

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03070

研究課題名(和文) 駆動源の出力様式を考慮した走・打・投動作の動力学的な生成メカニズムの解明

研究課題名(英文) Clarification of motion generating mechanism for running, hitting and pitching motions considering output mode of actuators

研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：全身の運動方程式に基づく分析によって、走動作における身体重心速度や、打撃動作における打具先端スピード、そして投球動作におけるボールスピードなど各種スポーツ動作のスピード獲得メカニズムにおける関節トルクの発揮様式を考慮した生成メカニズムを明らかにした。すなわち、走動作における身体加速の様相が距離に応じて変化すること、および野球の打撃ならびに投球動作では、スピード獲得に大きく貢献する運動依存項の生成要因までも考慮した分析によって、打撃では肩関節の伸張性の内外旋トルク、そして投球では肩関節の短縮性の水平内転トルクが、スピード獲得のための運動連鎖の発生要因となっていることなどがわかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to make clear speed generating mechanisms in running, baseball batting and pitching based on multi-body dynamics considering joint torque generating mode. The body was modelled as 15-rigid linked segment system for the running, batting and pitching motions, and was additionally modelled as 21-rigid linked segment system when considering functional roles of fingers during pitching motion. The results show 1) the eccentric ankle plantar flexor torque is the largest contributor to the body acceleration during accelerating phase in sprinting, 2) the eccentric internal rotation torque at knob-side shoulder joint contributes largely to the generation of bat-head speed, and 3) the concentric horizontal adduction torque at shoulder joint is the major generating factor of kinetic chain which induces large ball speed during baseball pitching motion, and the roles of the fingers' joint torques are support and manipulate the ball.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：スポーツ動作 加速メカニズム 運動方程式 トルク発揮様式 動力学的貢献

1. 研究開始当初の背景

スポーツ動作は非常に高速あるいは高加速であるとともに、人体は多くの節が関節によって連結された多節構造であることから、運動時には、慣性力による各運動軸間の干渉に加えて、コリオリ力ならびに遠心力が複雑に作用する。このため、フォーム分析等の幾何学的分析であるキネマティクス分析や逆動力学演算によるキネティクス分析だけでは、なぜそのような現象が起こるのかを力学的に説明することは難しく、従来の研究では、人体をブラックボックス化し、動作条件の違いによる、動きの様相あるいはパフォーマンス等の出力結果の違いから、統計学的に技術レベルと動作の特徴との関係を推定することが一般に行われてきた。

2. 研究の目的

多体系としての全身の運動方程式に基づいた駆動源（関節発揮トルク）の出力特性と生成された動作間との因果関係を利用して、スポーツ動作の生成において必要となる各種機能（例えば、身体の推進・制動ならびに支持、体幹の姿勢制御、そして身体末端あるいは打具のスピード獲得・打点位置制御など）に対して、各関節のトルク発揮様式を考慮した動力学的分析を行うことにより、関節の動力学的な機能を定量化し、動作の発現メカニズムを明らかにすること。

3. 研究の方法

(1)陸上スプリント加速走の分析法

男子陸上短距離走選手7名を被験者として、クラウチングスタートから1m, 5m, 15m, 30mさらに45mの全力疾走を行わせた。被験者の身体代表点に貼付した反射マーカークの3次元座標を、モーションキャプチャーにより測定した。その際、走路に埋設したフォースプレート（Kistler社製、1000Hz、3台）によって地面反力を測定するとともに、支持脚の足底圧情報を取得した。

身体を15の剛体セグメント（節のこと）からなる多体系としてモデル化した系に対する、セグメント単体の運動方程式、セグメント間の連結方程式、関節軸の幾何学的拘束式、そして関節モーメント・軸トルク変換式の4式を連立することにより、下記に示す全身の運動方程式を導出した。すなわち、人体の運動方程式は、

$$\begin{aligned} \text{加速度ベクトル (回転・並進, 全節)} \\ = (\text{関節トルク項}) + (\text{運動依存項}) \\ + (\text{重力項}) + (\text{モデル化誤差項}) \end{aligned}$$

によって表すことができる。ここでは、モデル化誤差項として、全身のセグメントの伸縮成分を考慮している。

身体重心位置ベクトルは、各セグメントの重心位置ベクトルおよび各セグメントの質量の積和演算によって求まるため、身体重心加速度を、全身の関節トルク項、運動依存項、重力項およびセグメント伸縮項といった各

