Vol.2021-HCI-192 No.10
2021/3/15

仮想テニストレーニング支援システムにおける ボール衝突時のラケット位置姿勢提示による フィードバック手法の効果検証

石本岳[1]　福地健太郎[1]

概要：VR（バーチャルリアリティ）を用いたスポーツトレーニングが活発に研究されまた実用されつつある．こうしたシステムでは独力でのトレーニングを適切なフィードバックによって支援することが求められているが，その設計は難しい．様々な設計指針がこれまでに提案されているが，本研究ではフィードバックの内容を「練習者がどのように動いたか」と「練習者がどのように動くべきか」の 2 種類に大別した内の前者に着目し，これをごく短時間のみ提示することで時間当たりの練習量を増やし，後者については練習者が試行錯誤を繰り返すことによって自力で獲得することを期待する，という設計指針に基き，フィードバックを静止した像のみで提示する手法を考案した．具体的にはテニスを題材に，飛んできた球を目的に向かって打ち返すという課題において，ラケットとボールが衝突した際のラケットの位置姿勢のみをゴースト (ghost) としてフィードバックするよう実装した．21 名を対象とした実証実験を行った結果，提案手法が課題の成功率を向上させることがわかった．　これより，フィードバックを適切に絞り込み，時間当たりの練習量を増やすことでトレーニングを支援するという指針が妥当であることを示すことができた．

キーワード：スポーツトレーニング，　視覚的フィードバック，バーチャルリアリティ

1. はじめに

近年，VR（バーチャルリアリティ）を用いたスポーツトレーニングが活発に研究され，また実用されつつある[1-2]．バーチャル環境でのスポーツトレーニングにおいて，練習者のパフォーマンスを分析し，その結果を視覚的にフィードバックすることで，トレーニング効果が増大することや[4]，適切なフィードバックがあればトレーナーがいなくてもセルフトレーニングにより効率的な練習を行うことが可能であること[10]が報告されている．

タスク中に視覚的フィードバックを与える場合，その頻度については議論が続いている，頻繁に与えると学習を阻害するとする研究がある[11]一方で，メタ分析の結果それは artifact の影響によるものだとする報告もあり[3]，高頻度のフィードバックを支持する研究もある[12]．また，　実際のトレーニングを考えると，時間内におけるタスクの量を増やすのには制約を伴う，テニスのトレーニングを例にとると，飛んできたボールを打ち返すタスクにおいて，打ち返したボールがどこへ飛んでいくかを見定めるための時間があるため，タスクにかかる時間をそれより短くすることは難しい．さらに，「練習者がどのように動くべきか」をフィードバックするような先行研究は多数存在するが，「練習者がどのように動いたか」をフィードバックするものは数が少ない．

そこで我々は，フィードバックを瞬時に確認可能な簡素な形でのみ提示し，また不要なインタラクションを極力削減する手法を検討している．具体的には，テニスにおけるボールの打ち返しを題材に，ゴーストによるヒット時のラケット姿勢と打ち返したボールが目標に当たったか外れたかという結果のみ表示し，それ以外の「姿勢をどう改善すべきか」といった情報はフィードバックせず，またボールが飛んでくるスパンを短く設定することで，単位時間あたりの試行回数を増やし，練習者が効率的にタスクを学習する手法を試みている．また，練習者がどのように動くべきかについては，試行錯誤を繰り返すことによって自力で獲得することを期待する．

図 1　バーチャルテニスシステム

この手法の効果を検証するために，テニスコートを模した仮想環境においてラケットによるボールの返球を行うことのできる「バーチャルテニスシステム」(図 1)を作成し，実験を行った．本システムでは，ボールを打った瞬間のラケットの位置・回転情報を視覚的フィードバックとして提示することでユーザーの上達を促す．これは，ユーザーが打球した瞬間のラケットの 3D オブジェクトを半透明かつ赤色で数秒間表示するものであり，以後，ラケット ghost と呼称する（図 2）．実験では被験者 21 人を，ラケット ghost を打球中にごく短時間表示するオンライン群，ラケット ghost を打球後に遅れて長時間表示するオフライン群，ラケ

1 明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科
Department of Frontier Media Science, Faculty of Interdisciplinary Mathematical Sciences at Meiji University

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

ット ghost を表示しない非表示群に振り分けた．各被験者は，チュートリアルなどを行った後，振り分けられた実験群に対応する視覚的フィードバック条件でタスクを行うステージ 1 と，振り分けられた実験群にかかわらず視覚的フィードバックを表示しない条件でタスクを行うステージ 2 で構成される実験を行う．ステージ 2 は，ステージ 1 を通して得たスキルが視覚的フィードバックの存在しない条件下で反映されているかを確かめるものである．

実験の結果より，提案手法によって的への命中率の向上が見られたものの，統計的な有意差を示すまでには至らなかった．また打球時のラケット角度に提案手法による改善の傾向が観察された．実験条件やタスク設定には改良の余地があるため，それらを改善したのちに再実験を行うことを検討している．

