

生体の筋配列を有する多関節マニピュレータの先端出力分布特性

杉本貴大 (東京大学) 福正博之 (東京大学) 古関隆章 (東京大学)

Output Force Distribution Characteristics of Multi-Joint Manipulator with Life Muscle Arrangement

*Takahiro SUGIMOTO (The University of Tokyo), Hiroyuki FUKUSHO (The University of Tokyo), Takafumi KOSEKI (The University of Tokyo)

Abstract— Recently, attention to reserches on robot mechanism description as artificial human and life mechanisms is being focused. In this paper, the authors introduce a meethod for miximizing output force distribution of multi-joint manipulator with life muscle arrangement by linear programming meethod. They calculate output force distribution of hoofed mammals lower extremity by introduced meethod. They have found the way how hoofed mammals lower extremity generate large downward force.

Key Words: Bi-articular Muscles, Multi-articular Muscles, Linear Programming Problem, Hoofed Mammals

1. はじめに

近年、ヒト型ロボットの研究開発が進んできたが、それらの多くが各関節を独立なアクチュエータによって駆動させて動作を実現しているのが現状である。しかし、ヒトが日常的に行っている歩行などの動作をヒト型ロボットが行うには複雑で膨大な計算が必要となり、また、変化の少ない環境が前提となっている。一方、ヒトをはじめ生物は筋によって関節を駆動させ、ロボットが行うよりも環境変化に対してロバストで簡単に動作を行っている。そのため、生物の持つ筋配列や制御手法をロボットに取り入れようとする研究が進められている [1][2]。

生物の持つ筋配列のうち、特に二関節筋と呼ばれる二つの関節を同時に駆動させる筋の存在と拮抗構造がマニピュレータの先端での力出力特性や剛性の制御などに大きく貢献していることが知られてきた [3]。簡単な制御の実現のために生物のもつどのような筋配列をロボットに取り入れればよいのかという知見を深める目的と、生物のより深い理解のために生物の筋配列の研究を行う必要があると考えられる。

本論文では、静力学においてマニピュレータの先端最大出力を求めるために線形計画法を利用する手法を述べる。この方法は、二関節筋研究の枠組みで主に扱われてきた、図 1 に示されるようなヒトの上肢のモデルである 3 対 6 筋と呼ばれる構造 [3] に限らず、有蹄類下肢に見られるような、関節をまたいだり、リンクと交差しているような多関節筋を含む複雑な筋配列に対しても一般的に適用できる。また、本論文で述べる手法を用いて求めた有蹄類下肢の筋配列の先端出力分布特性の例を示し、考察を行う。

2. 先端出力分布求解の線形計画問題としての定式化

2.1 関節トルクと先端出力との関係

図 2 に示すような 3 関節マニピュレータを対象にマニピュレータ先端での出力分布の求解法の導出を行う。

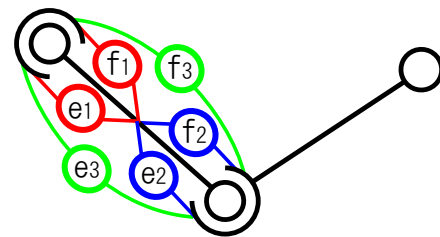


Fig.1 ヒト上肢の 3 対 6 筋モデル

なお、より一般的な N 関節マニピュレータへの拡張も同様にして行える。まずマニピュレータの先端の座標 $\mathbf{x}(\theta) = (x, y)^T$ を各関節のなす角 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)^T$ 、リンク長 l_1, l_2, l_3 を用いて表す。

$$\mathbf{x}(\theta) = \begin{pmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$ 、 $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$ などのように略記する。このとき、 $\dot{\mathbf{x}}(\theta) = \mathbf{J}(\theta)\dot{\theta}$ となるヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ は以下のように求まる。

$$\mathbf{J}(\theta) = \begin{pmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_2 s_{12} - l_3 s_{123} & -l_3 s_{123} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_2 c_{12} + l_3 c_{123} & l_3 c_{123} \end{pmatrix} \quad (2)$$

