

# ロボット四肢の運動制御で二関節筋の機能を考慮する工学的意義 -----技術者にとって冗長性に加え何が良いのか?-----

○古関隆章・福正博之・杉本貴大(東京大学大学院)

## Engineering advantages of bi-articular muscle functionality in robotic motion controls -----What are technical merits in addition to its redundancy?-----

\*Takafumi KOSEKI, Hiroyuki FUKUSHO, and Takahiro SUGIMOTO

**Abstract** ---This paper describes substantial advantages of bi-articular muscle functionality in straight line motion control of an engineering robot besides actuation redundancy.

### 1. はじめに

各関節に駆動モータを持つ典型的人工物としてのロボットアームや脚に対し、多くの哺乳類では二関節同時駆動筋を含む3対6筋をのアクチュエータとなっており、これらの協調制御が何らかの大きな利点を有する、という観点からの研究がなされている[1]。しかし、故障時の冗長性の議論を別として、工学システムとして、冗長なアクチュエータ構成をとることは一般には合理的方法とはされていない。確かに、我々生物にとっては、故障時に限定的機能を維持することが生存のために重要であり、進化の成果としては重要であるので、現在の我々の身体の構成の理由付けとしては十分な根拠となりうる。しかし、生物に学ぶことに良いことがあるはず、という考え方を人工物であるロボットに適用する工学者の立場からは、それ以上の明確な利点がないと、本来2自由度である二関節アームの駆動にわざわざ3組のアクチュエータを装備する合理性は説明しにくい。

一方、先行研究では、このような二関節筋の存在が静的な先端力の発生の際に、その発生力の方向制御が Fig. 1 に示すアクチュエータ出力指令の線形配分により行える可能性が指摘されている[1]。また、筆者らは、3組のアクチュエータの発生力の上限の総和を一定値とした場合、各アクチュエータの最大能力配分を均等なものとし、発生力の配分を、Fig. 1 に示されるパターンに従わせることで、出力可能な先端力発生力の6角形が最大化されることを、線形計画法の適用で示した[2]。すなわち、生物進化の結果としてのアクチュエータ構成、および出力の配分の考え方に合理性があることはすでに部分的に示されている。

しかし、実用的に重要な、より複雑な動的運動制御を考慮する際、この「生物の真似をすること」に、どのような長所があるかを明確に見通しよく示す必要性は残されている。

そこで、本稿では二関節筋の存在が単独で一般的長所を持つという考え方ではなく、その他の生物進化の成果とあわせ、ある特殊な条件のもとで、特異

的条件のもとで合理性を発揮するのではないかと、という観点からの整理を試みる。

### 2. 生物進化の成果としての条件

そこで、ここでは上記の「特殊条件」として以下の2条件を想定[3]する。

- (1) 腕あるいは脚の2つのリンクの長さは同一の  $l$  である。
- (2) 我々にとって重要な良く使う動作として、支点と先端を結ぶ方向にまっすぐに腕あるいは脚を伸縮する運動を想定する。

これは腕であれば、腕立て伏せ、重量挙げや、壁などをまっすぐに押す動作を意味する。また脚であればスクワットやジャンプ、歩行動作などの日常動作の基本となっており、また腕や脚が最も大きな力を出す動作でもある。そのほかの動きは肩や脚のつけね周りの回転運動とこの伸縮動作の組み合わせとして考えるのが自然という意味でも、このまっすぐに押すという動作が特別に重要な意味を持つことは明白である。

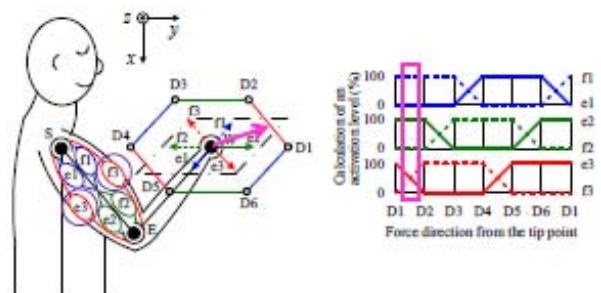


Fig. 1 Three pairs of mono- and bi-articular muscles and their output command distributions depending on the direction of the tip force.

### 3. 準静的な運動における先端力制御

図2のようなアームのモデルにおいて、図の通りの角度を定義し、1関節筋相当のトルクを  $T_1, T_2$  および2関節筋発生力相当のトルクを  $T_3$  とする。このとき、先端部における発生力と上記のアクチュエー

タトルクの一般式は  $l_1 = l_2 = l$  とすることで、

$$\begin{bmatrix} F \cos \phi \\ F \sin \phi \end{bmatrix} = \frac{1}{l \sin \theta_2} \bullet \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\{\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2)\} \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & -\{\sin \theta_1 + \sin(\theta_1 + \theta_2)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となる。

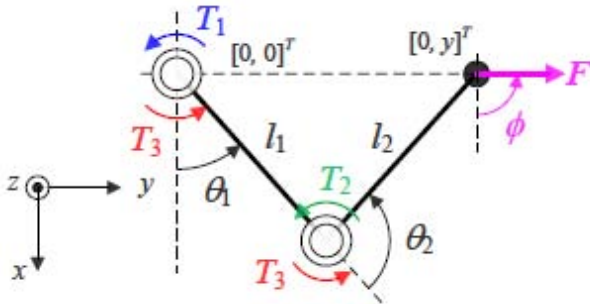


Fig. 2 Standardized arm model and stretching action.