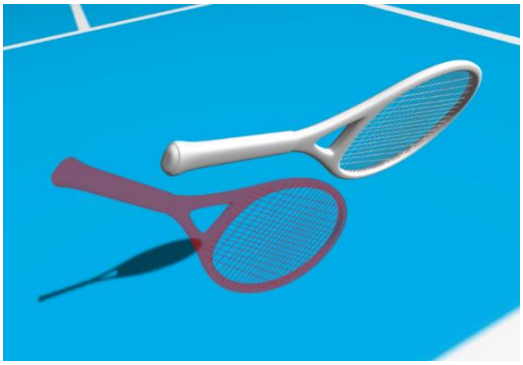

図 2　ラケット ghost

2. 関連研究

2.1 運動学習

運動学習は 3 つの異なるフェーズで特徴づけられる[5]．第一段階は学習の初期段階で，練習者が学習対象の運動についてのイメージを持っていないフェーズである．このフェーズでは，学習が急速に進行し，脳内で運動のイメージが形成される．第二段階は，運動のイメージと実際の運動を比較し，修正していくフェーズである．第三段階は，運動が自動化され，一貫した方法で実行されるフェーズである．

また，運動学習におけるタスクは，一度の練習では習得できず，運動の自由度が複数存在する複雑なタスクと，一度の練習で習得でき，運動の自由度が 1 つである単純なタスクに二分することができる[6]．

本実験では，テニスの経験が無い被験者は第一段階，経験のある被験者は第二・第三段階のフェーズで学習を行うことになる．加えて，テニスの返球タスクは体全体を用いる複数の自由度を持った複雑なタスクであると言える．

2.2 視覚的フィードバック

バーチャル環境でのスポーツトレーニングにおいて，視覚的フィードバックを工夫することでトレーニング効果が増大した事例が多く報告されている[7-9]．また，実際にトレーナーの下でトレーニングを行うより効率的であるという事例も報告されている[10]．

視覚的フィードバックには，タスク中に提示するオンラインフィードバックと，タスク後に提示するオフラインフィードバックがある．一般に，オンラインフィードバックは単純なタスクの学習において有害であるとされている[11]のに対し，複雑なタスクの学習においては効果的であるとされている[12-14]．特に，学習の初期段階では，オンラインフィードバックまたは高頻度のオフラインフィードバックが効果的であることが示されており[15]，これは，複雑なタスクにおいてフィードバックにユーザーの注意を引き付けることで，認知的負荷を軽減しているからであるとする説が有力である[16]．加えて，オンラインフィードバックをすべての試行で提示する方が，数回おきのフィードバックよりも効果的であるとされている[17]．つまり，タスクが複雑であるほど，練習者はオンラインフィードバックからより多くの利益が得られる傾向にある．そこでボールの返球という複雑なタスクを扱う本研究では，オンラインでの視覚的フィードバックが有用であると考えた．

一般に，ユーザーが常に同じお手本の動きをなぞるようなオンラインフィードバックは，トレーニングを阻害することが示されている[18-19]．これは，ユーザーがお手本のフィードバックに依存してしまい，フィードバックが存在しない環境に移った際にトレーニングで習得したスキルが反映されないことが原因である．そのため，ユーザーの視覚的なオンラインフィードバックへの依存を防ぐような設計をしなくてはならない．また，ユーザーの運動学習を促進するためには，運動のエラーの自己推定を促す必要がある[20]．初期の学習段階より後の段階では，ユーザーがターゲットとなる動きと，自分の動きの差を自己推定できる状態にすることが大切であり，練習者がフィードバックを自分のパフォーマンスと関連付けられるようになると，学習効果が増加するとされている[21]．

これらを参考に本研究では，ごく短時間でのフィードバックがガイダンスへの依存を防止し，自身の動きを視覚的に確認することが運動のエラーの自己推定の効果を増強すると仮定し，次に述べるラケット ghost を設計した．

2.3 ghost

タスクに関連するオブジェクトを半透明な視覚的フィードバックとして提示する手法を ghost と呼ぶ．ghost において，ユーザーに模範となる運動をフィードバックする手法は多くの先行研究で用いられてきた．例えば卓球のトレーニングを行う研究では，仮想環境において事前にキャプチャーされた専門家のラケットモーションを ghost として表示することで，多次元的なラケットの動きを同時にフィードバックすることができた[22]．これにより練習者は，自分のラケットを ghost に重ね合わせることで，本物のコーチと練習したグループよりも早くターゲットショットを習得

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

した．対照的に，太極拳の姿勢とジェスチャーを学習する場合，練習者がトレーナーのモーションに全身を重ね合わせてもパフォーマンスが向上しなかった[23]. これは, ghost と自分の体との間で比較すべき部分が多すぎると，練習者はあまりにも多くの情報に圧倒され，どこを動かせばいいか分からなくなるからであるとされている[24]. また, 視覚的フィードバックは不透明度が低いものの方が完全に不透明なものよりも練習者の学習効果が高いことが分かっている[25]. 以上から， ghost は主要な特徴についてのみ可視性の低い状態で提供することが重要であると言える．したがって，本稿では，視覚的フィードバックである ghost を練習者のラケットのみに絞り，可視性を低く設定した．

