



# 目は口ほどにものを言う

## —VR 投球における視線データを用いた内的状態推定—

User State Estimation Using Gaze Data Synchronized with Action Phases in a VR Throwing Task

村上遥, 稲邑哲也

Haruka MURAKAMI, Tetsunari INAMURA

玉川大学 脳科学研究所 (〒194-8610 東京都町田市玉川学園 6-1-1, hmurakami0418@gmail.com)

**概要:** 本研究では VR ボール投げ・的当て課題を用い、1 回の投球動作における視線データの時間的変化を動作データと同期させて分析した。ボール投げ群は的当て群に比べ人の注視点の遠近を表す視線輻輳 (Vergence) の変化幅が小さい傾向にあり、これは先行研究で多く報告されてきた VR 内における距離の過小評価現象を生体的に支持する結果となった。また、瞳孔径に関してはピークのタイミングに群間差が見られ、ボール投げ群で投球動作中が最も集中していたのに対し、的当て群では結果の確認に注意が向けられていた可能性が示唆された。

**キーワード:** Virtual Reality, 視線分析, 過小評価現象, エクサゲーム

### 1. はじめに

近年、VR を用いたリハビリ支援や行動変容促進、学習環境の構築といった体験型アプリケーションの実用化が進む中、ユーザの体験を評価・分析する技術的基盤の重要性が高まっている。これまでこうしたアプリケーションのユーザ状態の評価には、主にアンケート方式が採用されてきた。たとえば、*presence* や *ownership*、*agency* といった感覚的要因は、タスク終了後に被験者が主観的に回答する形式で測定されることが多く、実験報告や VR 応用研究の中でも定型化されたアンケートスケールに依存した評価手法が一般的である [1], [2], [3]。しかし、こうしたアンケート依存の評価にはいくつかの問題点が存在する。第一に、アンケートはタスク後に実施されるため、体験中に被験者が感じていた心理的・感覚的状态を正確に記憶し、再現することが困難である。とくに、本人が意識していなかった感覚や、言語化しづらい体験は、アンケート結果には反映されにくい。第二に、得られる情報が離散的かつ定型化されており、連続的な状態変化を反映しにくいことから、システムによる即時適応やフィードバック設計に活用するには限界がある。さらに、アンケートの質問項目はあらかじめ固定されており、タスク中に発生する予期せぬ心理的变化や、個人差に応じた動的な評価を行うことが難しい。

このような課題を克服するためには、よりリアルタイ

ム性が高く、被験者の自覚を伴わない変化にも反応できる評価手段が求められる。その候補として注目されているのが、非侵襲的かつ連続的に取得可能な生体情報の活用である。特に、VR HMD に搭載されたアイトラッカーを用いた視線情報の取得は、ユーザの状態をリアルタイムに評価する手法として近年注目されている [4], [5]。視線情報には、注視点や視線速度だけでなく、瞳孔径や視線輻輳 (Vergence) といった多次元の情報が含まれ、これらは心理学・神経科学の分野において、集中状態、覚醒度、認知負荷、緊張といった状態の指標となることが報告されている [6], [7]。特に、瞳孔径変動は Task-Evoked Pupillary Response (TEPR) として古くから研究されており、タスク誘発性の認知負荷に即応する生理的反応として信頼性が高い [6]。近年では、視線情報をもとにユーザの学習状態をリアルタイムに推定し、読み取り速度や内容提示を調整する Adaptive VR Reading System のような応用事例も報告されている [8]。また、リハビリテーションや学習支援を目的とした VR 環境において、視線速度や注視パターンから認知的努力や疲労の兆候を検出する研究も進んでいる [9]。

本研究は、こうした先行研究を踏まえ、ユーザの精神・感情・認知状態を従来のアンケートやパフォーマンス評価に頼らず、生体計測によって連続的かつ即時的に評価できる指標の構築を目指し、他の生体指標に比べて運動

タスクでも運動の影響が出にくいという観点からも視線指標を用いたユーザの内部状態に関する評価について取り組む。生体指標による客観的、連続値によるデータ評価が可能になれば、状態の可視化やフィードバックに基づいたリアルタイムのパーソナライズが実現でき、ユーザにとってより快適かつ適応的な VR 体験の設計が可能となる。

