

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

川崎仁史^{†1†2} 脇坂崇平^{†1} 笠原俊一^{†1†3} 齊藤寛人^{†1}
原口純也^{†1} 登嶋健太^{†1} 稲見昌彦^{†1}

我々は5分間程度のVRトレーニングによって、今まで成功したことが無い技の習得を支援するけん玉トレーニングシステムである「けん玉できた！VR」を開発した。VR空間で玉の速度を遅くしてから徐々に速くしていくことにより難易度を調整した。また、玉の速度を遅くしたVR空間で、実際に熟練者がプレイした身体動作をキャプチャし、それをバーチャルなお手本として提示した。本システムの体験者1128人のうち、1087人(96.4%)がけん玉の技を習得した。

CanKendama: A System for Supporting Users to Master Kendama Tricks through About Five Minutes of VR Training

HITOSHI KAWASAKI^{†1†2} SOHEI WAKISAKA^{†1} SHUNICHI KASAHARA^{†1†3}
HIROTO SAITO^{†1} JUNYA HARAGUCHI^{†1}
KENTA TOSHIMA^{†1} MASAHIKO INAMI^{†1}

We developed “CanKendama”: a system for supporting users to learn Kendama tricks which users had never made a success through about five minutes of VR training. We adjusted the difficulty by slowing down the speed of the ball and then gradually increasing the speed in the VR space. Additionally, we captured the motion of expert playing Kendama actually in the VR space with a slow ball speed. The motion was presented as a virtual model. 1087 out of 1128 people who experienced “CanKendama” mastered a Kendama trick.

1. はじめに

映画『マトリックス』において、デジタルな世界の中で、ヘリコプターの操縦を数秒間で習得できてしまうシステムが登場する[1]。我々はそのようなSFの世界を現実化することを目指し、短時間での技術の習得を支援するVRトレーニングシステムの開発を進めている。近年、没入型VRデバイスの視野角の拡大や、コントローラの位置推定技術の向上、軽量化、低価格化が劇的に進んでいる。それにより、フライトやドライビング、医療分野のシミュレータとしてだけでなく、スポーツのトレーニングにおいてもVRが活用されてきており注目を集めている。さらに、近年では時間の進み方や重力を変えられるというVRならではの特性を生かしたトレーニングシステムも提案されている。

我々はスポーツの中でも日本の伝統的な遊びであるけん玉に着目し、VRによるけん玉のトレーニングシステム「けん玉できた！VR」を開発した(図1)。けん玉の基本技を今まで成功したことが無く、けん玉は難易度が高いと知っている人が一定数存在する。その要因として、玉の動きが速いので動きを捉えて身体を対応させることが難しいことと、技を安定させるための身体の動かし方が分かりにく

いことが考えられる。本システムでは、VR空間ならではの特性を活かして、トレーニング開始時は玉の速度を遅くし、トレーニングが進むにつれて徐々に速くしていくことにより難易度を調整した。また、けん玉の技を安定させるためには、膝の曲げ伸ばしによって玉を上げてキャッチすることが重要である。そこで、膝の曲げ伸ばしを視覚的に素早く理解できるように、VR空間で実際に熟練者がけん玉をプレイした身体動作をキャプチャし、それをバーチャルなお手本として体験者に提示した。さらには、システムの体験時間を短縮するために、体験者側で煩雑な操作をする必要が無い体験をデザインした。

本システムの有効性の評価として、VRやけん玉、ジャグリングのイベント等を通じて本システムのユーザスタディを実施した。その結果、体験者1128人のうち、1087人(96.4%)が今まで成功したことが無いけん玉の技を習得した(2020年6月現在)。また、アンケート結果からも、本システムの



図1 「けん玉できた！VR」のトレーニング風景

Figure 1 Training Scene in “CanKendama”

^{†1} 東京大学

The University of Tokyo

^{†2} イマクリエイティブ株式会社

ImaCreate Co., Ltd.

^{†3} ソニーコンピュータサイエンス研究所

Sony Computer Science Laboratories, Inc.

