

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650385

研究課題名(和文)冗長な自由度の制御とパフォーマンスの正確性：制球力を決定する身体運動の制御方略

研究課題名(英文)Control of redundant degree of freedom regulating the accuracy of movement performance: Control strategy for determining throwing accuracy

研究代表者

松尾 知之(Matsuo, Tomoyuki)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00209503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、投球動作において、関節運動のバラツキを相互に補完するように、運動が制御されているのかどうかを明らかにすることを目的として行われた。社会人野球の投手18名を対象に、光学式モーションキャプチャーシステムを用いて、投球動作中の身体各部位の3次元座標値を得た。その値を基に、ランダムイズ法を用いてシミュレーション動作を生成し、実際の投球動作と比較した。その結果、最終効果器である手の位置、向き、移動方向の標準偏差は、シミュレーション動作の方が実際の投球動作よりも5倍から15倍も大きく、実際の投球動作では、相互補完協調動作が行われていたことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate whether the movement of pitching is controlled so that fluctuation arising at a joint is complemented mutually among joints. Data were collected from 18 semi-professional pitchers who threw a baseball from an indoor mound, by using a motion capture system with 16 high-speed cameras (1,000 Hz). A simulation motion was generated by using the direct kinematics with randomized method in which each joint angle is randomly selected from the 10 best pitches. One hundred set, one set was composed of 10 simulated motions, were generated. The standard deviations of the position, direction, and movement direction for the actual movement was compared with the 100 sets of the simulated motion. The SDs for the actual movement were much smaller than those for the simulated movements. It suggested that the actual pitching movement is controlled by some mechanism utilizing mutual-complementary coordination.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：身体システム学 スポーツ科学 身体運動学 運動制御 スポーツバイオメカニクス 生物・生体工学

1. 研究開始当初の背景

(1) これまで投球に関する研究では、投球速度の向上や投球傷害予防に関する研究が大半を占めており (ex: Fortenbaugh ら, 2009; Oyama, 2012; Whiteley, 2007)、制球力に関する研究は極めて少ない。近年、Hore ら (2005) は、ボールリリース付近の手指の動きを分析することで、制球力の向上にはリリース時の手や指の向きが重要であることを示した。しかしながら、彼らの研究は、座位での投球や立位で予め決められた場所に両足をステップした状態での投球など、実際の投球とは異なる条件で、手指の動作のみに着目している。したがって、彼らの結果を、実際のスポーツ場面で行われる全身のダイナミックな運動に外挿 (拡張) して解釈することには問題がある。

(2) 実際のスポーツ指導の現場では、経験的に、制球力の向上には強い脚力を基にした腰部や体幹部の安定性が重要であると言われている。これは、上述した Hore ら (2005) の手や指の動きが重要であるという結果と一致しない見解である。

(3) 近年、目標とする地点に手を伸ばすリーチング運動などを対象とした研究で、身体の持つ冗長な関節自由度を協調的に利用し、複数の関節を相互補完的に動作させていることが明らかになってきた。つまり、1つ1つの関節運動に変動があっても、最終効果器 (手や指先) の変動はそれらの積み重ねによって大きな変動になるのではなく、それぞれの変動を相殺するようにはばらつくことによって、最終効果器の変動を小さく抑え、正確な動作が可能になるという (Scholtz ら, 2000)。このような身体運動の相互補完的協調動作は、リーチング動作 (Scholz ら, 1999) や座位からの立位動作などの日常動作 (Reisman ら, 2002) の他に、フリスビーをバックハンドで投げるような動作にも含まれることが知られている (Yang ら, 2005)。

2. 研究の目的

野球の投球においても、これまで報告されてきたリーチング課題の結果と同様に、相互補完的な協調動作が行われている可能性がある。スポーツ動作の正確性や安定性がどのような身体の制御によって遂行されるのかを知ることは、新たなトレーニング方法や投球傷害予防プログラムを作成できる可能性がある。

そこで本研究では、野球の投球において、関節運動のバラツキを相互に補完するように、運動が制御されているのかどうかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 被験者は、日本野球連盟に所属する社会人野球チームの投手 23 名である。うち、

サイドスローの投手を除外した 18 名を分析対象とした。被験者は、実験に際して、実験内容に関する説明を受け、内諾書に署名した後に、キャッチボールを含む入念なウォーミングアップを実施した。その後、身体 48 箇所およびボール 4 点に反射マーカーを貼付した後、室内マウンドからキャッチボールおよび投球練習を実施した。投球は、約 19m 先の捕手の位置に設置した同心円の描かれたの中心を目掛けて、試合時を想定して、速くコントロールよく投げるのが要求された。投球練習後、実験開始とし、15 球を 1 セットとし、5 分から 10 分の休憩を挟んで 2 セットの投球を行った。実験終了後は、軽いキャッチボールを実施した。