関節 i ($i = 1, 2, 3$) にかかるトルク τ_i とマニピュレータ先端から出力される力 \mathbf{F} との間には、仮想仕事の原理よりヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ を利用して以下のような関係が成り立つ。ただし、関節トルクベクトルを $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$ とする。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\theta)^T \mathbf{F} \quad (3)$$

ここで、3 関節マニピュレータを対象にしているためヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ は 2×3 行列となっており正則にはならない。そのため、式 (3) の両辺に左から転置したヤコビ行列 $\mathbf{J}(\theta)$ の逆行列をかけ、明示的にトルク $\boldsymbol{\tau}$ から先端での力 \mathbf{F} を求めることはできない。そこで、マ

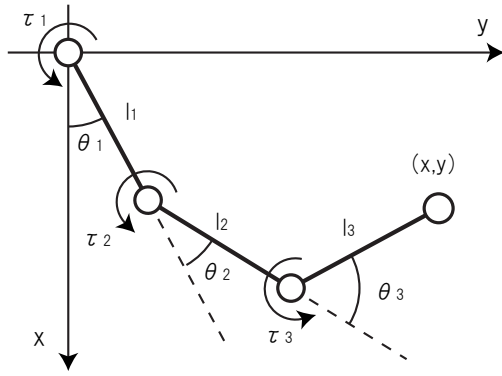


Fig.2 3 関節マニピュレータ

マニピュレータ先端から出力される力 F を以下のように角度 ϕ 方向を意識した形式に書き直す。

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = F \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{pmatrix} \quad (4)$$

F は力の大きさである。これを式 (3) に代入する。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= F\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T \begin{pmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{pmatrix} \\ &= F\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \quad (5)$$

$\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})$ はマニピュレータの関節角度ベクトル $\boldsymbol{\theta}$ と力の出力方向 ϕ とを指定すると一意に定まるため、このように式変形することで、関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ と先端の出力 F との関係を明確に捉えることができる。

2.2 生体の筋配列と関節トルクとの関係

次に関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ について取り上げる。図 3 のような生体の筋配列を持つマニピュレータを対象に説明を行う。生体には 1 つの関節にトルクを与える 1 関節筋 (f_1 など) の他に、同時に 2 つの関節にトルクを与える 2 関節筋 (f_3 など) が存在する。図 3 に示されるマニピュレータでは筋張力ベクトル \mathbf{f} と関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ は式 (6) の関係にある。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} \quad (6)$$

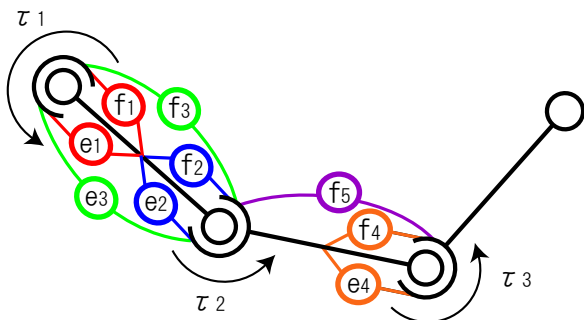


Fig.3 生体の筋配列をもつ 3 関節マニピュレータ

ここで、関節を反時計回りに回転させる関節トルクを正とする。 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ は各筋のモーメントアームを表す行

列となっており、以下のようにかける。 r_{ij} は i 番目の関節に対する筋張力ベクトル \mathbf{f} の第 j 要素の筋のモーメントアームであり、正の値をとる。

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{pmatrix} r_{11} & -r_{12} & 0 & 0 & r_{15} & -r_{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{23} & -r_{24} & r_{25} & -r_{26} & 0 & 0 & r_{29} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{37} & -r_{38} & r_{39} \end{pmatrix} \quad (7)$$

\mathbf{f} は各筋の筋張力を並べたベクトルである。

$$\mathbf{f} = \left(f_1, e_1, f_2, e_2, f_3, e_3, f_4, e_4, f_5 \right)^T \quad (8)$$

アクチュエータとして筋が出せる力には上限と下限が存在するため、筋張力ベクトル \mathbf{f} には以下の制約が課せられる。ただし不等式はベクトルの要素ごとに成立するものとする。

$$\mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})_{min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})_{max} \quad (9)$$

