

足部反応速度トレーニングにおける VR 環境の妥当性評価と効果分析

遠藤 惟織^{1,a)} 中島 達夫^{1,b)}

概要：足部の反応速度は、スポーツや日常生活における迅速な状況判断に不可欠な要素である。しかし、足部の反応速度を対象にした研究は限られている。本研究では、足部反応時間を Virtual Reality (VR) 上で計測できるシステムを構築し、その正確性とトレーニング効果を検証した。システムは、VR 環境内に色に変化する円形オブジェクトを提示し、色に変化してから足先がオブジェクトに触れるまでの動作を、反応時間 (VR 計測時間) として計測できるものである。この VR 計測時間の正確性を検証するために、円形オブジェクトの色が変化してから足先が地面に接地するまでの動作をスローモーションカメラで撮影した。そして、得られた映像から反応時間 (映像解析値) を計測し、VR 計測値との比較を行った。その結果、VR 計測値と映像解析値の間には高い一致度が確認された。また、提案システムのトレーニングの有用性を検証するために、システムを用いて 5 日間のトレーニングを実施した。その結果、足部反応時間が統計的に有意に短縮し、提案システムを用いた足部反応速度トレーニングの有用性が示された。

1. イントロダクション

人間の反応速度は、スポーツにおける迅速な状況判断や、日常生活での危険回避において重要な役割を果たしている [1][5][7]。さらに、適切なトレーニングにより反応時間を短縮し、パフォーマンスを向上させることが可能である [1][5][7]。

これまでの研究では主に手と目の協調 (ハンド・アイ・コーディネーション) に焦点が当てられてきた [5][1]。しかし、足と目の協調 (フット・アイ・コーディネーション) も、状況判断や、危険回避において重要であるが、この分野を対象とした研究は限られている。そのため、本研究ではフット・アイ・コーディネーションに着目する。

足部を用いた反応時間を測定するためには、従来の方法では特別な装置や多額の資金が必要とされることが多かった [8]。しかし、近年の Virtual Reality (VR) 技術の進展により、足部の反応時間を、統制された環境下で、従来の測定手法より低コストかつ簡易に、繰り返し計測することが可能になりつつある。

よって本研究では、VR 環境を活用した足部反応速度トレーニングシステムの構築を目指し、トレーニングの有用性を検証するために、足部反応時間を評価できるシステムを構築した。正確な反応時間の計測データは、トレーニ

ング効果を定量的に評価するための基礎情報を提供し、適応的なトレーニングプログラムの設計を可能にする。本研究は、VR 環境内で正確性のある足部反応時間を計測可能にし、その期間的な計測結果よりトレーニング効果の有用性を検証することを目的とする。

ここで、トレーニング効果の有用性を検証するために、筆者自身を参加者として、右足と左足それぞれについて 5 日間、合計 10 日間にわたりデータを収集した。さらに、それぞれの初日と最終日の反応時間を比較することで、有用性を検証した。これにより、今後のトレーニングシステム開発に向けた有用な知見を提供することを目指す。

2. 関連研究

3. DirectRT プログラムに基づく反応速度評価方法

これまでに多くの研究で、反応時間を測定するさまざまな手法が提案されてきた [1][2]。その中でも DirectRT プログラムは、多様な条件下で正確に反応時間を測定できるツールとして知られている。DirectRT プログラムを用いた代表的な実験手法として、画面上のターゲット (例：黄色のボックス) を被験者が視認し、可能な限り迅速にクリックまたはタップして反応時間を測定する方法が挙げられる [6]。この手法は testlabvisual と呼ばれ、反応時間を正確に計測可能であることが示されている。

従来の研究では、DirectRT プログラムを用いた評価は主

¹ 早稲田大学基幹理工学部情報理工学科

^{a)} i.endo.315@dcl.cs.waseda.as.jp

^{b)} tatsuo@dcl.cs.waseda.as.jp

に手と目の協調動作（ハンド・アイ・コーディネーション）に焦点が当てられてきた。一方、足と目の協調動作（フット・アイ・コーディネーション）を対象とした研究は非常に限られており、その主な要因として標準化された測定手法やツールの不足が考えられる。

そこで本研究では、testlabvisual の手法をフット・アイ・コーディネーションの測定に応用し、足部の反応時間を測定可能なプロトタイプシステムを構築した。本システムの開発により、従来の手法では十分に扱われていなかった足部の反応速度について、新たな知見を得ることが期待される。

