング』が、幅広い層のユーザに対して、カーリングの魅力を伝える新たなエンターテインメント体験を提供できるかを検証することを目的とする。具体的には、(1) システムの受容性 (楽しさ)、(2) 操作性 (ユーザビリティ)、(3) 体験の質 (没入感) などを評価指標とし、体験者のフィードバックから今後の改善点を探る。

4.2 実験環境と評価方法

- **場所・期間:** EXPO 2025 大阪・関西万博, 「Sports Future Lab〜スポーツがつくる未来〜」 (独立行政法人日本スポーツ振興センターブース)。2025 年 9 月 3 日〜9 月 8 日。
- **展示レイアウト:** 図 1 に示す通り、3.2 節で述べた 75 インチのモニタ (正面・側面・床面) をブース内に配置した。
- **被験者:** 上記イベントにおける来場者 (任意協力)。体験は 2 人 1 組で行われた。
- **手順:** システム体験後に、参加者に QR コードを提示し、Web ベースのアンケートフォームへの回答を依頼した。
- **アンケート項目:** 年代、性別、カーリング経験の有無といった基本情報に加え、「総合的な楽しさ」、「操作の分かりやすさ」、「映像の迫力」、「もう一度プレイしたいか」の 4 項目に関する 5 段階評価 (1: 全くそう思わない〜5: 非常にそう思う)、および自由記述欄を設けた。
- **収集データ数:** 有効回答数 $N = 482$ 件。(総体験者数は 1,743 名)

(※文責: 森田理央)

第5章 結果と考察

本章では、実証実験で得られたアンケート結果を定量・定性の両面から示し、その結果に基づきシステムの有効性や課題について考察する。

5.1 アンケート結果

収集したアンケートデータを集計した。回答者の属性を図16に示す。回答者の年代は20代が最も多く40%を占め、カーリング未経験者が全体の約85%に達した。これは本システムが当初想定したターゲット層に広くリーチできたことを示唆している。各評価項目の集計結果を表1に示す。「総合的な楽しさ」は平均4.7(標準偏差0.6)と極めて高い評価を得た。その内訳を見ると、この質問への回答者471名のうち376名(約79.8%)が最高の「5」を、75名(約15.9%)が「4」を付けており、合わせて95%以上の体験者が肯定的な評価をしたことがわかる。「操作の分かりやすさ」も平均4.5(標準偏差0.8)と高い評価であった。