## 2. 方法

### 2.1 方針

本研究では、視線データからの被験者の精神・認知・感情などの内部データの取得の第一歩として、VR 空間内でのボール投球タスクを一例とし、繰り返し動作を伴う運動タスクにおいて各視線指標がどのように変化するかを観察した。一人のユーザの経時データにおける変化を見るためにはタスク特有の視線指標の変化を先に取得する必要があると考え、本稿ではボール投げタスクとボール的当てタスクという動作としては似た課題を設定し、ボールを投げるというタスク自体や軽微なタスクの違いがどのように視線指標に影響を与え、そこから何が読み取れるかということを検証した。試行中に記録された視線データおよび運動データを用い、タスク群ごとの平均的な視線・動作プロファイルを可視化・分析した。

### 2.2 被験者およびタスク条件

分析に用いたデータは、筆者らが先行研究として実施した VR におけるボール投球実験に基づくものである [10]。VR ボール投げアプリケーションは HMD に Vive Pro eye (HTC 社)、ソフトウェアに Unity を用い、トラッキングに Vive base station と 2 台の Vive Tracker (ver.2) を用いている。トラッカーは被験者の利き手の肩と手のひらにバンドで固定して装着し、被験者は椅子に座った状態で手に Vive Tracker を持った状態のままボールの下手投げ動作を行い、それが VR 内のボール投げ動作に反映されるという仕組みである。先の実験における本来の実験目的はシステムの違いが被験者のタスクパフォーマンスや精神に与える影響を検証するためボール的当て群 3 群とボール投げ群 1 群で比較検証をしたが、タスク内で実施することは共通しており大きな驚きなどの感情を伴う違いは実験群間で存在しないため、今回は簡易的にタスクの違いのみで実験群を 2 つに分け、視線分析を行なった。今回の実験群はやや遠方に表示されている的に向かってボールを当てる的当て群 (n = 28) とボールを可能な限り遠くに投げるチャレンジをするボール投げ群 (n = 4) の 2 群である。

### 2.3 データ記録と処理

主なデータとして、利き手の手のひらの Vive Tracker から得られた動作データログと、Vive Pro Eye に搭載されている視線記録機能を用いて取得された視線データログを用いた。ログには、以下の各種指標が含まれている。なお、ボールの投球方向を Z、垂直方向が Y 軸となっている。

- 運動関連指標：手の前後方向位置 (Hand position Z)、ボールの速度 (Debug ball velocity Y)、手首の折り曲げ方向の回転 (Hand rotation Z)



図 1: VR ボール下手投げの様子。

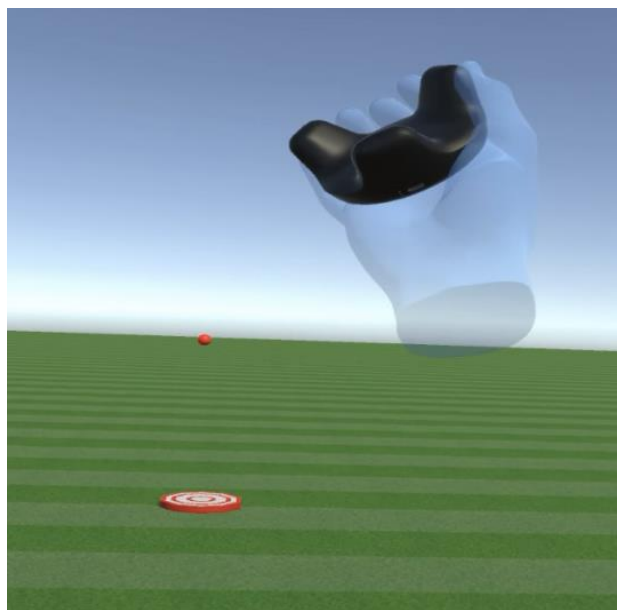


図 2: ユーザー目線の VR ボール投げの様子。画像はボール的当てタスクであり、ボール投げ群の場合にはこの的が表示されていない風景となる。

- 視線関連指標：視線速度 (Gaze speed)、両眼輻輳 (Vergence)、瞳孔ジッター (Pupil jitter)
- 瞳孔・瞬き関連指標：瞳孔径 (Pupil diameter)、目の開き具合 (Eye openness)、瞬き (Blink flag)