4. 実験方法

4.1 システム詳細

本システムは、VR 環境内の床面上に色が変わる円形オブジェクトを設置し、オブジェクトの色が変わってから足が触れるまでの反応時間を測定する。また、VR 内の映像をミラーリングし、円形オブジェクトの色が変わってからつま先が地面に接地するまでの反応時間をスローモーションカメラによって計測する。本システムを用いて2つの反応時間の比較・分析を行う。

4.2 実験環境

本システムは、HMD によってユーザに視覚刺激を提示し、ユーザの足に装着したモーションセンサーによって足の動きを追跡することができる。HMD には Meta Quest 2 を用い、足部動作のトラッキングには Meta Quest 2 のコントローラを用いた。アプリケーションの開発は Unity (2022.3.16f1) を用いた。スローモーション映像撮影には iPhone 12 Pro Max を用い、平均 240FPS 撮影速度を確保することで、極めて微細な時間差を計測可能とした。また、VR 環境内の映像を iPad にミラーリングしている。また、足部動作のトラッキングに際しては、VR コントローラを 3D プリンターで成形した専用のアタッチメント [4] を用いて靴（サンダル）部分に固定した。この工夫により、足先の位置を VR 環境内で正確かつ安定的に計測可能となった。実験で用いた装置を図 1 に示す。



図 1 実験で用いた装置（VR コントローラと 3D プリントアタッチメントの固定例）

4.3 実験手法

本実験は、実験参加者は筆者自身として実施した。タスク手順を以下に示す。

- (1) **初期姿勢**：参加者は VR 環境内でリラックスした直立姿勢をとり、所定の位置で待機した。初期姿勢の視点を図 2 に示す。
- (2) **初期刺激提示**：VR 環境内の床面上に円形オブジェクトを配置し、初期状態は黄色で表示された。
- (3) **色変化刺激**：円形オブジェクトは、5.0～8.0 秒のランダムな遅延経過後に黄色から緑色へと変化するよう設定された。
- (4) **反応動作**：参加者は色変化を視認したら、可能な限り迅速に指定された足（右足または左足）で円形オブジェクト上へ足先を移動・接触させた。

(1) から (4) までは 1 タップ反応とする。本実験では、右足および左足でのタップ反応を別々に計測した。具体的には、1 日あたり 100 回の試行を行い、これを 5 日間継続する。つまり、右足・左足あわせて 10 日間にわたる計測期間で計 1000 回の反応時間データを収集した。

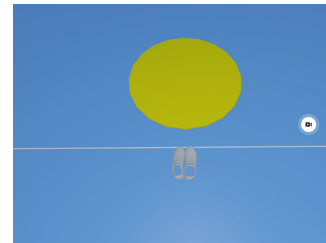


図 2 本実験における VR 環境内の視点例（参加者の視界イメージ）

4.4 解析手法

本実験では、VR 環境内で計測された反応時間とスローモーション映像解析によって得られた反応時間を比較することによって計測の正確性を評価した。本研究で用いた 2 つの反応時間の定義について以下に示す。

● VR 環境内で計測された反応時間

反応時間は、実験手法で示された 1 タップ反応において、円形オブジェクトの色が緑色に変化してから、円形オブジェクトに足先が接触するまでの時間を VR 環境内で計測された反応時間（以下、VR 測定値）と定義した。

● スローモーション映像解析によって得られた反応時間

スローモーション映像解析では、VR 環境内の映像をミラーリングした iPad を用い、その映像をスローモーションカメラで撮影する。iPad の画面に映った円形オブジェクトの色が緑色に変化してから、つま先が地面に触れるまでの時間をスローモーション映像解析によって得られた反応時間（以下、映像解析値）と定義した。なお、事前の調査により、iPad に映る映像と

VR 環境内の映像には約 0.1574 秒の遅延が発生することが確認されている。この遅延を考慮し、データの補正を行った。

また、データの信頼性を向上させるために外れ値の除外処理を実施した。具体的には、各測定値について平均値から 3 倍の標準偏差を超える値を外れ値とみなし、これらを除外した後、平均値で補正を行った [9]。