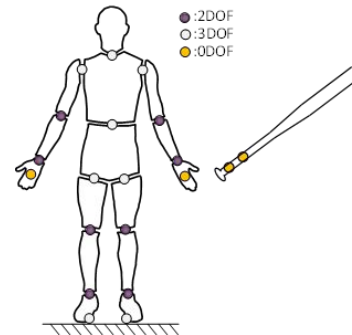


図1. バット-全身系剛体リンクモデル

種の動力学的貢献の和として表すことができる。さらに、全身の関節トルク項による貢献から、各関節軸トルクに関する項を抽出することにより、各関節軸トルクの身体重心加速度に対する動力学的貢献を求めることができる。

(2)野球打撃動作の分析法

大学硬式野球部員を対象に、ティー打撃（計22名）および飛来球打撃実験（10名）を行った。身体特徴点座標、左右各足部の地面反力、および左右各手のバット作用力・作用モーメントをそれぞれ、モーションキャプチャー、地面反力計およびセンサーバットを用いて取得した。

図1に示すように、解剖学的拘束自由度を考慮した、バット-全身系の剛体リンクモデルを用いて分析を行った。その際、各足部の圧力中心点に設けた仮想関節によって足部が地面と連結しているものとしたほか、左右各手とバットは自由度0の仮想関節により連結しているものとした。

バット-全身系の運動方程式の離散化式と、加速度の速度差分方程式とを連立して導出した速度漸化式を利用して、高速スウィング時の速度獲得に対して極めて大きな貢献を示す運動依存項の生成要因を考慮した分析を可能とする。これにより各関節トルクの動力学的貢献を定量化可能とするとともに、下腕の回転の運動方程式を利用して、体幹仮想関節のトルク作用メカニズムを定量化した。

(3)野球投球動作の分析法

本研究では、図2(a)に示した身体各節の計15の剛体セグメントにボールを加えた計16セグメントの剛体リンクモデルおよび、これらに図2(b)に示した投球腕側手指（示指、中指および拇指）の計6セグメントを加えた計22セグメントからなる剛体リンクモデルの2種類の全身-ボール系モデルを用いて分析を行った。

ここで、22セグメントモデルにおいては、示指、中指および拇指によりボールを把持するため、三指およびボールにより生成される機構的な閉ループ系によって、ボールの動きから各指作用力を求めることができない閉

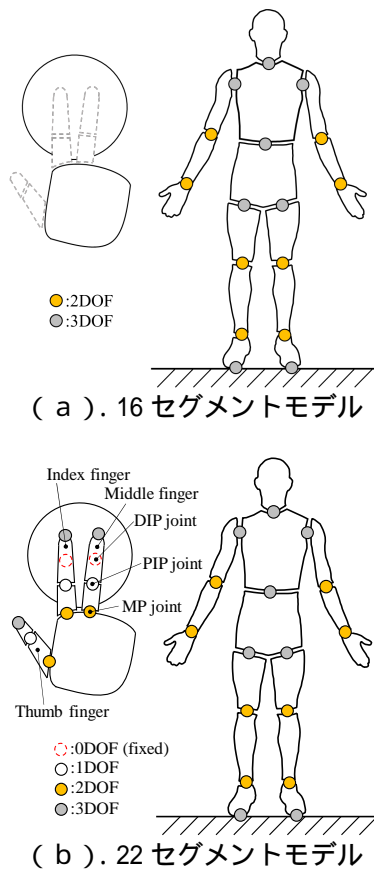


図2. ボール-全身系の剛体リンクモデル

ループ問題が生じる．この問題の解決方法として，各指とボールとの間にばねおよびダンパーを設け，ボール状態量を満たすような各指における作用力（操作力）について，シミュレーションを行って推定した．なお，その際，ボール中心から各指の先端部へと向かう位置ベクトルと各指における作用力ベクトルとの内積が0以下となるようにして，各指がボールに対して引っ張りの力を作用させないようにした．