手法によって、けん玉の習得しやすさの向上が実現できたと考えられる。

本稿では、我々の開発した VR けん玉トレーニングシステムについての詳細と、ユーザスタディやアンケートの結果について述べる。

2. 関連研究

2.1 現実に近い状況を再現するトレーニングシステム

工学的技術を用いたトレーニングシステムとして、古くは 1929 年に Edwin Link が開発した Link Trainer というフライトシミュレータがある[2]。実際には飛行しない機体のなかで、ユーザの操縦に応じて実際に飛行する飛行機に近い機体や計器の動きを再現した。50 万人以上のアメリカ合衆国のパイロットが Link Trainer で飛行機の操縦に関するトレーニングを受けた。1982 年には Thomas Furness が、HMD (Head Mounted Display) を装着することで、現実の飛行機に乗ったような視覚情報を訓練者が得ることができるフライトシミュレータ VCASS を開発した[3]。

ドライビングシミュレータは 1970 年代前半から開発が進み、フライトシミュレータと同様に、実際には走らない車体のなかで、ユーザの操縦に応じて実際に走行する車に近い動きや景色を再現した[4]。1994 年には VR 技術を用いたドライビングシミュレータも開発された[5]。ドライビングシミュレータは運転のトレーニング用だけではなく、アミューズメント用として広く活用されている。

手術のシミュレータの題材としては腹腔鏡手術が一般的であり、古くは 1993 年に Satava が腹腔鏡手術の VR シミュレータを開発した[6][7]。このシステムは実際の手術と近い状況を再現したものであり、トレーニングに利用された。また近年では 2016 年に Osso VR 社が外科医向けの VR トレーニングシステムを開発した[8][9]。

スポーツのトレーニングシステムでは、実際に玉を打ったりスキーをしたりする等の動作をせずとも、実際にその動作をしたかのような視覚的、聴覚的、触覚的な刺激が再現されている[10]。VR によるスポーツトレーニングでは、バーチャルなお手本を提示する手法が多く用いられていて、1997 年には卓球において用いられた[11]。1999 年にはリハビリでも、2003 年には太極拳でも、バーチャルなお手本を提示する研究が行われた[12][13]。また近年では 2014 年には STRIVR 社がアメフトの、2019 年にはイマクリエイト社がゴルフの VR トレーニングシステムを開発した[14][15]。

2.2 VR の時間的介入を利用したトレーニングシステム

近年では、現実に近い状況を再現するのではなく、時間の進み方や重力を変えられるという VR ならではの特性を

活かして難易度を調整することで、効率的なトレーニングを実現するシステムを提案している研究がある。水島らは、VR 空間でのボールジャグリングの難易度を下げるために重力加速度を 0.5 倍にした条件と、1 倍の条件を比較し、0.5 倍にした方が動作に余裕ができることを観察している[16]。Adolf らも VR 空間でのボールジャグリングにおいて、ボールの動きを捉える時間を増やすために、重力加速度を小さくする機能を実装している[17]。Lammfromm らは、VR を用いたボールジャグリング・トレーニングシステム Lightweight Juggler の開発にあたって、ボールの速度を遅くし、徐々に速くしていくという手法を提案している[18]。

スポーツの VR トレーニングでよく行われているようにバーチャルなお手本を提示する場合に、お手本の動きをスローモーションにしている研究がある。Yang は、3D マウスを操作する実験において、VR 上でバーチャルなお手本の動きをスローにすることによって、トレーニングを受ける側が動きを記憶しやすくなった可能性があることを示している[19]。脇田らは、舞踊動作のトレーニングにおいてバーチャルなお手本をスロー再生できる機能を実装し、訓練し始めるときにじっくり練習できるようにしている[20]。

3. VR けん玉トレーニングシステム

VR けん玉トレーニングシステム「けん玉できた！VR」の体験の様子を図 2 に示す。体験者は VR ゴグルをかぶり、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、VR 空間のみに存在する玉を使ってトレーニングをする。本システムでは、難易度調整にあたって玉の速度を遅くして徐々に速くしていくという手法と、バーチャルなお手本を提示する手法を用いた。さらには、システムの体験時間を短縮するために、体験者側で煩雑な操作をする必要が無い体験をデザインした。本章でそれぞれの手法とデザインについて説明する。