5. 結果

5.1 反応時間の正確性の検証結果

図 3 および図 4 に、右足および左足で計測された各試行ごとの反応時間を示す。

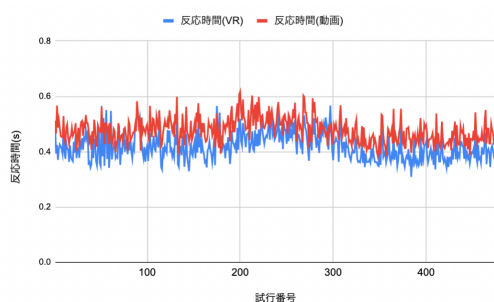


図 3 右足における反応時間の比較

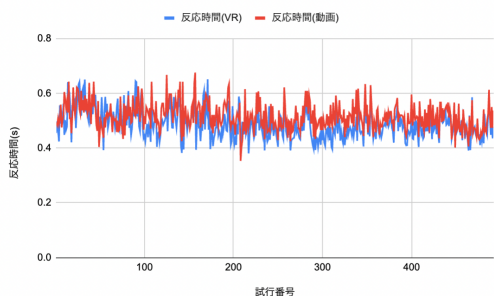


図 4 左足における反応時間の比較

次に、表 1 に、右足および左足における VR 測定値と映像解析値の統計的評価結果を示す。相関係数、カッパ係数、平均誤差、および誤差の標準偏差について、それぞれの値を算出した。

	相関係数	カッパ係数	平均誤差 (秒)	誤差の標準偏差 (秒)
右足	0.7470	0.8706	0.0620	0.0264
左足	0.6900	0.9220	0.0414	0.0272

5.2 左右足の反応時間比較

図 5 は、右足（青線）および左足（赤線）における VR 反応時間を試行ごとに示したものである。

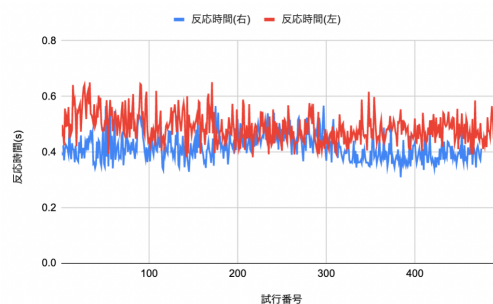


図 5 右足および左足による VR 反応時間比較

5.3 有効性の検証結果

本実験では、初日と最終日の計測結果を比較し、統計的検定を行った。

検定に先立ち、計測データの正規性を確認するためにシャピロ・ウィルク検定を実施した。その結果、いずれの母集団においても正規性が確認されなかった (右足: $p\text{-value} = 1.660 \times 10^{-8} < 0.05$, 左足: $p\text{-value} = 2.802 \times 10^{-8} < 0.05$)。そのため、非正規分布に適したノンパラメトリック検定であるウィルコクソン符号順位検定を用いて、初回と最終日の反応時間の差を評価した。表 2 に、右足および左足におけるウィルコクソン符号順位検定の結果を示す。

表 2 右足および左足におけるウィルコクソン符号順位検定結果

	1 日目の中央値 (秒)	5 日目の中央値 (秒)
右足	0.4181	0.3812
左足	0.5260	0.4724

右足の結果では、初日のデータと最終日のデータの間に統計的に有意な差が認められた ($p\text{-value} = 1.035 \times 10^{-6} < 0.05$)。一方、左足の結果では、同様に初日と最終日の間に統計的に有意な差が認められた ($p\text{-value} = 1.521 \times 10^{-10} < 0.05$)。

6. 考察

6.1 動画と VR の計測結果における相関関係および一致度の考察

図 3 および図 4 の結果から、VR 測定値は映像解析値と相関関係および一致度を示している。右足の結果では、相関係数が 0.7470 で中程度から高い相関関係が確認された。また、カッパ係数が 0.8706 と高い一致度を示した。しかし、誤差平均が 0.0620 秒と一定のずれが認められ、このずれのばらつきを示す標準偏差は 0.0264 秒であった。一方、左足の結果では、相関係数が 0.6900 と右足よりやや低いものの、中程度の相関が認められた。さらに、カッパ係数が 0.9220 と非常に高い一致度を示した。また、誤差平均が 0.0414 秒と右足に比べて小さく、誤差標準偏差も 0.0272 秒であった。しかし、全体的な傾向としては VR 測定値は映像解析値と比較してわずかに短い傾向が確認された。その

要因として、VR システムの設計仕様および解析基準点の不一致が考えられる。本研究で用いた VR システムでは、円形オブジェクトが地面から約 1cm 上方に配置され、つま先がサークルに接触した瞬間に反応時間を記録する設計としていた。一方、映像解析では、つま先が地面に接触した瞬間のフレームを基準としており、実質的には 1cm 下方での検出タイミングが記録されていた。この差異により、映像解析値は VR 測定値と比較して、つま先がサークル位置に到達後、地面に接触するまでの時間分だけ遅くなったと考えられる。したがって、映像解析をより VR 計測と整合的な手法とするためには、VR 環境の設計仕様に合わせ、つま先が地面から 1cm 離れた位置でのフレームを基準とした解析が必要となる。