大学硬式野球部に所属する右上手投げの投手10名を被験者として，約18m離れたネットに向かって全力投球を行わせた．身体の座標値の取得には，被験者の身体代表点47点および示指および中指の指上にそれぞれ4点，拇指の指上に3点および試技動作に影響を及ぼさないボール表面上の6点の計64点に貼付したマーカーをモーションキャプチャー(VICON-MX, 500Hz)により計測した．また，左右下肢と地面における地面作用力，フリーモーメント，および圧力中心位置は，2台の地面反力計(Kistler社製, 1000Hz)を用いて計測した．なお，投球方向をY軸，鉛直方向をZ軸とし，Y軸とZ軸との外積によって得られるベクトルをX軸と定義し，分析対象区間は，Y座標におけるボール中心座標が最小値を示す時点を試技開始とし，リリース直前でボールが投球腕側拇指から離れる時点を試技終わりとした．

4. 研究成果

(1) 陸上スプリント加速走について

身体重心に関する推進速度獲得に対する下肢関節トルクの貢献を図3に示す．なお，結果は全被験者の平均値を示している．

関節トルクに関しては，支持期を通して足関節底屈トルクが最も大きく，これを発揮様式にわけると支持期前半では伸張性，支持期後半では短縮性の底屈トルク発揮となる．これらのトルクは身体の推進に対して最も大きく貢献し，一方で，身体の制動に対しては膝関節トルクが最も寄与する．また，支持期前半において，足関節は伸張性の底屈トルクを発揮しており，この間に獲得する推進速度の全てを足関節トルクのみにより獲得しているとは言い難い．ここで，足関節角速度に着目すると，股関節および膝関節トルクが足関節を背屈させるような結果が得られた．これより，股関節および膝関節トルクは伸張性の足関節底屈トルク生成にも関与しており，言い換えれば，支持期前半における身体の推進に間接的に貢献している可能性が有ることを明らかにした．

(2) 野球打撃動作について

インパクト時のバットヘッドスピードに対して，関節トルクの累積的な効果である運動依存項が大きな貢献を示した．また，運動依存項の貢献とバットヘッドスピードの間には強い正の相関がみられた．このことは，バットヘッドスピードが大きい被験者ほど，運動依存項が大きくなるようにスウィングしていることを示している．一般化速度ベクトルに対する速度漸化式を利用して，運動依存項の生成要因までも考慮した際の，インパクト時のバットヘッドスピードに対する各関節トルクの動力学的貢献の分析結果(図4)から，グリップエンド側(ノブ側)肩関節の各関節軸トルクの貢献が大きなことがわかった．特に伸張性の内外旋トルクの貢献

