

VRを用いた運動技能トレーニングのための 未来のお手本情報提示

佐々木 悠佑^{1,a)} 入山 太嗣¹ 小室 孝¹

概要: 本研究では、VRを用いた運動技能トレーニングにおいて、訓練者が目指すべき目標の動作に加えて、その先の未来の動作をお手本として提示する手法を提案する。提案手法では、未来の動作を提示する未来のお手本が訓練者に対して事前に動作や速さを知覚するフィードフォワードを提供し、時間差で提示される目標のお手本が訓練者とのずれによってフォームやタイミングの正確性をフィードバックとして視覚化する。さらに、速さやタイミングが重要となる技能としてダーツを取り上げ、動作の学習において重要なタイミングを視覚化を行った。その結果、提示されるお手本情報が動作の空間的再現性および時間的再現性を向上させる模倣学習を実現するための手がかりとなることを確認した。

1. はじめに

技能を修得するためには、熟練者のお手本を直接、あるいは動画等で参考にするのが一般的な手段として有効とされている。訓練者は、実際に試行を繰り返すことで技能の修得を図るが、多くの場合トレーニングに費やせる時間やコストは限られている。そのため、効率的なトレーニングの方法が求められている。

これまでに、スポーツ技能等におけるVRトレーニングの有効性が示されている。複雑な空手技である外受けを技能タスクとした研究では、VR空間に指導者の仮想のお手本と訓練者の動作を反映したアバターを提示し、それぞれの比較によるトレーニングを行う[1]。訓練者の全身をトラッキングして可視化するほか、技能に特に重要な部分のみを可視化するなどの実環境ではできない柔軟な学習設計を可能にしている。けん玉を技能タスクとした研究では、VR空間でけん玉の「けん」に対応するコントローラを把持した訓練者が、VR空間のみに存在する玉を用いたトレーニングによって習得したスキルについて現実世界へ十分に転移されることも確認されている[2]。また、VRの利用がトレーニングを行う際の楽しさやモチベーションにポジティブに働くという結果も示されている[3]。このように、VRは技能習得と意欲向上の両面で高いポテンシャルを持つが、その効果を最大化するためには、訓練者に適切な教示情報を与える支援システムの構築が重要となる。

技能トレーニングを支援する教示情報として、ある動

作を実行、修得するために行うべき動作の指示を与えるフィードフォワードや[4]、間違いを正しエラーを最小限に抑えるための手がかりを与えるフィードバックが矢印や色、テキストなどの様々な形で利用されている[5]。これらを適切に提示することで、動作ガイダンスがより効果的なものとなり、訓練者の動作学習の支援と向上に寄与する。

こうした動作ガイダンス手法の中で、仮想のお手本動作を提示し、訓練者にその動作を直接追従させるアプローチがある。指揮動作を技能タスクとした研究では、仮想の指導者が継続的に動作を提示することで訓練者にとっての明示的なフィードフォワードを提供し、その動作を追従することで技能の習得を目指す直感的なトレーニングを可能にしている[6]。アメリカンフットボールの投げ動作を技能タスクとした研究では、お手本動作を訓練者に重畳させて提示することで、訓練者とお手本とのずれを可視化し、理想の動きに修正するための直感的なフィードバックとして利用している[7]。重畳されるお手本動作の速度を段階的に変えたトレーニングを行い、動作のフォームについての純粋な形状のみの類似度である空間的な再現性の向上に効果的であることが示された。

一方で、同研究では、動作の空間的再現性とターゲットへの命中精度・正確性との間には直接的な相関が見られなかったことも報告されている。また、前述の研究を含め、技能トレーニングにおいて仮想のお手本の追従が有効であることが示されたが、動作の再現性についてその時間的な一致や間隔を考慮した評価はされておらず、特に速い動作を含む技能の場合、指導者の継続的な動作提示のみによるタイミング等の時間的な再現は困難である。このような技

