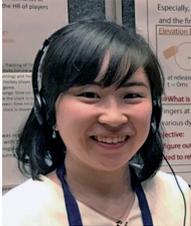


[研究助成 (C)]

熟練技術における指先による巧みな修正動作の解明

Elucidation of correction behavior by fingertips in expert skills

2217003



研究代表者 東京大学 大学院総合文化研究科 博士課程 草 深 あやね

[研究の目的]

スポーツ動作や楽器演奏，職人仕事における熟練者は身体を“巧みに”操ることができる。しかし，その多くはほぼ無意識に身体を動かし，思い通りに目的を達成できるようになっているため，自身の技術を他者に言語化して伝えることは難しい。さらに，近年は少子化などによる継承者の減少が重なり，ロストテクノロジー化が社会問題となっている。本研究は，熟練技術の中でも，熟練者が正確な動作を繰り返すために感覚的に行っていると考えられる，指先による修正動作の定量化を目的とする。

[研究の内容，成果]

本研究では，熟練者が指先による微細な修正を行っていると考えられる野球のピッチング動作 (Hore & Watts, 2011) を対象とした。動作遂行中に結果 (ボール到達位置) の正確性を高めるための修正を行うには，結果を決定する最後の瞬間 (ボールリリース時) に向かって，ボールを理想的な状態に近づける・維持する能力が重要である。この能力を明らかにするには，まず理想的な状態とは何かを明確にする必要がある。一般的にボールの理想的な状態とは，リリース時の速度や回転など多変数の組み合わせによって決まるが，これまでの研究から，ピッチングにおいては，投射角度さえ適切な範囲内

に収まっていればボールを目標位置に到達させられることが明らかとなっている。そこで投射角度を基準にボールの理想的な状態を特定し，それに対する指先の運動の関わりを明らかにすることとした。

しかしながら，投球中の指先やボールのように，高速かつ微細な動きを計測する場合，例えば，マーカーを貼付する従来の動作計測方法では正確に計測することが困難であった。そこで本研究では，深層学習を利用した自動画像認識技術を援用することで，マーカーを貼付せずに高速で微細な動きを取得することを試みた。具体的には，上記実験プロトコルの構築及び従来手法との精度比較を行った後，投球中の指先が正確性に与える影響について明らかにした。

実験プロトコルの構築と精度検証

方法

野球投手経験者 1 人 (右投げ) が捕手の構えたミットに向かって行った 30 球の投球を対象とした。ボールは軟式球を用い，球種は全球ストレートとした。ミット (幅，長さ約 20 cm) は地面から 90 cm，ホームベース (ピッチャープレートから 10 m) の後方 50 cm に中心を設定した。参加者は「目標にできるだけ正確に全力で投げるように」指示された。実験は屋内の実験室で行った。

投球腕の手関節，示指及び中指における中手指節関節 (Metacarpophalangeal joint: MP)，

近位指節間関節 (Proximal interphalangeal joint: PIP), 遠位指節間関節 (Distal interphalangeal joint: DIP), 爪 (Tip of finger: TIP) の中心に計 10 点のマーカーを貼付し, 赤外線カメラ 10 台を含む光学式 3 次元動作分析装置, 及び投手の後方と投球腕側に置かれた 2 台のハイスピードカメラを用いて撮影した (いずれも 960 fps; 図 1)。ボールには中心位置を算出するため, 6 点のマーカーを貼付した。

2 台のハイスピードカメラの同期には LED 照明と市販の同期装置を用い, 光学式 3 次元動作分析装置との同期には, LED 照明点灯と同時に入力されるアナログ信号を用いた。データを取得した動作局面は肩関節の最大外旋からボールリリース後約 20 ms までの約 60 ms とした。

