



# バーチャルスポーツ環境における身体性の変化に 対する習熟度別運動解析

Motor Analysis on Delay of Virtual Embodiment  
by Skill Level in VR Sports Environment

遠藤愛奈<sup>1)</sup>, Adrien Verhulst<sup>2), 1)</sup>, 正井克俊<sup>3), 1)</sup>, 杉本麻樹<sup>1)</sup>, 木村聡貴<sup>3), 1)</sup>  
Aina ENDO, Adrien VERHULST, Katsutoshi MASAI, Maki SUGIMOTO, and Toshitaka KIMURA

1) 慶應義塾大学 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

2) 東京大学 (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

3) NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1)

**概要:** 本研究では、バーチャル環境での野球シーンでアバターの運動の時間構造を操作し身体性を変化させたときの習熟度別の運動変容を調査した。モーションキャプチャで取得した運動データよりも遅延して動く身体を実験参加者に提示した条件でバッティングを計測し、運動解析をした。解析の結果、未習熟者はスイングの時間構造をずらすことで調節したのに対し、習熟者は時間構造を維持しながら、スイングの回転角度幅や速さなどの空間構造や運動パラメータを変更して調整したという差異が明らかになった。

**キーワード:** スポーツ, 運動解析, バーチャル環境, スポーツ VR

## 1. はじめに

ヒトは視覚, 聴覚, 嗅覚, 触覚など多岐にわたるセンサで実環境を知覚し, その情報を元に判断を行い, 運動を生成している. 特に視覚は他の知覚に比べて優位であり, 視覚の影響を受け知覚が歪む現象が他の感覚よりも多く報告されている.

例えば, バーチャル環境で自身のアバターの身体のパラメータを操作することにより, 身体認知や運動を変化させられることが知られており, 実環境の身体運動に遅延を加えた視覚情報を提示することで身体が重いと感ずることが示唆されている[5].

本研究では, バーチャル環境で提示する視覚情報の操作により身体感覚や実際の運動が変容するという知見を野球のバッティングシーンに応用することを試みる.

野球のバッティングシーンでは, 極めてシビアな時間構造の中で知覚, 判断, 運動のタスクが行われている. また, 運動の高速性と複雑性の観点から, 日常生活の運動とは明確に区別される. 本研究では, このような高速かつ複雑な運動を要するスポーツシーンにおいても, 視覚情報による運動変容が起こるかを調査する. また, 野球の習熟者と未習熟者との間で運動変容にどのような違いが起こるかを解析する.

## 2. 関連研究

### 2.1 バーチャルリアリティとスポーツ

バーチャル環境は条件統制が容易であり, 同じ試行を繰り返し行うことも可能である. 現実では危険だったり不可能だったりする事柄も提示できる. このような利点を活かし, バーチャル環境を利用したスポーツ運動解析が行われている[1].

### 2.2 野球のバッティングに関する運動解析

野球はスポーツの中でも, 知覚から判断, 運動形成までに許容された時間が短いことが特徴的なスポーツであると言える. ピッチャーがボールをリリースしてからバッターの元にボールが届くまでに要する時間は 0.4 秒ほどであり, スイングの前動作には少なくとも 0.3 秒程度必要とされるため, ボールリリースからスイング開始までの時間的猶予は約 150 ms から 250 ms であると言われている[2]. また, 打撃成功のための時間的許容誤差は 9 ms と言われており, 野球のバッティングは極めてシビアな時間制御の中で行われている運動であると言える.

野球のバッティングの運動解析の研究例としては, 地面反力の計測を利用し正確で強いバッティングの要件を見出した研究[3]や, 複数選手に共通する運動の解析[4]が挙げられる.

### 2.3 パーチャル環境における身体所有感覚と運動変容

身体所有感覚とは、ある対象に対し、それを自己の身体だと認識する感覚のことである。バーチャル環境において視覚や運動が自己と同期しているオブジェクトに対しても身体所有感覚を生じることがある。

笠原らはアバターの運動を遅延させるとユーザは身体が重いと知覚し、また実際の運動にも変容が見られたということを報告した[5]。本研究では、この知見をスポーツに応用することを試みる。

## 3. 提案手法

### 3.1 野球 VR

NTT コミュニケーション基礎科学研究所スポーツ脳科学プロジェクトが構築した野球 VR システムを使用する。

当システムは Unity で実装されたバーチャル環境でバッティングができるシステムである。事前に投手による投球モーションと投球されたボールの回転数や軌道を計測しておき、そのデータを元にピッチャーアバターのモーションとボールの軌道がバーチャル環境に反映される。

