

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500718

研究課題名(和文)投運動における運動連鎖に関するシミュレーション研究

研究課題名(英文)SIMULATION STUDY OF THE PROXIMAL-DISTAL SEQUENCE IN THROWING MOTION

研究代表者

藤井 範久 (FUJII, Norihisa)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：10261786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、投動作における運動連鎖が発生する要因を明らかにすることを目的とした。投動作のコンピュータシミュレーションを用いて、様々な条件での最適投動作を推定し、運動連鎖の現象がみられるのかを検討した。さらにシミュレーション条件に類似した投動作を実験的に分析し、シミュレーション結果の妥当性を検証した。その結果、投動作における運動連鎖を決定する要因は、ボールや上肢の慣性の分布よりも、上肢関節の自由度である可能性が高いと考えられた。たとえば肘関節は内外反軸が拘束されているため、受動トルクを有効利用するように肩関節水平内転は肩関節内旋よりも早いタイミングで生じ、運動連鎖が存在すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the contributing factors to the kinetic chain principle in throwing motion. Three-dimensional simulation of throwing was carried out under various conditions. The throwing motions under the similar conditions to the simulation were analyzed with a motion capture system in order to validate the simulation results. As the speculation derived the both results of simulation and motion capture, the contributing factors to the kinetic chain principle were not the inertia distribution of the throwing arm and ball, but the joint configuration of the throwing arm. For instance, since the valgus/varus axis of elbow was a constraint joint, a passive joint torque was resulted at the elbow during the throwing motion. For utilizing the passive joint torque of elbow, it was inferred that the horizontal adduction of shoulder was activated earlier than the internal rotation of shoulder.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

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：運動連鎖 近位-遠位順序性 ボール質量 身体慣性特性 最大等尺性関節トルク 最適化 順動力学的シミュレーション 遺伝的アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

投動作やサッカーのキック動作など身体遠位端を加速する動作では、身体中枢部から加速が始まり、時間遅れを持ちながら加速する部分が遠位に移っていく現象がみられる。このような現象を「運動連鎖の原則」(kinetic chain principle)や「ムチ的動作」(whip like motion)と呼ぶ。Kreighbaum & Barthels (1996)は、運動連鎖が生じる前提条件として、(1)末端部(遠位部)の慣性(質量、慣性モーメント)が中心部(近位部)よりも小さいこと、(2)中心部は末端部よりも大きな力やエネルギーが発揮できることとしている。ここで一般的に、身体は上記の前提条件を満たしているが、陸上競技の砲丸投ややり投げなど、末端部に質量や慣性モーメントが大きな投擲物を保持することで、前提条件を満たさなくなる場合も少なくない。また、ハンドボールのシュート動作では、肘関節の屈伸運動が小さいことも知られている。

Herring & Chapman (1992)は、剛体リンクモデルによる投動作の順動力学的解析(コンピュータシミュレーション)を用いて、近位の関節が逆方向(減速方向)のトルクを発揮することにより、遠位部の加速が促進されることを示唆している。Kojima (1995)も、コンピュータシミュレーションを用いた研究により同様の示唆を得ている。しかし、これらの先行研究は、Kreighbaum & Barthels (1996)が示した運動連鎖の概念を説明するまでは至らず、また2次元モデルを用いたシミュレーションであることが大きな制約となっている。野球の投動作では、肩関節の水平内転動作、内旋動作、肘関節の伸張動作がボール速度獲得に貢献しているが(宮西ほか, 1996)、2次元剛体リンクモデルを用いたシミュレーションでは肩関節の水平内転動作と内旋動作を分離して評価できないという問題点がある。

2. 研究の目的

上述したように野球の投動作に代表される身体遠位端を加速する動作においては、身体の近位部が先に加速し、その後遠位部が時間遅れをもちながら加速していく現象が頻りにみられる(Kreighbaum & Barthels, 1996; 島田ほか, 2004)。このような現象を「運動連鎖の原則」または「ムチ的動作」と呼ぶが、すべての投動作でみられるものではない。そこで本研究では、剛体リンクモデルによる3次元コンピュータシミュレーションと最適化手法を組み合わせることにより、投動作における運動連鎖の発生要因、制限要因を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、投動作における運動連鎖を検討するために、ボール質量、上腕と前腕の慣性を変化させた場合の最適な投動作をコン

