

令和 2 年 7 月 10 日現在

機関番号：57403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18327

研究課題名（和文）投球動作解析評価用筋骨格モデルの構築に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Construction of Musculoskeletal Model for Pitching Motion Analysis Evaluation

研究代表者

野尻 紘聖 (Nojiri, Kosei)

熊本高等専門学校・電子情報システム工学系C Iグループ・講師

研究者番号：80435487

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：野球ボール内部の表面に4つの小型3軸力覚センサ（ショックチップ）を配置し、親指、人差し指と中指の指先、薬指の第2関節の接触力を計測でき、かつ、加速度・角速度・地磁気それぞれ3軸の合計9軸を計測するモーションセンサ（BN0-055）を内蔵してボールの速度と回転および移動軌跡を計測できるセンサボールを開発した。

開発したセンサボールの投球動作時、上肢に貼付した各反射マーカークの3次元位置座標および速度、肩関節の角度、前腕の回内・回外角度と手首の角度を算出し、その結果を筋骨格モデルシミュレーションソフトウェアのOpenSimを用いて解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ボール把持の姿勢による筋・腱・靭帯の挙動分析と前腕尺骨近位端の靭帯の挙動に着目し、そのために必要な筋骨格構造を明確にする点で独創的であると考えられる。

開発したセンサボールは四指の指先把持力やボールの挙動を同時に計測でき、モーションキャプチャシステムを用いた前腕骨格の尺骨近位端の挙動推定手法の提案、指先から手首までの動力学モデルの構築と最適化手法の提案であり、さまざまなスポーツ・競技での技能評価と傷害予防に有効なモデルである。

研究成果の概要（英文）：Four small 3-axis force sensors (Shokaku chips) are placed on the surface of the baseball ball, and the contact force of the second joint of the thumb, forefinger and middle finger, and the second joint of the ring finger can be measured, and acceleration, angular velocity, and geomagnetism can be measured. We have developed a sensor ball that has a built-in motion sensor (BN0-055) that measures 3 axes each, totaling 9 axes, and that can measure the speed, rotation and movement trajectory of the ball.

When throwing the developed sensor ball, the three-dimensional position coordinates and speed of each reflective marker attached to the upper limb, the angle of the shoulder joint, the pronation/supination angle of the forearm and the angle of the wrist are calculated, and the results are musculoskeletal. Analysis was performed using OpenSim, a model simulation software.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：投球動作 ボール把持力 筋骨格モデル 手指 前腕 靭帯

## 1. 研究開始当初の背景

2020年の東京オリンピック・パラリンピックの開催に向けて、スポーツ技能の向上およびスポーツ傷害の予防と早期回復が大きな課題の一つとして挙げられ、スポーツ工学やバイオメカニクスに関する研究がさらに進められていくと考える。野球・ソフトボールは現時点ではオリンピック競技には含まれていないが、日本での知名度や人気は非常に高く、競技人口が多いスポーツの一つである。小学生から部活動などで本格的に野球に取り組む子供たちが多く、特に投手は誰しもが憧れるポジションの一つである。しかし、身体の成長が十分ではない子供たちが適切な投球フォームを身に付けることや投球練習の質を向上させることは、さまざまなメディアからの情報や各チームのコーチに委ねられているのが現状である。幼い頃からの投球動作の繰り返しによりダメージが蓄積し、将来の夢や希望を叶えられなかった選手たちも多くいることはスポーツに対するイメージダウンにも繋がりがかねない。

そこで、プロ野球選手や高校野球選手などの投球動作を計測し、そのフォームを選手たちにフィードバックすることが行われている。用いられる計測機器としては、複数台の高速度カメラや慣性センサを用いたモーションキャプチャシステムである。それらのデータをもとに、フォームのスナップショットを提示することでコーチングに利用されているが、腕の内部状態までの評価ではない。また、同じモーションキャプチャシステムを用いて計測した動作から、筋骨格モデルに基づき、筋肉の張力変化や骨格動作を提示することも行われている。しかし、その際に用いられる筋骨格モデルにおいて、筋張力や関節トルク算出に用いられる数値モデルのもととなる前腕の骨格機構はシリアルリンクであり、人間の筋骨格構造を適切に表現するモデルとはいいい難く、投球傷害として約6割を占める肘関節の内側部の挙動を表現するモデルは、まだ存在しないといっても過言ではない。