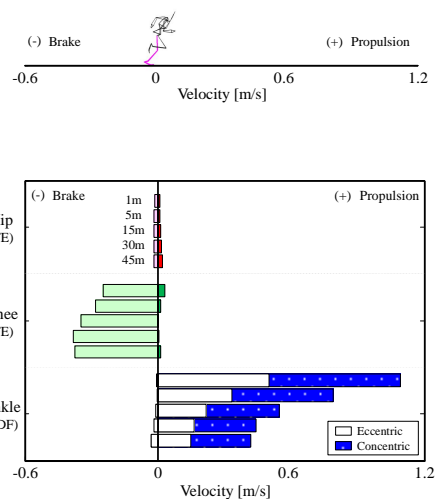


図3. 関節トルクの発揮様式を考慮した，身体重心の推進速度獲得に対する各関節トルクの貢献．各値は平均値を示す．

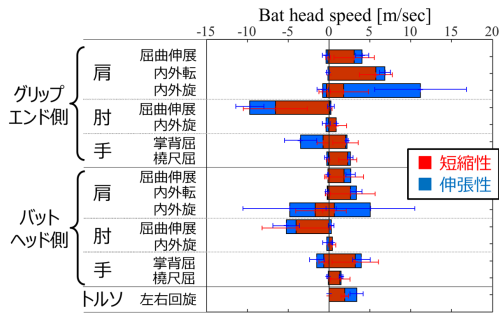


図 4. 運動依存項の生成要因およびトルクの発揮様式を考慮して算出した、インパクト時のバットヘッドスピードに対する関節軸トルクの貢献

が大きかった。他方、グリップエンド側の肘関節屈曲伸展軸トルクについては、短縮性のトルクにより、負の貢献が示されていた。これは、肘関節の過伸展の抑制に作用しているものと考えられる。なお、インパクト時のヘッドスピードに対する各時刻の関節トルクの貢献を求めた結果から、インパクト時のヘッドスピードを生成するためには、関節軸によって異なる、適切な発揮タイミングが存在することがあきらかとなった。インパクト時のヘッドスピードに対する貢献は、短縮性トルクが優位な関節軸が多かった。他方、最も大きな貢献を示すグリップエンド側肩関節内外旋軸は伸張性トルクが優位であった。くわえて、静止球に対して飛来球の打撃では、グリップエンド側肩関節の内 外旋軸トルクの貢献が増大しており、その作用により時間的拘束 に対応していると考えられる。

(3) 野球投球動作について

全身およびボールからなる多体系の剛体リンクモデルを用いて動力学的分析を行うことにより、野球投動作におけるボールスピード生成に対する関節軸トルクの役割を明らかにし、その動作メカニズムを明らかにすることが可能となった(図5)。

まず、22 セグメントモデルを用いた分析の結果、野球投動作において、投球腕側の手指は、投球腕のスウィング時にボールを支持する役割を担っており、その関節運動によって直接的に大きなボールスピードを生成しているわけではないことがわかった。

次に、16 セグメントモデルを用いた分析の結果、野球投動作において、投球腕のムチ動作を発現する運動依存項は、ボールスピード生成に大きな貢献を示し、その運動依存項生成には、投球腕の肩関節水平内外転軸における短縮性の内転トルク発揮が主な生成要因であった。

さらに、野球投動作において、肩関節水平内転トルクが生成する肩関節水平内転角速度および肩関節内旋トルクが生成する肩関節内旋角速度がボールスピード生成に対して、異なるタイミングで寄与するため、投球

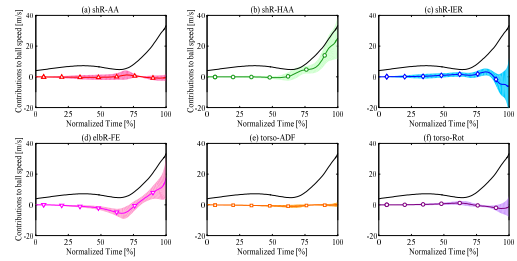


図 5. 運動依存項の生成要因を考慮して算出した、ボールスピードの生成に対する各関節軸トルクの貢献

各図の内訳: (a)左上: 肩関節の内外転軸, (b)中央上: 肩関節の水平内外転軸, (c)右上: 肩関節の内外旋軸, (d)左下: 肘関節の屈曲伸展軸, (e)中央下: 体幹仮想関節の前後屈軸, (f)右下: 体幹仮想関節の左右回旋軸のそれぞれの軸トルクによるボールスピード生成に対する貢献。実線は平均値、ハッチングはSDを示す。

腕の運動連鎖となって発現していた。

投球腕における肩関節水平内転角速度は、肩関節外旋角速度に、肩関節内旋角速度は、肩関節水平外転角速度にそれぞれ寄与しており、ボールスピードに対して相殺するように作用していた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

Sekiya KOIKE, Hiroki UZAWA and Daisaku HIRAYAMA: Generation mechanism of linear and angular ball velocity in baseball pitching. Proceedings 2018, 2(6), 206, 2018. 査読有

Sekiya KOIKE and Kohei MIMURA: Main contributors to the baseball bat head speed considering the generating factor of motion-dependent term, Procedia Engineering. Vol. 147, 197-202, 2016. 査読有

Sekiya KOIKE and Kohei MIMURA: Contributions of joint torques, motion-dependent term and gravity to the generation of baseball bat head speed, Procedia Engineering. Vol. 147, 191-196, 2016. 査読有

[学会発表](計16件)

見邨康平, 小池関也: 野球の飛来球打撃動作におけるバットヘッド速度の生成メカニズム. 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演会, 金沢, 2017.11.9.

鵜澤大樹, 小池関也: 野球投動作のボール速度および角速度生成に対する関節トルクの動力学的な貢献. 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演会, 金沢, 2017.11.9.

小池関也, 鵜澤大樹, 平山大作: 野球投

球動作におけるボール状態量の生成メカニズム .日本体育学会第 68 回大会 ,静岡 ,
2017.9.10 .

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号 : 50272670