

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560265

研究課題名（和文） 擬似三角構造マトリクスに基づいた人の筋・腱駆動系の静力学的解析

研究課題名（英文） Statical analysis of the muscle-and-tendon-driven system of the human on the pseudo-triangular structure matrix.

研究代表者

横川 隆一（YOKOGAWA RYUICHI）

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：70220548

研究成果の概要：

本研究の目的は、屈曲・伸展運動における指の筋・腱駆動モデルと3関節4腱駆動方式の腱の経路・配置を、筋・腱張力と指先操作力の関係に基づいて比較・検討することにより、屈曲・伸展運動における人の指の器用な動作が、筋・腱駆動系のどのような機構によって実現されているのかを、静力学的に調べることであった。人の指の筋・腱駆動モデルにおいて、屈曲・伸展運動に限定するときの各関節に対する筋・腱の経路と3関節4腱駆動方式の腱の経路を比較した。この比較により、複雑な人の筋・腱駆動系を単純化し、筋張力で任意の指先操作力が制御できるように各関節に対する筋・腱の経路のモデル化を行った。MRI計測に基づいて、人の指の各関節における各腱のモーメントアームのモデル化を行った（被験者3人）。擬似三角構造マトリクスに基づいて得られた筋・腱の経路モデルとMRI計測に基づいたモーメントアームのモデルより人の示指の新しい腱駆動系モデルを作成した。このモデルを用いて、筋張力空間から指先操作力空間への写像を幾何学的に表し、その幾何学的特徴を基に腱駆動系の静力学的特徴を調べた。結果として、MRI計測に基づいた示指の3つの関節における筋・腱のモーメントアームのモデルを新たに構築できた。そのモデルと3関節4腱駆動方式の腱の経路とを比較することで、指の筋・腱駆動系が擬似三角構造マトリクスに基づく駆動系に近似できることが判った。結論として、人の示指の筋・腱駆動系は、筋張力により任意の各関節トルクを理論的に安定に出力できる筋の数と経路を持っていることが判った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：制御工学、生物・生体工学、知能ロボティクス、バイオメカニクス

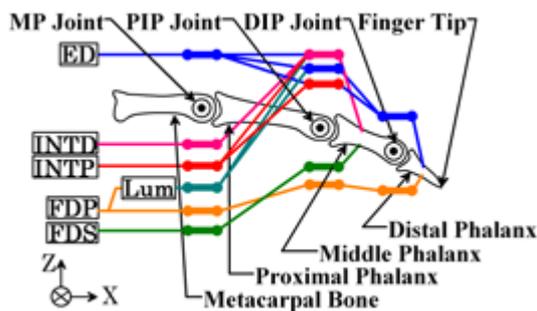


Fig. 1 An anatomical model of the index finger

### 1. 研究開始当初の背景

人の指先の器用な動作は、その筋・腱駆動系により実現されている。一本の腱が複数に分岐、あるいは複数の腱が一本に結合する複雑な構造を有している。一方、腱駆動のロボットでは、いくつかの腱駆動の方法が提案されているが、輪状の閉ループ型の腱によって、モータの回転軸に取り付けられたプーリと関節軸のプーリとの間を伝達する Endless 機構と、腱の一端をリンクに固定しもう一端をアクチュエータによって引っ張る Open-ended 機構に分類できる。さらに、後者では、 $n$  個の関節に対して  $2n$  本の腱で引っ張る方式と  $n$  個の関節に対して、 $n+1$  本の腱で引っ張る ( $n$  関節  $n+1$  駆動) 方式とが提案されている。人間の指の筋・腱駆動の骨格筋モデルでは、屈曲・伸展の平面運動に限定するとき、関節の自由度 3 に対して、筋の本数は、5 本から 6 本でモデル化されている。屈曲・伸展平面運動において、指の骨格筋モデルと腱駆動のロボットマニピュレータの駆動方式を比較するとき、人の指の駆動系は、ロボットマニピュレータの 3 関節 4 腱駆動方式 ( $n=3$ ) に構造的には最も近いことが観察できる。指の運動を屈曲・伸展面内に制限するとき、関節自由度 3 に対して、3 関節それぞれを任意のトルクで正・逆回転させるために必要な最小限の腱の本数は 4 本である。しかし、明らかに、人の指の腱駆動系は、関節の自由度に比べて冗長であることがわかる。

本研究代表者はこれまで、人の指のリンク機構（たとえば、姿勢計測に基づく人差し指リンク機構の解析、平成 15 年度～平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究(C)））、筋・腱駆動系のモデル化および運動学・静力学の解析に関する研究を行っている。それらの研究から工学的に最適に設計された 3 関節 4 腱駆動系を基にして、人の複雑な筋・腱駆動系を力学的に解明できるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、これまで提案されている

屈曲・伸展運動における解剖学的な指の筋・腱駆動モデルと 3 関節 4 腱駆動方式の腱の経路・配置、および筋・腱張力と指先操作力の関係とを比較・検討することにより、屈曲・伸展運動における人の指の器用な動作が、筋・腱駆動系のどのような機構によって実現されているのかを、静力学的に調べることである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 3 関節 4 腱駆動方式における駆動機構の選定