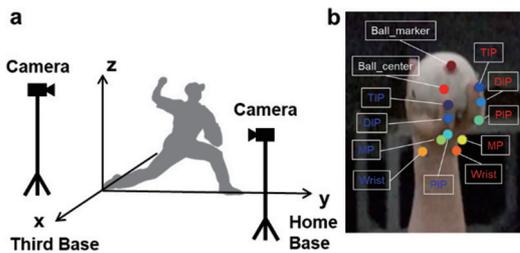


図 1 実験設定

ハイスピードカメラ画像上のボールと指の各点は, 深層学習に基づく自動画像認識技術 DeepLabCut (Nath et al., 2019) を用いて取得した。学習前に動画はボールリリースフレームを基準にトリミングされた。ボールリリースフレームは, 投手の横に置かれたカメラ画像の定性的な観察によって特定された。1 試行から 20 枚の画像を DeepLabCut の自動機能で抽出し, 手動でのラベル付けを行った。得られたラベル付き画像を用いて学習を 35000 から 55000 回繰り返した後, これらのモデルを用いて残りの全ての試行の画像上の点を追跡した。モデルはカメラごとに個別に作成した。

位置座標の変換には, 水平方向に 3 点 (0.1 m 間隔), 垂直方向に 3 点 (0.2 m 間隔), ホームベース-ピッチャープレート方向に 3 点 (0.1

m 間隔) の計 27 点の校正点を用い, ボールと指の位置座標を直接線形変換 (direct linear transformation: DLT) 法により算出した。カットオフ周波数 60 Hz の 4 次ローパスデジタルバターワースフィルタを使用した後, 11 点の特徴点について 2 種類のモーションキャプチャシステムにより得られた 3 次元座標間の絶対距離及び相対距離を算出した。また, 各特徴点の 3 次元座標について相関解析を行った。3 次元直交座標は, マウンド上のピッチャープレートを中心を原点とし, x 軸を三塁方向 (水平軸), y 軸をホームベース方向 (矢状軸), z 軸を鉛直上方向 (鉛直軸) と定義した (図 1)。

ボールの速度ベクトルは中心位置を微分することで算出し, 投射角度は, ボールリリース時の速度ベクトルの向きを極座標における仰角 θ_1 (-90° – 90°) と方位角 θ_2 (-90° – 90°) で表した。 θ_1 の正方向を上方向, θ_2 の正方向を三塁側方向とした。投射角度のばらつきは, 投手ごとの全試行における標準偏差とした。

結果

図 2a はある 1 試行におけるマーカーレスモーションキャプチャシステム (左), 及び従来のモーションキャプチャシステム (右) により得られた各特徴点の座標を図式化したものである。また, 図 2b はその試行における各 3 次元座標の時系列を重ねて示したものである。全ての特徴点において 2 種類のモーションキャプチャシステムにより得られた各 3 次元座標の時

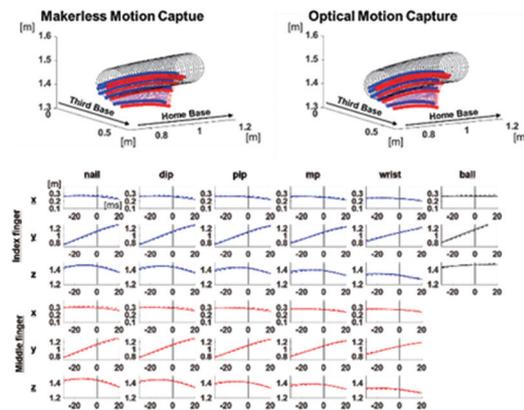


図 2 実験設定

系列プロファイルは類似していた。

各試行における2種類のモーションキャプチャシステムにより得られた各3次元座標の差の平均を算出した。3次元空間上での両座標の絶対距離の平均は15.5 mm~29.4 mmの範囲となった。ただし、ボールの中心については、試行によりハイスピードカメラの画角にデータ取得局面が全て含まれていなかったため、ボールリリースの瞬間までを解析対象とした。さらに、2種類のモーションキャプチャシステムより得られた各3次元座標の時系列について相関解析を行った。両者の相関係数は0.932~0.999の範囲となり、2種類のモーションキャプチャシステムより得られた各3次元座標の時系列が高い相関を示すことが分かった。