図 2 「けん玉できた！VR」の体験の様子
Figure 2 Training Picture of “CanKendama”

3.1 玉の速度を遅くすることによる難易度調整

本システムでは、まず玉の速度を遅くして徐々に速くしていくという難易度調整手法を用いた。玉が遅く動く難易度の低い状態から、玉が通常速度で動く難易度の高い状態に徐々に移行させることによって、つまずきの少ないスムーズな上達を促す。

玉の速度を遅くするための簡単な方法は、関連研究で行われている重力加速度を小さくする方法である[16][17]。重力加速度が小さいと、鉛直方向の速度の変化量が小さくなり玉の速度が遅くなる。しかしながら、単純に重力加速度を小さくすると、玉の速度は遅くなる一方で、地上と同じ力で玉を上げると玉が高く上がりすぎる。それにより、むしろ現実よりも難しくなってしまう問題と、実際に行うべき動作とは異なる動作のトレーニングになってしまう問題がある。

そこで我々は、玉がけん玉の皿から上がる瞬間に玉の軌道を予測して、玉の軌道を変えずに玉の速度を 0.4 倍速、0.6 倍速などに調整することによって玉を遅くした。この方法を用いると、玉の速度も遅くなり、なおかつ玉の上がる高さも地上と同じになる。それにより、実際に行うべき動作のトレーニングを現実よりも難易度を下げて行うことができる。

水平方向を x, z 軸、鉛直方向を y 軸としたときに、玉が皿から上がる瞬間の時刻を 0、位置を (P_{x0}, P_{y0}, P_{z0}) 、速度を (V_{x0}, V_{y0}, V_{z0}) とすると、時刻 t における玉の位置 (P_x, P_y, P_z) は以下の式で表される。 g は重力加速度 $(-9.8m/s^2)$ とする。

$$P_x = P_{x0} + V_{x0} t$$

$$P_y = P_{y0} + V_{y0} t + \frac{1}{2} g t^2$$

$$P_z = P_{z0} + V_{z0} t$$

玉の速度を f 倍速にする場合は、一定時間に進む玉の移動量を通常速度 (1.0 倍速) の f 倍にする。

我々は、本システムにおける玉の速度を、0.4 倍速、0.6 倍速、0.8 倍速、1.0 倍速の 4 段階に設定した。

3.2 自然で真似しやすいバーチャルなお手本

本システムでは、けん玉の技を安定させるのに重要な膝の曲げ伸ばしについて体験者に理解してもらうために、バーチャルなお手本を提示する。バーチャルなお手本を提示する際に、関連研究のようにお手本の動きをスローにする場合、単純に玉の速度をスローにしたのと同じ分だけお手本の動きをスローにすると、実際にその通りに身体を動かすには不自然で真似しにくいという問題点がある。

お手本の動きが不自然で真似しにくい要因として、玉の速度が遅い環境において、人間が自然に身体を動かす速度が玉の速度と異なっていることが挙げられる。そこで、玉

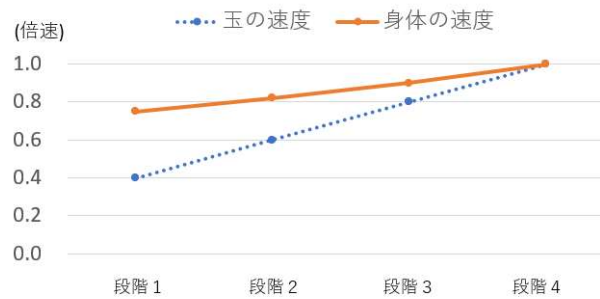


図 3 玉と身体の速度の関係

Figure 3 Relationship of Speed between Ball and Body

の速度が 0.4 倍速、0.6 倍速、0.8 倍速、1.0 倍速のそれぞれの条件で、けん玉の熟練者 1 人が VR 空間でのけん玉を実際に行った際に、玉を上げるときの身体の動きが何倍速になるのか計測した。このとき、身体の動きの速度は、玉を上げるときに、けんが最も低い位置にある状態から玉がけんから離れるまでの時間を計測し、玉の速度が 1.0 倍速条件での動きを基準にして各条件における速度の倍率を計算した。計測した玉と身体の速度の関係の結果を図 3 に示す。身体は、玉が 0.4 倍速の時は約 0.75 倍速に、玉が 0.6 倍速の時は約 0.82 倍速に、玉が 0.8 倍速の時は約 0.90 倍速になった。