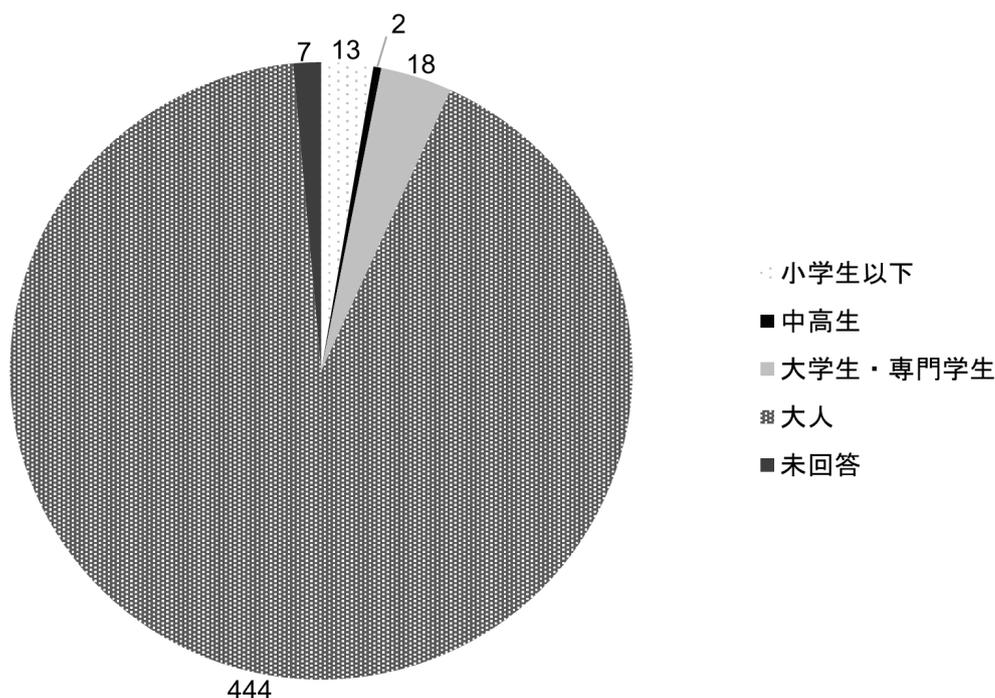


図16 アンケート回答者の属性

自由記述欄からは、体験価値に関するポジティブな意見が多数寄せられた。具体的には、「本物のカーリングのようで面白かった」(リアリティ)、「AIが強くてやりごたえがあった」(ゲーム性)、「自分の投げた感覚が画面に反映されるのがすごい」(操作のフィードバック)といった声が代表的であった。一方で、改善点に関する指摘は主にUI/UXと操作性に集中しており、「ブラシの反応が少し分かりにくかった」(フィードバック不足)、「もっと詳しいルール説明がほしい」(チュートリアル不足)といった意見も見られた。

表 1 各評価項目の平均値と標準偏差 (N=482)

評価項目	平均値	標準偏差
総合的な楽しさ	4.7	0.6
操作の分かりやすさ	4.5	0.8
映像の迫力	4.2	0.9
もう一度プレイしたいか	4.4	0.9

5.2 体験価値に関する考察

アンケート結果は、本研究が設定した4つの体験価値が概ね達成されたことを示唆している。「総合的な楽しさ」(平均4.7)、「操作の分かりやすさ」(平均4.5)、「もう一度プレイしたいか」(平均4.4)といった主要な項目で極めて高い評価が得られたことは、システム全体の受容性の高さを示している。特に自由記述の「本物のよう」「自分の投げた感覚が反映される」というコメントは、設計思想の核であった(1)リアルな用具に触れる体験価値と(4)リアリティの高いフィードバックが体験者にポジティブな影響を与えたことを裏付けている。また、「AIが強くてやりごたえがあった」というコメントは、(2)AIと競い合う面白さが意図通り機能したことを示している。(3)チーム内での連携体験については、アンケート項目に直接的な設問は設けなかったものの、会場では2人1組の体験者が楽しそうに戦術を協議し、共同で操作する様子が随所で観察された。AIが単なる的当てゲーム的ではなく、思考する対戦相手として認識されたことは、本システムの戦術的価値を高める上で大きな成果である。自由記述で「ブラシの反応が分かりにくい」という意見も見られたが、全体として高い評価を得ていることから、多くのユーザが直感的な操作で楽しめたと考えられる。ブラシのフィードバックについては、今後の改善点として捉えることができる。

5.3 システム的考察と開発プロセスの教訓

本実証実験は、EXPO 2025 大阪・関西万博という大規模イベントの来場者を対象としており、6日間の会期で延べ1,743名という多数の体験者にシステムを提供できた。アンケート有効回答数(N=482)だけでも多くのフィードバックを得られ、1章で述べた「スポーツ文化の裾野を広げる」という目的に対しても一定の貢献ができたと考えられる。しかし、イベントの特性上、テクノロジーや新しい体験に関心が高い層が多く参加している可能性があり、一般的な母集団に対する評価とは異なるバイアスがかかっている可能性は否定できない。また、プレイ時間が限られていたため、カーリングの戦術面での奥深さを十分に体験してもらう前に評価が行われた側面もある。

開発プロセスにおいては、複数チームによる並行開発、特にUnityプロジェクトのバージョン管理において課題が生じた。仕様駆動開発が初期の方向性を統一する上で有効であった一方、開発が進むにつれて生じる細かな仕様変更や機能統合の場面では、GitHub上でのコンフリクトが頻発した。これは、シーンファイルやプレハブといったバイナリファイルの管理の難しさに起因するものであり、より細分化されたコンポーネント指向の設計や、Git LFSの活用といった具体的なバージョン管理戦略の重要性を示す教訓となった。

(※文責: 村松良祐)

第6章 まとめと今後の課題

本章では、本研究の成果を総括し、明らかになった課題と今後の展望について述べる。本研究では、物理デバイス、ストーンシミュレーション、局面分析 AI を統合した新たなカーリング体験システム『ミライノカーリング』を提案・開発した。EXPO 2025 大阪・関西万博での展示評価を通じて、(総体験者 1,743 名, 有効回答数 482 名) 体験者からフィードバックを得て、本システムが幅広い層にカーリングの魅力を伝える上で有効であることを実証した。物理的な操作感とデジタルなゲーム性を融合させるという本研究のアプローチは、新しいスポーツエンターテインメントの可能性を示したと言える。