ピュータシミュレーションにより推定するとともに、シミュレーション結果の妥当性を確認するために、実験的検証を行った。

(1) コンピュータシミュレーションによる最適動作の推定

シミュレーションモデルおよび最適化

投動作シミュレーションのモデルには、ボール・手部、前腕、上腕、体幹の4セグメント12自由度モデルを用いた(図1, Fujii & Hubbard, 2002)。このモデルは肩関節に3自由度を有し、肩関節の水平内転動作と内旋動作を区別することが可能である。また質量が異なる様々な条件での最適動作を推定するためには、高速かつ局所解に陥りにくい最適化手法をシミュレーションシステムに組み込む必要がある。そこで生体の進化過程を模したジェネティックアルゴリズム(遺伝的アルゴリズム手法)の組み込みを行った。そして、経験的に、淘汰で残る割合30%、交配する割合30%、突然変異する割合40%とした。

シミュレーション条件

Kreighbaum & Barthels (1996)が示している運動連鎖の発生要因を検討するために、ボール質量、上腕と前腕の慣性、肩関節と肘関節の最大発揮トルク(関節の角速度が0の時に最大トルク)、を変更した条件を設定した。具体的には、ボール質量については、通常の野球ボール145gに対して345gまたは545gの仮想的なボールを設定した。上腕と前腕の慣性については、基本モデルに対して慣性(質量および慣性モーメント)を0.8倍または1.2倍に変更した。肩関節、肘関節の最大発揮トルクについては、基本モデルに対して0.9倍または1.1倍に変更した。なお上腕、前腕の慣性を増加させることはできても減少させることは実験的には不可能であり、本研究の主題であるシミュレーション研究の利点である。

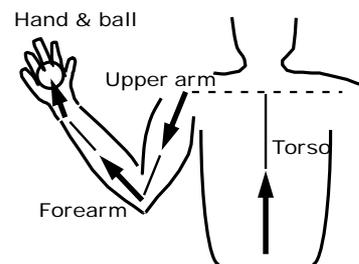


図1 身体モデル

(2) 投動作実験

実験方法

シミュレーション結果の妥当性を検証するために、健康な男子成人8名を被験者として、3次元自動動作分析装置(VICON MX, カメラ12台構成, 250Hz)を用い、下記の条件での投動作を計測した。得られた身体各部(体幹および上肢)の座標値から、上腕、前腕の部分角度、肩関節角度、肘関節角度などを算出した。また、超高速ビデオカメラ(NAC GX-1 plus)を用いて、リリース時の

手指とボールの接触状態を確認した。なお本実験は、筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て、提出した実験計画書にしたがって実施した。

実験条件

シミュレーション条件のうち、実験で再現可能なものとして、ボール質量の増減、上腕および前腕の慣性の増加について、投動作の計測を行った。使用したボールは、野球ボール(質量が異なる3種類)、ソフトボール(質量が異なる3種類)、ハンドボールであり、その特性は表1に示すとおりである。上腕および前腕の慣性の増加については、250gのリストウェイトを、上腕と前腕の近位部、中央部、遠位部に巻き付けた。リストウェイトの質量の設定については、野球ボールとハンドボールの質量の差である300gを上限として、市販のリストウェイトを使用する制約から250gと設定した。なお、その際の使用したボールは、通常の野球ボール(145g)である。

表1 投動作の実験に使用したボールの大きさと質量

	Circumference [cm]	Mass [g]
Baseball	23	ca. 120/145/170
Softball	30	ca. 150/190/220
Handball	59	ca. 450



図2 投動作実験に使用したボール(左から、野球ボール、ソフトボール、ハンドボール)

