

令和元年6月24日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12997

研究課題名（和文）筋骨格モデルを用いた投球動作中の肩甲骨の関節キネティクスの同定

研究課題名（英文）Kinetics of shoulder girdle during baseball pitching using musculoskeletal model

研究代表者

松尾 知之（Matsuo, Tomoyuki）

大阪大学・医学系研究科・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

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまで困難とされてきた投球動作中の肩甲骨の動きを計測することを可能とした。複数肢位のキャリブレーション姿勢において、肩甲骨体表部に半径3mmの小型反射マーカを2.5cm間隔で8行7列貼付し、その凹凸や角度、高さ情報から重回帰分析によって数学モデルを生成した。従来型のマーカークラスター法（AMC法）と比較すると、AMC法ではリリース付近で明らかなノイズが出現したが、そのノイズは消失しており、投球全域に亘って計測可能なことが確認された。この肩甲骨可動モデルをつかって、キネマティクスの算出を試みた結果、肩関節のnet forceのピーク値は、むしろ増加したことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

運動中の肩甲骨の動きを計測することは極めて難しく、これまで幾つかの方法が試みられてきたが、投球全域に亘っての計測は報告されてこなかった。それを可能とした点に本研究の学術的意義がある。また、動作中の肩甲骨の動きを非侵襲に計測できることによって、肩甲骨動作不全によるリスク判断が可能となり、投球障害の予防対策を講じることができると予想される。また、野球選手や他のスポーツ選手に限らず、肩関節痛を有する患者の原因究明、あるいは治療後のリハビリの進捗状況を把握するためにも利用可能であるという点で、広く社会に貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：It is known that measuring scapular movement is one of challenging task, because the scapular moves in the wide range under the soft tissues including skin, fat, and muscles. We successfully measured it by using scapular surface mapping approach (SSM) which is composed of an 8 x 7 matrix of reflective markers. Each marker is 2.5 cm apart from the adjacent markers. The heights, lengths, and angles were extracted from the matrix. The data were utilized as independent variables in multiple regression analyses. The relative position and angles of the scapular local coordinate system to the thorax coordinate system were analysed, based on the calibration session. In acromion marker cluster method, we found obvious noise around the instant of ball release, while noise disappeared in the SSM. The results of kinetics indicated that the net force at shoulder joint was not diminished, but even increased the peak values.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：運動制御 生物・生体工学 スポーツ医学 投球障害

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

投球は、下肢や体幹の動きによって発生させた力を巧みに利用し、大きなエネルギーをボールに伝達しながら、目標に向かってボールを投射するという運動課題である。このエネルギーの伝達過程では、上肢関節への関節負荷が増大することから、多くの選手が投球傷害に陥っている。したがって、投球パフォーマンスを維持・向上させながら、投球障害リスクを軽減させることが、競技力向上に不可欠となる。

肩甲帯は、体幹と上肢を連結する機能を有していることから、投球パフォーマンスの維持・向上とともに、投球障害リスクの軽減にも重要な役割を果たすと考えられている。ヒトの肩甲骨の形状や肩甲上腕関節は、チンパンジーのそれと比べて、投動作に有利になっていることが報告されている (Roach et al, 2013)。その肩甲骨を含む肩甲帯が機能不全に陥ると、肩関節不安定、関節唇損傷、肩関節腱板断裂など諸々の肩関節障害を引き起こすことも報告されている (Kibler, 2013)。

このように、肩甲帯は、投球にとって鍵となる非常に重要な身体部分の一つであるが、皮膚や筋肉の下を6自由度で動くために、運動中の挙動を正確に計測することが難しく、これまでも多くの方法が試されてきた。

外科的に小さなピンを骨に埋め込み計測する方法 (Bourne et al, 2007, 2011) は最も正確だと考えられるが、侵襲的な方法は被験者への負担が大きく、また投球動作への適用も困難である。体表に電磁センサーを貼付する方法 (Beardsley et al, 2010; Konda et al, 2015; Meyer et al, 2008) では幾つかの運動中の計測も行われてきたが、磁気センサーからのノイズが邪魔になるために、全力投球中の計測には不向きである。

