



VR ジャグリングシステムを用いた仮想現実空間内における 運動スキル学習

A VR system for motor skill training of juggling

佐藤誠¹⁾, 神原裕行²⁾, 趙完熙¹⁾, 小林誠¹⁾, 田中宏和³⁾, 香川高弘⁴⁾, 吉村奈津江¹⁾
Makoto SATO, Hiroyuki KAMBARA, Cho WANHEE, Makoto KOBAYASHI, Hirokazu TANAKA,
Takahiro KAGAWA, and Natsue YOSHIMURA

- 1) 東京工業大学 (〒226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, mkt.sato@gmail.com)
- 2) 東京工芸大学 (〒243-0297 神奈川県厚木市飯山南 5-45-1, h.kambara@t-kougei.ac.jp)
- 3) 東京都市大学 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1, htanaka@tcu.ac.jp)
- 4) 愛知工業大学 (〒453-0356 愛知県豊田市八草町八千草 1247, t_kagawa@aitech.ac.jp)

概要: 近年, スポーツ等の運動技能トレーニングにおいて, VR 技術を利用する機会が増えている。一方, 仮想世界でトレーニングした運動技能が, 実空間に上手く転移しない例も報告されている。その原因として, 物体とのインタラクションにより生じる力覚情報が仮想世界において表現されていないことが挙げられている。本発表では, ジャグリングの運動技能獲得を支援するために開発した力覚提示を含む VR システムを紹介する。

キーワード: 行動・認知、力覚・体性感覚、ウェアラブル、教育・訓練

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 技術の進歩により, スポーツトレーニングやリハビリテーションの場面において, 仮想現実空間で運動スキルをトレーニングすることが増え始めている。一方, VR 技術を利用した多くのシステムでは, 物体とのインタラクションにより生じる力覚情報が表現されておらず[1], このことが仮想現実空間で身につけた運動スキルが現実空間に転移することを妨げる一つの要因だと指摘されている[2]。

本研究では, ボールを用いたジャグリングのような複雑な運動タスクの運動スキル獲得を支援するための, 力覚提示機能を含む新しい VR システム (以後, VR ジャグリングシステムと呼ぶ) の開発を目的とする。近年の神経科学分野の研究により, 数か月のジャグリングトレーニングによって, 若者だけでなく高齢者にも脳の構造[3,4]や神経伝達機能[5]に変化がもたらされることが示されている[6]。我々が開発する VR ジャグリングシステムでは, 仮想世界の物理パラメータを操作することでジャグリングの難しさを緩和し, 初心者のトレーニング継続へのモチベーションを高められる可能性がある。本発表では, 我々の VR ジャグリングシステムを紹介するとともに, 同システムを用いてジャグリング初心者に仮想世界の中でトレ

ーニングを行わせる実験の結果を報告する。

2. VR ジャグリングシステム

図 1 に本研究で開発した VR ジャグリングシステムの構成を示す。このシステムは, 力覚提示装置や HMD (ヘッドマウントディスプレイ) とそれらを制御するコンピュータ (WindowsOS) から構成されている。

力覚提示装置は, 力覚提示システム SPIDAR[7] の派生型の一つである SPIDAR-W[8] (ARACHNOFORCE 社製) を使用する。この装置はアーチ状のアームを肩に載せることで上半身前面に装着可能であり, ユーザは左右のそれぞれの手でプラスチックの球形グリップを握りながら操作を行う。それぞれの球形グリップには糸が 4 本ずつ取り付けられており, それらの糸をフレーム内に設置されたモータが引くことで, 糸の張力を介してユーザの手に 3 次元の並進力を提示することが可能となっている。一方, 球形グリップの 3 次元位置は, モータに取り付けられたエンコーダの値から求められた糸の長さを基に計算される。モータへの制御指令やグリップ位置は USB ケーブルを利用してコンピュータと 1kHz で通信される。

VR ジャグリングシステムのソフトウェアアプリケーションはゲームエンジン Unity を用いて開発した。アプリケ

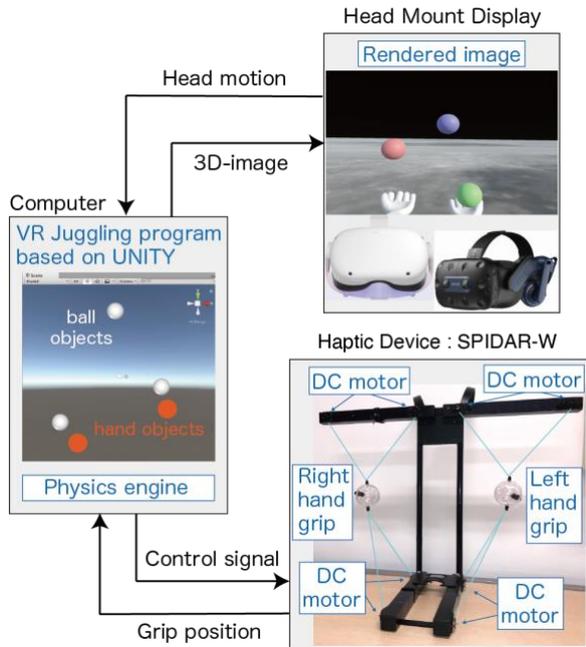


図 1: VR ジャグリングシステムの構成.

