

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：57301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12663

研究課題名(和文) 手指の筋腱複合体の弾性特性に着目した物体操作運動の解析とスポーツ指導への展開

研究課題名(英文) Analysis and performance evaluation of manipulation motion in sports with focusing on elasticity of muscles and tendons in human hand

研究代表者

横田 諭 (Makita, Satoshi)

佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号：60580868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では手指に内在する筋腱複合体(筋と腱の総称)のもつ弾性特性を外部から簡便に計測、推定する手法を提案し、スポーツ動作の定量的評価へ応用することを目的とした。まず、指先から発揮される力の大きさ、およびMP関節角度を計測し、そのモデルを基にバレーボールのオーバーハンドパスの動作を評価した。また、計測結果から推定される弾性特性モデルが生理学的に正しいことを検証するために、超音波画像診断装置による撮影画像から筋腱の動態を分析した。動作評価においては、プレーの成功率と手指動作の関係が示唆される結果が得られた。また提案モデルで見られたヒステリシスの発生に関与する可能性のある筋腱の動態が確認された。

研究成果の概要(英文)：We propose a mechanical model of elasticity of muscle-tendon complexes in hand, whose parameters are easily measured by using external observers, for sports coaching. This model is composed of forces exerted from fingertip and MP joint angle, and it is applied to a performance index of overhand pass motion in volleyball. A relationship between the success rate of performance and the hand motion is supposed from measurement results. In addition, ultrasonographic images of muscles and tendons of human hand are investigated to address a hysteresis of the proposed model. Exerted forces from the fingertip largely decrease in a stretch-shortening cycle (SSC), and it may be caused by decrease of muscular strength which supports elongation of tendons. The displacement of a tendon measured as that of a highlight feature in the ultrasonographic images is proportional to MP joint angle, but it also decreases in the same phase of SSC.

研究分野：ロボティクス, バイオメカニクス

キーワード：手指運動 筋腱複合体 計測 超音波画像 バイオメカニクス 弾性特性 バレーボール 運動解析

### 1. 研究開始当初の背景

身体運動の拘束等によって筋腱に外力が印加されると、特に腱が伸長して弾性体としてふるまう。筋腱複合体の弾性特性の発揮メカニズムおよび身体運動への効果は、例えば下肢による跳躍に関する研究(参考文献[1][2])などにより明らかになりつつある。一方で、申請者は未解決の課題として次の2つを考える。

- (1) 上肢や手指の動作に関する筋腱複合体の研究、およびそれに基づく運動解析の事例は少ない
- (2) 動作指導等への応用を考える場合、生理学的知見は必ずしも直観的に理解しやすいといえない

手指の「しなり」を巧みに利用する運動は例えば、バレーボールや野球の投球動作などに見られる。しかし、筋腱複合体の動態の解析手法は超音波診断装置等によるため簡便でないことなどから、その知見をそのままスポーツ動作の改善に応用することも難しい。ゆえに、その弾性特性の発揮メカニズムと動作パフォーマンスの関係はプレー指導においてあまり認知されていない。したがって、生理学的に正しいアプローチによる運動解析を、いかにして一般のプレー指導等に応用しやすくするか、ということが、スポーツ科学の波及に重要ではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

以下の3点の研究課題に取り組むことを本研究の目的とする。

- (1) 提案モデルの生理学的正しさの検証：手指の筋腱複合体の弾性特性を外部から簡便に計測する提案モデル(参考文献[3])を、従来の生理学的アプローチ([1]など)による筋腱の直接的計測から考察する。
- (2) 手指の運動速度に筋腱複合体の弾性特性が与える効果の計測：提案モデルより手指関節角度から指の運動速度が推定できる。計測結果との比較から運動パフォーマンスの評価指標を導出する。
- (3) 手指と操作対象物との衝突の解析：提案モデルから導出できる力学モデルによる衝突解析と実際のプレーとを比較し、手指関節の状態とプレーのパフォーマンスとの関係を明らかにする。

### 3. 研究の方法

- (1) 筋腱複合体の提案モデルの生理学的正しさの検証

示指の指先に外力を加え関節角度を変化させたときの指先発揮力を計測する。この計測実験において、指先に外力を加え関節角度を増加させていく過程を load elevation、指先から外力を除き、関節角度を減少させていく過程を load reduction と定義する。また、外力印可分による関節角度と指先発揮力