(2) 実験時の投球動作を 16 台の高速度カメラ (1,000 Hz) を備えたモーションキャプチャーシステム (VICON MX, Oxford Metrics Inc., UK) で撮影した。撮影したマーカー位置を専用のソフトウェア (Nexus ver. 1.7.1, Oxford Metrics Inc., UK) で算出し、踏み出し足から手先に至るまでの関節角度を求めた。すなわち、下腿が地面となす角度、踏み出し足の膝関節角度、踏み出し足の股関節角度、腰部と腹部でなす角度、腹部と胸部とでなす角度、胸鎖関節角度、投球側肩関節角度、投球側肘関節角度、投球側手関節角度、投球側第三中手指節間 (MP) 関節角度、同近位指節間 (PIP) 関節角度、同遠位指節間 (DIP) 関節角度。

また、ボールに貼付した 4 つのマーカーからボール中心位置を算出することによって、リリース直後のボールの投射角を求めた。

(3) 指の運動学的分析には、データの平滑化を行わずに、加算平均を行った。

(4) リリース直後の速度ベクトルを求め、それを基にリリースパラメータを求めた。すなわち、速度ベクトルを水平面に投射し、投球方向となす角度をボール水平角度、投球方向垂直面に投射し、水平軸となす角度をボール垂直角度とした。また、リリース直前の手の向きや移動方向を同様にして求め、独立変数とし、それぞれのリリースパラメータを従属変数とした重回帰分析を行った。

(5) 相互補完的協調動作の有無は、ランダムイズ法を順運動学に適用することで検討した。まず、被験者毎に、試技の中からの当たり、且つ、速度の高かった投球を 10 球ずつ選択し、それらの試技の各関節角度を算出した。そして、足関節から第三中手骨骨頭に至るまでの 9 つの関節および足関節中心位置について、ランダムに角度または位置を選択した。この際、各関節に関しては回転 3 自由度を設定し、足関節中心位置に関しては並進 3 自由度を設定しているが、その 3 つの自由度は 1 セットとしてまとめて取り扱った。その角度等を順運動学に適用することによって、シミュレーション動作を生成した。

すなわち、足関節中心位置は試技1だが、膝関節角度は試技4、肩関節角度は試技10、手関節角度は試技3というように、関節角度の組み合わせをランダムにして、投球動作を生成した。このようなシミュレーション動作10試技分を1セットとし、100セット分を生成した。この100セットで計算した動作変動と、実際の10試技の動作変動を比較した。

4. 研究成果

(1) リリース時の指の運動

図1にリリース付近のMP関節運動の典型例を示した。MP関節のリリース直前・直後の動きは、被験者間でパターンは類似していた。つまり、MP関節はリリース10msec前までは、大きな屈曲または伸展運動は生じず、リリース直前からわずかに伸展を始め、リリース直後には急激な屈曲が始まった。この急激な屈曲は、リリース後6~8msecほどで、一旦、停滞またはわずかな伸展運動へと転ずるが、すぐに屈曲動作となった(図1)。

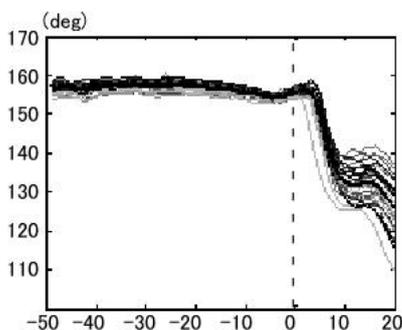


図1. リリース付近のMP関節運動の典型例. 縦の点線はボールリリース. 1つ1つの線は、各試技の生データ。

PIP関節ではMP関節よりも屈曲・伸展運動がかなり大きくなった。リリース10~20msec前に大きく伸展し始める。このときボールは手のひらから指先に向かって、転がり始める。PIP関節がほぼ真っ直ぐになると(160~175°)、ボールはリリースされ、PIP関節は一気に屈曲する。しかし、その屈曲はリリース後数msecで伸展運動と切り替わり、その後またすぐさま屈曲へと切り替わった。つまり、リリース前後のたかだか20msec程度の間、二峰性の伸展のピークが現れた(図2)。

DIP関節では、セグメント長が短いために、角度にすると他の関節運動に比べて、ノイズが大きかった。しかし、PIP関節同様、リリース直後に急激な屈曲動作が生じ、それに引き続き伸展動作の存在を明らかにすることができた(図3)。

これらの指の関節、特にPIP関節やDIP関節、で見られた極めて短い時間で行われる明白な屈曲・伸展運動のサイクルは、人間の運動制御問題を考える上で極めて重要な資料であり、今後の研究の進展が期待される。

