

HMD を用いた輻輳・調節機能訓練システムの提案

長張 快¹ 池田 滉成² 國武 実里³ 橋口 哲志⁴
森田 磨里絵¹ 柴田 史久¹ 木村 朝子¹

立命館大学 情報理工学部¹ 立命館大学大学院 情報理工学研究科²
平成医療短期大学 リハビリテーション学科視機能療法専攻³
立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構⁴

1. はじめに

近年、パソコンやスマートフォンなどのデジタルデバイスの普及に伴い、眼精疲労による視機能低下が社会的な問題となっている。このような視機能低下に対する改善手法として、視能訓練士の指導のもとで行われる視能訓練が知られているが、従来は紙媒体や特定の専用機器を用いた方法が主流であった。

一方、近年の VR (Virtual Reality) 技術の発展により、医療分野への応用が進み、HMD (Head Mounted Display) を用いた視機能訓練の有効性が報告されている[1-3]。しかし、視機能の計測は依然として専用機器や視能訓練士による評価に依存しており、訓練と同時に視機能状態を把握する手法は十分に確立されていない。VR 環境では柔軟な視距離制御や視覚刺激の提示が可能であり、さらにアイトラッキング機能を備えた HMD を用いることで、視線や瞳孔径といった生体情報をリアルタイムに取得・解析できる。これにより、視機能の検査と訓練を同一環境下で並行して実施することが可能となり、このような課題の解決につながる。

そこで本研究では、アイトラッキング機能を備えた HMD を用いて、視機能の検査と訓練を同時に行うシステムを構築する。本稿では、眼精疲労と密接に関連する輻輳機能（内寄せ運動）および調節機能（ピント合わせ）を対象とし、VR 技術の特性を活かした訓練および計測により、その有効性を検証するとともに訓練条件の検討を行う。

2. 提案システム

本システムは、アイトラッキング機能を搭載

Proposal of a Training System for Convergence and Accommodation in an HMD Environment

1 College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2 Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

3 Division of Orthoptics, Heisei College of Health Sciences

4 Ritsumeikan Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

した HMD である HTC VIVE Pro Eye およびゲームエンジン Unity を使用し、調節機能検査である石原式近点計およびアコモドメータを参考に設計した。具体的には、VR 空間において参加者の前方 1 m から参加者に向かって移動するオブジェクトを注視させ、対象が鮮明に見えなくなる、または二重に見えるタイミングでキー入力による回答を行わせる。回答時には、オブジェクト位置座標に加え、視線情報、瞳孔径、注視点の座標、目の開き具合の計 5 種類の目の動きに関するデータを同時に収集可能である。

3. 実験

実験では、HMD を用いた視能訓練の有効性と、訓練条件（オブジェクトの移動速度）の違いによる影響を検討する。オブジェクトの移動速度は、訓練効果だけでなく眼球運動計測の安定性にも影響する重要な要因であるが、既存の設定速度において、訓練効果の検証および計測が成立するかは明らかでないためである。本システムを用い、初期位置（前方 40 cm）から移動する「*」形状のオブジェクトを注視させるタスクを各条件につき 10 回実施した。実験条件として、オブジェクトの移動速度は石原式近点計を基準とした 2.5 cm/s, 1.25 cm/s および 5 cm/s の 3 種類に設定した。参加者は 21~25 歳の正常視力を有する 18 名（男性 14 名、女性 4 名）とした。

オブジェクトの位置座標から算出される調節力 (d: Diopter) の変化と、瞳孔径の変化の 2 点について分析を行った。まず、調節力 d の算出について述べる。本来、調節力は近点距離の逆数から遠点距離の逆数を減じることで求められるが、本実験では参加者全員が完全矯正された状態でタスクを行った。そのため、遠点屈折度を 0 D とみなし、オブジェクトが視認限界（ぼやける、または二重に見える）に達した際の眼球からの距離の逆数として算出した。

また、瞳孔径の変化については、縮瞳量（実験開始時の自然な状態における瞳孔径と、キー押下時すなわち注視時の瞳孔径の差分）を算出し、タスク開始時 1 回目と 10 回目における変化量を評価対象とした。