3. バーチャルテニスシステム

これまでに述べた，複雑な運動の自己トレーニングを支援するフィードバック手法を具現化するために，本研究では仮想環境内でテニスの返球タスクを行うシステムを作成した．HMD とコントローラーを用いたバーチャルリアリティ（VR）システムを用いて体験することができ，実際にテニスをしている時に近い感覚でトレーニングを行えるよう，テニスコートの風景を 3DCG で再現した．なお，システム内のテニスコート，ラケット，ボールの大きさの比率は実際のものに近づけている．ソフトウェアは Unity ゲームエンジンを用いて構築し，HMD には Oculus Quest を用い，Oculus Link で PC と有線接続を行った．システム利用者は横 5m×縦 2．5m ほどのスペース内で，HMD と Oculus Quest 付属のコントローラー（利き手のみ）を着用した状態でシステムを体験する．

3.1 打球

このシステムでは，ユーザーが自分の利き手に着用しているコントローラーと仮想環境内で位置・回転が同期しているラケットを操作し, ボールの打球を行うことができる．ラケットの面には直方体の Collider がセットされており，ラケットの面とボールが衝突する（Collider 内にボール進入する）と，ボールの運動ベクトルがスクリプトによって変更される仕組みになっている．衝突後のボールの運動ベクトルは，単純な反射式で求められた反射ベクトルにユーザーのラケットを振る速度（衝突する直前 10 フレームでの移動距離の平均）を乗算することで求められる．また，ボールに関して回転や変形等は考慮していない．なおシステムは約 90fps で更新される．

3.2 タスク

ユーザーはこのシステム内で，自分に向かって放たれたボールを前方の的に向かって打ち返すというタスクを設定した球数行う．このタスク内でボールの発射ベクトルは一定であり，打球前・打球後は重力によってボールが落下する．なお，ユーザーの初期位置は，ボールの発射位置と正対する方向かつテニスコート後方であり，自由に移動することができる．また，床・ネット・壁にボールが当たった場合は，Unity の標準機能を用いて設定した反射係数を元に跳ね返る．反射係数は実際の値を参考に設定し，著者がシステムに合わせて微調整を行った．

3.3 バーチャルテニスシステムのモード

本システムは 5 つのモードで構成される

3.3.1 スタートモード

トレーニングを行う準備が整うまでの間，機器のキャリブレーションや正面の設定を行う．

3.3.2 チュートリアルモード

システムに慣れるために練習を行う（図 3）．キーボードのキー入力でスタートモードから遷移する．実験の際，被験者に VR への慣れと ghost の確認を行ってもらうことが目的である．事前に設定した速度ベクトルで前方から放たれたボールを手元のラケットで打ち返すことができる．なお，球数は自由に設定が可能である．

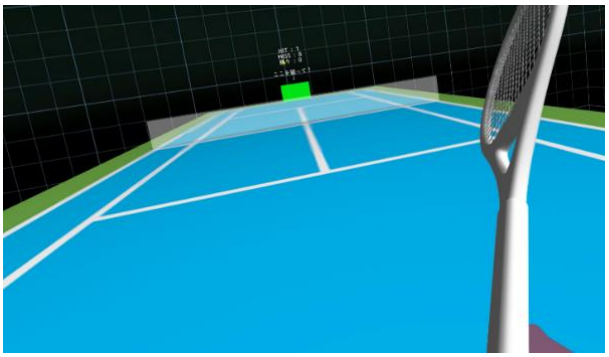

図 3　チュートリアルモード

3.3.3 待機モード

本番モードまでの準備を行う．チュートリアルモードで設定した球数が終了すると，自動で遷移する．実験では，このモード中, 被験者に本番への移行に対して同意を得た．

3.3.4 本番モード

チュートリアルモード同様，事前に設定した速度ベクトルで前方から放たれたボールを手元のラケットで打ち返すことができる（図 4）．こちらも，球数は自由に設定が可能である．実験では，打球時のラケットのパラメーターや，打球したボールが的に当たった割合（命中率）などのデータを収集した．

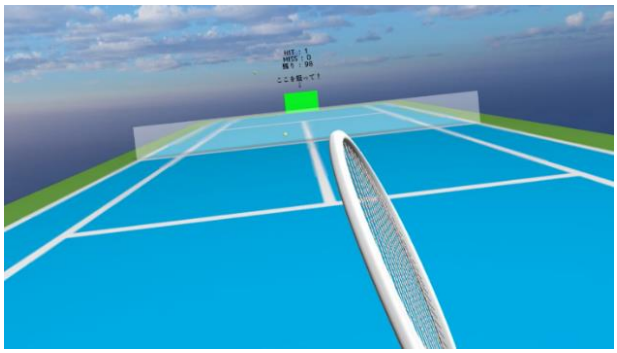

図 4　本番モード

3.3.5 結果表示モード

的に当たった数，外れた数，当たった割合を表示する．本番モードで設定した球数が終了すると，自動で遷移する．

4. 実験

提案手法の有効性の確認のため実験を行った（図 5）．実験協力者として 20 代前半の大学生・大学院生男女 21 名に本システムを体験してもらい，データを集計したのち，アンケート調査を実施した．