そこで我々は、それぞれの玉の速度において熟練者が VR 空間上でけん玉を実際に行ったモーションをキャプチャし、その 4 種類のモーションをそれぞれの玉の速度におけるお手本として使用した。これらを VR 空間上に提示される 3D のバーチャルアバター動きとして反映させることで、玉がスローに動く環境に応じた、自然で真似しやすいお手本を体験者に提示した。

3.3 体験者による操作が不要な体験のデザイン

さらに我々は、体験者のシステム体験時間を短縮するために、コントローラのボタンを全く押す必要がなく、コントローラの動きのみに集中できるように体験をデザインした。現実のコントローラの位置は、VR 空間でのけん玉の「けん」の位置に対応するようにした。玉の速度を 1 段階、速くするタイミングで、体験をアテンドする人がコントローラのボタンを押して玉の速度を上げるようにした。それにより、体験者は VR ゴーグルをかぶって、コントローラを動かすだけで良いので、数十秒から数分を要する操作の説明を省略して、すぐにトレーニングを開始できる。

4. ユーザスタディとアンケート

本システムの有効性の評価として、VR やけん玉、ジャグリングのイベント等を通じて本システムを体験してもらうユーザスタディを実施した。ユーザスタディにおける体験

の内容や、体験者の人数・感想、アンケートについて説明する。

4.1 体験の内容

本システムで扱う技は「もしかめ」「つばめ返し」「サイドスパイク」とした。「もしかめ」は図4のように、玉を大皿から中皿に、中皿から大皿に行ったり来たりさせる技である。「うさぎとかめ」という「もしもしかめよ」で始まる童謡に合わせて行われることが技の名前の由来とされている。「もしかめ」が体験前からできる人には、「つばめ返し」という皿の上から玉を上げて、けんを玉の周りを一周させてから玉を皿で受け止める技に挑戦してもらった。さらに、「つばめ返し」が体験前からできる人には、「サイドスパイク」という皿の上から玉を上げて、横を向いた玉の穴にけん先を入れる技に挑戦してもらった。

体験の流れについて説明する。まず、体験者に対して「もしかめ」を実演または動画で見せた後に、体験者ができるかどうか実際のけん玉で挑戦してもらった。できない場合は「もしかめ」のVRトレーニングを開始し、できる場合は「つばめ返し」について同様にできるかどうか確認し、トレーニングしてもらう技を決定した。その後、VRゴーグルを装着してコントローラを持ってもらい、「目の前にいる3Dのお手本を真似しながら、今持っているけん玉の『けん』を動かしてください。最初は簡単にプレイできるように玉がゆっくり動きます」と伝えて、VR空間でけん玉をしてもらった。失敗してしまう人には「お手本の膝の動きを特に意識して真似してください」と伝えた。玉が0.4倍速で動くスローな環境で安定して成功するようになったら、「玉の速度を少し速くします」と伝えて、体験をアテンドする人がボタンを押して玉の速度を1段階速くした。通常(1.0倍速)の速度でも安定して成功するようになったら「VRで上手にできるようになったので、次は現実でもう一度挑戦してください」と伝えて、VRゴーグルを外してもらい、実際のけん玉で、VRトレーニングした技に挑戦してもらった。所要時間は、VRトレーニング前実際のけん玉が1分程度、VRトレーニングが3分程度、VRトレーニング後の実際のけん玉が1分程度であった。

