

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700201

研究課題名(和文) 手指伸筋腱ネットワークに潜む関節トルク調整機構の解明と筋腱張力推定問題への展開

研究課題名(英文) Function of the musculotendinous network of human hands for articulated finger motion revealed by musculoskeletal simulation and motion analysis

研究代表者

多田 充徳 (Tada, Mitsunori)

独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究チーム長

研究者番号：70392628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：繊細な手指の機能は複雑な筋腱ネットワークから生み出される。この複雑な腱構造の相互作用に着目し、手内筋の張力が外在伸筋腱の走行や手指の関節運動に与える影響を明らかにするために、筋腱骨格モデルを用いた動力学シミュレーションと、屍体標本に対する筋骨格運動計測を実施した。このシミュレーションと計測の結果、手内在筋の張力が大きくなるほど中手指節関節に比べて指節間関節の屈曲が遅くなり、このため指尖部がより大きなアーチ軌道を描くことが分かった。コンピュータを用いた筋骨格運動シミュレーションにおいては、このような筋腱ネットワークを再現する必要があることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：Precise manipulative function of human hand is realized by complicated musculotendinous network. In order to clarify the influence of the intrinsic muscle force on the path of the extrinsic muscle and the articulated finger motion produced by the extrinsic muscle, dynamic simulation for the musculoskeletal model and musculoskeletal motion measurement for cadaver hands were conducted, focusing on the cross-interaction within musculotendinous network. Results of these simulation and measurement clearly demonstrated that the trajectory of the fingertip was enlarged as the tension of the intrinsic muscle increased, since the interphalangeal joints began to flex later than the metacarpophalangeal joint when the intrinsic muscle was activated. This result suggests that reproducing the complicated musculotendinous network is fundamental for musculoskeletal computer simulation of human hands.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：筋骨格モデル 筋骨格運動計測 内在筋 外在筋 モーメントアーム

## 1. 研究開始当初の背景

繊細な手指の機能は複雑な筋腱ネットワークから生み出される。特に手指の伸展機構に関しては、伸筋腱が基節骨の背側で中央索と2本の側索に分岐すると同時に、これら3本の索に橈側と尺側から伸びる手内筋腱が接続するなど、屈筋腱の走行に比して極めて複雑な構造を持つ。

従来から手指の機能をコンピュータ上に再現するための試みがバイオメカニクス、エルゴノミクス、ロボティクス、コンピュータグラフィクスなど幅広い分野で行われている。多くの場合、筋腱張力を関節トルクに変換するためのモーメントアーム長や、冗長問題に対して解を一意に定めるための拘束条件を導入することで、与えられた指先力を実現し得る筋腱張力パターンを計算していた。しかし、先に説明したような伸展機構を持つ複雑な筋腱ネットワーク構造、そしてこのネットワーク内に生じる筋腱間の相互作用を考慮した研究は殆ど無かった。

## 2. 研究の目的

本研究では、人の手指の優れた機能を解き明かす鍵が伸展機構のネットワーク構造の中にあるとの立場から、その構造と筋腱間の相互作用に着目した研究を実施する。具体的には、手内筋腱の張力が外在伸筋腱の走行や手指の関節運動に与える影響を明らかにするために、筋腱骨格モデルを用いた動力学シミュレーションと、その妥当性を検証するための筋骨格運動計測実験を実施する。

## 3. 研究の方法

基本的に腱とは繊維質の束である。このため曲げ方向に比べて引張り方向の剛性が高いという機械的な特性を有する。

動力学シミュレーションでは、筋要素を用いてこの特性を模擬すると同時に、筋腱と骨との干渉を防ぐために骨の形状を再現したラッピング要素を導入することで、関節の屈曲に伴い側索が掌側に移行する現象を再現できるようにする。また、手内筋の1つである虫様筋の張力が深指屈筋腱による示指関節の屈曲運動に与える影響を定性的に評価する。

動力学シミュレーションの妥当性を検証するために、屍体標本を用いた筋骨格運動計測を行う。虫様筋に異なる静荷重を加えた状態で深指屈筋腱を一定速度で駆動し、その際の示指の関節運動をCTとモーションキャプチャシステムを用いて計測する。

## 4. 研究成果

### (1) 動力学シミュレーション

筋骨格運動計測時に屍体標本に対して撮像したCT画像から筋腱の走行を讀影し、筋腱骨格モデルを構築した。特に、手指の伸展機構が持つ分岐構造と、それに対して橈側と尺側から接続する手内筋の構造を再現でき