複数の反射マーカを土台に固定して貼付する方法 (Acromion Marker Cluster 法、AMC 法: Brochard et al, 2011; van Andel et al, 2009) が考案されたが、肘が高く上がった姿勢 (大きな肩外転角) では、肩関節周りの筋肉の隆起により、精度に問題が生じることが指摘されている (Lempereur et al, 2014)。Miyashita et al (2010) は2つの反射マーカを貼り付けた長さ20cmのスティックを肩甲棘表皮部に貼付するという AMC 法に類似した方法を採用し、投球中の肩甲骨の動きを計測したが、この場合でも、少なからぬノイズが混入したと思われる。したがって、彼らは腕が加速する直前 (肩関節最大外旋位) の動きに限定して議論している。また、2点だけで肩甲骨の3次元の動きを表現するのは不可能で、算出した後方傾斜角への他の運動による誤差混入可能性を否定できない。このように、投球動作の最重要局面である加速期やボールリリース前後の肩甲骨の動きを精度よく計測した研究は報告されていない。

投球動作中の関節負荷 (関節キネティクス: 関節間力、関節トルク) に関しては、これまでに比較的多くの報告がなされ (Feltner, et al, 1986; Flesig et al, 1995; Sabick et al, 2004; Oyama et al, 2014 など)、投球障害との関連が議論されてきた。しかし、これらの研究は、肩甲骨が体幹に固定されている簡略化モデルを使っており、ヒトの骨格構造の最大の利点である肩甲骨の可動により、関節負荷にどのような影響を与えているのか知ることはできない。

2. 研究の目的

全力で投球している際の肩甲骨の動きを計測する方法を開発するとともに、肩甲骨をモデルに加味した関節負荷の解析を行うことで、投球中の肩甲骨動態を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、新しく開発する方法の精度検証のための実験1とその結果を実際に投球に適用する実験2の2つの実験を行った。

(1) 実験1

①研究対象: 右利き成人男性17名 (1.72±0.07m, 60.9±6.0kg, 20.3±2.5才)

②手続き: 研究内容を口頭および書面にて説明し、研究参加の内諾書を得た。その後、肩甲骨の形状を自作の肩甲骨形状記憶器 (図1) で計測した。上肢および体幹の特徴点に反射マーカを貼付し、左右肩峰外側平坦部に半径3mmの反射マーカ3つから構成される Acromion marker cluster (以下、AMC) を貼付した (図1b)。その後、指定した15個のキャリブレーション姿勢を維持してもらい、肩甲骨の特徴点 (肩峰角、肩甲棘基部、肩甲下角) を触診および肩甲骨形状記憶器を用いて特定し、Stylus で軽く押し当てた際の、Stylus マーカーの位置を小型カメラ17台の3次元動作計測装置 (FlexV100R2, サンプリング周波数100Hz, OptiTrack) で計測した

次に、肩甲骨体表部に2.5cm間隔の8行7列の体表マッピングマーカー (Surface Mapping Marker: 以下、SSM) を貼付し、上述と同じ肢位での計測を3回ずつ行った。

③データ解析: あらかじめ Stylus の3点の他に、Stylus の先端部にも反射マーカを貼付し、その位置座標を Stylus 局所座標系から算出した。この位置座標を座標変換することによって、各肢位の肩甲骨の位置を胸部座標系の位置として算出した。また、その位置から胸部座標系に対する肩甲骨の3つの解剖学的角度 (上方回旋、前突、後方