¹ 埼玉大学

^{a)} y.sasaki.246@ms.saitama-u.ac.jp

能においても、時間的な再現性を向上させるための手がかりを訓練者に提供し、ターゲットへの命中精度との間の影響を評価する必要がある。

これらを踏まえて、本研究ではVRを用いた運動技能トレーニングにおいて、訓練者が目指すべき目標の動作に加えて、その先の未来の動作をお手本として提示する手法を提案する。提案手法では、未来の動作を提示する未来のお手本が訓練者に対して事前に動作や速さを知覚するフィードフォワードを提供し、時間差で提示される目標のお手本が訓練者とのずれによってフォームやタイミングの正確性をフィードバックとして視覚化する。速さやタイミングに加えて、ターゲットへの命中精度が重要となるダーツの投げ動作を技能タスクとし、トレーニングにおいて重要なタイミングの視覚化を行うことで、動作の空間的再現性および時間的再現性を向上させる、より正確な模倣学習を実現する可能性を検討する。

2. 未来のお手本情報提示

2.1 概要

本研究では、速さやタイミングが重要となる技能タスクとしてダーツの投げ動作を取り上げ、その習得支援を行う。提案手法の概要を図1に示す。提案手法では、VRを用いて訓練者と重なる目標の動作を提示する指導者のお手本と、その先の未来の動作を提示する指導者の未来のお手本を仮想空間に提示する。指導者の未来のお手本が訓練者が行うべき動作の未来を提示することで、訓練者に対して事前に動作や速さを知覚するフィードフォワードを提供する。一方、指導者のお手本は、訓練者とのずれによってフォームやタイミングの正確性を直感的に把握できるフィードバックを提供する。訓練者が未来の動作を追従し、時間差で提示される指導者のお手本によって、リアルタイムで時空間的な再現性を確認することができるトレーニングを実現する。



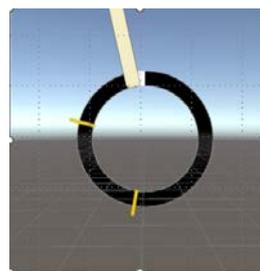
図 1: 未来のお手本情報提示

2.2 提示手法の設計

トレーニング開始時のお手本は、提示するお手本動作の初期姿勢で待機しており、訓練者がその姿勢に合わせることをトリガーとして、能動的に技能の試行を開始する。これにより、技能トレーニングにおける訓練者の主体性を担保しつつ、訓練者とお手本の動作における時間的な一致を図る。訓練者が初期姿勢を満たすと、一定時間後に指導者の未来のお手本が先行して動作提示を開始する。その後、設定された時間差で指導者のお手本が動作提示を開始する。訓練者は、先行して提示される動作軌道を参照し、遅れて提示される指導者のお手本に対して、位置とタイミングを一致させるように動作を実行する。

2.3 重要なタイミングの視覚化

ダーツの投げ動作についての時間的な再現性を向上させるためには、タイミングの視覚化が必要となるが、瞬間的な合図のみでは予測が困難である。そのため、時間の進行を連続的に確認できるプログレスリングを、訓練者の焦点を妨げないダーツボードの周りに導入した。重要なタイミングを視覚化する際のプログレスリングと訓練者視点の様子を図2に示す。訓練者が初期姿勢を満たした時点からゲージが満ちていき、一連の動作が終了する時点で一周する。このプログレスリング上に、トレーニングにおける重要なタイミングを視覚化する目印としてマーカーを配置した。具体的なタイミングとしては、訓練者が指導者の未来のお手本によって参照した動作の模倣を開始する時点、ダーツの投げ動作におけるテイクバック時点、リリース時点とし、ゲージがそれぞれの時点に到達した瞬間に各マーカーを拡大して発光させた。