4. 研究成果

(1) 投動作のシミュレーション結果

図3は、ボール質量を変化させた場合のシミュレーション結果であり、肩関節水平内外転、肩関節内外旋、肘関節屈曲伸展のトルクジェネレータの活性度を示している。横軸は時間で、主要局面であるリリース前約0.1秒でデータが比較しやすいように、0.1秒以前のデータの色を薄くしてある。通常のボールに比べて、ボール質量が増加するにしたがって、肩関節水平内転の活性度(正が水平内転)がより早いタイミングで立ち上がり、その後、水平外転(負が水平外転)に移行するタイミングも早くなった。また同様に、肩関節内旋の活性度(負が内旋)はより早いタイミングで立ちあがるが、外旋に移行するタイミングには大きな変化はみられなかった。肘関節伸展の活性度(正が伸展)もより早いタイミングで立ちあがるが、屈曲(負が屈曲)に移行するタイミングはほぼ同時であった。表2は、シミュレーションモデルに含まれるトルクジェネレータ(上述したもの以外に、肩関節内外転、前腕回内外、手関節掌背屈)が発揮した力学的仕事をまとめたものである。ボール質量が増加しても、肩関節水平内外転の力学的仕事には大きな変化がみられない。一方、

肩関節内外旋の力学的仕事は、負の(エキセントリックな)力学的仕事が増加する傾向にあり、肘関節屈曲伸展の力学的仕事も増加した。また図示していないが、上肢の関節角度、身体部分角度の変化から、ボール質量の増加にしたがって、肩関節水平内転動作が早期に起こり、肘が早いタイミングで前方に引き出されるような投動作に変化した。このように、ボール質量の増加にしたがって、トルクジェネレータの活性度の立ちあがりに変化が認められ、動作にも変化が認められた。しかし、その近位-遠位順序性が入れ替わる、たとえば肘関節伸展動作が肩関節内旋動作よりも先に生じることはないようである。

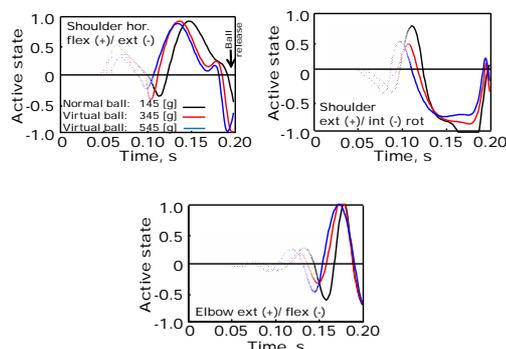


図3 ボール質量の変化と肘関節角度の変化および上腕角度の変化

表2 トルクジェネレータが発揮した力学的仕事

	Shoulder		Elbow	Total
	horizontal flex/ext	ext/int rotation		
Normal: 145 [g]	36.7	-34.8	24.9	16.8
Virtual: 345 [g]	35.7	-49.9	38.0	15.1
Virtual: 545 [g]	36.6	-54.8	47.4	23.6

Positive work: energy generation
Negative work: energy absorption
Unit: J

図4は、上腕および前腕の慣性を増減させた場合のシミュレーション結果であり、それぞれの条件における肩関節水平内外転、肩関節内外旋、肘関節屈曲伸展のトルクジェネレータの活性度を示している。ボール質量の変化に対する活性度の変化と同様に、上腕および前腕の慣性の変化に対して活性度の立ちあがりタイミングには変化がみられるが、肩関節内旋の活性度が肩関節水平内転より早いタイミングで立ちあがることはなかった。また肘関節伸展の活性度が、肩関節内旋の活性度より早いタイミングで立ちあがることもなかった。

肩関節、肘関節の最大発揮トルクの変化に対しても、ボール質量や上肢の慣性の変化と同様に、活性度の立ちあがりタイミングには変化がみられるものの、近位-遠位順序性が入れ替わることはないようである。

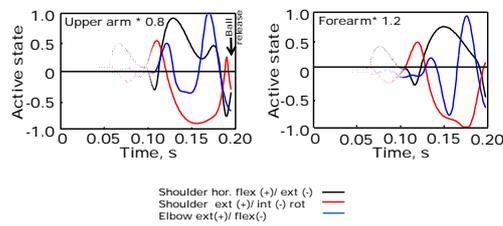


図4 上肢の慣性を变化させた場合のトルクジェネレータの活性度

(2)投動作実験の結果

図5は、異なるボールの投動作の実験から得られた結果である。水平面に投影した上腕の部分角度は、ボール質量の増加にしたがって、負から正に変化するタイミングが早くなっていた。ここで、正の値は、鉛直上方から上腕をみた際に、肘関節が肩関節より投球方向に位置することを示している。この結果は、シミュレーション結果の妥当性を支持するものである。またボール質量が増加しても、肘関節角度の変化パターンにはほとんど変化がみられない。シミュレーションにおいてはボール質量の増加にともない肘関節伸展の活性度が早いタイミングで立ち上がっていたが、早いタイミングで肘関節伸展トルクが立ち上がっても、前腕・手部・ボール系の慣性が大きくなり、肘関節伸展角速度に大きな変化がみられなかったものと解釈できる。