打者の運動とバットの挙動はモーションキャプチャにより取得し、リアルタイムでバーチャル環境に送信される。

### 3.2 モーションキャプチャ

本研究では、バットと実験参加者の位置および運動を独立にキャプチャする。

複数台のカメラを用いて撮影空間内の再帰性反射マーカの3次元位置を推定する、光学式モーションキャプチャという手法を採用する。光学式モーションキャプチャは3次元位置推定の精度が高く、ユーザの運動の制限が少ない点で本研究に適している。

### 3.3 身体性の操作

モーションキャプチャによって取得した運動情報よりも遅延した運動をバーチャル環境上のオブジェクトに反映することで、身体性を変化させる。

バーチャル環境上では、モーションキャプチャで取得した運動情報をそのまま反映する Master と、それを追従するように動く Slave を実装する。Slave に含まれるあるボーンの第  $n$  フレーム目の3次元位置や姿勢を  $S(n)$ 、それと対応する Master のボーンの3次元位置や姿勢を  $M(n)$  とすると、パラメータ  $C$  を用いて次のような式で  $S(n)$  が決定される。

$$S(0) = M(0)$$

$$S(n) = S(n-1)(1-C) + M(n)C$$

この式で表現される遅延は速度変化をもたらすもので、単に時間軸上でスライドさせたものでないことに注意されたい。 $C$  の値が小さいほど遅延の程度が大きくなり、大きいほど Master の運動に漸近する。

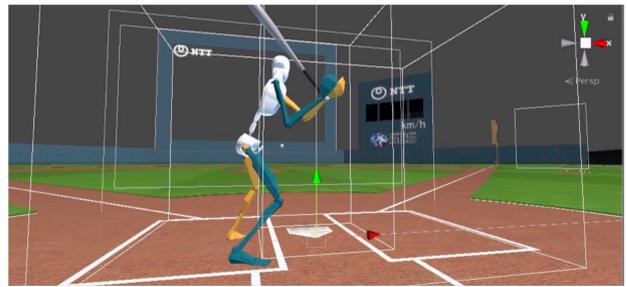


図1：バーチャル環境の様子



図2：実験参加者の様子

## 4. 実装

### 4.1 システムの概要

本研究のバーチャル環境は Unity2018 で構築した。図1に構築したバーチャル環境内の様子、図2に実験参加者の様子を表す。

### 4.2 モーションキャプチャ

本研究ではモーションキャプチャシステムとして OptiTrack を使用した。合計 22 台のカメラを実験室に配置し、およそ  $3\text{ m} \times 4.5\text{ m}$  の範囲をトラッキングした。トラッキングソフトウェアの Motive2.2 により取得した運動データをバーチャル環境へストリーミングした。

実験に使用したバットは長さ  $84\text{ cm}$ 、質量平均  $750\text{ g}$  の金属バットで、バットには 4 個の再帰反射性マーカを取り付けた。実験参加者は 37 個の再帰反射性マーカのついたスーツを着て実験に参加した。

### 4.3 アバターの運動

バーチャル環境上にアバターとバットのそれぞれで Master と Slave のオブジェクトを作成した。Master には透明化するマテリアルを取り付けて投影されなくなるようにし、実験参加者は Slave のみを見ることができるようにした。

データのストリーミングには OptiTrack の Unity プラグインを使用した。ヒューマノイドは Xsens MVN のものを使用した。アバターのスケールを実験参加者の身長に合わせて調節することで、他のオブジェクトとの位置関係に矛盾がなくなるようにした。

Slave の運動は LerpUnclamped 関数を使用して実装した。

## 5. 実験

実際の運動より遅延した運動をするアバターを提示したときに習熟度別でどのように運動を変容するか調査するため、実験を行った。システムの平均フレームレートは90 fps だった。

### 5.1 実験方法

実験は以下の手順で行なった。

- ① 運動未操作の状態で10球打席に立った
- ② 運動を操作し、自身のアバターの運動の様子を3人称視点で1分間観察した
- ③ 運動を操作した状態のまま10球打席に立った
- ④ 実験参加者には予告せず、運動未操作の状態に戻し10球打席に立った
- ⑤ アンケートに答えた
- ⑥ ②~⑤の過程を2条件で行い、終了したら最終アンケートに答えた

③④の過程において、1球ずつ投球開始から1フレームごとにMasterの28個のボーンの3次元座標と姿勢をcsvファイルに記録した。

### 5.2 実験条件

アバターの運動は遅延の程度の大小により2条件に分けた。条件1は $C = 0.15$ (遅延:大)、条件2は $C = 0.30$ (遅延:小)とした。

実験参加者は習熟者3名と未習熟者3名の合計6名で全員が右打ちの男性であった。投球されるボールはいずれの試行で変化させなかった。実験参加者には、打球がセンターに飛ぶよう調整するように説明した。