6.2 左右足の反応時間の差の分析

右足と左足の反応時間は全体的に右足の方がわずかに短い傾向が観察された。この要因としては、参加者の利き足が右利きである場合、右足の方がより迅速な反応が可能であることが挙げられる [3]。このような個人特性が反応時間に影響を及ぼす可能性があるため、今後の研究では、利き足の違いや参加者個人の身体的特徴を考慮した実験デザインが望まれる。

6.3 足部反応速度トレーニングへの応用についての考察

表 2 の結果から、足部反応速度トレーニングの実施により右足の反応時間が改善されたことが示された。最終日の中央値が初日の中央値に比べ短縮されていることから、反応時間の短縮が確認された。同様に、左足でも最終日の中央値が初日の中央値に比べ短縮されていることから、トレーニング効果が明確に示されている。よって、5 日間のトレーニング期間中、両足ともに反応時間が短縮されたことが統計的に有意に示された。このことは、反応時間における反復的なトレーニングが足部反応速度の改善をもたらす、パフォーマンス向上に寄与することを示唆している。また、本実験は筆者自身のみを対象として実施したため、結果の一般化には限界がある。今後は、より多様な参加者を対象とした研究が必要である。

7. 結論と将来展望

本研究では、VR 環境を用いて足部反応時間を計測するシステムを構築し、その正確性と有用性を評価した。また、足部反応動作を撮影したスローモーション映像による反応時間の解析結果との比較や、短期的なトレーニング効果の検証を行い、以下の知見を得た。

第一に、VR 環境で計測した反応時間は、スローモーション映像解析による反応時間と中程度から高い相関関係を示し、カッパ係数の観点からも高い一致度が確認された。これにより、提案した VR 計測システムは、足部反応時間の

評価手段として一定の信頼性を有することが示された。

第二に、5 日間の反復的なトレーニングにより、足部反応時間が統計的に有意に短縮されることが確認された。これは、VR 環境を活用したトレーニングが、反応時間改善を通してパフォーマンスの向上に寄与し得ることを示唆している。

今後は、ユーザ間における個人差や利用環境の影響の調査、さらにはトレーニング期間や頻度の最適化といったさまざまな要素を、より体系的かつ包括的に検証する必要がある。これらの課題の解決により、VR を活用したトレーニングシステムのさらなる精密化と実用性の向上が期待できる。本研究は、その基盤を築く一歩として貢献すると考える。

参考文献

- [1] Aliza Aliza, Irene Zaugg, Elif Celik, Wolfgang Stuerzlinger, Francisco Raul Ortega, Anil Ufuk Batmaz, and Mine Sarac. Eye-hand coordination training: A systematic comparison of 2d, vr, and ar display technologies and task instructions. In *2024 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pages 200–210. IEEE, 2024.
- [2] I Scott MacKenzie and William Buxton. Extending fitts' law to two-dimensional tasks. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 219–226, 1992.
- [3] Timothy M McGrath, Gordon Waddington, Jennie M Scarvell, Nick B Ball, Rob Creer, Kevin Woods, and Damian Smith. The effect of limb dominance on lower limb functional performance—a systematic review. *Journal of sports sciences*, 34(4):289–302, 2016.
- [4] m.ich. Controller holder a for oculus quest2 (both hole), 2021. Accessed: 2024-12-17.
- [5] Sebastian Rutkowski, Mateusz Adamczyk, Agnieszka Pastuła, Edyta Gos, Carlos Luque-Moreno, and Anna Rutkowska. Training using a commercial immersive virtual reality system on hand-eye coordination and reaction time in young musicians: A pilot study. *International journal of environmental research and public health*, 18(3):1297, 2021.
- [6] Jose Shelton and Gideon Praveen Kumar. Comparison between auditory and visual simple reaction times. *Neuroscience and medicine*, 1(01):30–32, 2010.
- [7] Bulent Turna. The effect of agility training on reaction time in fencers. *Journal of Education and Learning*, 9(1):127–135, 2020.
- [8] Teruo Uetake. A study of the training effect on reflexes of the elderly. *KAKEN Research Project*, 2007–2008.
- [9] 井関龍太. 心理学者は反応時間をどう分析するか. *基礎心理学研究*, 38(2):243–249, 2020.