式 (6) で表されるように、関節トルクベクトル $\boldsymbol{\tau}$ が筋張力ベクトル \mathbf{f} の線形和で表せる関係が生体の筋配列のもつ大きな特徴である。式 (5)、式 (6) をまとめると以下の式が得られる。

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = F\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta}) \quad (10)$$

2.3 線形計画問題としての定式化

前節までの議論で、筋張力ベクトル \mathbf{f} とマニピュレータの先端から角度 ϕ 方向に出力される力の大きさ F との関係は式 (10) で表されることが分かった。式 (10) の左から $\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T / (\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta}))$ をかけると以下のように変形できる。

$$F = \frac{\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})} \mathbf{f} \quad (11)$$

つまり、式 (11) で表される F を、式 (10) の等式制約と式 (9) の不等式制約のもと最大化する筋張力ベクトル \mathbf{f} と最大値 F_{max} を求める問題と捉えることができる。式 (10) の等式制約には求めるべき F を含んでいるため、 F を含まないように同値な条件に置き換える。 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = (\mathbf{a}_1(\boldsymbol{\theta}), \mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta}), \mathbf{a}_3(\boldsymbol{\theta}))^T$ 、 $\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta}) = (b_1(\phi, \boldsymbol{\theta}), b_2(\phi, \boldsymbol{\theta}), b_3(\phi, \boldsymbol{\theta}))^T$ とおく。

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = Fb_1(\phi, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = Fb_2(\phi, \boldsymbol{\theta}) \\ \mathbf{a}_3(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = Fb_3(\phi, \boldsymbol{\theta}) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (b_2(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_1(\boldsymbol{\theta}) - b_1(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta}))\mathbf{f} = 0 \\ (b_3(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta}) - b_2(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_3(\boldsymbol{\theta}))\mathbf{f} = 0 \\ \text{if } b_i(\phi, \boldsymbol{\theta}) = 0 \text{ then } \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \end{cases} \quad (12)$$

以上をまとめる。

先端最大出力分布求解の線形計画問題

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{f}} \quad & F = \frac{\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})}{\mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})^T \mathbf{b}(\phi, \boldsymbol{\theta})} \mathbf{f} \\ \text{s.t.} \quad & (b_2(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_1(\boldsymbol{\theta}) - b_1(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta}))\mathbf{f} = 0 \\ & (b_3(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_2(\boldsymbol{\theta}) - b_2(\phi, \boldsymbol{\theta})\mathbf{a}_3(\boldsymbol{\theta}))\mathbf{f} = 0 \\ & \text{if } b_i(\phi, \boldsymbol{\theta}) = 0 \text{ then } \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\theta})\mathbf{f} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \\ & \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})_{min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})_{max} \end{aligned}$$

このように、マニピュレータの先端最大出力分布を求める問題が線形計画問題として帰着できた。線形計画問題としての定式化は、4関節以上のマニピュレータについても3関節の場合と同様にして行えるため、一般に生体の筋配列を持つ多関節マニピュレータの最大先端出力分布を求めることができる。

線形計画法に帰着できた理由を明確にしておくとして、
 1. 式(4), (5)のように、先端での力 F を、指定できる力の方向 ϕ と求めるべき力の大きさ F に分離した点、
 2. 式(6)のように、関節トルクベクトル τ が筋張力ベクトル f の線形和で表されるという特徴を筋配列が有している点、
 主にこの2点による。そのため、理由として上げた2つ目の特徴を持つ筋配列であれば、複雑な筋配列を持つマニピュレータに対しても先端の力が簡単に計算できる。

3. 有蹄類下肢の筋配列の評価

3.1 有蹄類下肢モデル

図4に示すように有蹄類下肢の筋配列にはヒトの上肢でモデル化されている3対6筋の構造には見られない、関節 K をまたぐ3関節筋(筋 f_3)、リンクと交差する2関節筋(筋 f'_3)が存在しているのが特徴である[3][4]。有蹄類下肢の筋配列を対象とし、先端での最大出力分布を求める。有蹄類下肢を簡単にモデル化し $A(\theta)$ を以下のようにおいた。 r は関節半径に相当し、0.1[m] とした。

$$A(\theta) = r \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

ここで筋張力ベクトルは以下のようにとっている。

$$f = \left(e_1, f_1, e_2, f_2, e_3, f_3, f'_3, f_4, e_4, f_5, e_5 \right)^T \quad (14)$$