### 5.3 解析方法

記録した各ボーンの3次元座標、回転量のデータのうち、1試行ごとのバラツキが少なく、バッティングの運動がよく反映されていた、腰の鉛直方向に対する回転を解析対象とした。1フレームごとの回転角の差分を取り1フレーム経過にかかる時間で割った商を角速度とし、角速度の絶対値の最大値を最大角速度、最大角速度をとるときボールリリースからの経過時間をピークタイミングとした。また、回転角の最大値と最小値の差を回転量とした。

実験参加者1人あたり40試行における最大角速度、ピークタイミング、回転量を算出し、実験参加者ごとのスイングフォームなどの個人差をなくすため個人ごとに平均値との差分を算出し、検定に用いるデータとした。

## 6. 実験結果

### 6.1 習熟者と未習熟者の対応の違い

図3は横軸に時間、縦軸に腰のy軸まわりの回転角をとり、身体性を操作した前半10球分の腰の回転角の時系列変化を表したものである。上段が習熟者、下段が未習熟者のグラフである。上段と下段とを比べると、10球分のグラフの横軸方向ずれに差異が見取れる。習熟者は時間軸方向のずれが小さく、未習熟者は大きい。

そこで、習熟者と未習熟者でスイングのピークタイミン

グの等分散性を検定した。Levene 検定の結果、習熟者と未習熟者のピークタイミングのばらつきについて有意差が認められた( $p = 0.000415 < 0.001$ )。

### 6.2 身体性の違いへの対応

条件ごとに習熟者、未習熟者それぞれで身体性を変化させている前半10球と身体性を元に戻した後半10球の試行に分けて2群間に有意差があるかt検定を行なった。対象は最大角速度、ピークタイミング、回転量の3項目についてである。

解析結果を図4,5に示す。未習熟者においては、どの2群間においても有意差が認められなかった。1回の試行ごとの分散が大きかったことが要因として考えられる。

一方、習熟者では、条件1(遅延:大)のときは、前半10球は回転量を有意に小さくしていた( $p = 0.0000729 < 0.001$ )。また、条件2(遅延:小)のときは、前半10球で最大角速度を有意に大きくしていた。