投球中の指先・ボールの動作計測と誤差修正方法

20人の大学野球投手(男性;年齢:20.6±1.9歳;身長:176.6±4.8cm;体重:73.5±8.6kg;右投げ17人)が実験に参加した。参加者は捕手の構えたミットに向かって30球の投球を行った。ボールは準硬式球を用い、球種は全球ストレートとした。ミットは地面から90cm、ホームベース(ピッチャープレートから18.44m)の後方50cmに中心を設定した。参加者は「目標にできるだけ正確に全力で投げるように」指示された。実験は全て屋外のグラウンドで行った。

投手の後方及び側方に設置した2台のハイスピードカメラでボールと指の動きを撮影した。身体の特徴点の座標算出方法は構築したプロトコル通りとした。ボールと手指の各特徴点の位置関係を明らかにするため、特徴点ごとにボールの中心に対する相対位置(Positional Relationship Index: PRI)を調べた。この指標は、グローバル座標系におけるボールの中心に対する相対3次元位置とした。この指標と投射角度のばらつき(SDθ1, SDθ2)との関係を、投手ごとにピアソンの相関検定により調べた。

結果

ボールに加わる力の主な作用点と考えられるTIPにおいて、投射角度のばらつきとの関係を検討した。図3aは、各投手の前額面(x-z平面)において、人差し指と中指のTIPの相対位置(PRI)の時系列変化を示したものである。

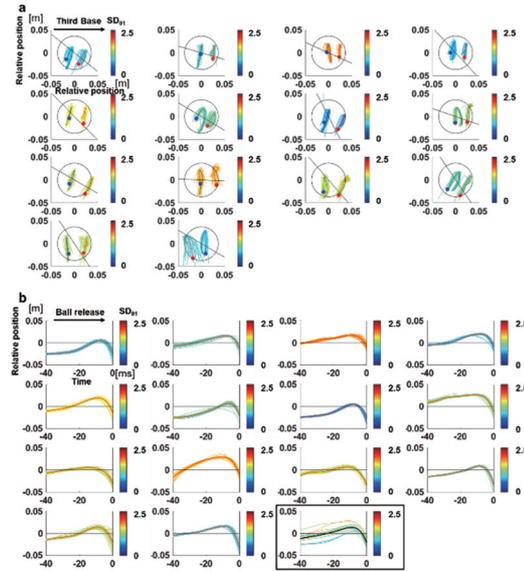


図3 ボールと指先の位置関係

中指のPRIのz方向における平均値とSDθ1との相関を調べると、両者間に有意な相関が見られる局面が存在することが分かった(p<0.05)。図3bは、各投手の中指のPRIのz方向における時系列を示したものであり、図4aは、各時刻の中指のPRIのz方向における平均値とSDθ1との相関係数、及びそのp値である。リリースの20-30ms前の中指の位置がボールに対して下部に位置するほど、SDθ1の値は小さくなった。この傾向はSDθ2においても同様

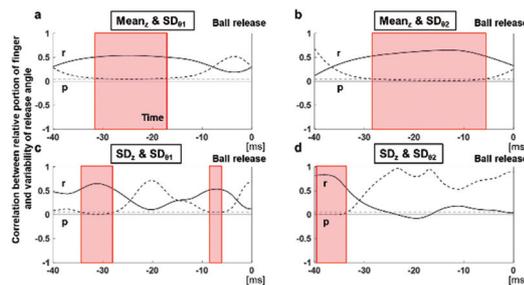


図4 指先位置と投射角度のばらつき

であった (図 4b)。

またリリース前において、中指の PRI の z 方向における SD と SD θ_1 , SD θ_2 には有意な相関がそれぞれ見られた (図 4c, d)。これらの局面では中指の相対位置のばらつきが小さいほど、投射角度のばらつきも小さくなった。一方で、中指の PRI の x 方向や、人差し指の PRI と SD θ_1 や SD θ_2 との間には、有意な相関が見られなかった。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究で構築したプロトコルのようにマーカーを貼付しない動作解析方法には、従来手法と比べた利点はいくつか存在する。従来手法には、手法そのものの特性に加え、高価な赤外線カメラを含む実験室環境を想定した機器を必要とするために、トレーニングやリハビリテーションなどの場には応用させづらいという問題が存在する。実際に、動作解析システムは特定の研究機関に局在していることも指摘されている (Lopes et al., 2018)。一方で、本手法は民生用のカメラを用いることができるため、これまで限られた研究者しかアクセスできなかった実験室外の環境でもヒトの動作を比較的容易に計測することを可能にするものである。したがって、動作計測の利用環境を広げるものとして今後の発展が望まれるものである。