の変化の関係性を調べるために、随意的な筋力のみで示指を持ち上げた際の MP 関節における最大角度を計測の初期角度とする。また、MP 関節可動域の最大関節角度を計測の限界角度と定義する。計測台(図1)に手のひらを下にして載せ、示指の指先に伸張方向へ外力を加え、初期角度から関節角度を5度ずつ増加させていき、可動限界角度に到達すると、印加外力を小さくして関節角度を5度ずつ減少させていく。関節角度の変化に合わせて、随時、指先発揮力を計測する。同時に、示指 MP 関節近傍の指屈筋腱とその周辺を超音波画像撮影し、腱の変位量を画像分析から推定する。超音波画像中の指屈筋腱には、著しく輝度が高い特徴的な点が確認できるため、その変位量を計測する

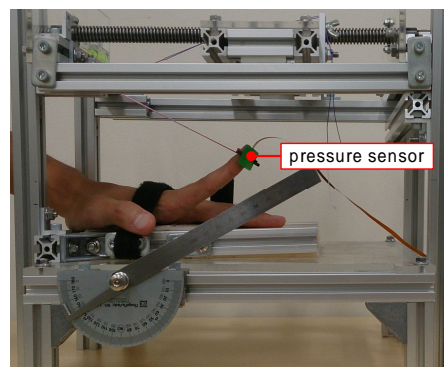


図1：計測装置

- (2) 手指の運動速度に筋腱複合体の弾性特性が与える効果の計測

前述の(1)と同様の方法で、適当な関節角度まで指先を押し上げ、手指を伸展させる。その後、指先に印加している外力を瞬間的に取り除き、これによって生じる手指の運動の角速度を、運動開始時の角度とともに計測・記録する。角速度は高速度カメラの数フレーム分の動画像から推定できる。load reduction 過程においては、いったん目標関節角度以上に手指を伸展させた後、関節角度を減少させてから、リリースする手順としている。

- (3) 手指と操作対象物との衝突の解析

バレーボールのオーバーハンドパスを例として、手指と衝突するボールの緩衝からリリースまでの手指運動を分析する。計測対象者は指先に1軸の圧力センサを装着する。計測対象者の頭上の同じ位置にレールからボールが落下するように設定し、対象者はボールを返球するとき、目標高さを経由して目標地点に落下するようボールをコントロールする。

### 4. 研究成果

- (1) 筋腱複合体の提案モデルの生理学的正

## しらの検証

男性、20代の実験協力者1名に対し、示指の指先発揮力と関節角度の計測を5回行った(図2)。この結果より、load elevation 過程における指先発揮力は、関節角度変化に対して指数関数的な特性を示していることが確認できる。これは参考文献[3]でも確認されているとおり、先行研究において報告された、摘出腱の伸長量と復元力の関係(参考文献[4])に類似しているため、筋腱の弾性特性の指標として妥当な結果であるといえる。また、load elevation と load reduction の間において指先発揮力が急減するヒステリシスが確認できる。これは参考文献[4]で報告された腱のみの特性と比較して、差が大きいものであり、この計測過程における筋の動態が関与していると予想される。

次に、同じ対象者に対し、超音波画像診断装置による指屈筋腱の撮影を5回行った(図3)。この結果では、load elevation 過程では、関節角度変化と特徴点変位量がほぼ比例関係にある。関節角度と腱の伸長量は比例関係にある(参考文献[5])ことから、本研究で調べた特徴点変位量は、腱の伸長量を表すか、比例関係またはそれとの相関関係にあると言える。以上の結果より、load reduction 過程においては腱の短縮が起こっていると予想され、これには筋張力の低下が原因の一つと考えられる。指屈筋腱の動態を定量的に計測する手法を確立することで、この原因の解明につながるものと期待される。