4.2 体験者の人数・感想

2020年6月までに、延べ人数で1128人のけん玉の初・中級者が本システムを体験し、そのうちの1087人が、けん玉の今まで成功したことが無い技を習得した(習得率は96.4%)。初・中級者とは、「もしかめ」「つばめ返し」「サイドスパイク」という今回用意した技の中で、成功したことがないものがある人とした。技ごとには、「もしかめ」トレーニングを800人が体験し786人が習得(習得率は98.3%)、「つばめ返し」を219人が体験し207人が習得(習得率は94.5%)、「サイドスパイク」を109人が体験し94人が習

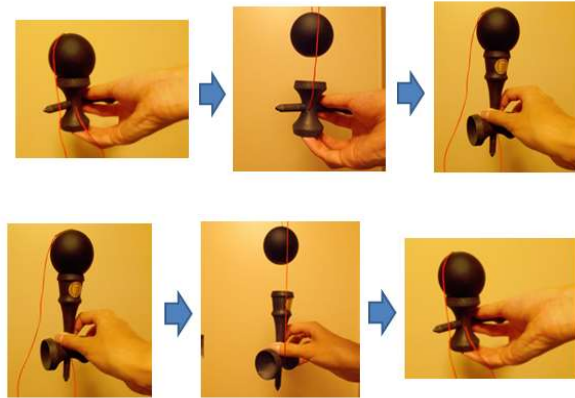


図4 「もしかめ」というけん玉の技
Figure 4 Kendama Trick Named “Moshikame”

得した(習得率は86.2%)。「もしかめ」の成功の基準は、大皿から中皿への移動と、中皿から大皿への移動が両方とも成功したこととした。「つばめ返し」と「サイドスパイク」の成功の基準は、技が一回以上成功したこととした。

本システムの体験者がTwitterに公開した感想を、いくつかのパターンに分類して紹介する。

一つ目のパターンは、習得・上達について報告した感想である。

- けん玉VRすごい！
VRで練習したら現実でできるようになった！
- 先日体験させていただきましたが、実際に出来るようになりました。
- けん玉できたVRでけん玉できるようになったぞ
- バーチャルけん玉を練習した後、
現実に戻っていざ挑戦！けん玉出来ましたねぇ！！
- 現実でのけん玉上達具合にかなり感激しましたw
- 二つ目のパターンは、習得・上達に追加して、習得・上達に要した時間について記述した感想である。
- 「けん玉できた！VR」で5分間練習したら、
ツバメ返し出来るようになったよ すごい
- 数分前までけん玉初心者だったのに...
燕返しをその場で数分で習得
- ずっと気になってたVRけん玉体験させて頂きました！
5分でマジで上達しました。
- たった、5分でできるようになった～驚き!!

三つ目のパターンは、習得・上達の要因や本システムの機能について記述した感想である。

- VR内では、けん玉がゆっくり動く状態から練習して
どんどん早くなっていく。腰をつかかって動かしてけん玉を受け止める動作を意識するとうまくなるのねー。
- 少しずつ速くしていけば結局実際の速さでもできる
- VRによって時間軸をずらして徐々に身体機能をアジャストさせて喜びを与える。

- けん玉 VR, 「たまを落としても大丈夫という安心感」という感想
 - ・けん玉 VR は地道な反復練習に、一回づつ成功（けん玉が皿に乗る）という成功体験を提供するので飽きない
 - ・さらに成功するということは、正しい体の動きをしているってことで、それが正しい体の動きのチェックにもなっている
- というのがカラクリというか本質なんだろうと思う

4.3 アンケート

2018年10月7日～8日のJapan Juggling Festival 2018というイベントにおいて、株式会社ナランハの協力のもと本システムの体験会を開催した。その際に、本システムの体験者に、任意回答のアンケートに協力してもらった。アンケートの回答者は55人である。回答者のほとんどがジャグリングに興味や経験がある人であった。しかし、回答者の全員が、けん玉に関しては「もしかめ」「つばめ返し」「サイドスパイク」という技の中で、成功したことがないものがある初・中級者であった。

「体験いただいたVRけん玉はお楽しみいただけましたか？」という問いに対する回答の結果は図5のようになった。78.2%の人が「とても楽しかった」、21.8%の人が「楽しかった」と回答した。「そこそこ」「あまり楽しくなかった」「楽しくなかった」と回答した人はいなかった。