擬似三角行列となる構造行列（筋張力から関節トルクへ変換する行列）に対して、3 関節 4 腱駆動方式の腱のすべての経路を求める。これは、経路決定のためのアルゴリズムを作成し、計算機シミュレーションによって実行した。

#### (2) 3 関節 4 腱駆動方式に基づいた人の示指の筋・腱の経路モデルの作成

腱の経路について、(1) で求められた 3 関節 4 腱駆動系とこれまでに提案されている解剖学的な人の指の筋・腱駆動モデルとを比較して、人の指の筋・腱駆動モデルのもつ腱の経路に最も近い腱駆動系を考えた。

解剖学的モデルでは、伸筋腱が分岐・合流する複雑な構造となっている。そこで、次のように近似した。

- ・ 虫様筋 (Lum) の働きは無視した。
- ・ 虫様筋の PCSA（筋肉の生理断面積）は、指の駆動筋の中で最も小さく、指の駆動に対する貢献は小さいものと考えた。
- ・ 側索 UB における掌側骨間筋 INTP の合流を切断した。
- ・ 背側骨間筋 INTD、および掌側骨間筋 INTP を 1 本の筋 INT でモデル化した。
- ・ 中央索 CB を、骨間筋 INT が作用する腱と伸筋 ED が作用する腱とに分けた。
- ・ 伸筋腱において、ED と側索 UB、および RB の分岐をなくし、1 本の伸筋腱 TED でモデル化した。

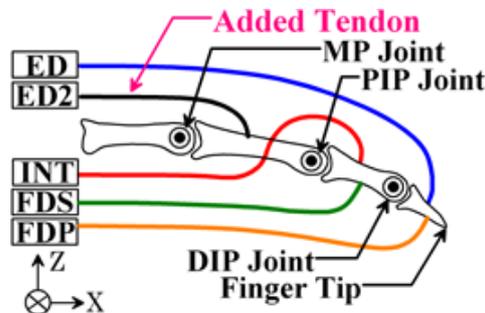


Fig. 2 The proposed model of the index finger

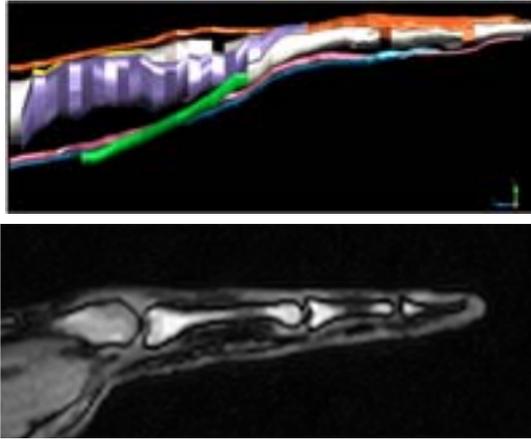


Fig.3 An anatomical finger model on MRI

しかし、以上のようにして、得られた構造行列は、擬似三角行列の形をとっていなかった。そこで、この構造行列を擬似三角行列に近づけるために、新たに MP 関節に負のトルクを与える腱 ED2 を 1 本加えた。そのモデルを本研究での提案モデルとし、構造行列の解析を行った。

### (3) MRI 計測に基づいたモーメントアームのモデル化

人の示指の主な筋・腱 (Fig.1 参照) は、伸筋腱 (ED)、浅指屈筋腱 (FDS)、深指屈筋腱 (FDP)、骨間筋 (INTD, INTP)、および虫様筋 (Lum) であり、本研究では、これら 5 種類の筋・腱の配置を計測する。MRI 装置 (日立メディコ製, AIRIS II) を用いて、5 つの屈曲・伸展姿勢における示指の横断面と矢状断面を撮影した。MRI の画像をコンピュータに取り込み、横断面の各画像でそれぞれの筋・腱の周囲をポリラインで囲む。得られた腱の輪郭を結び合わせて、筋・腱の 3 次元モデルを作成した。これのモデルを用いて、各関節における各腱のモーメントアームのモデル化を行った。

なお、同志社大学が定める「人を対象とする研究」倫理基準に従い、同大学の定める「人を対象とする研究計画等の申請」を行い、同志社大学研究倫理委員会の承認の判定を得て、本計測を実施した。

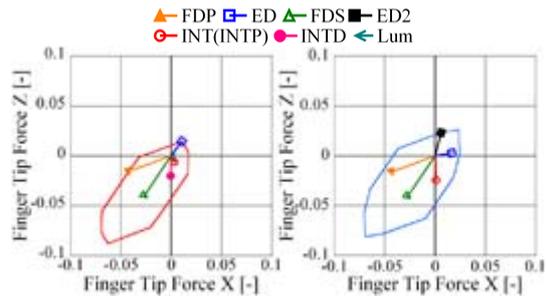
### (4) 新しい腱駆動系モデルの作成

得られた筋・腱の経路モデルとモーメントアームのモデルより人の示指の新しい腱駆動系モデルを作成した。筋・腱駆動系およびリンク機構からなる示指の静力学モデルを作成した。