被験者 21 人を，ラケット ghost を打球中にごく短時間表示するオンライン群，ラケット ghost を打球後に遅れて長時間表示するオフライン群，ラケット ghost を表示しない非表示群に振り分けた．各被験者は，チュートリアルなどを行った後，振り分けられた実験群に対応する視覚的フィードバック条件で 99 球の打ち返しタスクを行うステージ 1 と，振り分けられた実験群に関わらず視覚的フィードバックを表示しない条件で 99 球の打ち返しタスクを行うステージ 2 を行う。

実験ではステージ 1 とステージ 2 での被験者がボールを的に当てた数、打球時のラケットの角度とスピード、アンケート結果からフィードバックと本システムの有用性を確かめる。

図 5　実験風景

4.1 実験群

被験者 21 人を実験条件の異なる 3 つの群に各 7 名ずつランダムに振り分けた．なお，全群共通で，チュートリアルモードでは 9 球，本番モードではフィードバックあり（ただし内 1 群は対照群としてフィードバックなし）で 99 球ボールの打ち返しタスクを行った後，すべての群でフィードバック非表示で 99 球の打ち返しタスクを行わせ，その上達率を指標として比較した．3 群の内訳は以下のとおりである．

オンライン群（提案手法）

打球後すぐにラケット ghost を 2 秒間表示する．ボールが放たれるまでの間隔は 3 秒である．

オフライン群

オフラインフィードバックを模した条件．打球してから 1 秒後にラケット ghost を 6 秒間表示する．ボールが放たれるまでの間隔は 9 秒である．

非表示群

視覚的フィードバックを表示しない．ボールが放たれるまでの間隔は 3 秒である．

4.2 実験の流れ

まず，被験者に実験に際する注意事項を説明し，HMD を装着させたのち，利き手のみにモーションコントローラーを持たせた．この時，本システムはスタートモードであり，被験者の向いている方向がシステム上の正面であることを確認した．その後，被験者に実験の流れを説明し，システムをチュートリアルモードに移行した．チュートリアルモードでは，オンライン群とオフライン群に対し，打球後には透明かつ赤色で表示されるラケットを意識するよう説明した．設定した球数が終了し，待機モードに移行すると，ステージ 1（本番モード）に移って良いか被験者に確認を行った．設定した球数が終了し，結果表示モードに移行すると，ステージ 1 が終了となる．ステージ 2 に移行する前に，一度 HMD とモーションコントローラーを被験者から外し，被験者の体力低下に伴う運動パフォーマンスの変化を防ぐために，2 分間の休憩を挟んだのち，ステージ 1 同様，HMD とモーションコントローラーを被験者に装着した．この時，本システムは待機モードで，被験者の向いている方向がシステム上の正面であることを確認し，ステージ 2（本番モード）に移行した．ここでは，実験群に関わらず，視覚的フィードバックを非表示かつ，ボールが飛んでくるまでの間隔を 3 秒に設定しシステムを体験してもらった．設定した球数が終了し，結果表示モードに移行すると，ステージ 2 が終了となる．

4.3 アンケート

実験終了後，被験者にシステムの使用感やトレーニングについてのアンケートを実施した．なお，Q3 はオンライン群とオフライン群のみに行った．

【質問項目】

Q1. ボールが飛んでくる間隔は適切でしたか？（7 段階評価）

Q2. 自分の持っているラケットの角度やスイングの速度とボールの飛び方は対応していましたか？（7 段階評価）

Q3. ボールを打った後に表示される赤いラケットの角度とボールの飛び方は対応していましたか？（7 段階評価）

Q4. この実験を通して，打ち返すのが上達したという実感

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

はありましたか？（7 段階評価）

Q5. テニスなどのラケットスポーツの経験がある場合は，経験年数を教えてください

Q6. どのような部分に気を付けてフォームを修正しようと試みましたか？

Q7. どのような部分に気を付けたらボールを上手く打ち返すことができましたか？

Q8. 気づいたことや気になったことがあればお書きください

5. 実験結果

本番フェーズの際，被験者毎に集計した 3 つのデータを分析する．1 つ目は，打球したボールが的に当たったか否かである．2 つ目は，打球時のラケットスピードである．衝突する直前 10 フレームでの仮想環境内におけるラケットの移動距離の平均をラケットスピードとして算出した．テニスのトレーニングにおいて，ラケットの移動スピードが上達の指標になることは先行研究で示されている[26]．3 つ目は，打球した際のラケットの角度である．打球時の仮想環境内でのラケットの三軸の回転情報を取得した．本実験において，的と打球前のボールは x 座標が同じであるため，的に当てるためにはラケットの yaw 角が重要になる（図 6）．yaw 角の絶対値で 0~180 度の範囲で表される角度Rが 0 に近いほど，ラケットの面が的に正対しており，的に当たりやすくなる．