(a) プログレスリング



(b) 訓練者視点

図 2: リリース時点におけるタイミングの視覚化

3. 実装

Unity を用いてシーンに仮想オブジェクトとして二つのバーチャルハンドとプログレスリングを配置したダーツトレーニングのためのお手本提示システムを実装した。ヘッドマウントディスプレイとして Meta Quest 3 を使用し、パススルー機能を用いることで、仮想空間のバーチャルハンドをお手本として参照しながら、現実空間で実際にダーツ

を投げるトレーニングを可能にした。また、ハンドトラッキングについても Meta Quest 3 の機能を利用し、リアルタイムで訓練者の骨格情報を利用した。

3.1 お手本動作の取得と再現

訓練者が参照するお手本動作については、ハンドトラッキングを行い、Unity の座標系においてのヘッドマウントディスプレイに対する各関節の相対座標を、フレーム毎に記録することで作成した。本実装では、ハンドトラッキングおよびお手本動作のフレームレートを 30fps に設定した。トレーニング開始時は、記録したお手本動作の初期フレームの座標を用いてお手本オブジェクトとなる二つのバーチャルハンドの初期化を行い、どちらのお手本オブジェクトも同じ位置・姿勢で待機させた。ハンドトラッキングによって取得される訓練者の各関節の座標とお手本オブジェクトの対応する関節の座標間の距離を指標に、初期姿勢を満たして一定時間後に、指導者の未来のお手本オブジェクトから、フレーム毎に記録座標を参照した。もう一方の指導者のお手本オブジェクトについては指定フレーム後に時間差で参照することで、それぞれお手本動作を再現し未来のお手本提示を実現した。

3.2 キャリブレーション

適切な位置と向きにお手本動作を提示するため、ダーツを投げる位置におけるヘッドマウントディスプレイの高さを 0 とした座標を、お手本動作取得時とトレーニング時の両方で基準とした。トレーニング開始時に、ハードダーツの公式ルールに則って仮想空間に適切に配置したダーツボードに見立てた円とスローイングエリアに見立てた枠を、現実空間のダーツボードとスローイングエリアに対して視覚的に重ね合わせることでキャリブレーションを行った。キャリブレーション完了時のヘッドマウントディスプレイの座標と記録した相対座標を利用して、正しくお手本動作が提示できることを確認した。

3.3 動作例：ダーツの投げ動作

提案手法の有効性を確認するため、ダーツにおける構えから投げるまでの一連の動きについて、未来のお手本提示を行い、ベースライン手法と比較した。お手本動作として、ダーツボードのブルに命中した時にトラッキングした動作を使用した。指導者の未来のお手本は、15 フレーム先 (0.5 秒先) の動作を提示するように設定した。実際のダーツトレーニング時における訓練者視点のお手本提示の様子を、ベースライン手法と提案手法のそれぞれについて、図 3、図 4 に示す。純粋な未来のお手本についての効果を確認するため、今回はどちらの手法においてもプログレッシングによる重要なタイミングの視覚化を行った。ベースライン手法では、青色の指導者のお手本を追従することで

直感的に動作を試行することができるが、お手本動作を見てから動作を模倣する場合、リリース等のタイミングには遅れが生じた。一方で、時間的な再現のためにお手本に重ね合わせようとすると、動作のフォームは前回の試行でのお手本動作のイメージに頼らざるを得ず、その試行ではお手本動作を確認しづらくなるという制約があることを確認した。これに対し、提案手法では、赤色の指導者の未来のお手本が事前にお手本動作を提示してくれることで、一度の試行の中でお手本を追従しつつ、青色の指導者のお手本とのずれによって時間的再現性を確認することができた。また、どちらの手法においても、プログレッシングによってお手本動作の模倣開始やダーツのリリースのタイミング等のお手本だけでは提示が難しい情報を確認することができた。