「VR体験でけん玉が上達したと感じますか？」という問いに対する回答の結果は図6のようになった。36.4%の人が「とても上達した」、29.1%の人が「上達した」、23.6%の人が「少し上達した」、9.1%の人が「続ければ上達しそう」、1.8%の人が「変わらない」と回答した。

「何か現実との違いを感じたことはありますか？」という自由記述の問いに対しては、何らかの違いを記述した24人のうち9人(37.5%)が、以下のように重さ・振動・感覚の違いを指摘した。

- 重さ
 - 玉の重さの有無
 - ものの重さ
 - 玉の重さが無いので何となくしっくりこない時がありました
 - 振動の感じ方
 - 手に伝わる衝撃がVRでは感じるのが難しいと感じました
 - 接触時の感覚以外は意外となかったです
 - けん玉が皿に乗る感覚が違うと思いました
 - けん玉がお皿にのる感覚が、現実よりもやわらかく感じました
- 「その他何かご意見ございましたらご自由にお書きくだ

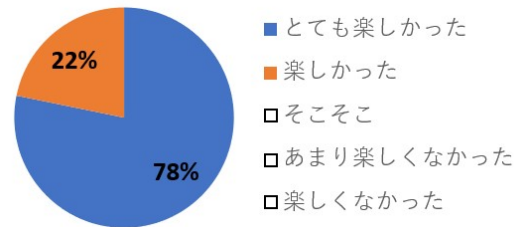


図5 楽しさに関するアンケート結果
Figure 5 Questionnaire Result about fun

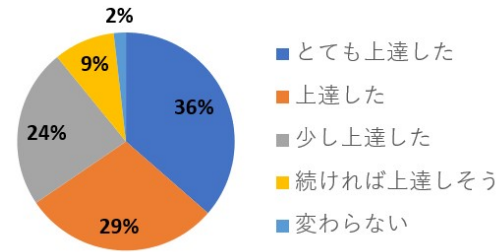


図6 上達に関するアンケート結果
Figure 6 Questionnaire Result about Improvement

さい」という自由記述に関しては、習得・上達に関する以下の感想が挙げられた。

- 「絶対VRで出来ても現実では出来ないでしょ」って思っていたので上達したのにびっくりしました
 - 初めてつばめ返しことができました
- また、習得・上達の要因や本システムの機能について関する以下の感想が挙げられた。
- 速度調整できるのがありがたい
 - スローでできると技の動きが分かりやすかったです
 - 体のつかいかたを覚えられ、上達できました
 - 「落としてもいい」という気持ちがあって、すごく気持ちよくできました

5. 考察

本システムによって、多くの体験者が5分間程度で、今まで成功したことの無い技を習得することに成功した。体験者がTwitterの感想で挙げたとおり、トレーニングの所要時間は5分間程度であった。Twitterで時間について記述していない感想もあったが、トレーニングの所要時間は同じく5分間程度だったので、習得したことに対する驚きに比べて体験が短時間だったことの驚きは小さく、時間について取って挙げられなかったものと考えられる。

「スローでできると技の動きが分かりやすかった」「体のつかいかたを覚えられ、上達できた」といった感想から、玉の速度を遅くして徐々に速くしていくという手法や、自然で真似しやすいバーチャルなお手本を提示する手法によ

って、けん玉の習得しやすさを向上させられたと考えられる。習熟度が低い状態の時は、実際のけん玉のトレーニングでは失敗を繰り返しながら練習するが、玉をスローにした難易度の低い VR トレーニングでは成功を繰り返しながら練習できる。それによって、練習する意欲が向上し、成功体験の蓄積によって習熟度向上の効果が高まる可能性があると考えられる。「3Dのお手本を真似してください」と伝えるだけで、多くの体験者が膝を動かして技を成功させていたが、膝を動かさずに失敗してしまう人もいた。そのような人には、お手本の膝の動きへの意識を促すことによって、失敗が減ることを観察した。今後、意識すべき重要な身体の箇所の色を変えたり、光らせたりして強調することを検討する。