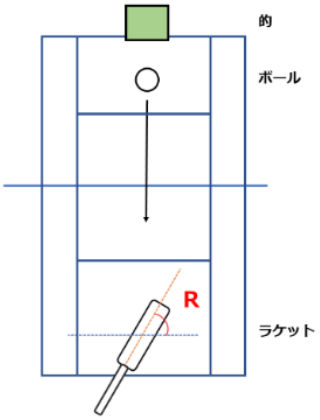

図 6　コート

5.1 命中率

各被験者において，ステージ 1 の的への命中率に対するステージ 2 の命中率（上達率）を調査する．ステージ 1 で的に当たった割合をH_1，ステージ 2 で的に当たった割合をH_2とすると，上達率H_cは以下の式で求められる．

$$H_c = \frac{H_2}{H_1}$$

実験条件によって命中率における上達率に違いがあるかを検討するために，t 検定を行った．被験者ごとの上達率を図 7 に，各群の上達率平均を図 8 に示す．なお，オフライン群において，実験で的に一度も球が当たらなかった被験者 1 名をデータ分析から除き，また上達率が 7 となった被験者のデータを外れ値とした．t 検定により求めた p 値を Bonferroni の手法で補正した結果，オンライン群対オフライン群，オンライン群対非表示群，非表示群対オフライン群においてそれぞれ p = 0.073，1.438，0.613 で，いずれも 95%水準での有意差は見られなかった．

実験群	ステージ1の命中率平均	ステージ2の命中率平均	上達率平均
オンライン	0.10	0.21	2.384
オフライン	0.11	0.15	1.357
非表示	0.09	0.16	1.678

図 7　被験者ごとの上達率

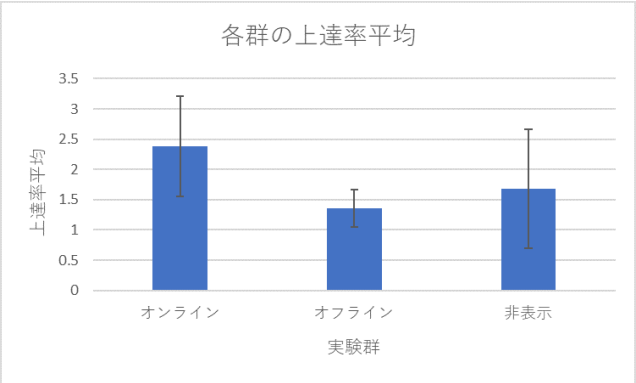

図 8　各群の命中率における上達率平均

5.2 ラケットスピード

各被験者について，ステージ 1 とステージ 2 それぞれでのラケットスピードの標準偏差を算出した．通常，上達につれてラケットスピードが上昇する傾向にあるが，本システムは実験後のアンケートの Q6 と Q7 において，「早く振りすぎるとボールが飛びすぎるので，ラケットスピードを抑えた」という意見が複数得られた．そのため，ラケット速度の安定が上達に繋がると考え，ラケットスピードの標準偏差を指標とした分析を行った．各群における被験者ごとの標準偏差を図 9～11 に示す．

