

「コリオリテニス」 ～円筒型スペースコロニー空間における 運動の直感的理解を促す VR ゲームの提案～

松永康佑^{†1} 氏家脩汰^{†1} 残間愛瑠^{†1} 川股幸來^{†1}

概要：回転する円筒型スペースコロニーでは、コリオリ効果により物体の運動が日常的な直感と大きく異なる。本研究では、円筒型スペースコロニー空間を想定した VR テニスを通じて、回転空間における運動の直感的理解を促すインタラクションを提案する。プレイヤーはラケット操作に対して予測と異なるボール軌道を経験し、繰り返しのプレイを通じて身体的な補正や予測の変化を示す。本研究は、物理現象の説明ではなく、体験を通じて知覚や直感がどのように更新されるかに着目し、非日常的な力学環境を体感的に理解するためのインタラクション設計の可能性を示す。

1. 背景

円筒型スペースコロニーに代表される回転空間では、人工重力が生じる一方で、コリオリ効果などにより物体の運動が日常的な直感とは大きく異なる。このような非慣性系における運動は、教科書的な図解や数式、映像による説明だけでは理解が難しく、体験者が直感的に把握することは容易ではない。

一方、VR を用いた体験型コンテンツは、身体運動と視覚的フィードバックを結びつけることで、抽象的な概念を体感的に理解させる手段として注目されている。特に、操作結果が予測と乖離する状況は、利用者の知覚や行為の修正を引き起こし、直感の更新を促す可能性がある。しかし、回転空間における運動特性を、身体的体験を通じて提示するインタラクションの設計については、十分に検討されていない。

2. 目的

本研究の目的は、円筒型スペースコロニー空間を想定した VR テニスを通じて、回転空間における運動の直感的理解を促すインタラクションを提案することである。本研究では、物理現象を正確に説明・可視化することを主目的とせず、プレイヤーの操作とその結果とのズレを体験させることで、身体運動や予測がどのように変化していくかに着目する。これにより、非日常的な力学環境において、人間の知覚や直感がどのように再構成されるかを示し、体験を通じた理解を支援するインタラクション設計の可能性を明らかにすることを目指す。

3. 関連研究

回転空間や人工重力環境における物理現象は、O' Neill による円筒型スペースコロニーの提案^[1]以降、コリオリ効

果を含む非慣性系の運動として理論的に整理されてきた。しかし、これらは観察を中心とした理解を目的としており、利用者自身の身体運動を伴う体験的理解には十分に踏み込んでいない。

一方、VR を用いた体験型学習に関する研究では、没入的環境が概念理解や学習意欲に与える効果が報告されている^[2,3]。また、身体運動と知覚の関係に着目した研究では、操作結果と予測とのズレが運動学習や知覚の変化を引き起こすことが示されている^[4,5]。しかし、これらの多くは日常的な慣性系を前提としており、回転空間のような非日常的な力学環境を対象としたものは限られている。

本研究は、円筒型スペースコロニー空間を想定した VR テニスを通じて、回転空間における運動に対する直感や身体的補正の変化を体験的に提示する点に特徴がある。可視化や説明を主とする従来研究とは異なり、身体的インタラクションを通じて知覚や直感がどのように更新されるかに焦点を当てる点で新規性を有する。

4. システム概要

本研究では、円筒型スペースコロニー内部を想定した回転空間を VR 上に構築し、その内部でテニスを行う体験型インタラクションを実装した。仮想空間は円筒状の内壁を地面とし、人工重力が常に地面に対して垂直に作用する環境として設計されている。

本研究では、フィールドを変形させるためのパラメータ θ を用いて bend 変形処理を実装した。図 1 に θ の値に応じてテニスコート形状がどのように変形するかを示す。 θ は、3DCG ソフトウェアにおける bend 変形と同様に、空間形状を軸方向に沿って曲げる量を角度で指定するパラメータである。 $-360^\circ < \theta < 360^\circ$ の範囲で変形させることができ、 $\theta = 180^\circ$ のとき、テニスコートは半周分曲げられ、プレイ空間全体が円筒状の形状となる。