筋とマニピュレータに関するパラメータは以下のようにおき、出力角度 ϕ を $2\pi \cdot 0.01$ [rad] ずつ変化させ、出力分布を求めた。

関節角 $\theta = (-\pi/4, -\pi/2, \pi/3)^T$ [rad]

リンク長 $(l_1, l_2, l_3) = (1, 1, 1)$ [m]

最小筋張力 $f(\theta)_{min} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ [N]

最大筋張力 $f(\theta)_{max} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ [N]

図4に有蹄類下肢の先端出力分布を示す。出力分布が鉛直下方向に偏っているという特徴を持つことが分かる。これより、ウマなどの有蹄類の下肢構造は下方向へ出せる力の最大値が大きく、地面を強く蹴ることのできる筋配列であることが分かる。

3.2 有蹄類下肢に特徴的な筋の出力分布への寄与

前節から、有蹄類下肢の筋配列が特に下方向へ大きな力を出せる配列であることが分かった。そこで有蹄類下肢にみられる特徴的な筋のうち、どの筋が下方向への出力に最も寄与しているのか調べるため、関節 K をまたぐ3関節筋(筋 f_3)、リンクと交差する2関節筋(筋 f'_3)をそれぞれ除いた筋配置について出力分布を求めた。結果を図5に示す。なお、図4における赤の分布と図5の赤の分布は同一の分布である。

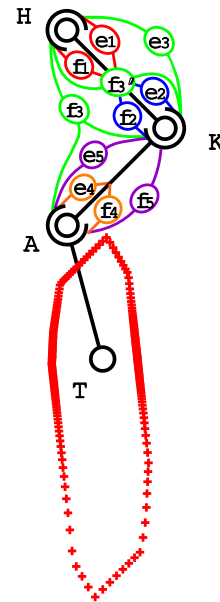


Fig.4 有蹄類下肢モデルと出力分布

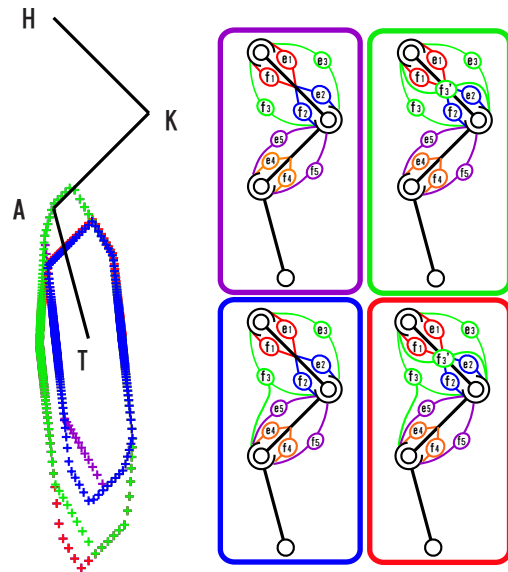


Fig.5 3関節筋, 交差する2関節筋がない筋配列での出力分布

筋 f'_3 を持たない場合の分布(紫, 青)に比べ、筋 f_3 を持つ場合の分布(緑, 赤)の方が下方向への出力が大きいことが見て取れる。このことから、筋 f_3 が下方向への出力に大きく寄与していることが分かる。これは筋 f'_3 が筋張力を発生させると、関節 A を下方向に押し下げようとして関節 H , 関節 K にトルクが生じるためだと考えられる。また、筋 f_3 も筋 f'_3 ほどではないが、下方向への出力に寄与していることが分かる。

3.3 独立した2つの筋としての3関節筋の検討

図4を見ると分かる通り、筋 f_3 は枝分かれしており、関節 H , 関節 K , 関節 A を駆動させる。前節までは筋 f_3 が単一の筋であり、筋の支配神経が共通で、同時に3つの関節を駆動させるものとしてきた。本節で