これらのデータはすべて、1 投球動作を起点から終点まで含む単位として整理された。各投球試行の時系列データを、1 投球を指標として正規化した時間軸 (normalized time: 0.0 ~ 1.0) に揃えた上で、同一被験者内で平均化を行い、「1 投球平均プロファイル」を作成した。その後、同一群に属する全被験者の全投球プロファイルを再度平均化することで、「群レベルの平均プロファイル」を得た。こうすることにより、個別試行でなく全体傾向を表現している。

### 2.4 可視化およびイベント検出

平均プロファイルは、運動・視線・瞳孔の 3 カテゴリに分け導出した。また、運動データをヒントに 1 投球動作における以下の 4 つの主要イベント (Reset、Throw start、

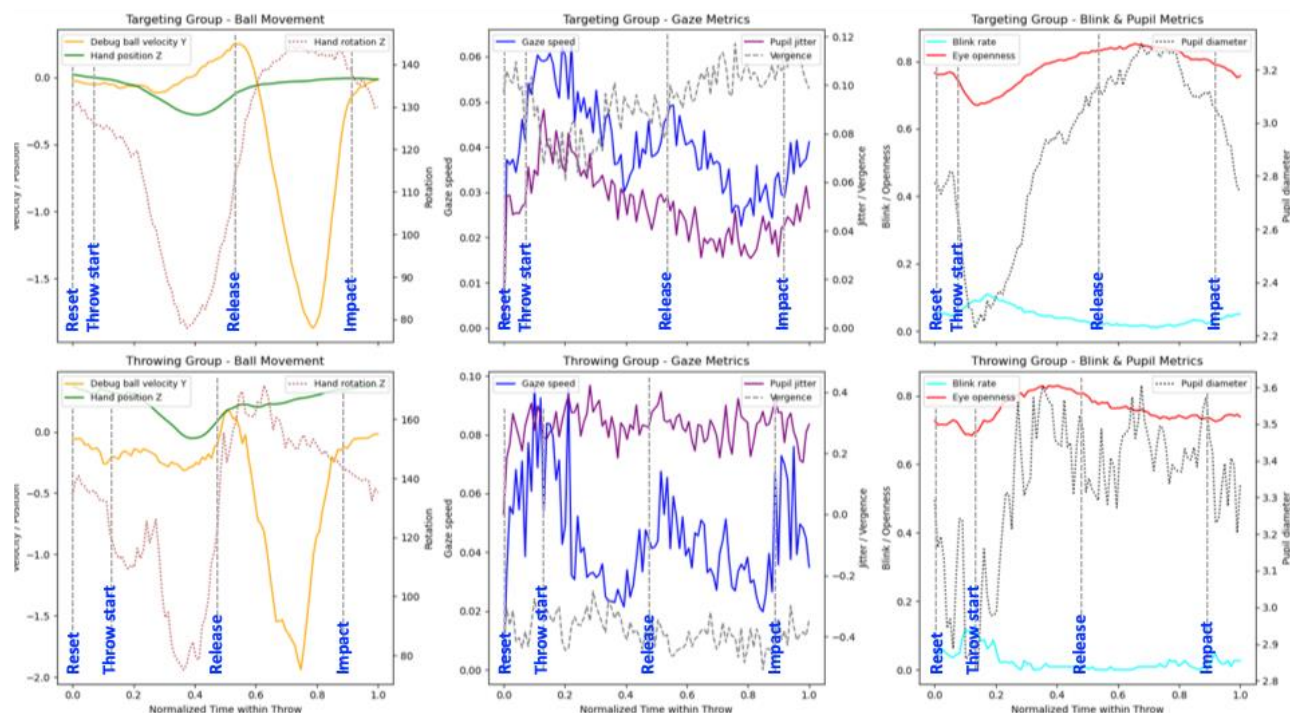


図 3: VR ボール投げ 1 投球における動作および視線データ（上段：的当て群、下段：ボール投げ群）

Release、Impact）を抽出した。

- **Reset**: ボールを被験者の手元に移動させた瞬間。時系列の先頭時点（normalized time = 0.0）とした。
- **Throw start**: Release に至る動作の直前から腕が後方に引かれたタイミングを事後的に定義したものであり、データ上では手の前後位置が変化し始めた最初の点とされた。
- **Release**: あらかじめ設計された投球条件（初速度と角度）を満たす動作が実行された時点を示す。
- **Impact**: Release 後にボールが的もしくは地面にぶつかった瞬間（内部データ Debug ball position Y が 0 となった時）と定義された。