るように注意を払った。

構築した筋腱骨格モデルを用いて、深指屈筋腱による示指関節の屈曲運動の動力学シミュレーションを行った。その結果、虫様筋の張力が大きくなるほど、指尖部が空間中に描くアーチが大きくなることが分かった。なお、シミュレーションの結果などについては未発表のため割愛する。

### (2) 筋骨格運動計測

実験には手関節で切断した7体の新鮮凍結屍体標本(61歳から91歳、平均79歳)を用いた。5体が男性、2体が女性の屍体標本であり、明らかな筋骨格系疾患を持つ屍体標本は含まれていない。実験の直前に室温で解凍した後に、腱鞘を破壊しないように屍体標本から皮膚、神経、そして血管を除去した。

外在筋からのびる総指伸筋腱(EDC)、示指固有伸筋腱(EIP)、深指伸筋腱(FDP)、そして浅指屈筋腱(FDS)については、切断部(手関節)近傍に絹糸を縫合した。一方、手内筋である虫様筋(LUM)、背側骨間筋(DI)、そして掌側骨間筋(PI)については、それぞれの付着位置近傍に縫合した絹糸を、解剖前の力の作用方向を保持できるように、対応する筋の筋腹中央付近を通した上で、手関節近傍へと導出した。

絹糸の末端を直径0.18mmのステンレスワイヤへと結合し、このワイヤを次節で説明する筋腱駆動装置のプーリに固定した。また、屍体標本を筋腱駆動装置に固定するために、中手骨の背側に2本のステンレスピンを刺入した。

更に、モーションキャプチャ用のマーカを固定するために、末節骨と中節骨に直径1.6mmのステンレスピンを刺入した。ピンの末端には一辺の長さが約15mmの3角形板を固定した。この板の頂点に直径約4mmのマーカを接着することで、皮膚変形の影響を受けない関節運動の計測が実現できる。一方、基節骨についてはマーカを接着した3角形板を爪に直接固定した。また、筋腱駆動装置の上面には、中手骨の位置を復元するために同じく直径約4mmのマーカを4から6個接着した。

マーカの軌道から関節運動を復元するにはマーカと骨の位置関係を計測する必要がある。このために、関節運動の計測を行う前に屍体標本のCT画像を撮像した。CT画像からマーカと骨のポリゴンモデルを作成し、前者をモーションキャプチャで計測したマーカ座標へとフィッティングすることで、骨の3次元的位置と姿勢が復元できる。図1の左にモーションキャプチャを用いて計測した屈曲運動時のマーカ軌道を、図1の右にCT画像に対してセグメンテーションを行うことで作成したマーカと骨のポリゴンモデルを示す。

この実験システムを用いて、虫様筋に対して0.00N、0.49N、0.98N、1.47N、または

1.96N の一定張力を与えた状態で FDP を伸展位から屈最大曲位まで 2.0mm/sec の一定速度で駆動した．図 2 に掌側（左下），遠位（右上），そして撓側（右下）から見た指先の軌跡を示す．

このグラフから明らかなように，伸展位と最大屈曲位の近傍ではそれ以外の姿勢に比べて虫様筋の張力が軌道の変化に与える影響が小さい．これは，前者の場合には全ての関節が伸展するため，後者の場合には靭帯により関節が拘束されるためだと考えられる．一方，これ以外の姿勢では，虫様筋の張力が高くなるほど指先が描く円弧状の軌跡が大きくなる．ただか 0.5N 程度の張力の変化で，指先の軌道が 20mm 以上変化することは虫様筋の機能を理解する上で興味深い．