ーション内では、ボールにかかる重力加速度の他にボールのサイズや質量を、実験者やユーザが目的に応じて任意に変更できるようになっている。さらに、ボールが手からリリースされた際の速度をスケールするためのパラメータも導入し、重力加速度が小さいときにボールが遠くに飛んでしまうことを抑制可能となっている。また、仮想世界内でボールが手に接触している際には、ボールの負荷力を力覚提示装置により手に加えられるが、その大きさはボールの質量と重力加速度の積とし、力の方向は鉛直方向下向きとした。ボールと手の接触判定はお互いの距離に基づいて行われる。また、グリップに装着されたボタンを押すことでボールを保持し、ボタンを離すことでボールが手からリリースされる仕組みとなっている。なお、上記のボタンはグリップを手で握った際に親指が接触する部分に配置されている。

仮想空間内におけるボールや手の視覚映像はHMDを用いてユーザに提示される。本研究で開発したソフトウェアではHMDとしては、HTC社製Vive ProシリーズやOculus (Meta)社製のRiftやQuestシリーズが利用可能となっているが、本研究ではHTC社製のVive Pro-Eyeを用いた。

3. ジャグリングのトレーニング実験

3.1 実験方法

VR ジャグリングシステムの有効性を検証するために、同システムを用いて仮想現実空間内でジャグリングをトレーニングする実験を実施した。

被験者はジャグリング初心者の健康な若者2名とし、3つのボールを用いたカスケードパターンをトレーニング対象の技とした。実験期間は10日間とし、各日において

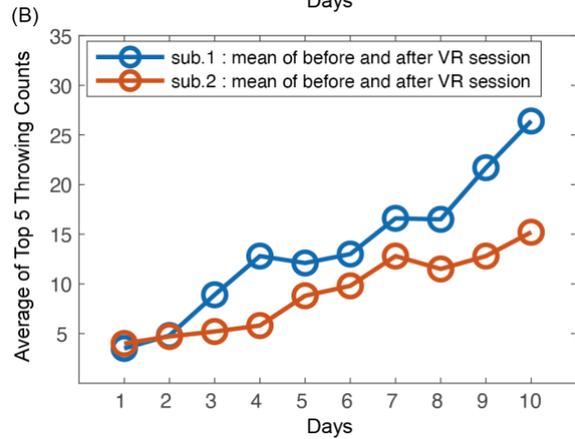
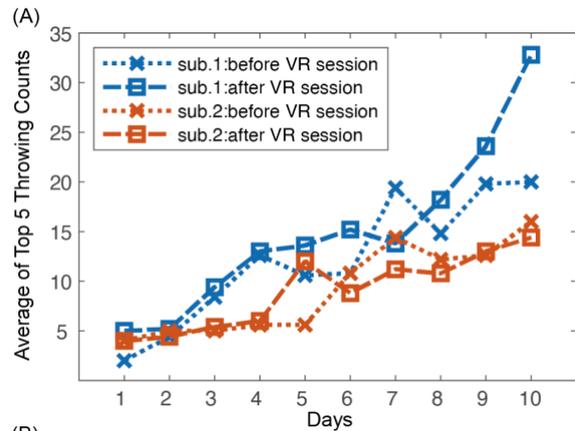


図 2: 現実空間におけるジャグリング技能. (A) 各 real-world セッションにおいて最も連続スローイング回数が高い5つの試行の平均値. (B) (A)で示された値の各日における平均値.

仮想現実空間内でジャグリングを行う VR juggling セッションを20分間ずつ行った。また、現実空間におけるジャグリングのスキルを検証するために、各日において、現実空間で実際のボールを用いてジャグリングを行う real-world セッションを、VR juggling セッションの前後で行った。この real-world セッションでは、VR juggling セッションと同様に、3つのボールのカスケードパターンを被験者に行ってもらった。なお、この実験は東京工業大学の倫理委員会による承認を受けている（承認番号 2020107）。