ただし、これらのイベントはいずれも群平均プロファイルでは平均化の影響で条件に合致する時点がなかったりズレがあるため、次章の平均化後の結果への適用では近似を行い、自動的に検出したタイミング傾向として導出した。

### 3. 結果

運動・視線・瞳孔の 3 カテゴリーの的当て群およびボール投げ群、結果を図 3 に示す。各グラフは時間軸に沿った群平均の時系列変化を示している。統計的検定は今回は行っておらず、下段のボール投げ群は上段よりもデータ量が 7 分の 1 しかないため、ノイズが大きく出ている。4 つの主要イベント（Reset、Throw start、Release、Impact）は運動データ記録からそのタイミングを導出し、プロファイル上には 1 投球動作における以下の灰色の垂直破線とラベルで重ねてイベントタイミングを表示した。

運動指標に関して、両群ともに「Throw start」以降で手の前後位置（Hand position Z）および回転（Hand rotation Z）が大きく変化し、ボールリリースに向けて手が前方へ動

く典型的な投球動作を示したが、ボール投げ群では手首の折り曲げ動作（Hand rotation Z）が 2 段階で起きているのに対し、的当て群ではスムーズに徐々に手首の折り曲げを行なっているという違いが出た。また、的当てタスクの方がボールを手にしてから投球動作（Throw start）を開始するまでの時間が短かく、後ろに腕をふりかぶってから投げるまでの時間に関しては長い傾向にあることが図 3 から観測された。

視線指標においては、Gaze speed は両群共に似た傾向を示し、Reset 以外の全てのイベントのタイミングで Gaze speed が極大点を迎えて投げ動作開始時（Throw start）にピークを迎え、各イベント間では値が低下する傾向が見られた。ジッターリング Pupil jitter はボール投げ群で顕著に高く、全動作でほぼ一定の傾向が見られた。一方、ボール的当て群では投げ動作開始直後にピークを示し、ボールが落下するまでは値が低下傾向を示した。両眼輻輳 Vergence については、ボール投げ群では大きな下降、上昇トレンドは見られなかったが、ボール的当て群では Reset 後に値が低下し、投球動作開始（Throw start）後しばらく値が低下し続けてからボール落下 Impact まで上昇トレンドに転じた。また、値もボール投げ群が平均 -0.4 程度であるのに対し、ボール的当て群では 0.1 程度と大きかった。

瞳孔関連指標では、Eye openness はボール投げ群においては投球動作中にピークを迎え、その前後はほぼ一貫して上昇・加工トレンドであったのに対し、ボール的当て群では投げ動作開始直後に値が低下し、投げ出されたボールが空を飛んでいる間にピークを迎えた。瞬き Blink rate は両群ともに投球動作開始 Throw start 前後で急上昇してピークを迎える傾向が見られ、ボール投げ群では動作開始前、ボ

ールの当て群では手を前に投げ出すタイミングで最大となり、緊張のタイミングがタスク間で異なり、その取得が可能であることが示唆された。瞳孔径 Pupil diameter の変化は全視線指標の中で最も顕著であり、両群とも投球動作開始 Throw start 直後に値の急降下が見られ、その直後に急上昇するという傾向が見られた。しかし、ボール投げ群では投球動作中に値のピークが見られたが、的当て群ではボールを投げ出して落下するまでの中間地点にピークが来ているという違いが見られた。