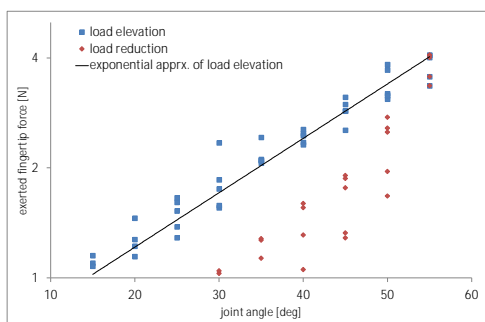


図2：伸展開節角度と指先発揮力の関係

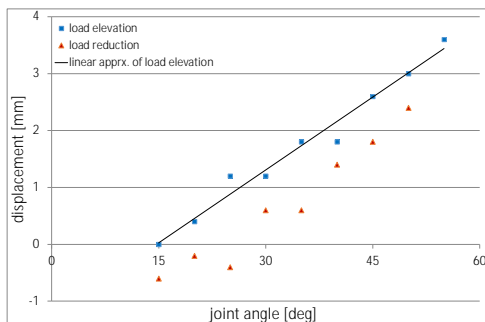


図3：伸展開節角度と指屈筋腱の特徴点の変位量の関係

## (2) 手指の運動速度に筋腱複合体の弾性特性が与える効果の計測

(1)と別の実験協力者に対して、同様の計測を行った。適当な関節角度まで指先を押し上げて、リリースしたときの関節角速度をプロットした結果を図4に示す。この結果から(1)と同様に、リリース直後の指先の運動速度とMP関節の伸展角度との間には指数関数で近似される関係があると考えられる。また、load elevation と load reduction の間で関節角速度にヒステリシスがあることが確認できる。これは(1)で計測された復元力の減少により筋腱に蓄積される弾性エネルギーが減少したことによるものと推定される。

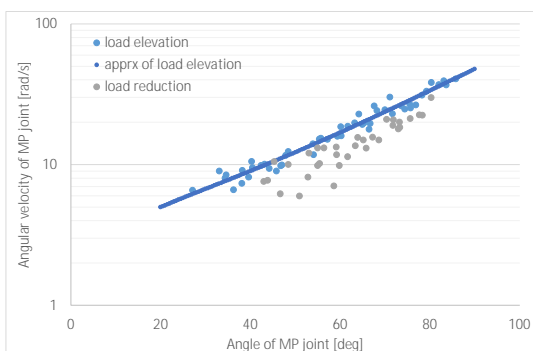


図4：伸展開節角度と手指の運動角速度の関係

## (3) 手指と操作対象物との衝突の解析

バレーボール経験者(男性8名、女性4名、15~20歳)を実験協力者とし、各5回ずつ試技を行い、指先の接触力を計測した。このうち、「目標高さへの到達」「目標位置への落球」のプレーの成功率の高かったプレーヤーAと、成功率の低かったプレーヤーBの両手示指の計測結果をそれぞれ図5、6に示す。この結果から、プレーヤーAは毎試技ごとのボールへ与える接触力のばらつきが小さく、プレー動作が安定していることが推察される。一方、プレーヤーBは接触力のばらつきが大きいことからプレー動作が不安定で、返球するボールの軌道が安定していないと考えられる。また、リリース時のボールの接触時間についてはプレーヤーAが平均0.069秒、プレーヤーBは0.052秒であった。

なお、関節角度についても曲げセンサを用いて計測したが、計測機器のキャリブレーションにおいて分散が大きくなり、本試技の計測において有効といえる計測結果を得ることができなかった。ただし、熟達したプレーヤーほど関節の伸展角度が大きい傾向がみられ、これは接触時間に起因している可能性が考えられる。安定した計測結果が得られるような機器の選定と計測手法の検討が今後の課題である。