^{†1} 札幌市立大学

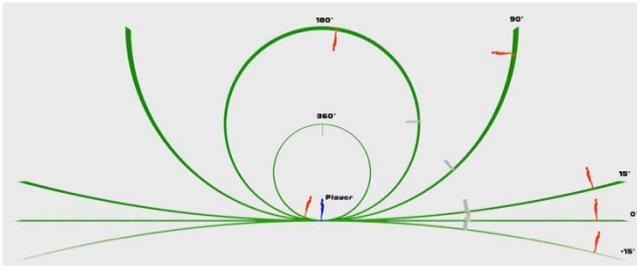


図1 bend角 θ によるテニスコート形状の変形
赤・青の人はプレイヤーと対戦相手の位置関係を示す

同時に、空間全体は任意の角速度で回転しており、ボールの運動には回転系特有の力学的影響が生じる。

本システムでは、曲げ角度および角速度をパラメータとして制御可能であり、値に応じてプレイヤーから見たボールの軌道が変化する。これにより、同一の操作であっても状況に応じて異なる結果が生じ、プレイヤーの予測と視覚的結果との間にズレが生じる。

プレイヤーは Oculus コントローラを用いてラケット操作を行う。視覚的には、地面方向の重力は常に安定して知覚される一方で、ボール運動のみが非直感的な挙動を示す構成とすることで、回転空間特有の運動特性が強調される。

本システムにおける対戦相手キャラクタは、返球などの自律的な行動を行わず、空間構造や相対位置を知覚させるための視覚的参照として配置している。

5. シーン設計

本研究では、回転空間における運動の直感的理解を促すためのインタラクションとしてコリオリ力を感じやすい球技の中からテニスを採用した。競技選択にあたっては、以下の4条件を考慮した。「ルールや動作の基本が馴染み深いものであること」「一人での体験でも、成立すること」「大きな移動が伴わないこと」「プレイエリアを円筒形に変形したときに適度なサイズになること」

サッカー、バスケットボール、野球なども候補として検討したが、これらはコートやフィールドが広く、回転空間の特性を体験として把握するには適さないと判断した。一方、テニスは比較的にコンパクトなコートサイズで成立し、ボールの軌道変化を視覚的・身体的に捉えやすい。テニスコートを仮に長辺31.4メートルとすると、 $\theta=180^\circ$ で曲げたときに、円筒形の直径が10メートルとなる。以上の理由から、本研究ではテニスが回転空間における運動特性を体験的に提示するインタラクションとして最適であると結論づけた。

本システムにおけるプレイ内容は単純で、プレイヤーは相手コートから打ち出されるボールを、ラケットで相手コートへ打ち返す操作のみを行う。得点や勝敗といった競技的要素は重視しておらず、操作の複雑さが体験に影響しないよう設計した。円筒形のコートでは、前へ打ち返すべき

か上へ打ち返すべきかなどが問題になる。単純な目標とすることで、ボール軌道の変化や空間知覚の違いそのものに注意が向く構成とした。

6. 観察された行動や体験

本研究の原型となるVRテニスは、2025年9月のオープンキャンパスにおいて一般来場者を対象に体験展示を行った。同年11月にはAIXR Creative Awardに出展し、審査員および一般参加者に体験してもらった。これら複数の展示を通じて、専門家及び、一般利用者を含む幅広い層の反応や行動を観察する機会を得た。

図2に体験時に利用者がどのような空間構造を知覚していたかを示すため、円筒型スペースコロニー空間を横から俯瞰した様子を示す。中央のキャラクタは空間に浮かぶ観客席である。観客席および地球は、プレイヤーからは視界の端に見え、空間把握の助けとなる。



図2 円筒形の横から全体を俯瞰した様子

図3に示すように、本システムではプレイヤー自身の視点から、通常のテニスとは異なる空間構造および運動の見え方が体験される。ボールの軌道はプレイ中にリアルタイムで可視化されており、操作結果と視覚的フィードバックの対応関係を即座に知覚できるよう設計している。

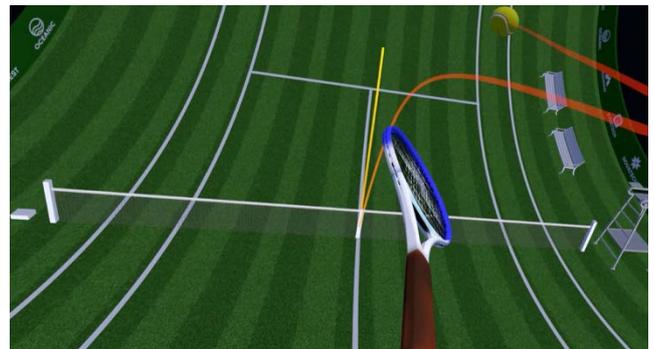


図3 プレイヤー視点から見たプレイ中の様子

9月の段階では、円筒型スペースコロニーの回転パラメータを手動で調整していたが、調整の手間が大きく、体験の一貫性を保つことが困難であった。そこで、 θ を 15° 、 90° 、 180° 、 360° 、 -180° の値に設定し、段階的に変化させる方式へと変更し、各値におけるボールの飛ぶ角度や、