#### 4. 考察

最も顕著であった結果は、両眼輻輳 (Vergence) のタスク間における違いである。Vergence は両眼の視線の交差角度から奥行きを推定する手がかりであり[6]、値が負方向に大きいほど、視線はより近くの距離に収束していることを意味する。今回の結果では、ボール投げ群では Vergence が一貫して負の値で安定し、全体を通してほとんど変化が見られなかった。これは、視線が常に近距離に向けられており、映像上のボールの距離変化や背景の奥行き表示が視線行動に反映されていなかったことを示している。一方、的当て群では Vergence が正の値を中心に推移し、動作のフェーズに応じて明確な変動が見られた。ボール投げ群では的を表示しておらず明確な注視点が存在しないことから、これは先行研究で「オブジェクト数が少ないと VR 内での距離を小さく見積りやすい」と言われている距離の過小評価現象を生体的に支持する結果となった。

また、瞳孔径の変化は、認知的および情動的負荷のタイミングの違いを示していた。動作開始直後に両群とも一過的な収縮と拡大が見られたが、ボール投げ群ではこの拡大が投球動作中に出現し、的当て群では、ボールの飛翔後に的に当たるかどうかを見守るタイミングでピークが現れた。瞳孔径の拡大は Task-Evoked Pupillary Response (TEPR) として、集中状態や覚醒度の変化を反映することが知られており[8]、これらの違いは、投球群では動作遂行中に最大の集中が求められていたのに対し、的当て群では視覚的結果の確認に注意が向けられていた可能性を示している。

他の視線指標としては視線速度 (Gaze speed) は、ボールの挙動が変化する各イベント周辺で一時的な増加が見られた。このことから、視線移動は対象物の状態変化と同期して起き、以降は注視が維持されるという視覚的反応の切り替えが行われていたと解釈できる。瞬目率 (Blink rate)、視線ジッター (Pupil jitter)、まぶたの開き (Eye openness) の3指標は、それぞれ異なる動作フェーズに応じて波形が変化し、タスク間で変動パターンにも違いが見られた。これらはいずれも短時間で変化する反応であり、視覚的緊張や集中状態の微細な違いが、各タスクの動作フェーズごとに異なる形で生じていることを示している。とくに、瞬きのタスクごとに異なるタイミングの急増は、注意や緊張の

ピークが行動内容に依存して変化していることを示唆しており、これらの指標を組み合わせることで、内的状態の動的変化をより精緻に読み取る可能性が示された。

本研究は、VR 内での一連の動作タスクにおいて、視線および瞳孔指標が動作中の知覚的・心理的状态の違いを反映して変化することを明らかにした。これらの指標が個々の動作フェーズとどのように同期するかを示すことにより、今後、主観報告に依存しないユーザ状態の評価や、システムの適応制御に関する基礎的知見として活用されることが期待される。

**謝辞** 本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2034】の支援を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] M. Slater, "Measuring Presence: A Survey of Presence Questionnaires," *Virtual Reality*, vol. 24, no. 1, pp. 1–16, 2020.
- [2] D. Roth and M. W. Latoschik, "Construction of the Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ)," in *Proc. of CHI 2022*, ACM, pp. 1–13.
- [3] S. Gonzalez-Franco and A. Steed, "Measuring virtual embodiment: A review," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, p. 74, 2019.
- [4] S. Gonzalez-Franco and A. Steed, "Measuring virtual embodiment: A review," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 6, p. 74, 2019.
- [5] M. Mikhailenko, K. Reiner, and A. Bulling, "Eye Tracking in Immersive Virtual Reality for Education: A Review," *Front. Educ.*, vol. 7, p. 856229, 2022.
- [6] D. Kahneman and J. Beatty, "Pupil Diameter and Load on Memory," *Science*, vol. 154, no. 3756, pp. 1583–1585, 1966.
- [7] J. Lee, B. R. Thomas, and K. R. Rao, "Measuring Cognitive Load in VR Training via Pupillometry," *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 27, no. 5, pp. 2553–2562, 2021.
- [8] M. Grootjen, C. Dogan, and T. Kosch, "Adaptive RSVP Display Using Pupil Dilation," in *Proc. of CHI 2024*, ACM, pp. 1–10.
- [9] T. Sun et al., "Gaze-Based Cognitive Load Estimation in VR Learning," in *Proc. of IEEE VR 2023*, pp. 567–576.
- [10] 村上遥、稲邑哲也、"VR 投球における White Lie がパフォーマンスに与える影響の検討"、第 29 回バーチャルリアリティ学会大会、2024 年 9 月 11 日、名城大学天白キャンパス、名古屋