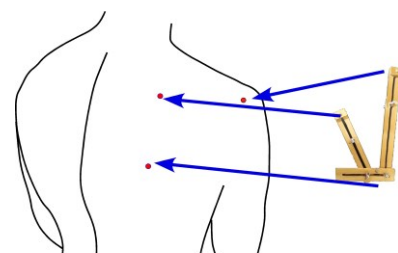


図1. 肩甲骨形状記憶器での計測

傾斜)を求めた。

AMCに局所座標系を設定することにより、AMCと肩甲骨の角度関係を座標変換によって求め、この際の3行3列の座標変換行列をAMC変換行列と定義した。

SSMに関しては、まず各行各列の長さを求めた。また、2.5cm間隔の8行7列に貼付した反射マーカの平均平面を表わす2つの軸を主成分分析により算出し(以下、SSM平均平面軸)、それらに直交する軸(以下、SSM平均平面直交軸)の値をSSMの高さと定義した。SSMの第1列目をSSM平均平面に投射し、単位ベクトルに変換したものをSSM平均平面Z軸、SSM平均平面内にあり、SSM平均平面Z軸に直交する単位ベクトルをSSM平均平面X軸、それらに直交軸する単位ベクトルSSM平均平面Y軸とした(図2:Σ_S)。次に、反射マーカ平面を0.5cm間隔の36行31列に分割し、メッシュ平面とした。このメッシュ平面にも上記と同様の操作を施し、メッシュ平均平面軸(X軸、Z軸)とメッシュ平均平面直交軸(Y軸)を算出した。体表の下に肩甲骨がある地点の方がない地点よりも高さが高くなるという前提の下に、高さが平均よりも高い部分を抽出し、再度、その平面の平均平面を示す2つの主軸とそれに直交する軸を求めた(メッシュ抽出平均平面X・Y・Z軸)(図2:Σ_M)。

胸部座標系X軸(右外側方向に伸びる単位ベクトル)とZ軸(垂直方向に伸びる単位ベクトル)でなす平面に対する、SSM平均平面Z軸およびメッシュ抽出平均平面Z軸がなす角度をそれぞれの上方向回旋角、胸部座標系のX軸とY軸(矢状方向に伸びる単位ベクトル)でなす平面に対する、SSM平均平面X軸およびメッシュ抽出平均平面X軸がなす角度をそれぞれの前突角、胸部座標系Y軸とZ軸でなす平面に対する、SSM平均平面Y軸およびメッシュ抽出平均平面Y軸がなす角度をそれぞれの後方傾斜角と定義した。

④統計: Stylusの計測値を基に算出した肩甲骨の解剖学的角度(上方回旋、前突、後方傾斜)をそれぞれ従属変数とし、AMCと肩甲骨の角度関係を示す3行3列の変換行列の各要素および胸部上腕角度3変数を独立変数として、ステップワイズ法の重回帰分析を研究対象者毎に実施した。

SSMの計測において、角度計やガイドバーを利用してAMC計測時と同様の肢位を保持させたが、3次元動作解析装置の結果から10°以上の逸脱を示す場合が頻りに生じていたことが判明し、同一条件下の肩甲骨の位置との対応は難しいと判断した。一方で、AMC法の推定が極めて高いことが分かったことから、代替案として、SSM法での胸部上腕角度に対応するAMC法による肩甲骨角度推定値を従属変数とした。独立変数は、各行各列の長さ、マーカ平均平面およびメッシュ抽出平均平面それぞれの上方回旋、前突、後方傾斜として、ステップワイズ法の重回帰分析を研究対象者毎に実施した。

(2) 実験2

①研究対象: 右利き男子大学野球投手26名(1.78±0.06m, 77.3±5.5kg, 19.9±3.7才)。
 ②手続き: 研究内容を口頭および書面にて説明し、研究参加の内諾書を得た。その後、肩甲骨の形状を自作の肩甲骨形状記憶器(図1)で計測した。

投球時に貼付するマーカは、以下の通りである: 全身の解剖学的特徴点43地点に半径7mmの反射マーカ、左右の鎖骨特徴点3地点ずつとボール4箇所半径3mmの反射マーカ、左右肩峰外側平坦部に半径3mmの反射マーカ3つから構成されるAcromion marker cluster(以下、AMC)、肩甲骨体表部に8行7列で半径3mmの反射マーカ(図3)。このうち、最初に上肢と体幹のマーカを貼付し、キャリブレーション姿勢の計測を行った。

研究対象者は、検者のゴニオメータでの確認の下、座位にて6つのキャリブレーション姿勢をとり、検者が肩甲骨の特徴点(肩峰角、肩甲棘基部、肩甲下角)を触診および肩甲骨形状記憶器を用いて特定した。特定した地点をシールにてマーキングし、その部位を反射マーカ3個を取り付けたStylusで軽く押した際の、Stylusマーカの位置を高速カメラ16台の3次元動作計測装置(VICON FX, サンプリング周波数500Hz, VICON)で計測した(図4)。計測は、それぞれ3回ずつ行った。