さらに、本研究で対象とした手指動作は、これまでヒトの動作研究において手掌部を代表として解析されることが多く、特に全身運動における指に関する研究は、他の身体部位の運動に関する研究と比較して限られてきた。この背景には、従来手法の持つ制約ゆえに、指の運動を正確に計測することが困難であったことが考えられる。一方で、制御工学分野などでは、物体を扱う上で指先の微細な部分まで考慮する必要があることが明らかとなっており (Murray et al., 2017)、その検討の必要性は指摘されている。これまで着目されてこなかった身体部位の運動

を解析する手法が確立していくことは、肉眼では捉えにくい微細な運動を可視化することができるという点で意義を持つものと考えられる。

最後に、近年の科学技術の進歩に伴い、計測機器やデータ解析技術の進歩はめざましいものがあるが、これらの技術を用いても、ピッチングのようなヒトの高速全身運動における微細な力を、動作や感覚を妨げずに正確に計測することは現状では不可能である。本研究では、ボールの動きから逆計算により加速度を推定し、力の大きさ・向きの検討を行ったが、この方法ではボールに働く力を各指からの力を詳細に解析することは困難である。中指のふるまいにのみ相関が見られたことから、指によってボールに作用する力は異なる可能性がある。今後、力を簡単に取得できる計測技術 (例えば、ボールの表面に取り付けるセンサー) が開発されれば、今回見出した位置関係と合わせて、ボールの動きを決定するプロセスの詳細を得ることができる可能性がある。また、本研究では、ボールの中心に対する指先の位置を接触点として考えたが、指とボールの接触点は指先だけでなく、複数存在する可能性がある。指とボールの実際の接触点をすべて考慮するためには、やはりボールに加わる力を正確に把握する必要がある。

[成果の発表, 論文等]

学術雑誌等に発表した論文

Ayane Kusafuka, Kohei Nishikawa, Naoki Tsukamoto, Kazutoshi Kudo. "Positional Relationship between Ball and Fingers for Accurate Baseball Pitching". Available at SSRN 4054181, 2022

草深あやね, 塚本直樹, 宮田紘平, 工藤和俊. 「高速投動作における手指のマーカーレスモーションキャプチャとその精度検証」スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集 2022, A-15, 2022

国際会議における発表

Ayane Kusafuka, Kohei Nishikawa, Naoki Tsukamoto, Kazutoshi Kudo. "Ball-Finger Positioning for Accurate Baseball Pitching". Congress of The European Society of Biomechanics (ESB), Porto, Portugal, June, 2022 (口頭・査読有)

.....

Ayane Kusafuka, Kohei Nishikawa, Naoki Tsukamoto, Kazutoshi Kudo. "Control in Accurate Baseball Pitching Explored from Positional Relationship between Ball and Fingers". European College of Sport Science (ECSS), Sevilla, Spain, August, 2022 (ポスター・査読有)

国内学会・シンポジウム等における発表

草深あやね, 西川晃平, 塚本直樹, 工藤和俊. 「ボールと手指の位置関係から探る投球コントロール —— コントロールの「しやすい投げ方」と「しにくい投

げ方」——」日本野球科学研究会 第8回大会, 石川, 2021年 (ポスター・査読有)

草深あやね, 西川晃平, 塚本直樹, 工藤和俊. 「正確な投球コントロールのためのボールと手指の位置関係」第4回韃ひろば(日本バイオメカニクス学会), 大阪, 2022年 (口頭・査読有)

草深あやね, 塚本直樹, 宮田紘平, 工藤和俊. 「高速投動作における手指のマーカーレスモーションキャプチャとその精度検証」日本機械学会 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス, 北海道, 2022年 (口頭・査読有)