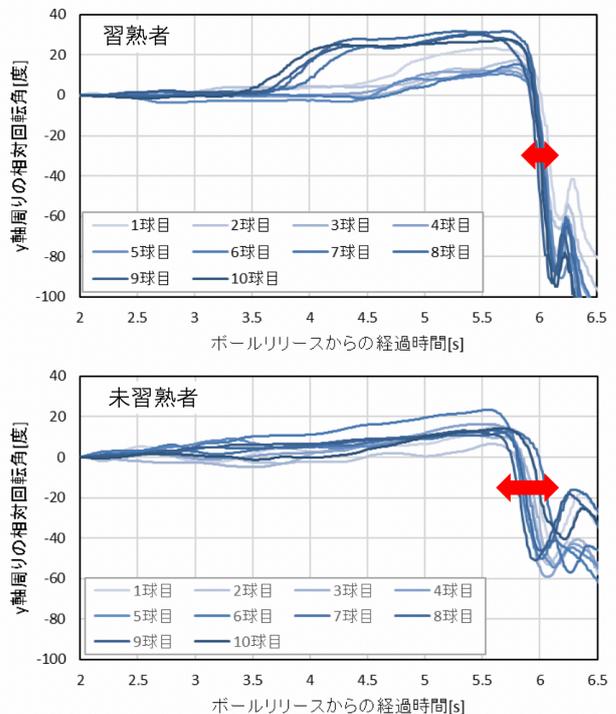


図3：条件1における前半10球の腰の回転角の推移

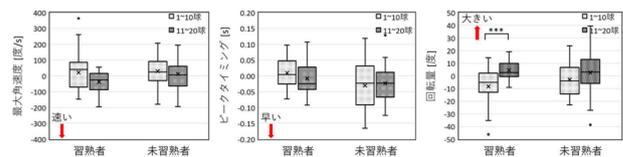


図4：条件1における前半10球と後半10球の運動変容

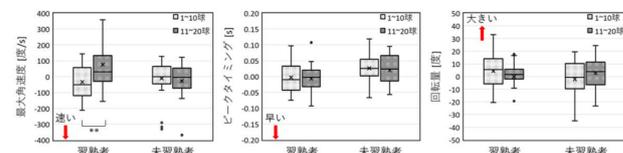


図5：条件2における前半10球と後半10球の運動変容

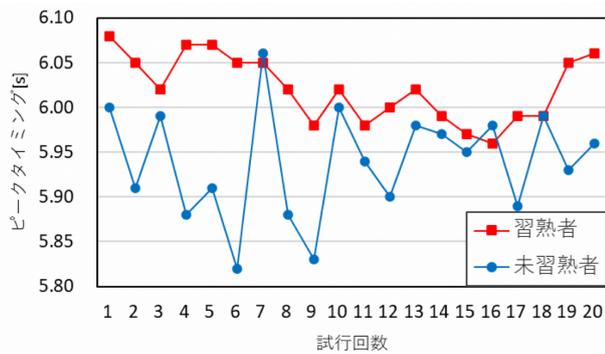


図6: 1球ごとのピークタイミングの推移

次に、1球ずつのピークタイミングの推移を解析対象とする。図6はある習熟者と未習熟者の条件1におけるピークタイミングの推移をグラフ化したものである。

未習熟者は習熟者に比べて1球あたりのピークタイミングの調整の幅が大きいことが見て取れる。そこで、前試行とのピークタイミングの差の大きさについて習熟者と未習熟者の2群でt検定を行なった。その結果、習熟者の1球ごとのピークタイミングの差は未習熟者のそれと比べて有意に小さいということがわかった( $p = 0.0000424 < 0.001$ )。

## 7. 考察

### 7.1 習熟者と未習熟者の対応の違いについて

結果より、身体性の変化に対して習熟者はバッティングのタイミング自体を変化させるのではなく、スイングの速さや強さ、回転量の大きさを調節して対応していると言える。実験後のインタビューにおいても、習熟者の1人は「自分が遅れているのはわかるがむやみにスイングするタイミングを前倒しすることは怖くてできない」と述べていた。実際の野球のバッティングシーンでは様々な球種の多様な速さ、コースの球が織り交ぜられて投球されるため、スイングをギリギリまで遅くして球を見極めようとする癖がついているそうだった。したがって、スイングする前の動作やスイングの強さを変更することにより微妙なタイミング調整を行なっているのだと考えられる。

また、習熟者のタイミング調整の幅は未習熟者のそれよりも有意に小さかったことから、細かくタイミング調整する技術が優れているということがわかる。

### 7.2 条件1と条件2での対応の仕方の違いについて

習熟者の結果において、遅延の大きい方の条件1では前半10球のスイングの回転量は後半10球のそれと比べて有意に小さかった。また、有意差は認められなかったがグラフより最大角速度も前半10球の方が後半10球よりも小さいことがわかる。アンケートによる内観報告によると条件1における「バッティングのタイミング調整の容易さ」の項目の回答のポイントは条件2よりも低かった。これらの

ことから、条件1では遅延の程度が大きいがゆえにバッティングのタイミング調整が困難だったのでスイングの速さや回転量を小さくすることでバットコントロールを重視しようとしたのではないかと考えられる。

一方で条件2では遅延の程度が小さく、微妙な身体の遅れに対してスイングを速くすることで対応したのだと思われる。

また、未習熟者の前半10球と後半10球に有意差が見られなかったのは、バッティングが安定してなくて各試行の運動のばらつきが大きく、群間の差との区別がつかないからであると考えられる。これについては、今後、試行回数や実験参加者を増やすことで検証していく。

## 8. 結論

本研究では、バーチャル環境での野球バッティングシーンにおいて、自身の実際の運動よりも遅れた運動をするアバターを提示したときの習熟度別の運動変容を調査した。

アバターの遅延への対応について習熟者と未習熟者の間で差異が見られた。未習熟者はスイングのタイミング自体をずらすことで運動の遅れに対応しようとしたのに対し、習熟者はタイミングではなくスイングの速さや回転量を変更して対応しようとした。また、習熟者は未習熟者に比べてタイミング調整の分解能が高く、より緻密な調整をする技術があるということがわかった。

### 参考文献

- [1] 木村聡貴, 三上弾. 打者は打席で何をしているのか? 打撃パフォーマンス分析に向けたバーチャルリアリティの活用. 日本神経回路学会誌, Vol. 7, No. 2, pp. 8-15, 2002.
- [2] 井尻哲也, 中澤公孝. 野球のバッティングにおけるタイミング制御. 日本神経回路学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 124-131, 2017.
- [3] 勝又宏, 川合武司. 地面反力からみた異なる投球速度に対する野球の打撃動作の特性. 体育学研究, Vol. 40, No. 6, pp. 381-398, 1996
- [4] 那須大毅. 野球の投手-打者対戦からみたバッティングの時間構造. 日本神経回路学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 132-137, 2017.
- [5] Shunichi Kasahara, Keina Konno, Richi Owaki, Tsubasa Nishi, Akiko Takeshita, Takayuki Ito, Shoko Kasuga, and Junichi Ushiba. Malleable embodiment: Changing sense of embodiment by spatial-temporal deformation of virtual human body. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 6438-6448, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.