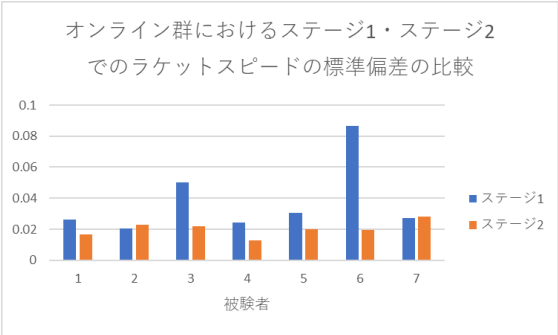

図 9　オンライン群におけるステージ 1・ステージ 2 でのラケットスピードの標準偏差の比較

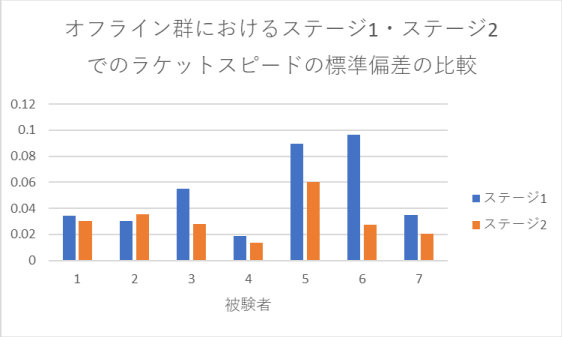

図 10　オフライン群におけるステージ 1・ステージ 2 でのラケットスピードの標準偏差の比較

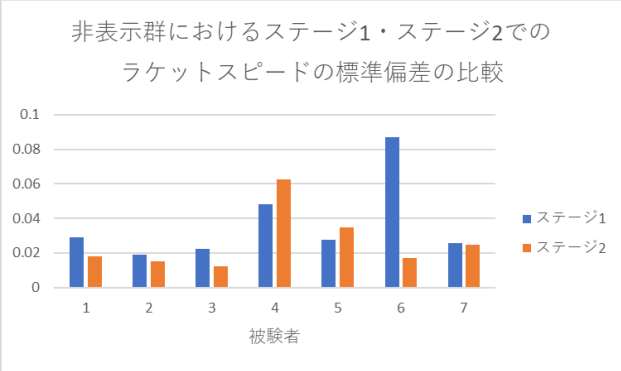

図 11　非表示群におけるステージ 1・ステージ 2 でのラケットスピードの標準偏差の比較

各被験者についてステージ 1 でのラケットスピードSの平均をS_1，ステージ 2 でのスピードSの平均をS_2とし，スピードの上昇率S_cを以下の式で求める．

$$S_c = \frac{S_2}{S_1}$$

条件間でS_cが異なるかどうかを検討するために，一元配置分散分析を行った．その結果 p= 0.686 となり 95%水準での有意差は見られなかった．

5.3 ラケットの角度

各被験者についてステージ 1 でのラケットの yaw 角の絶対値を示すRの平均をR_1，ステージ 2 での角度Rの平均をR_2とし，角度の変化率R_cを以下の式で求める．

$$R_c = \frac{R_2}{R_1}$$

各群におけるR_1とR_2の平均を図 12 に示す．条件間でRが異なるかどうかを検討するために，一元配置分散分析を行った．分散分析の結果 p= 0.311 となり，95%水準での有意差は見られなかった．

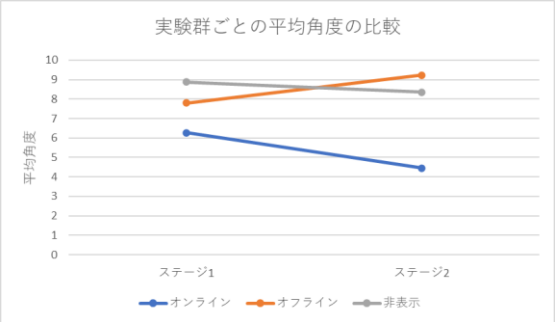

図 12　実験群ごとのR_1とR_2の比較

5.4 経験者と未経験者の比較

アンケートの Q5 に対し，ラケットスポーツを授業以外で継続的に行った経験があると答えた被験者 10 人を経験者群，そうでない被験者 11 人を未経験者群とし，2 群間での命中率における上達率の比較を行った（図 13）．なお，実験で的に一度も球が当たらなかった被験者 1 名をデータ分析から除き，かつ上達率 7 の被験者のデータを外れ値とした．また，オフライン群の経験者が 1 名であり，分散を算出できないため，データの分散分析は行わない．

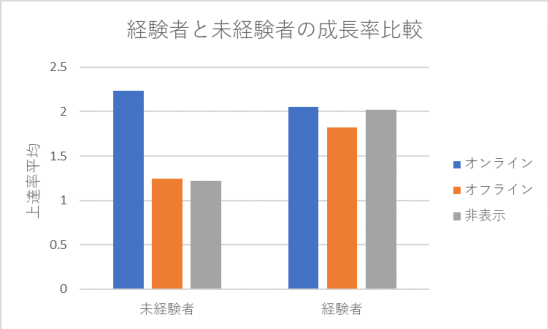

図 13　経験者と未経験者の命中率における上達率比較

5.5 アンケート

条件間でシステムの使用感に変化があるか調べるために Q1，Q2，Q4 において一元配置分散分析，Q3 においては非表示群は対象とならないため，t 検定による 2 群比較を行った．各群におけるアンケートの平均値の比較を図 14 に示す．分散分析の結果，Q1 は p= 0.053，Q2 は p= 0.938，Q4 は p= 0.163 であり，いずれも 95%水準での有意差は見られなかった．t 検定の結果，Q3 は p= 0.004 で 95%水準での有意差が見られた．

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

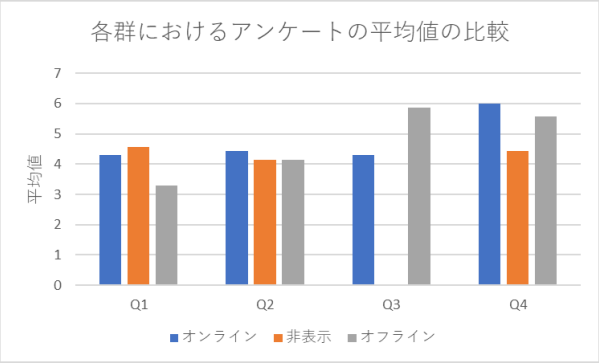

図 14 各群におけるアンケート平均値の比較

次に，経験者・非経験者の間でシステムの使用感に違いがあるかを調べるために，t 検定を行った．経験者・非経験者におけるアンケートの平均値の比較を図 15 に示す．Q1 は p= 1.479，Q2 は p= 0.500，Q3 は p= 0.521，Q4 は p= 0.660 であり， いずれも 95%水準での有意差は見られなかった．