今後の課題として、アンケート結果から明らかになった点を踏まえ、短期・中長期の視点から以下を挙げる。

- **ユーザ体験の向上 (短期):** UI/UX の改善を最優先課題とする。特に指摘のあったブラシデバイスのセンサ感度調整に加え、スウィーピングの回数(効果)に応じて画面にエフェクトを表示する、または音のフィードバックを加えるといった実装により、操作への応答を強化する。また、初心者向けのルール解説を充実させたチュートリアルモードを追加し、ルールの理解を促進する。
- **ゲームコンテンツの拡充 (中期):** 1 エンド (16 投) を最後までプレイできるゲームロジックを完成させ、対人戦モードや、過去の名試合の局面を追体験できる「メモリアルモード」を実装する。AI についても、複数の難易度を選択できるよう改良し、プレイヤーのレベルに応じた挑戦を提供する。
- **システムの安定化と展開 (長期):** 長時間稼働を想定したコードのリファクタリングと、センサキャリブレーションの自動化など、ハードウェアの堅牢性を向上させる。将来的には、設営・撤収が容易なポータブル版の開発も視野に入れ、教育機関や地域のイベントなど、より多様な場所への展開を目指す。
- **技能習熟支援システムへの応用:** 本システムの提供する体験はエンターテインメントに留まらないが、カーリングの奥深さの一部であり高い参入障壁ともなっている**氷の状態を読む経験**や、**正確なデリバリー技術**の習得といった高度なスキルに関しては、現状のシステムでは十分なサポートを提供できていない。今後は、記録した投擲データ(初速, 回転数, リリースポイント)を理想的な軌道データと比較し、その差分を可視化する機能に加え、例えば異なる氷の状態をシミュレーション内で再現し、それに応じたショット選択やデリバリー調整を学べるような機能拡張も考えられる。ショットごとに投擲パラメータのばらつきを散布図として提示し、フォームの安定性をプレイヤーが客観的に把握できるようなダッシュボード機能の開発は、効果的な練習に繋がりうる。

これらの課題に取り組み、本システムをより完成度の高いインタラクティブな体験システムとして昇華させていく。

(※文責: 瀧沼美紀)

参考文献

- [1] K. Ishitoya, F. Masui, H. Yanagi, M. Ptaszynski, S. Aihara. Development of a Method for Reproducing Measured Orbital Data of Curling Stone by VR Technology. *icSPORTS*, pp. 61–69, 2023. <https://doi.org/10.5220/0012178700003587>.
- [2] Nishimura, T. Construction of an immersive curling system using VR. 修士論文, The University of Electro-Communications, 2021.
- [3] T. Misu, H. Hoshino, Y. Sugiura, M. Ogata. A virtual reality curling system for experiencing super shots. 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 1–2, 2017. <https://doi.org/10.1109/GCCE.2017.8229239>.
- [4] Y. Makino, S. Kouchi, Y. Sugiura, M. Inami, T. Igarashi. The continuous strain-sensing sticker: a deformable input sensor for physical objects. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 589–594, 2014. <https://doi.org/10.1145/2642918.2647385>.
- [5] V. Camomilla, E. Bergamini, S. Fantozzi, G. Vannozzi. Trends in the use of wearable inertial sensors for human movement analysis. *Sensors*, vol. 18, no. 5, p. 1500, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18051500>.
- [6] J. A. Stone, B. Small, N. Gredin, N. D’Amico, J. Gbadamosi, M. Buller, C. J. Hass, J. H. Cauraugh. The effects of virtual reality and live batting practice on baseball batting performance. *Virtual Reality*, vol. 23, no. 2, pp. 119–128, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0348-1>.
- [7] 増田初音, 加藤邦拓, 新屋拓海, 池松香, 竹川佳成, 平田圭二. タブレット端末と慣性センサを用いた調理初心者のための包丁さばき支援システムの設計と実装, および食材切断に関する学習効果の評価. *情報処理学会論文誌*, vol. 63, no. 1, pp. 1–12, 2022.
- [8] T. Maruyama. The science of curling: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, vol. 226, no. 2, pp. 79–91, 2012. <https://doi.org/10.1177/1754337111430420>.
- [9] H. Baier, G. Satta. Strategy and evaluation in the sport of curling. *Journal of Quantitative Analysis in Sports*, vol. 16, no. 4, pp. 287–302, 2020. <https://doi.org/10.1515/jqas-2019-0063>.
- [10] Y. Kato, M. Ptaszynski, F. Masui, D. Kondo. Shot selection support system for curling players based on data science. 2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), pp. 4688–4690, 2018. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622176>.