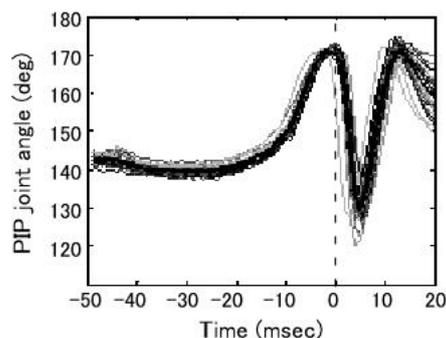


図2. リリース付近のPIP関節運動の典型例. 縦の点線はボールリリース. 1つ1つの線は、1試技の生データ。

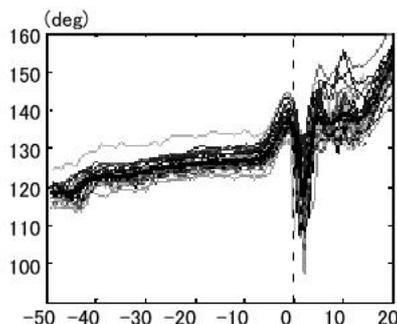


図3. リリース付近のDIP関節運動の典型例. 縦の点線はボールリリース. 1つ1つの線は、各試技の生データ。

(2) 制球力に与える指の影響

本研究では、MP関節までの動きで、どの程度制球力を推定できるのかを知ることによって、逆説的に指が制球力に与える影響を検討しようと考え、リリース直前の手の向きや移動方向を独立変数とし、リリース直後のボールの投射角(ボール水平角度あるいはボール垂直角度)を従属変数とした重回帰分析を、被験者毎に実施した。

その結果、ボールの水平角度は垂直角度に比べ、独立変数全体による説明率(累積重相関係数値)は高かった(0.45±0.18 vs 0.26±0.13)。また、独立変数の中で手の移動方向が最も高い説明率を示していた。しかし、被験者の中には、どの独立変数にも有意な相関を示さず、説明率も低いものもいた。ボールの垂直角度に対する各独立変数の説明率は、被験者によってかなり異なっていた。多くは、手の移動方向に有意な相関を示したが、その説明率は比較的lowく、ほとんどが0.2~0.3を示し、0.4を超えるものはいなかった。それ以外の独立変数においては、手の方向に高い説明率を示すものもあれば、リリース位置の高さあるいは左右方向に高い説明率を示すものがあるなど、一定の見解を得ることはできなかった。

これらの結果は、Horeら(2005)の垂直面で検討した実験結果と矛盾するものではなく、垂直面の制球力に関しては、指の影響が大きいものと推察できる。一方、水平面の制球力に関しては、手の移動方向で高い説明率を示す場合が多く、指の影響力が垂直面に比べて小さいものと思われる。

そこで、以下では、水平面の手の向きや移動方向がどのように制御されているのかに焦点を当てて、相互補完協調動作の有無を検証する。

(3) 相互補完協調動作の検証

身体各部位で生じる変動が、さまざまなレベル（神経細胞発火、筋収縮、力発揮、等々）でランダムに発生する“ノイズ”であるならば、相互補完関係は生じず、最終目的とする部位での変動は比較的大きなものとなる。一方、各部位で生じる変動が上記のランダムに発生した“ノイズ”と同程度であっても、相互補完関係を有するならば、最終目的とする部位での変動は、それらが相殺されるために比較的小さくて済む。

ランダマイズ法を順運動学に適用することによって、相互補完協調動作の有無を検証した結果、相互補完協調動作を行っていたことが明らかとなった（図4）。図4は典型例を示しており、各関節位置の標準偏差を、左から順に、1：踏み出し足の足関節、2：踏み出し足の膝関節、3：踏み出し足の股関節、4：腰部上縁、5：胸部下縁、6：胸鎖関節、7：投球側肩関節、8：投球側肘関節、9：投球側手関節、10：投球側第三MP関節（手掌部遠位）を示す。エラーバーを伴った細い線はランダムに生成したシミュレーション動作10試技分を1セットとし、その100セット分の平均値およびその標準偏差を示している。太線は実際の投球10試技分の関節位置の標準偏差を示している。

実際の各関節位置の標準偏差は2～5 cm程度で横ばいになっているが、各関節角度の組み合わせをランダムに選択したランダマイズ法の結果は、変動が徐々に拡大し、最終的に手掌部の位置の変動は、実際の10倍にもなっていることがわかる。

手の向きや移動方向に関しても、上記と同様の結果となった。向きに関しては、実際の標準偏差に比べて、シミュレーション動作の平均値は4.7倍となった。生成した100セットのシミュレーション動作の分布と比較したのが、図5である。100セットのどの組み合わせで生じた標準偏差よりも著しく小さい値を示していることがわかる。