近年、鶴田整形外科の小松智氏などのグループにより、ボール把持の際の三指(親指・人差し指・中指)の位置関係が前腕の回内・回外に大きく影響していることが指摘されている。投球動作時の回内・回外の強度(可動域)は肘関節内側に掛かる力ばかりではなく、投げ出されるボールの挙動にも大きな影響があるため、傷害予防や投球技能向上に重要な関係であると考えられる。しかし、これらを定量的に評価できる筋骨格モデルは提案されていない。さらに、モーションキャプチャシステムを用いた指モデルは、計測や解析の困難さや精度面の理由で二指モデルにとどまっているものが多く、投球動作に適用するには課題があると考えられる。

## 2. 研究の目的

投球動作の解析と評価に用いられている筋骨格モデルは、前腕に着目するとシリアルリンクとみなされた骨格であり、その運動をもとにモデルの姿勢やエネルギー消費などの目的関数の最適化により算出される筋張力を出力とするモデルであり、より精密な筋骨格モデルの構築により、投球フォームの改善につながり傷害予防が期待される。以下に、本研究の狙いと内容を示す。

### 1. ボール把持時の三指の位置関係が及ぼすボール挙動と前腕回内・回外の挙動分析

ボールを把持する初期段階において、四指の位置関係が投球動作やボールの挙動に影響があることが指摘されている。そこで、光学式モーションキャプチャシステムを用いて、四指の位置関係の違いによるボールと指先から肘関節までの挙動を計測および解析する。ここで、投げる球種は、速球と変化球である。

### 2. 投球動作時の把持力および肘関節内側部の靭帯伸長計測システムの構築

四指の把持力を計測するために、野球ボール内部の表面に複数の小型3軸力覚センサを配置し、複数の指先の接触力を同時に計測可能なセンサボールを開発する。また、上肢を任意の姿勢で保持できるワイヤ駆動のシステムを構築し、肘関節内側部の靭帯の伸びを超音波計により計測する。

### 3. 三指と手首関節および前腕骨格系の運動学・動力学モデルの構築

速球や変化球投球時の指先から肘関節までの骨格モデルを構築し、モーションキャプチャシステムによる計測結果と比較検討を行う。ここで、指関節は親指が八自由度、人差し指と中指が五自由度とし、手首関節は二自由度の機構とし、前腕は八個の関節をもつ全体で二自由度のパラレルリンク機構とする。

前述の骨格モデルをもとに、各関節に掛かる力とトルクを算出した後、筋の冗長性と二関節筋であることを考慮して姿勢またはエネルギー消費を目的関数とする最適化手法(PSO)を用いて、筋の張力を推定する筋骨格モデルを構築する。

### 4. 構築する運動学および動力学モデルの検証と評価

ボール把持力と肘関節内側副靭帯の伸長を計測した結果と、構築する筋骨格モデルにより算出する結果を比較検証し、提案モデルの有用性と妥当性を検証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、ボール把持時に使われる四指、手首関節、前腕骨格系の筋骨格モデルを構築し、その運動学および動力学を導出し、各関節力とトルクおよび筋・腱・靭帯の張力を最適化手法により算出する。さらに、そのモデルを用いて、四指の位置関係とモデルの運動および力を野球経験者および未経験者のモーションキャプチャと把持力計測結果と比較し、その有用性と妥当性を検証する。

筋などの張力推定には、遺伝的アルゴリズムなどの学習アルゴリズムではなく、姿勢やエネルギー消費を目的関数し、数値的最適化手法として PSO (粒子群最適化) を用いて算出する。

#### ●平成 28 年度

##### 1. ボール把持時の四指の位置関係が及ぼすボール挙動と前腕回内・回外の挙動分析

光学式モーションキャプチャシステムを用いて、ボール把持時の四指の位置関係の違いによるボールと指先から肘関節までの挙動を計測および解析した。ここで、投げる球種は、速球と変化球である。

設備備品費で新たにモーションキャプチャシステムを導入するまでの期間、研究協力者である佐賀大学医学部の堀川悦夫氏が管理する動作解析・支援開発センターの VICON を用いて計測を行い、鶴田整形外科の小松智氏より、適切な反射マーカの設置箇所や解析ポイントについてアドバイスを頂く。

##### 2. 投球動作時の把持力および肘関節内側部の靭帯伸長計測システムの構築

野球ボール内部の表面に小型 3 軸力覚センサを 4 つ配置し、手指とボールとの接触力を同時に計測可能なセンサボールを開発し、四指の把持力を計測する。また、上肢を任意の姿勢で保持できるワイヤ駆動システムを構築し、肘関節内側部の靭帯の伸びを超音波エコーにより計測する。計測の際は、動的に靭帯の伸長を計測することが出来ないため、姿勢を維持するシステムを構築する。