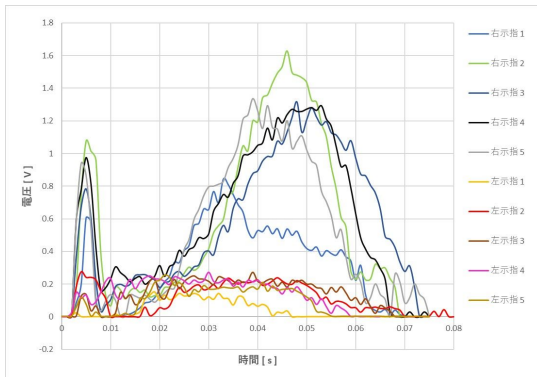


図5：プレーヤーA(熟達者)のオーバーハンドパス時の示指の接触力の変化

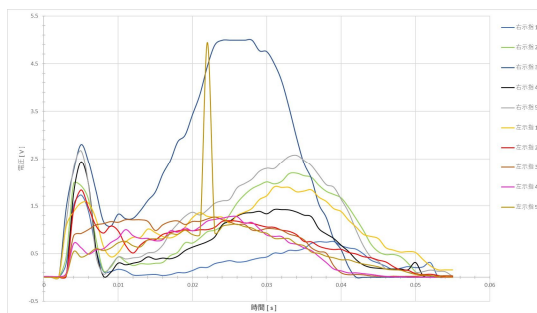


図6：プレーヤーB(未熟練者)のオーバーハンドパス時の示指の接触力の変化

以上の研究成果より次のことが確認された。(1)本研究で提案する手指の筋腱複合体の弾性特性の発揮メカニズムについて、生理学的なアプローチとして筋腱の動態を超音波画像から分析することに一定の有効性がある。(2)筋腱の弾性特性による手指の運動速度には指先発揮力同様に、関節角度に応じた関係があり、かつ、関節運動の経過に対してヒステリシスがある。(3)球技のパフォーマンス評価において、ボールの軌道に表れるプレーの質と、そのプレーを実現する身体運動の質を計測データから定量的に分析できる可能性がある。

今後は、より詳細な計測を実施することで、上記それぞれの結果の関連を明らかにできると期待する。例えば、関節角度の分析から手指運動の経過を観察することで、弾性エネルギーを急減させずに有効利用しているかどうかを推定できる。ボールとの接触時間、与える接触力、リリース時の手指の運動速度などから、良質のパフォーマンスを実現するための身体運動を定量的に評価することを目指す。

#### 参考文献

- [1] 福永：“筋腱複合体 - ここまでわかった筋腱のふるまい”, Sportsmedicine, 10, 6-17, 2009.
- [2] M. F. Bobbert et al.: “The force-length relationship of a muscle-tendon complex: experimental results and model calculations,” J. of Applied Physiology, 61:323-329,

1990.

- [3] 川淵ら：“手指の筋腱複合体のもつ弾性特性の計測”, 計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2J1-3, 2013.
- [4] Ker R. F.: “Dynamic tensile properties of the plantaris tendon of sheep”, J. of Experimental Biology, Aug. 93, pp. 283-302, 1981.
- [5] 太田めぐみ, “生体電気インピーダンス法を用いた筋長変化測定法の開発”, 博士学位論文, 早稲田大学, 2006.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計7件)

馬場園直樹, 榎田諭: バレーボールのオーバーハンドパス動作中の指先力計測に基づくプレーパフォーマンス評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-G10, 2018年6月。(査読なし)

片岡将平, 榎田諭: オーバーハンドパス中の手指関節角度と指先発揮力の計測, 日本バレーボール学会第23回大会, No. 16, 2018年3月。(査読なし)

R. Yamaguchi, S. Yoshikawa and S. Makita: Ultrasonographic Observation of Stretched Flexor Digitorum in forced Dorsiflexion, Proc. of Int. Symp. on Innovative Engineering, PS06, Jan 2018. (査読なし)

榎田諭, 縄田亮太: バレーボールのオーバーハンドパスにおける手指の筋腱複合体の弾性特性に基づくコーチングへの一考察, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2017AC3H1-02, 2017年9月。(査読なし)

吉川慧, 榎田諭: 外力による伸展時に伸長される指屈筋腱の超音波画像解, 日本機械学会年次大会, G2300101, 2016年9月。(査読なし)

S. Makita, M. Maeda, Y. Kawafuchi and R. Nawata: A Mechanical Model of Elasticity Attributed to Flexor Digitorum, The 6th JSME/RMD Int. Conf. on Advanced Mechatronics, pp. 84-85, Dec 2015. (査読あり)

S. Makita, M. Maeda, Y. Kawafuchi and R. Nawata: Estimation of Elastic and Dynamic Properties of a Finger Attributed to Muscle-Tendon Complex by Measuring Joint Angles, the 25th Congress of the Int. Society of Biomechanics, AS-0165, July 2015. (査読あり)

〔その他〕

- 榎田諭, 前田桃子, 川淵雄貴, 縄田亮太:

手指関節角の計測に基づく筋腱複合体の弾性特性モデル, 佐世保工業高等専門学校研究報告, 第 52 号, pp. 12-15, 2016 年 2 月.(査読なし)

● 研究代表者ウェブサイト

<http://www.sasebo.ac.jp/~makita/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

榎田 諭 (MAKITA, Satoshi)

佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号: 60580868

(2) 研究分担者

縄田 亮太 (NAWATA, Ryota)

愛知教育大学・教育学部・助教

研究者番号: 60551281

(3) 連携研究者

なし