体験者による操作が不要な体験のデザインについては、感想で明示されなかった。体験者にコントローラのボタン操作を説明して理解してもらうには数分かかり、その時間を不要にしていることから、VR トレーニングに要する時間を短くしている。体験者に意識されずに、効果を発揮するこのデザインは、体験者の支援にとって理想的な形であるかもしれない。

習得効果の向上や、習得に要する時間短縮に対して、本システムの手法やデザインが寄与している可能性は高いと考えるが、どの要素がどれだけ効果があったのかは不明確である。今後、それぞれの要素を分解して実験するなどして明確にしたいと考えている。

また、3章で挙げた本システムの手法やデザインとは他に、玉を落としても良いという安心感を与えることによって、体験者が気持ちよくトレーニングできたことが感想から分かった。本システムでは、玉が皿から落ちて、一瞬で玉が皿に乗る機能を実装していた。VR トレーニングでは、ジャグリングや球技系のスポーツにおける「球拾い」を無くすことができ、それによって訓練者が効果の高いトレーニングに集中し、上達に要する時間を削減できるメリットもあると考える。

実際のけん玉と、VR空間のけん玉の違いについては、重さ・振動・感覚の違いといったハプティクスに関する内容が多く挙げられた。VR トレーニングの後に、実際のけん玉に挑戦してもらう際に、「VR トレーニングでは玉の重さが無かったので、感覚が違う」と指摘されることがしばしばあった。今後、実際のけん玉に近いハプティクスを提供し、VR のけん玉と実際のけん玉の違いを小さくすることによって、習得をよりスムーズにできる可能性があると考えられる。

現状の本システムでは、玉の速度の調整は、体験者をアテンドする人が状況に応じて判断し手動で行っている。今後、体験者の習熟状態をシステムで認識し、自動で速度の調整を行うように改良する予定である。

また、本システムで、中心的に扱っている「もしかめ」という技は、難易度が低い技である。「つばめ返し」や「サ

イドスパイク」という技は難易度が中程度だが、けん玉には他にもさらに難易度の高い様々な技があるので、それらを VR でトレーニングできるように本システムの改良を続けていく。さらに、けん玉の技の習得の支援を通じて得た知見を、他のスポーツや産業におけるトレーニングにも活かしていく予定である。

6. おわりに

我々は、5分間程度の VR トレーニングによって、今まで成功したことが無い技の習得を支援するけん玉トレーニングシステムである「けん玉できた！VR」を開発した。本システムでは、VR空間で玉の速度を遅くしてから徐々に速くしていくことにより難易度を調整した。また、玉の速度を遅くした VR空間で実際に熟練者がけん玉をプレイした身体動作をキャプチャし、それをバーチャルなお手本として体験者に提示した。さらには、体験者のシステム体験時間を短縮するために、体験者側で煩雑な操作をする必要が無い体験をデザインした。ユーザスタディの結果、本システムの体験者 1128 人のうち、1087 人 (96.4%) がけん玉の技を習得した。また、アンケート結果から、本システムの手法によって、けん玉の習得しやすさが向上させられたと考えられる。

謝辞 イマクリエイト株式会社の山本彰洋さん、葉山勝大さん、坂元旭さん、久保田悟さん、松迫翔悟さん、川崎絢子さん、奥田知華さん、小椋貴文さん、サイボウズ株式会社の畑慎也さん、山和証券株式会社の飯岡真嗣さんに「けん玉できた！VR」の開発・改良や体験のアテンド、アピールを行っていただいた。Tokyo XR Startups 株式会社の國光宏尚さん、ブレイクポイント株式会社の若山泰親さん、若山理子さんにイマクリエイト株式会社の活動を支えていただいた。日本けん玉協会の関誠さん、鈴木康之さん、吉本秀一さん、GLOKEN けん玉先生の平泉徳也さん、ZOOMADANKE の Kodaman さん、Tokyo damagirls の Mirai さん、一般社団法人グローバルけん玉ネットワークの窪田保さんにけん玉の指導をいただいた。川崎久夫さん、川崎敦子さん、一般財団法人立志財団の坂本憲彦さんに本システムを開発するきっかけをいただいた。株式会社ナランハの中嶋潤一郎さん、松並裕樹さんに Japan Juggling Festival でのアンケートの実施と掲載許可をいただいた。体験者の方々に貴重なフィードバックや Twitter 等での感想をいただいた。これらの人々に謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Lana Wachowski and Lilly Wachowski: The Matrix, Warner Bros. Pictures (1999).
- 2) David Chesebrough: The Link Flight Trainer, ASME International (2010).