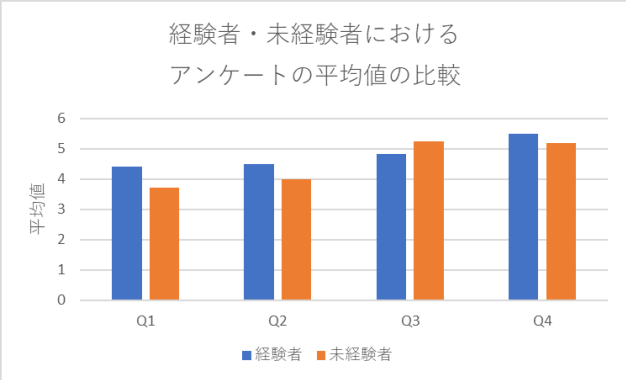

図 15 経験者・非経験者におけるアンケート平均値の比較

6. 考察

命中率において，各条件間の上達率を比較した際、95%水準では有意差が見られなかったが，オンライン群とオフライン群の差は注目に値する(p = 0.073)．後述するように，経験者と未経験者とで傾向が異なるため、実験条件を整理した上で，両者の被験者数を増したうえで再実験を行いたいと考えている．仮に提案手法が上達率の向上に寄与しておらず，オフライン群やと同等であったとしても，いなかったとしても，ステージ 1 においてオフライン群はオンライン群に比べてトレーニングにかける時間が長くなっているため，提案手法は時間効率的に優れた手法であると考えられる．

ラケットの角度の変化率において有意差は見られなかったが，非表示・オンライン群において，ステージ 1 からステージ 2 の間で平均角度が低下しているのに対し，オフライン群のみ平均角度が増加している．さらに，ステージ 2 におけるオフライン群の平均角度は，ステージ 1 の非表示群の平均角度を上回っている．このことから， オンラインでのラケット ghost が練習者のスキルの上達を促しているのに対し，オフラインでのラケット ghost はスキルを悪化させている可能性がある．先行研究において，フィードバックへの依存がトレーニング結果に悪影響を及ぼすことが示されており[18]，本実験においてもオフライン群において長時間の視覚的フィードバックが，フィードバックへの依存を引き起こしたからではないかと考える．

経験者と未経験者を比較すると，未経験者では，オンライン群の上達率が他 2 群に比べて大きい傾向がある．そのため，未経験者にラケット ghost を用いる際は，ごく短時間のオンラインフィードバックが有効である可能性がある．これは，学習の初期段階では特にオンラインガイダンスフィードバックが有効であるという先行研究[12]の結果を支持するものである．一方，経験者には，3 つの群の間で上達率に大きな差が見られないことから，ghost によるガイダンスフィードバックが有効ではない可能性がある．

アンケートでは，Q3 においてオンライン群とオフライン群の間に有意差が見られたことから，オフライン群の被験者がラケット ghost とボールの飛び方に違和感を抱いていたと言える．Q6 において，オンライン群とオフライン群の被験者は，ラケットの角度やスピードを元にポーズの修正を試みたという回答のみであったのに加え，非表示群の被験者には自分の姿勢を修正したという回答がいくつか見られた．結果的にオンライン群の上達率が最も高かったことから考えると，視覚的ガイダンスが複雑なタスクにおいてユーザーの注意を引き付けることで，認知的負荷を減らしているという先行研究[16]の結果を支持していると考えられる．Q7 では，Q6 に比べて，ラケットスピードを緩やかにするという回答が多く見られたことから，打球時のボールが実際よりも飛び過ぎていることが分かった．また，実験時にボールが上手く打てなかった時のみ，ラケット ghost を確認しているオンライン群の被験者が複数見られたことから，ラケット ghost が自己管理型フィードバックとして機能していた可能性がある．自分の好きなタイミングでのみガイダンスを確認する自己管理型フィードバックは，学習効果を高めるという先行研究[8]が存在する．

7. まとめ・今後の課題

本稿では，VR を用いた仮想空間におけるスポーツトレーニングにおいて「練習者がどのように動いたか」と「練習者がどのように動くべきか」の 2 種類に大別した内の前者に着目し，これをごく短時間のみ提示することで時間当たりの練習量を増やし，後者については練習者が試行錯誤を繰り返すことによって自力で獲得することを期待する，という設計指針に基き，練習者の位置姿勢画像のみをフィードバックとして提示する手法を考案した．具体的にはテニスを題材に，飛んできた球を目標となる的に向かって打

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan

ち返すというタスクを行えるバーチャルテニスシステムを作成し，ラケットとボールが衝突した際のラケットの位置姿勢のみをゴースト (ghost) として視覚的にフィードバックするラケット ghost を実装した．評価実験の結果，特に初心者に対しては提案手法の優位性が示唆されたものの，統計的有意差は示されなかった．

今後の研究計画としては，経験者と初心者とで実験群をあらかじめ分けた上でより打球数を増やし，フィードバックがある状態での上達率を計測し分析することで，提案手法の効果をより精密に見極めたい．また，経験者においては命中率が頭打ちになっている場面が見られたため，トレーニング効果を精密に測定するために，ラケットとボールの衝突計算を改善する必要があると考えている．