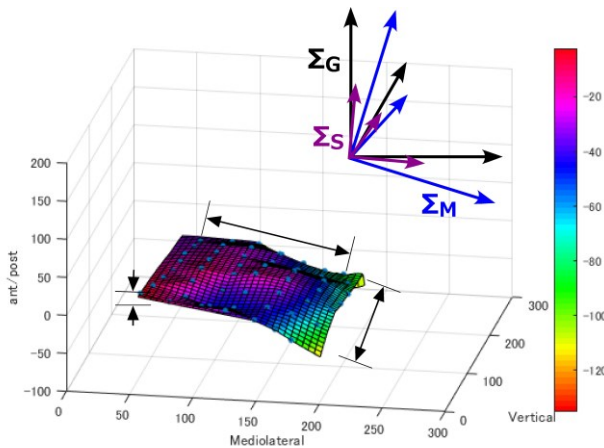


図2. SSM平均平面の座標系(Σ_S)とメッシュ平均平面の座標系(Σ_M)の模式図。両矢印は各行、各列の長さとし、高さを示す。

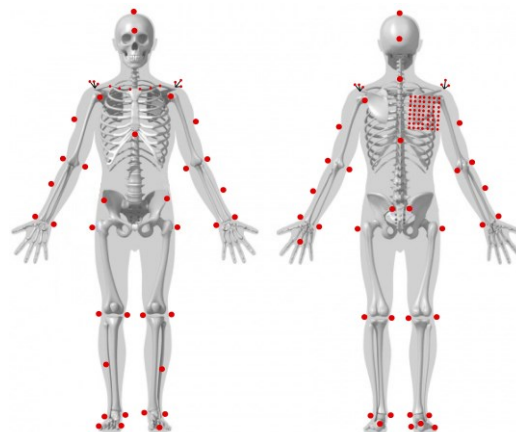


図3. 反射マーカの貼付位置

キャリブレーション姿勢の撮影後、試合時に行うのと同様のストレッチやジョギング等の準備運動、キャッチボール、室内マウンドからの投球練習を行い、研究対象者から全力投球ができるとの申告があるまで、投球準備の時間を設けた。準備完了後、残りの反射マーカを貼付し、再度、キャッチボールと投球練習を行ってから、投球動作の撮影を行った。

投球は、直球5球、変化球2種類を5球ずつの計15球であったが、本研究では直球のみを研究対象とした。

③データ解析：実験1と同様に、Stylus 局所座標系を基に、キャリブレーション姿勢時の肩甲骨特徴点3点を胸部座標系に対する位置座標として算出し、肩甲骨の3つの解剖学的角度（上方回旋、前突、後方傾斜）を求めた。また、AMC 座標系と肩甲骨座標系の変換行列を AMC 変換行列と算出した。SSM に関する項目も、実験1と同様に、各行各列の長さ、SSM 平均平面 X, Y, Z 軸、メッシュ抽出平均平面 X, Y, Z 軸を求めた。

④統計：肩甲骨の解剖学的角度（上方回旋、前突、後方傾斜）をそれぞれ従属変数とし、AMC と肩甲骨の角度関係を示す3行3列の変換行列の各要素、SSM の各行各列の長さ、マーカ平均平面およびメッシュ抽出平均平面それぞれの上方回旋、前突、後方傾斜、および胸郭上腕角度3変数を独立変数として、ステップワイズ法の重回帰分析を研究対象者毎に実施した。また、利用する反射マーカ貼付法の違いを検討するために、胸郭上腕角度3変数のみからの推定、胸郭上腕角度3変数と AMC を使った推定、胸郭上腕角度3変数と SSM を使った推定も行った。

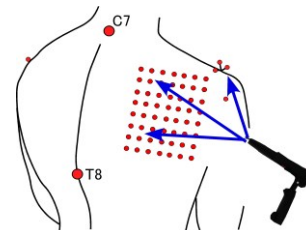


図4. SSM時の肩甲骨位置の計測

4. 研究成果

(1) 実験1

静止姿勢での肩甲骨角度の推定は、極めて精度が高く、重回帰分析の結果から求めた推定値と実測値との相関係数は、軒並み0.9を超えた（上方回旋の相関係数の範囲：0.908～0.974、前突：0.918～0.994、後方傾斜：0.868～0.996）。座標変換行列の結果を独立変数に用いているので、当然といえば当然の結果であるが、上方回旋では、胸郭上腕角度だけでも相関係数は0.8以上となり、いずれの研究対象者も健康な肩甲上腕リズムを有していたことを示唆するものと思われる。上方傾斜や前突に比べて、後方傾斜の推定がやや劣る傾向が見られた。この原因として、筋肉量の多い研究対象においては、外転角が大きくなると、三角筋などの肩関節周囲筋が隆起することで、Stylusでの計測自体が難しくなったことが挙げられる。この点に関しては、本研究の方法上の限界であり、より精度よく計測するためには、医療画像法などと組み合わせた計測を行う必要があろう。