- 3) Sharmistha Mandal: Brief Introduction of Virtual Reality & its Challenges, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.4, Issue.4, pp.304-309 (2013).
- 4) Petr Bouchner: Interactive Driving Simulators History, Design and their Utilization in area of HMI Research, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, Vol.10, pp.179-188 (2016).
- 5) Salvador Bayarri: Virtual Reality Techniques in Urban Driving Simulation, In *Proceedings of the Driving Simulation Conference in RealTime Systems*, pp29-43 (1994).
- 6) Richard M. Satava: *Emerging Technologies in Surgery*, Springer (2007).
- 7) Richard M. Satava: Virtual reality surgical simulator: the first steps. *Surg Endosc* Vol.7, pp.203-205 (1993).
- 8) Virtual reality brings doc training to life, <https://www.modernhealthcare.com/article/20170925/TRANSFORMATION04/170929992/virtual-reality-brings-doc-training-to-life>
- 9) MoguraVR, <https://www.moguravr.com/osso-vr-2/>
- 10) Roland Sigrüst, Georg Rauter, Robert Riener, and Peter Wolf.: Augmented Visual, Auditory, Haptic, and Multimodal Feedback in Motor Learning: A review, *Psychon Bull Rev* Vol.20, pp.21-53 (2013).
- 11) Emanuel Todorov, Reza Shadmehr, and Emilio Bizzi.: Augmented Feedback Presented in a Virtual Environment Accelerates Learning of a Difficult Motor Task, *Journal of Motor Behavior*, Vol.29, pp.147-158 (1997).
- 12) Maureen Holden, Emanuel Todorov, Janet Callahan, and Emilio Bizzi: Virtual Environment Training Improves Motor Performance in Two Patients with Stroke: Case report. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, Vol.23, Issue.2, pp.57-67 (1999).
- 13) Philo Tan Chua, Rebecca Crivella, Bo Daly, Ning Hu, and Russ Schaaf, David Ventura, Todd Camill, Jessica Hodgins, and Randy Pausch: Training for physical Tasks in Virtual Environments: Tai chi, *Virtual Reality Conference, IEEE*, pp. 87-94 (2003).
- 14) Jeremy Bailenson: *What Virtual Reality is, How It Works, and What It Can Do*, W. W. Norton & Company (2018).
- 15) PR TIMES, https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000009.000034298.html?fbclid=IwAR37Gyey1oQfoU1liWT3ep7_GiIoNEy7bG112sSRh9pJBsyUppDDJvYI7AY
- 16) 水島未那人, 西晃生, 広田光一, 池井寧: 素早い動作を可能とした VR 環境の構築及び検証, *日本バーチャルリアリティ学会*, Vol.17 No.4, pp.429-438 (2012).
- 17) Jindrich Adolf, Peter Kan, Benjamin Outram, Hannes Kaufmann, Jaromir Dolezal, and Lenka Lhotska: Juggling in VR: Advantages of Immersive Virtual Reality in Juggling Learning, *VRST'19* (2019).
- 18) Rotem Lammfromm, and Daniel Gopher: Transfer of Skill from a Virtual Reality Trainer to Real Juggling, *BIO Web of Conferences* 1, 00054 (2011).
- 19) Ungyeon Yang: Implementation and Evaluation of "Just Follow Me": An Immersive, VR-Based, Motion-Training System, *Presence*, Vol.11, No.3, pp.304-323 (2002).
- 20) 脇田航, 齊藤充行, 小林 康秀: 没入型 VR 環境における舞踊動作訓練システム, *電気学会論文誌 C*, Vol.137, No.3, pp.495-501 (2017).