3.4 主観評価

研究室内のダーツ初心者 1 名による予備的な主観評価として、提案手法によるお手本情報提示を用いてダーツを投げてもらい、口頭でのインタビューを行った。その結果、指導者の未来のお手本が提示するお手本動作によって、これまで知らなかったフォームを事前に確認しつつ動作を試行できたことを特に良かった点として挙げており、時間差で提示される指導者のお手本とのずれによって、体験者は自身の動作が遅れていることを認識できた。また、プログレッシングによって得られるリリース等のタイミング情報についても時間的な再現の指標になることを確認した。一方、的への命中精度まで意識すると、参照すべき情報量が多く混乱してしまうという課題も見られたため、トレーニングの段階に応じた目的を適切に設定し、認知的負荷の軽減を考慮する必要がある。具体的には、お手本情報提示を用いたトレーニングでは、動作の再現性に注力した上で、お手本情報提示を用いない実践段階における命中精度を評価し、空間的・時間的再現性と命中精度についての相関やトレーニング前後の命中精度についての比較による評価を行う必要があると考えられる。

4. おわりに

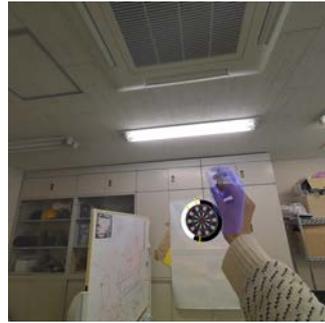
本稿では、VR を用いた運動技能トレーニングにおいて、訓練者が目指すべき目標の動作に加えて、その先の未来の動作をお手本として提示する手法を提案した。提案手法では、未来の動作を提示する未来のお手本が訓練者に対して事前に動作や速さを知覚するフィードフォワードを提供し、時間差で提示される目標のお手本が訓練者とのずれによってフォームやタイミングの正確性をフィードバックとして視覚化する。さらに、ダーツの投げ動作において重要なタイミングの視覚化を行った。その結果、提示されるお手本情報が動作の空間的再現性および時間的再現性を向上させる模倣学習を実現するための手がかりとなることを確



Frame 23



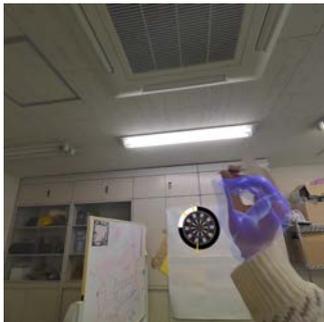
Frame 28



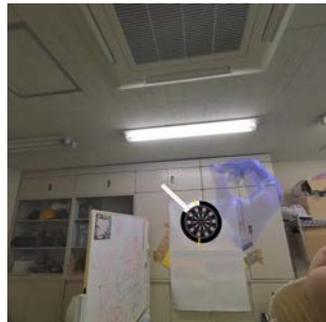
Frame 33



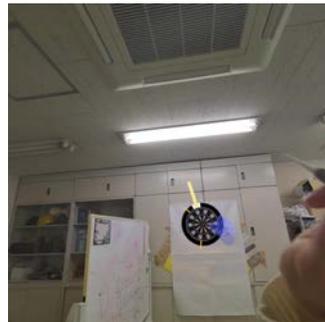
Frame 38



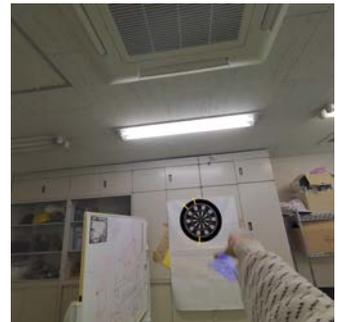
Frame 43



Frame 48



Frame 53



Frame 58

図 3: 指導者の動作のみをお手本とする提示手法（ベースライン手法）における訓練者がお手本の初期姿勢を満たした時点
を Frame 0 (30fps) とした場合の訓練者視点映像（青色：指導者のお手本）