#### ●平成 29 年度，平成 30 年度

##### 3. 四指と手首関節および前腕骨格系の運動学・動力学モデルの構築

速球や変化球投球時の指先から肘関節までの骨格の運動学モデルを構築し、モーションキャプチャシステムによる計測結果と比較検討を行う。ここで、指関節は親指が八自由度、人差し指と中指が五自由度とし、手首関節は手関節を上方・下方へ曲げる運動を背屈・掌屈，手関節を親指側・小指側へ曲げる運動を橈屈・尺屈の二自由度の機構とし、前腕は八個の関節をもつ全体で二自由度の平行リンク機構とする。

逆運動学モデルの精度検証のため、モーションキャプチャシステムでは、指の各関節や手首関節および前腕モデルの各端点に反射マーカを取り付ける。前腕骨格の各関節角度を導出するには、回内・回外角度を入力とし、研究代表者が提案する PSO を用いた最適化手法によりモデルの各関節角度を導出することが可能である。

前述の骨格モデルをもとに、逆動力学モデルにより各関節に掛かる力とトルクを算出する。次に、筋の冗長性と二関節筋であることを踏まえ、解剖学的知見に基づいて姿勢またはエネルギー消費を目的関数とする最適化手法 (PSO) を用いて、筋の張力を推定する筋骨格モデルを構築する。

提案手法および従来手法に用いる筋・腱モデルは一般的な Hill モデルを採用し、靭帯は単純なバネモデルを想定している。また、数値計算には、研究代表者が所属する学科が所有する Matlab/Simulink および、Matlab とも親和性があり多くの研究者が利用している OpenSim を用いる。

#### ●平成 31 年度 (令和元年度)

##### 4. 構築する運動学および動力学モデルの検証と評価

まず、運動学モデルの検証として、モーションキャプチャの結果である指先位置からも算出した各関節角度が、同じくモーションキャプチャの結果である各関節位置座標の結果について妥当性を検証する。さらに、各関節角度のについても、同様にモデルとモーションキャプチャの結果を比較検討する。また、肘関節内側副靭帯の伸長計測結果と前腕骨格部の直動関節変位  $s$  から求められる、解剖学的に同じ部位の伸長結果とを比較検討する。

次に、逆動力学モデルにより算出した指先力や肘関節内側に掛かる力と、ボール把持力や肘関節内側副靭帯の伸長を計測結果から求めた肘関節内側に掛かる力とを比較検討する。

以上のことより、提案モデルの有用性と妥当性を検証する。

### 4. 研究成果

野球ボール内部の表面に 4 つの小型 3 軸力覚センサ (ショッカクチップ) を配置して親指、人差し指と中指の指先，薬指の第 2 関節の接触力を同時に計測することが可能なセンサ

ボールを開発した。具体的な開発内容は、ボールの内部に力覚センサだけではなく、加速度・角速度・地磁気それぞれ3軸の合計9軸を計測するモーションセンサ(BNO-055)を内蔵してボールの速度と回転および移動軌跡を計測し、microSDカードを内蔵して各種センサのデータを保存できる。さらに、bluetooth通信によりパソコンと通信し、リアルタイムにデータをパソコンへ保存できる。実験では、当校の野球部3名に約50から80%程度の力でネットに向かって投げてもらい、先把握力および回転数などの計測を実施するとともにセンサボールの強度を確認した。

4台のSony社製デジタルスチルカメラを投球者の周囲に配置し、投球動作時の上肢と指先の動きを計測および分析した。本研究では、投球動作全体において肩関節、肘関節から指先までの位置や姿勢を計測する必要がある。本研究で導入したデジタルスチルカメラは約1000fpsでの撮影および比較的解像度の高い画像取得が可能であることを確認できている。この結果をDKH社のFrame-DIAS VIを用いてデジタイズし、Visual 3Dによって上肢に貼付した各反射マーカの3次元位置座標および速度、肩関節の角度、前腕の回内・回外角度と手首の角度を算出した。また、オープンソースの動作計測ソフトウェアであるOpenposeを用いて三次元での計測を行い、Frame-DIAS VIの算出結果との比較検証を行った。そして、その結果を筋骨格モデルシミュレーションソフトウェアのOpenSimを用いて解析を行った。解析結果より、従来手法よりも提案手法の筋骨格モデルが有用であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野尻紘聖
2. 発表標題 複数の指先接触力を計測可能な3軸力覚センサボールの開発
3. 学会等名 第19回公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----