方法で述べたように、SSM の計測時の胸郭上腕角度が、AMC 計測時（Stylus 計測時）と10°以上異なる場合が頻出したために、Stylus 計測による値を従属変数することには問題があると判断し、上記の AMC からの推定値を従属変数として用いた。SSM 関連の独立変数での推定は、極めて AMC 推定値と一致しており（0.947～0.996）、SSM での計測は、AMC での計測と同等の精度を有するものと思われる。

(2) 実験2

①数学モデルの生成：キャリブレーション姿勢での重回帰分析の結果は、ほとんどのケースにおいて、胸郭肩甲骨角度に対応する AMC 変換行列の要素の単相関係数が0.9を超えており、そのために最も説明率の高い変数として選択された。したがって、他の変数も含めた重相関係数は良好であった（上方回旋の重相関係数の範囲：0.926～0.997、前突：0.896～0.999、後方傾斜：0.875～0.996）。

しかしながら、重回帰分析結果を投球時に適用したところ、踏み出し足の着地時点付近で小さな振幅の高周波成分、ボールリリース付近で比較的大きな振幅の高い周波数成分の信号が混入していることが確認された。肩甲骨の動きがこのような急激な動きをするとは考えられず、着地の衝撃や腕の加速と高速度の回旋により AMC の揺れが生じたことによるノイズの可能性が疑われた。したがって、独立変数から AMC 変換行列の要素を除き、胸郭上腕角度と SSM 関連変数だけを使って肩甲骨の動きを推定した。

これによって、特に後方傾斜角の推定値が影響を受けたものの、比較的高い重相関係数が維

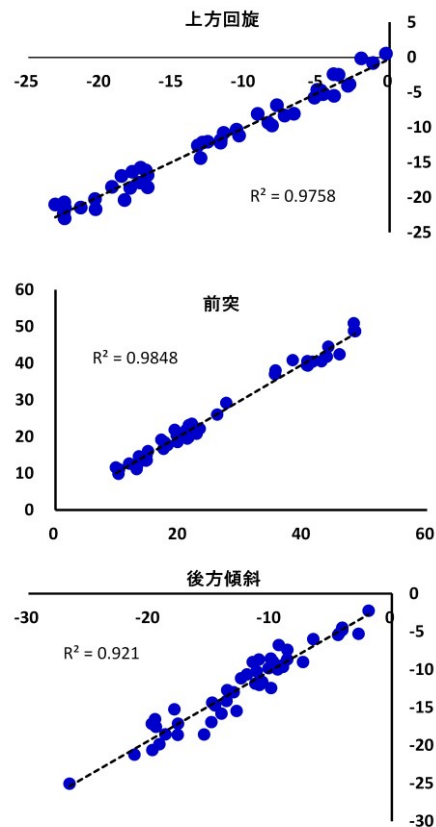


図5. 肩甲骨角度推定の典型例。
X軸：Stylusを基にした肩甲骨計測値。
Y軸：重回帰分析推定値

持された（上方回旋の重相関係数の範囲：0.892～0.974、前突：0.806～0.991、後方傾斜：0.758～0.892）（図6）。

②投球動作への適用：AMC座標変換行列を使わずに、胸郭上腕角度とSSMだけで推定した際の肩甲骨の動きを図7に示す。肩甲骨上方回旋角および前突角は、これまでに電磁ゴニオメータで最大外旋位（図7：MER）の時刻まで計測した先行研究の値（Konda, 2015）と類似しており、リリース後までの動きを捉えたものと考えられる。