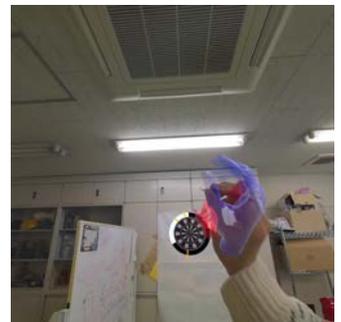
Frame 23



Frame 28



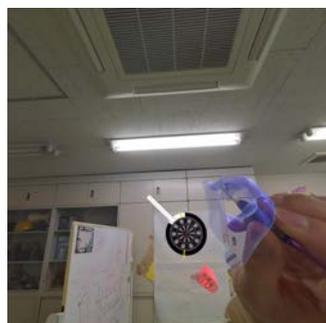
Frame 33



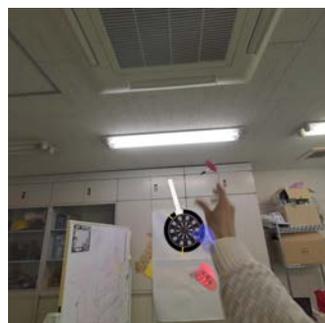
Frame 38



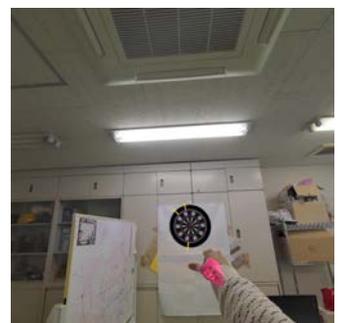
Frame 43



Frame 48



Frame 53



Frame 58

図 4: 指導者の動作とその先の未来の動作をお手本とする提示手法（提案手法）における訓練者がお手本の初期姿勢を満た
した時点（Frame 0 (30fps)）とした場合の訓練者視点映像（青色：指導者のお手本、赤色：指導者の未来のお手本）

認した。

今後の課題としては、ダーツ初心者が提案手法とベースライン手法による VR トレーニングを行った場合の動作の空間的再現性や時間的再現性およびターゲットへの命中精度を定量的に評価し、その効果を検証する比較実験を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] Pastel, S., Petri, K., Chen, C. H., Wiegand Cáceres, A. M., Stirnatis, M., Nübel, C., Schlotter, L. and Witte, K.: Training in Virtual Reality Enables Learning of a Complex Sports Movement, *Virtual Reality*, Vol. 27, No. 2, pp. 523–540 (2023).
- [2] 川崎仁史, 脇坂崇平, 笠原俊一, 齊藤寛人, 原口純也, 登嶋健太, 稲見昌彦: けん玉できた! VR:5分間程度のVRトレーニングによってけん玉の技の習得を支援するシステム, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020 論文集, Vol. 2020, pp. 26–32 (2020).
- [3] Adolf, J., Kán, P., Outram, B., Kaufmann, H., Doležal, J. and Lhotská, L.: Juggling in VR: Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning, *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–5 (2019).
- [4] Tang, R., Yang, X.-D., Bateman, S., Jorge, J. and Tang, A.: Physio@Home: Exploring Visual Guidance and Feedback Techniques for Physiotherapy Exercises, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4123–4132 (2015).
- [5] Hoang, T. N., Reinoso, M., Vetere, F. and Tanin, E.: Onebody: Remote Posture Guidance System Using First Person View in Virtual Environment, *Proceedings of the 9th Nordic Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 1–10 (2016).
- [6] Dürr, M., Weber, R., Pfeil, U. and Reiterer, H.: EGuide: Investigating Different Visual Appearances and Guidance Techniques for Egocentric Guidance Visualizations, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 311–322 (2020).
- [7] Le Naour, T., Hamon, L. and Bresciani, J.-P.: Superimposing 3D Virtual Self + Expert Modeling for Motor Learning: Application to the Throw in American Football, *Frontiers in ICT*, Vol. 6, p. 16 (2019).