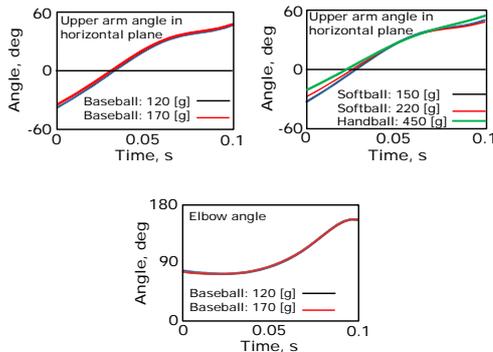


図5 ボール質量の変化と上腕角度の変化および肘関節角度の変化

上腕および前腕に 250g のリストバンドを巻き付けた投動作についても、近位 - 遠位順序性が入れ替わるような大きな変化は見られなかった。

(3)投動作における運動連鎖発生要因の検討

本研究でボール質量および上肢の慣性を変えたシミュレーション結果から考察できることとして、Kreighbaum & Barthels(1996)が述べた運動連鎖の発生要因である「遠位部の慣性が近位部よりも小さいこと」は、3次元的な投動作については当てはまらないことが分かる。言い換えると、近位部の慣性が遠位部よりも小さくても、運動連鎖は発生する。その結果、投動作における運動連鎖を決定する要因は、ボールや上肢の慣性の分布

よりも、上肢の構造にある可能性が高いと考えられる。たとえば、肘関節は内外反軸が拘束されており、投動作中に受動的拘束トルクが発生する。そのために肩関節の水平内転動作と内旋動作の近位-遠位関連性については、肘関節の受動的トルクを有効に利用するために、肩関節水平内転動作が肩関節内旋動作よりも早いタイミングで生じる必要があると考えられる。また肩関節内旋動作と肘関節伸展動作の近位-遠位関連性については、肘関節伸展が肘関節の関節力モーメントにより生じていることを考えると、肩関節水平内転動作や内旋動作は肘関節伸展動作よりも早いタイミングで生じる必要があると考えられた。以上のように、投動作における運動連鎖は上肢の構造に大きな影響を受けている可能性が示唆された。この結果は、3次元シミュレーションを行ったことではじめて分かったことであり、本研究の極めて重要な成果である。なお肘関節内外反軸の拘束を考慮しない身体モデルを構築し、最適化な投動作を行うことで妥当性を確認することも可能であるが、今後の研究課題として残されている。ただし、ヒトの構造とは異なるシミュレーションモデルで得られた結果が妥当なものであるのかを検証することは困難で、本研究の限界であるともいえる。

【参考文献】

Fujii N. and Hubbard M. (2002) Validation of a three-dimensional baseball pitching model. *Journal of Applied Biomechanics*, 18, 135-154.

Herring R. M. and Chapman A. E. (1992) Effects of changes in segmental values and timing of both torque and torque reversal in simulated throws. *Journal of Biomechanics*, 25, 1173-1184.

Kojima, T. (1995) Does a whip-like motion of throwing enhance ball speed and range in planar ball throwing? *Proceeding of Sports Engineering Symposium, Society of Mechanical Engineer of Japan*, 116-119.

Kreighbaum E. and Barthels K. (1996) *Biomechanics: A qualitative approach for studying human movement*, 337-345, Benjamin Cummings.

宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1996) 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する3次元的研究. *体育学研究*, 41, 23-37.

島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 川村卓, 高橋佳三 (2004) 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. *バイオメカニクス研究*, 8, 12-26.

5. 主な発表論文等

[学会発表](計2件)

Norihisa FUJII: Biomechanical change of throwing motion due to change in ball mass. XXIV Congress of the International Society of Biomechanics. 2013年8月7日, Natal, Brazil.

藤井範久: 質量および大きさが異なるボールの投動作における運動連鎖. 第63回日本体育学会大会, 2012年8月23日, 神奈川・東海大学湘南キャンパス.

6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 範久 (FUJII, Norihisa)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号: 10261786