### (5) 指の静力学的特性解析

構築された屈曲・伸展平面運動に限定された示指モデルにおいて、筋張力空間 (筋の数

を  $n$  本とするとき、 $n$  次元空間になる) から指先操作力空間 (屈曲・伸展上での操作力なので 2 次元平面) への写像を考えた。入力である各筋張力  $f_n$  を  $0 \leq f_i \leq 1$  とするとき、筋張力集合は  $n$  次元多面体で表される。この筋張力集合に対する指先操作力集合は、屈曲・伸展平面上の多角形を構成する。ロボット工学では、それは可操作力多角形と呼ばれる。指モデルの静力学的特徴は、指先操作力多角形の形状によって判定した。各筋張力は、指先操作力多角形内におけるベクトルとして



(a) The anatomical model (b) The proposed model

Fig.4 Fingertip forces

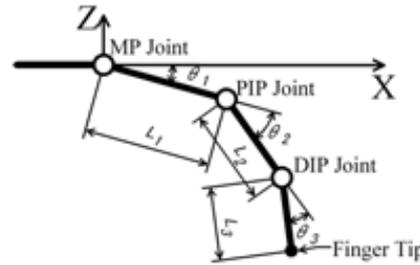


Fig.5 The link model of the index finger

Table 1 The link lengths and joint angles in Fig. 4

Angle [deg]	MP	28.03
	PIP	47.01
	DIP	49.05
Link Length [-]	L1	1.72
	L2	1.00
	L3	0.87

Table 2 The moment arms of the model in Fig. 4

DIP Joint [-]	FDP	0.11
	ED	0.13
PIP Joint [-]	FDP	0.26
	ED	0.13
	FDS	0.16
	INTD	0.18
	INTP	0.08
MP Joint [-]	FDP	0.51
	ED	0.31
	FDS	0.53
	INTD	0.12
	INTP	0.01
	Lum	0.41

写像されるので、このベクトルの方向・大きさによって各筋の指先操作力に与える静力学的影响を考察した。

#### 4. 研究成果

(1) 提案した3関節5腱駆動モデルの構造行列は、擬似三角行列の構造を持ち、制御可能条件を満たしていることがわかった。

(2) FDP と FDS の腱の指先力ベクトルの方向は解剖学モデル、および提案モデルの両方において一致しているのに対して、INT, INTD, INTP, Lum, ED, ED2 の腱については指先力ベクトルの方向と大きさが一致していなかった。しかし、提案モデルにおける INT の指先力ベクトルの方向が解剖学的モデルにおける INTD, INTP, Lum の指先力ベクトルの合力の方向に、提案モデルの ED, ED2 の腱の合力の方向が解剖学的モデルの ED の腱の指先力ベクトルの方向に近似できることがわかった。

これより、示指の運動を屈曲・伸展運動に限定した場合、提案モデルは解剖学的モデルに類似した指先力出力特性を持っていることが示された。

以上ことから、人の示指の筋・腱駆動系は、筋張力により任意の各関節トルクを安定に出力できる筋の数と経路を持っていることが判った。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 大西立修、積際 徹、横川隆一、画像情報を用いた示指リンク長の推定、日本機械学会関西支部第 84 期定時総会講演会、2009 年 3 月 17 日、近畿大学本部キャンパス。
- ② 小川 智弘、積際 徹、横川 隆一、人の示指リンク機構の運動学的特性、第 26 回日本ロボット学会学術講演会、2008 年 9 月 11 日、神戸大学 工学部。
- ③ 藤村 浩司、積際 徹、横川 隆一、擬似三角構造行列に基づいた示指の筋・腱駆動系のモデル化、第 26 回 日本ロボット学会学術講演会、2008 年 9 月 9 日、神戸大学 工学部。
- ④ 小川智弘、積際徹、横川隆一、柴田浩、人の示指リンク機構の運動学的特性、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008、2008 年 6 月 7 日、ビッグハット (長野市若里多目的スポーツアリーナ)。

ーナ)。

- ⑤ 藤村浩司、積際徹、横川隆一、柴田浩、示指の腱駆動モデルの動作シミュレーション、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008、2008 年 6 月 7 日、ビッグハット (長野市若里多目的スポーツアリーナ)。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

①携帯機器用装着具および携帯機器、横川隆一、学校法人同志社、特願 2009-084103 号、平成 21 年 3 月 31 日、国内。

②携帯端末およびアダプタ、横川隆一、中川善幸、川村幸太郎、内藤吉洋、喜多博昭、学校法人同志社、特願 2009-073865 号、平成 21 年 3 月 25 日、国内。

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

横川 隆一 (YOKOGAWA RYUICHI)  
同志社大学・生命医科学部・教授  
研究者番号：70220548

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。