はヒト下肢の大腿二頭筋のように支配神経が別々で、関節 H、関節 K を駆動させる筋 (f_{3a} とする) と関節 H、関節 A を駆動させる筋 (f_{3b} とする) が独立に駆動できるものとして先端最大出力分布を求める。

前節までの検討では、筋 f_3 に対応するモーメントアーム行列 $A(\theta)$ の列は $r(-1, -1, -1)^T$ としていたが、筋を独立に駆動させるという意味で、筋 f_{3a} のモーメントアームを $r(-1, -1, 0)^T$ 、筋 f_{3b} のモーメントアームを $r(-1, 0, -1)^T$ とする。また、筋 f_{3a} 、筋 f_{3b} の最小筋張力を $0[N]$ 、最大筋張力を $1[N]$ とする。得られた出力分布を図 6 に示す。なお、図 4 における赤の分布と図 6 の赤の分布は同一の分布である。

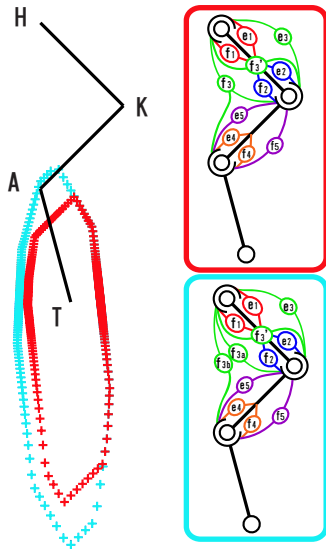


Fig.6 3 関節筋を単一の筋として扱った場合と独立した二つの筋として扱った場合の出力分布

筋 f_3 を一つの筋として扱った場合 (赤) に比べて、独立した二つの筋として扱った場合 (シアン) の方が上下方向に分布が広がっていることが分かる。有蹄類下肢が実際はどのような筋配列をしており、どのような筋制御されているのかは分からないが、最大出力分布という観点からは、 f_3 を 1 つの筋として駆動させるより独立した二つの筋として扱う方が有効であると言える。

4. まとめと今後の課題

生体の筋配列を持つ多関節マニピュレータを対象に、与えられたアクチュエータ能力を最大限に生かしたときに得られる先端の静的な出力分布を求めた。そのため線形計画法を用いる計算法を導入した。その方法に従い、有蹄類下肢に対して出力分布を求め、有蹄類下肢が下方向に大きな力を出し得ることを確認した。

また、有蹄類下肢に特徴的な筋のうちどちらが下方向への分布に特に寄与しているのかを調べた。その結果、リンクと交差するような 2 関節筋が特に大きいことを確認した。

今回は筋の特性をすべて等しいとしたが、各筋の最大筋力などの条件を、実在の動物を参考に考慮し、各動物の生活行動様式に適した出力分布が得られるもの

か、今後の課題として検証を行いたい。また、本論文では静的な条件下でのアクチュエータ出力配分の最適化問題を解くことで、筋配列とマニピュレータの特性を評価したが、動力学の観点からアクチュエータ出力配分と運動の機能・性能との関係性を評価する方法へ議論を発展させたい。

参考文献

- [1] 門田健志, 鈴木健也, 深井善朗, 小田高広: “二関節筋装備基本モデル「HIPRO」- VEA を用いたロボットアームによる二関節筋特性評価-”, 精密工学会生体機構制御・応用技術専門委員会二関節筋実利用 Workshop, 2003.
- [2] Ryuma Niiyama, Akihiko Nagakubo, Yasuo Kuniyoshi: “A bipedal jumping and landing robot with an artificial musculoskeletal system,”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2546-2551, 2007.
- [3] 熊本水頼: ヒューマノイド工学, 東京電機大学出版会, 2006.
- [4] 熊本水頼: “協調制御モデル -Animal Inspired Technologies-”, (社) 精密工学会 生体機構制御・応用技術専門委員会 <http://www.air-dawn.net/>, 2004.