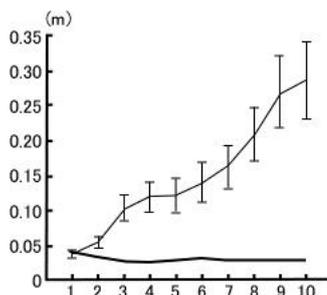


図4. 各関節位置の標準偏差の典型例. エラーバー付細線：ランダマイズ法によるシミュレーション動作の結果、太線：実際の結果. 1：足関節、2：膝関節、3：股関節、

4：腰部上縁、5：胸部下縁、6：胸鎖関節、7：肩関節、8：肘関節、9：手関節、10：手掌部遠位

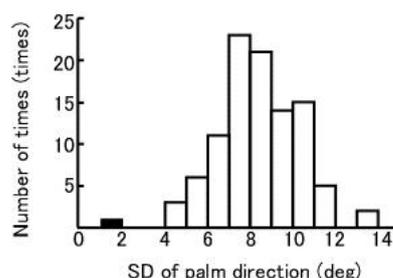


図5. リリース時の手の向き（水平方向の角度）の標準偏差の分布. 白いバーはランダマイズ法で生成されたシミュレーション動作の結果. 黒いバーが実投球時の標準偏差.

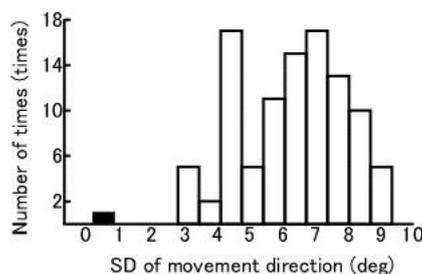


図6. リリース時の手の移動方向（水平方向の角度）の標準偏差の分布. 白いバーはランダマイズ法で生成されたシミュレーション動作の結果. 黒いバーが実投球時の標準偏差.

また、手の移動方向に関しては、実投球時の標準偏差は0.94度だったのに対し、ランダマイズ法の結果は6.74度となり、7倍となった。生成した100セットのシミュレーション動作の分布と比較したのが、図6である。手の向きと同様に、実投球時の標準偏差は、明らかに小さい。

本研究で行ったランダマイズ法の結果、最終効果器である手の位置、向き、移動方向ともに、各関節角度をランダムに抽出して組み合わせたシミュレーション動作のどれよりも変動が小さかったことが明らかとなった。すなわち、各関節で生じている変動は、単なる“ノイズ”ではなく、最終効果器（手）が目的を達成する（コントロール良く投げる）ために、必要な変動であったことを意味する。すなわち、相互補完的協調動作の存在が明らかとなったことを意味する。

(4) 指導現場への提言

上述のように、コントロール良く投げるためには、身体各部位が協調的に動くことが必要となる。これまでの指導現場で、コントロール良く投げるための対策として、“足腰を鍛える”、“投げ込む”が必要とされてきたが、それだけでは不十分である可能性が示唆される。つまり、指先の圧感覚や触覚、四肢や体幹の諸所の筋からの自己受容器あるいは感覚器から送られてくる情報を感度

良く受け取り、的確に処理をする能力が、欠かせない。それを効率よく達成するための1つの方法として、バリアビリティ・トレーニングが挙げられよう。すなわち、常に同じことを練習するのではなく、ボールの投擲距離や方向を変える、ボールの重さや大きさを変える、などのように、変化を与えることによって、受容する感度を高めようする方法である。

また、最終効果器（手や指先）の描く軌道をイメージすることも制球力向上に良い効果を及ぼす可能性がある。

本研究では、ボールの投射方向に対して手掌部での説明力が高かった水平方向に焦点を当てて検討したが、手掌部では十分な説明ができなかった垂直方向に関しては、指先の関与が大きいということを暗示し、指先の感覚の重要性が特に強調されるべきである。

制球力向上のために、ただ単に“投げ込む”だけでは、オーバーユースによる投球傷害に陥る危険性が高まってしまう。今後、本研究の知見を活かし、効率良く制球力を向上させる方法が確立されることを望む。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 1 件）

①松尾 知之、那須 大毅、神事 努 他、制球力は手掌までの動きでどの程度説明可能か？ 第 22 回日本スポーツバイオメカニクス学会大会. 北翔大学、2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 知之 (Matsuo Tomoyuki)
大阪大学・大学院医学系研究科・准教授
研究者番号：00209503

(3) 連携研究者

境 隆弘 (Sakai Takahiro)
大阪保健医療大学・保健医療学部・教授
研究者番号：60353009

佐藤 睦美 (Sato Mutsumi)
大阪保健医療大学・保健医療学部・講師
研究者番号：40444533

平山 大作 (Hirayama Daisaku)
独立行政法人日本スポーツ振興センター
国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・契約研究員
研究者番号：60466670

神事 努 (Jinji Tsutomu)
国際武道大学・体育学部・助教
研究者番号：20387616