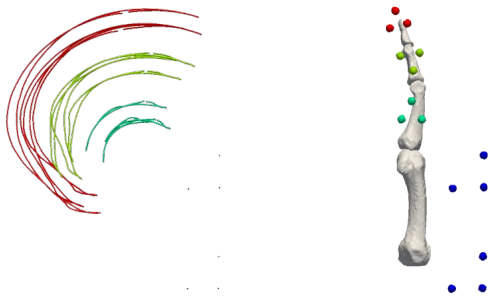


図 1: 筋骨格運動計測の原理

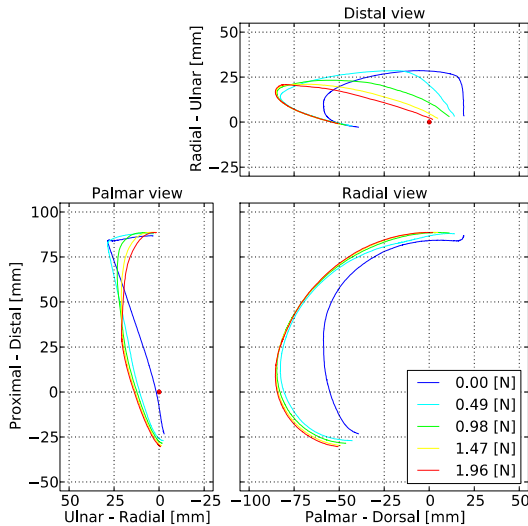


図 2: 虫様筋の荷重に対する指先軌道の変化

図 3 に遠位指節間（DIP）と近位指節間（PIP）関節における伸展-屈曲角度の変化と，中手指節（MP）関節における伸展-屈曲と内転-外転角度の変化を示す．このグラフから明らかなように，虫様筋に張力が加わっていない時には全ての関節がほぼ同じタイミングで屈曲を開始する．一方，DIP と PIP 関節においては虫様筋の張力が高くなるほど遅く屈曲するのに対して，MP 関節においては虫様筋の張力が高くなるほど早く屈曲する．図 2 に示したような指先軌道の変化が生じる理

由は，このような屈曲タイミングの変化にある．また，虫様筋麻痺手においては，大きな物体の把持が困難になることが知られているが，この指尖部の軌道変化が一因であると考えられる．

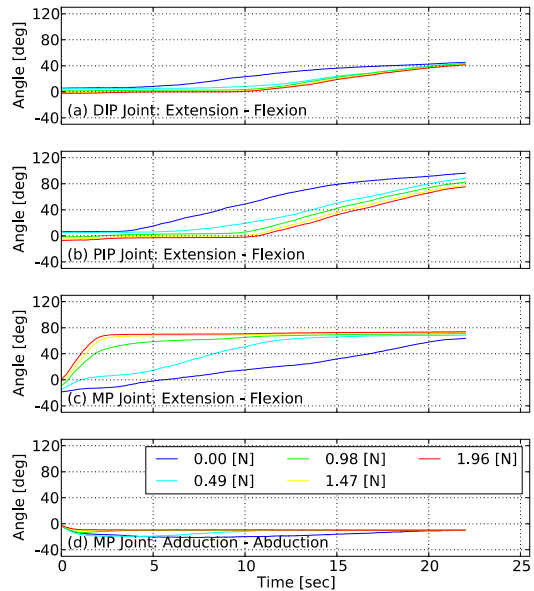


図 3: 虫様筋の荷重に対する関節角度の変化

以上のように，指尖部の軌道や深指屈筋腱の駆動距離と関節確度の関係を可視化した結果が，動力学シミュレーションの結果と定性的に一致することが分かった．手指の伸展機構と内在筋が持つ複雑な構造は，手指の把握機能を実現する上で重要な役割を担っている．コンピュータを用いた筋骨格運動シミュレーションにおいても，これらを再現する必要があることが示唆された．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Yusaku Kamata, Toshiyasu Nakamura, Mitsunori Tada, Shinjiro Sueda, Dinesh K. Pai, Takeo Nagura, Yoshiaki Toyama, Function of the lumbrical muscle in three-dimensional fingertip trajectory and balancing of the metacarpophalangeal joint: a cadaveric study. 投稿予定

〔解説論文〕(計 1 件)

多田充徳, 中村俊康: 屍体標本を用いた筋骨格運動シミュレーションによる手指筋腱メカニズムの解明, バイオメカニズム学会誌, 38 巻, 1 号, pp.11-17, 2014.

〔学会発表〕(計 3 件)

Mitsunori Tada, Musculoskeletal motion analysis of cadaver hands, International Conference on Robotics

and Automation 2014: Workshop on Human Modeling and Control for Assistive Technologies, 2014.

Mitsunori Tada and Yoshifumi Nishida, Inconsistency between objective and subjective difficulty of button-press task, XXIV Congress of the International Society of Biomechanics, 2013.

多田 充徳, 末田 信二郎, 鎌田 雄策, 中村 俊康, Dinesh K. Pai, 名倉 武雄, 戸山 芳昭, 示指関節運動の運動性, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 1P1-N08, 2013.

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

多田 充徳 (TADA, Mitsunori)

産業技術総合研究所 デジタルヒューマン  
工学研究センター 研究チーム長

研究者番号 : 70392628