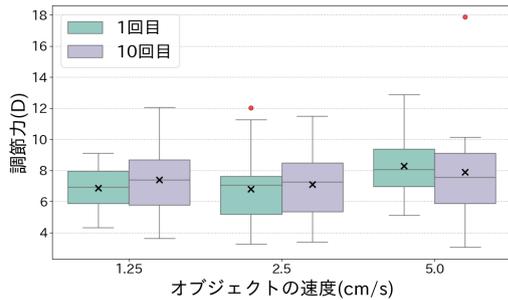


図1 速度条件別におけるタスク開始時と終了時の調節力の比較

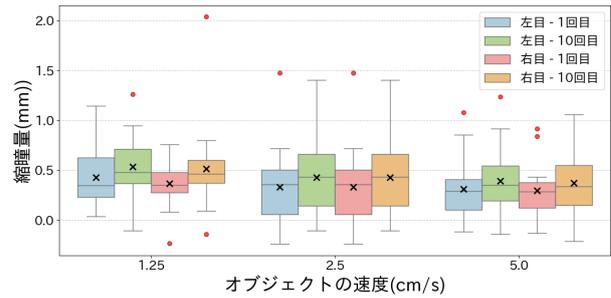


図2 速度条件別におけるタスク開始時と終了時の縮瞳量の比較

算出された各指標について正規性の検定を行った結果、一部のデータにおいて正規性の仮定が満たされなかった。そのため、非パラメトリックな手法である ART (Aligned Rank Transform) 法を用いた反復測定分散分析を実施した。分析は、移動速度 (1.25 cm/s, 2.5 cm/s, 5.0 cm/s) および繰り返し回数 (1 回目, 10 回目) を要因とする 2 要因参加者内計画とした。有意水準は 5% とし、多重比較には Holm 法を用いた。

【調節力の結果】図 1 に移動速度および繰り返し回数における調節力の結果を示す。ART による反復測定分散分析の結果、移動速度の主効果に有意差が認められた ($F(2, 85) = 4.37, p = .016$)。一方で、繰り返し回数の主効果 ($p = .870$) および移動速度と繰り返し回数の交互作用 ($p = .267$) は有意ではなかった。交互作用が有意ではなかったため、繰り返し条件で平均化した移動速度について事後比較を行った結果、移動速度 5.0 cm/s 条件は 2.5 cm/s 条件よりも有意に高い値を示した ($p = .019$)。よって、調節力は移動速度条件によって異なる値を示す傾向が認められた。

【縮瞳量の結果】図 2 に移動速度および繰り返し回数における縮瞳量の結果を示す。左眼の縮瞳量においては、移動速度の主効果 ($F(2, 85) = 3.35, p = .040$) および繰り返し回数の主効果 ($F(1, 85) = 4.18, p = .044$) の双方が有意であった。なお、交互作用は有意ではなかった ($p = .93$)。事後比較の結果、移動速度 1.25 cm/s 条件は 5.0 cm/s 条件と比較して有意に縮瞳量が大きかった ($p = .043$)。また、繰り返し回数については、10 回目の方が 1 回目よりも有意に縮瞳量が増加していることが確認された ($p = .044$)。一方、右眼の縮瞳量については、移動速度の主効果 ($F(2, 85) = 2.58, p = .082$) および繰り返し回数の主効果 ($F(1, 85) = 3.83, p = .054$) は共に有意傾向に留まり、交互作用についても有意差は認められなかった ($p = .997$)。よって、縮瞳量は左眼において移動速度および繰り返し回数の影響を受ける可能性が示唆された。

4. まとめ

本研究では、アイトラッキング機能を備えた HMD を用いた視能訓練システムを構築し、輻輳機能および調節機能を対象として、その有効性と条件の影響を検討した。

実験の結果、調節力および縮瞳量は訓練条件として設定したオブジェクトの移動速度に応じた反応を示した。特に、調節力は移動速度条件によって異なる値を示す傾向が認められた一方、繰り返し回数による影響は確認されなかった。

また、縮瞳量については左眼において移動速度および繰り返し回数の影響が認められたが、右眼では明確な差は確認されなかった。以上より、HMD を用いた VR 環境下での視能訓練および計測は、訓練条件に応じた反応を捉えることが可能であり、本システムの有効性が示唆された。

今後は、個人の調節能力に応じて移動速度を動的に変化させるなど、体験者ごとに最適化された訓練負荷を与える手法の検討が求められる。また、本実験は短期的な計測に留まっているため、今後は一定期間の継続実験を通じて、長期的な効果についても検証する必要がある。

参考文献

- [1] H.-J. Lee et al: "Effectiveness of binocularity-stimulating treatment in children with residual amblyopia following occlusion," BMC ophthalmology, vol. 18, pp. 1 - 6, 2018.
- [2] P. Ziak et al: "Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: preliminary results," BMC ophthalmology, vol. 17, pp. 1 - 8, 2017.
- [3] 河盛真大, 他: "視力改善を目的とした VR ゲームの検討," エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2023 論文集, vol. 2023, pp. 386 - 389, 2023.