③キネティクス：肩甲骨に可動性がない場合と可動性がある場合の肩関節部に作用する力を比較したのが図8である。リリース時に発生した外側方向への大きな力は、肩甲骨の運動によってリリース後により大きな力が必要になったことを示した。また、リリース直前の矢状方向への力のピークもより大きなものとなっていた。

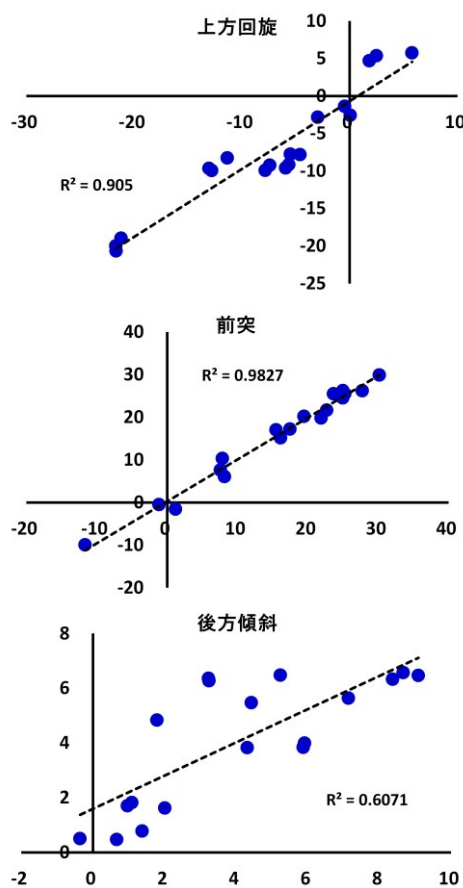


図6. 肩甲骨角度推定の典型例。
X軸：Stylusを基にした肩甲骨計測値。
Y軸：重回帰分析推定値

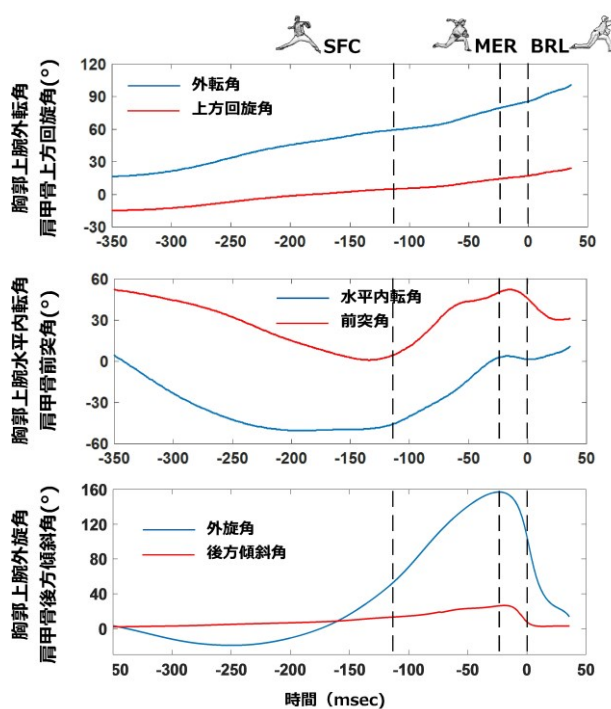


図7. 肩甲骨の胸郭座標系に対する上腕と肩甲骨の角度の典型例

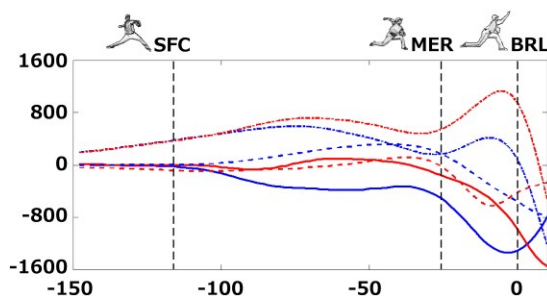


図8. 肩関節に生じたnet force. 青線は肩甲骨が動かないと仮定した場合、赤線は可動性のある肩甲骨を採用したモデル。実線は外側方向、一点破線は矢状方向、破線は垂直方向に近位部が遠位部に作用する力を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 1 件）

- ① 松尾知之：投球動作とパフォーマンスをつなぐ missing link. 投球動作研究会研究集会.
2019. 6. 2

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。