参考文献

[1] NTT データが開発した,VR 技術を用いたプロ野球選手向けトレーニングシステム, https://2020.ntt/jp/innovation/technology/04.html
[2] イマクリエイト,業界初となる VR ゴルフトレーニングのサービスを開始, https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000009.000034298.html?fbclid=Iw
[3] Joan Vickers, Psychological research in sport pedagogy: Exploring the reversal effect. Sport Science Review (1994), 28–40.
[4] Roland Sigrist, Georg Rauter, Robert Riener, Peter Wolf , Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review, Psychonomic Bulletin & Review volume 20, pages21–53(2013)
[5] Schmidt, Richard A. Wrisberg, Craig A., Motor learning and performance: A situation-based learning approach (4th ed.). Human Kinetics.
[6] Gabriele Wulf, Charles H Shea, Principles derived from the study of simple skills do not generalize to complex skill learning, Psychonomic Bulletin & Review 9(2):185-211, July 2002
[7] 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 (2020), 26-32, 2020-08-22
[8] Suzete Chiviacowsky, Gabriele Wulf, Self-controlled feedback is effective if it is based on the learner's performance. Research Quarterly for Exercise and Sport, 76(1), 42–48, 2005
[9] Ungyeon Yang, Gerard Jounghyun Kim, Implementation and Evaluation of "Just Follow Me": An Immersive, VR-Based, Motion-Training System, PRESENCE: Virtual and Augmented Reality, Volume 11, Issue 3, June 2002, p.304-323
[10] Emanuel Todorov, Reza Shadmehr, Emilio Bizzi, Augmented Feedback Presented in a Virtual Environment Accelerates Learning of a Difficult Motor Task, Journal of Motor Behavior, Volume 29, 1997
[11] Franz Marschall, Andreas Bund, Osef Wiemeyer, Does frequent augmented feedback really degrade learning? A meta-analysis, E-Journal Bewegung und Training, 1 (2007), 74-85
[12] Snodgrass, Rivett, Robertson, Stojanovski, Real-time feedback improves accuracy of manually applied forces during cervical spine mobilisation Liebermann, Manual Therapy 15(1):19-25, July 2009
[13] Michael Lee, Anne Moseley, Kathryn M Refshauge, Effect of Feedback on Learning a Vertebral Joint Mobilization Skill, Physical Therapy 70(2):97-102; discussion 103-4, March 1990
[14] Ju-Ying Chang, Guan-Liang Chang, Chia-Jen Chang Chien, Kao-Chi Chung, Ar-Tyan Hsu, Effectiveness of two forms of feedback on training of a joint mobilization skill by using a joint translation simulator, Phys Ther, 87(4):418-30, Apr 2007
[15] Dario G. Liebermann, Larry Katz, Mike Hughes, Roger M Bartlett, Advances in the application of information technology to sport performance, Journal of Sports Sciences, 20(10), 755–769, 2002
[16] Gabriele Wulf, Attentional focus and motor learning: A review of 10 years of research, E-Journal Bewegung und Training, 1, 4–14, 2007
[17] Gabriele Wulf, Charles H. Shea, Sabine Matschiner: Frequent feedback enhances complex motor skill learning, Journal of Motor Behavior, 30(2), 180–192, 1998
[18] Sandra Sülzenbrück, Herbert Heuer, Type of visual feedback during practice influences the precision of the acquired internal model of a complex visuo-motor transformation, Ergonomics, 54(1), 34–46, 2011
[19] Emanuel Todorov, Reza ShadmehrJohns, Emilio Bizzi, Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task, Journal of Motor Behavior, 29(2), 147–158, 1997
[20] Stephan P Swinnen, Richard A. Schmidt, Diane E. Nicholson, Diane C. Shapiro, Information feedback for skill acquisition: Instantaneous knowledge of results degrades learning. Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 16(4), 706–716, 1990
[21] George Tzetzis, Evandros Votsis, Kourtessis Thomas, The effect of different corrective feedback methods on the outcome and self confidence of young athletes, Journal of Sports Science and Medicine, 7, 371–378, 2008
[22] Emanuel Todorov, Reza Shadmehr, Emilio Bizzi, Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task, Journal of Motor Behavior, 29(2), 147–158, 1997
[23] Philo Tan Chua, R. Crivella, B. Daly, Ning Hu, Training for physical tasks in virtual environments: Tai chi. In Virtual Reality Conference, IEEE (pp. 87–94). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2003
[24] Daniel Eaves, Gavin Breslin, Paul van Schaik, Emma Robinson, The short-term effects of real-time virtual reality feedback on motor learning in dance. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 20(1), 62–77, 2011
[25] Christelle Robin, Lucette Toussaint, Yannick Blandin, Luc Proteau, Specificity of learning in a video-aiming task: Modifying the salience of dynamic visual cues, Journal of Motor Behavior, 37(5), 367–376, 2005
[26] Nicolas Robin, L. Dominique, Lucette Toussaint, Yannick Blandin, Effects of motor imagery training on returning serve accuracy in tennis: the role of imagery ability, International Journal of Sport and Exercise Psychology 2:177-188, 2007
[27] Alexandra Covaci, Anne-Hélène Olivier, Franck Multon, Visual Perspective and Feedback Guidance for VR Free-Throw Training, September 2015 IEEE Computer Graphics and Applications 35(5), 2015

ⓒ2021 Information Processing Society of Japan