3.2 実験結果

現実空間におけるジャグリングの技能を評価するため、real-world セッション中の各試行において、ボールを連続して投げられた回数（以後、連続スローイング回数と呼ぶ）をカウントした。さらに、各 real-world セッションにおいて、連続スローイング回数が多い5つの試行の平均値（以後、平均連続スローイング回数と呼ぶ）を求めた（図 2(A)）。また、それらの値に関して各日の2つの real-world セッションの平均値を求めた（図 2(B)）。

その結果、平均連続スローイング回数が、いくつかの日において前日より減少しているものの、全体的に見ると日を重ねるごとに値が大きくなる傾向が二人の被験

者ともに見られた。また、被験者1に関しては、7日目を除く全ての日において、VR juggling セッション前より後の real-world セッションの方が、平均連続スローイング回数が高いことが見て取れる。ただし、もう一人の被験者に関しては同様の傾向は見られなかった。

3.3 考察

今回の実験では、10日間のトレーニング期間中に、現実空間内におけるジャグリングスキルが日を重ねるごとに上達していく傾向が二人の被験者ともに見られた。ただし、実験の都合上、各トレーニング日に現実空間におけるジャグリングを実施する時間が含まれているため、VR ジャグリングシステムを用いたトレーニングによって、現実空間の技能が上達したとは直接的に結論付けることはできない。一方、今回の実験に参加した被験者の上達スピードは、現実世界でのみトレーニングを行った過去の研究と比較すると、より速い可能性がある。Huys ら[6]の研究では、ジャグリング初心者に本研究と同様に3つのボールのカスケードパターンを現実空間においてトレーニングしてもらっているが、ほとんどの被験者は計3時間のトレーニング後に多くても8回しか連続スローイングが出来ていない。一方、本研究では、二人の被験者ともに計160分(=2.67時間)の現実空間におけるジャグリングを経験しているが、いずれも15回以上の連続スローイングが行えるようになっている。また、Haibach ら[7]の研究では、ジャグリング初心者が5回の連続スローイングが出来るようになるまでに計1~2時間、あるいはそれ以上の時間であることが示されているが、本研究では二人の被験者ともに現実空間におけるジャグリングを計50分(=0.83時間)経験した後は、5回以上の連続スローイングが出来るようになったことわかった。今後、被験者数をさらに増やす必要があるものの、過去の研究との比較を通じて、本研究で開発したVR ジャグリングシステムを用いた仮想空間内でのトレーニングが、現実空間の技能の上達に貢献している可能性が考えられる。

4. むすび

仮想空間内で力覚提示を行いながらボールを用いたジャグリングが行えるVR ジャグリングシステムを紹介した。また、同システムの有効性を検証するために、ジャグリングの初心者にVR ジャグリングシステムを用いて仮想現実空間内で3つのボールのカスケードパターンと呼ばれるジャグリングの基本的な技を10日間に渡りトレーニ

ングしてもらう実験を行った。その結果、実験に参加した二人の被験者ともに日を重ねるに連れて現実空間におけるジャグリングの技能が上達する傾向があることが確認できた。

今後は被験者数を増やすとともに、VR ジャグリングシステムを用いない被験者群との比較実験を行い、開発したVR ジャグリングシステムの有効性を検証する予定である。

謝辞 この研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 CRCNS (NICT21701/NSF-BC20111716)、JSPS 科研費(JP19K04289/JP22K12775)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] F. Zanatta, A. Giardini, A. Pierobon, M. D'Addario and P. Steca, "A systematic review on the usability of robotic and virtual reality devices in neuromotor rehabilitation: patients' and healthcare professionals' perspective," *BMC Health Serv Res*, 22, 523 (2022).
- [2] D. E. Levac, M. E. Huber and D. Sternad, "Learning and transfer of complex motor skills in virtual reality: a perspective review," *J NeuroEngineering Rehabil*, 16, 1, 121 (2019).
- [3] B. Draganski, C. Gaser, V. Busch, G. Schuierer, U. Bogdahn and A. May, "Changes in grey matter induced by training," *Nature* 427, 311–312 (2004).
- [4] J. Scholz, M. Klein, T. Behrens and H. Johansen-Berg, "Training induces changes in white-matter architecture," *Nat Neurosci* 12, 1370–1371 (2009).
- [5] C. Sampaio-Baptista, N. Filippini, C. J. Stagg, J. Near, J. Scholz and H. Johansen-Berg, "Changes in functional connectivity and GABA levels with long-term motor learning," *Neuroimage* 1(106), 15–20 (2015).
- [6] R. Huys, A. Daffertshofer and P. J. Beek, "Multiple Time Scales and Multiform Dynamics in Learning to Juggle," *Motor Control*, Vol.8, No.2, 188–212 (2004).
- [7] P. S. Haibach, G. L. Daniels and K. M. Newell, "Coordination changes in the early stages of learning to cascade juggle," *Human Movement Science*, Vol.23, No.2, 185–206 (2004).