速度を調整した。このような設計とした理由は、 θ の変化に伴うボール見かけ上の速度変化が大きく、頭上高くバウンドして打ち返せないなど、テニスゲームとして成立しない軌道が生じるためである。また、 0 度付近では、回転空間の実装上、数値的に挙動が不安定になるため、 $\theta=15^\circ$ を最小値としている。この状態で、通常のテニスに近い感覚の VR テニスに慣れた上で、 $\theta=90^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ へと移行する構成とした。

$\theta=90^\circ$ の条件では、相手キャラクターが自分から見て仰角約 45 度の位置に存在するように知覚され、図 2 に示す $\theta=180^\circ$ では真上、 360° では自分の背後に相手が存在するようになる。 θ はプレイ中にスムーズに変化するため、変化の瞬間には驚きの声が多く観察された。一方で、 360° に達した際には「わけがわからない」といった反応も聞かれた。本研究では、このような状態を、日常的な空間知覚や運動直感が揺さぶられている結果であると捉えており、設計意図に沿った正しい体験結果であると考えている。

また、ボールを追って見上げる動作を繰り返すことで、首の疲労や負担を訴える参加者も多く見られた。さらに、体験に没入することでラケットを大きく振り回したり、移動可能範囲の限界に達したりする行動も頻発した。これらの行動は、仮想空間内の運動が現実の身体運動として強く知覚されていたことを示しており、回転空間における運動体験が高い没入感を伴って成立していたことを示唆している。(図 4)



図 4 体験中に観察された行動の例

(左：上方を見上げる動作，右：大きなラケット動作)

本研究では、回転空間における運動体験を段階的に変化させる設計を採用した。 θ を 15° から $90^\circ, 180^\circ, 360^\circ$ へと徐々に変化させる構成は、ユーザー体験における驚きや発見を強調することを意図したものであるが、その有効性について定量的な根拠を事前に設定したものではない。しかし、実際の展示体験においては、段階的な変化によってプレイヤーが一つ前の状態との違いを明確に知覚しやすくなり、 θ の変化の際に歓声や驚きの反応が多く観察された。これは、急激な変化よりも、比較可能な差分を体験として提示する設計が、知覚の更新を促す可能性を示唆している。

7. 考察

回転空間における運動は、日常的な空間知覚や運動予測と根本的に乖離しており、その理解は容易ではない。本システムが意図したのは、統合的な理解を与えるのではなく、むしろ直感が破綻する状況を体験させることで、利用者自身の知覚が揺さぶられる状態を生み出すことである。このような混乱を示す客観的な反応は、設計意図が体験として成立していたことを示す重要なフィードバックであると考えられる。

8. 今後の展開

体験中に首を大きく見上げる動作が繰り返され、首の負荷を訴える参加者も多く見られた点は課題として挙げられる。改善案として、*redirected walking* に代表される知覚誘導手法を応用し、実際には首を 90° 以上曲げなくても、 45° 程度の動作で同様の空間知覚が得られるような設計が考えられる。これは、没入感を維持しつつ安全性と快適性を両立させるための重要な検討課題である。

また、打球時にコントローラの振動をつけたほうが良いという指摘もあり、今後、実装する予定である。

- [1] O'Neill, G. K. "The High Frontier", 1976.
- [2] Chris Dede, "Immersive Interfaces for Engagement and Learning", *Science*, Vol. 323, No. 5910, pp. 66–69, 2009.
- [3] G. Makransky, S. Petersen, "The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality", *Educational Psychology Review*, Vol. 33, No. 3, pp. 937–958, 2021.
- [4] M. Wilson, "Six Views of Embodied Cognition", *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 9, No. 4, pp. 625–636, 2002.
- [5] M. Rietzler, F. Geiselhart, et al., "Breaking the Tracking: Effects of Tracking Errors on VR User Experience", *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems Paper No.128*, pp. 1-12, 2018.