ここで、2節で述べた条件を適用し、腕を y 軸上で方向のみに伸縮し、先端力を  $F_x = 0$  とし  $F_y$  のみ発生するように条件を限定する。すると、幾何学的条件から、

$$2\theta_1 + \theta_2 = \pi \quad (2)$$

これより、 $\cos \theta_1 + \cos(\theta_1 + \theta_2) = 0$ ,

$\sin \theta_1 - \sin(\theta_1 + \theta_2) = 0$  となるので、

$$F_x = \frac{\cos(\theta_1 + \theta_2)}{l \sin \theta_2} (T_1 + T_3) \quad (3)$$

$$F_y = \frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{l \sin \theta_2} (T_1 + 2T_2 - T_3) \quad (4)$$

となる。ここで、幾何学的制約式(2)と、Fig. 1 で与えられるアクチュエータ出力配分

$$T_1 = -T, T_2 = +T, T_3 = +T \quad (5) \text{を代入すると、}$$

$$F_x = 0 \quad (6)$$

$$F_y = \frac{-3}{l \cos \theta_1} T \quad (7)$$

が導かれる。(5)式は、生物から学んだ Fig. 1 の動作のさせ方において、「真っ直ぐ伸縮」という最も重要度の高い動作において、3つのアクチュエータをすべて最大限活用していることを示していると理解できる。そして、このとき、(6)により横方向の力の発生を抑制し、自然に真っ直ぐに押す引くという動作が可能となる。これは地面に対して常に鉛直な力を及ぼすことが自然にできるなどの意味で重要である。

さらに、先端力は(7)のように単一のトルク指令  $T$  と腕の伸び具合  $0 < \theta_1 < \pi/2$  の単純な関数として示される。これは、腕が極端に縮んでいる場合、押す力を出しにくい一方、腕が伸びきる直前に最も大きな押す力を出せるという我々の日常的な体験に合致する結果を与えている。そして、2関節筋を含む3対のアクチュエータ群と(5)に示す単純なアクチュエータ出力指令配分で、伸縮がきわめて簡単に行えること、特に、 $T = T_0 \cos \theta_1$  なる単純な指令の与え方で一定の先端力の発生を可能とするという明解な関係が得られることがわかる。

#### 4. 動的運動制御の考慮

ここでは紙面の都合上詳細を省略するが、リンクの慣性の影響を考慮した、上記に対して本質的に複雑であり、(2)(5)の条件を付加しても、その運動方程式が著しく単純化されるわけではない。しかし、ダランベールの原理を元に考察すると、各アクチュエータ出力を、3節で述べた先端力発生に直接関わる部分と、慣性影響を補償する部分の重ね合わせとして書くことができる。後者が制御則、所定の運動を行うためのアクチュエータ出力指令値の計算を複雑にしている要因であることは明確だが、実はこの部分は「自分自身の身体に関する情報処理」に属しており、事前学習を通じたアクチュエータ出力のマッピングで処理することができる。また、先端力負荷の大きい場合は運動はゆっくりとしたものとなるため3節で仮定した準静的仮定が実用的に成り立つことも多い。このような観点から3節で述べた伸縮動作における先端力出力指令の単純さという長所が多くの場合有効に生きると考えられる。

#### 5. まとめ

本稿では、二関節筋相当のアクチュエータを積極的に考慮し、生物学ぶ考えかたが、日常動作の基本として最も重要な「真っ直ぐな伸縮」動作を自然に行う際にその有用性が顕著に現れることを、準静的な解析に基づいて工学的観点から説明した。今後は動的な挙動の中でもその長所が有効に発揮されることを実証的に示す中で、二関節筋相当のアクチュエータを考慮した制御の工学的有用性を追求したい。

#### 参考文献

- [1] 熊本水頼「ヒューマノイド工学 生物進化から学ぶ2関節筋ロボット機構」東京電機大学出版局 2006
- [2] 杉本, 福正, 古閑 「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」第27回ロボット学会学術講演会, 1 K2-03, 2009
- [3] H. Fukusho, T. Sugimoto and T. Koseki: "Control of a straight line motion for two-link robot arm using coordinate transform of bi-articular simultaneous drive," the 11<sup>th</sup> AMC, NF-003069, Nagaoka, March 2010