

生体の二関節筋機構を取り入れた ヒューマノイドロボットの静力学基礎計算

福正 博之*, 古関 隆章(東京大学)

Fundamental statics calculation for a humanoid robot with bi-articular muscle mechanism
Hiroyuki Fukusho, Takafumi Koseki (The University of Tokyo)

1. まえがき

現在ヒューマノイドロボットは様々な観点でめまぐるしい進化が進み、多くの試みがここ数年の間に実現されつつある。運動制御においてもその傾向が見られ、ヒューマノイドロボットによるサッカーのペナルティキック対決などにおいても様々な構造のロボットが考えられている。

筆者らはロボットの運動制御に生体が持っている二関節筋機構を取り入れ、従来のロボット工学よりも簡単な運動制御化に取り組んでいる。本論文では、ロボット先端にかかる力と筋肉の代替をするアクチュエータトルク変化に注目し、二関節筋の特徴を取り入れた方程式を解き、検証する。

2. 生体の二関節筋とその特徴

本論文では生体の上肢を元にロボットアームについて考える。二関節筋とは図1左のe3, f3にあたる筋肉を指し、二つの筋肉にまたがってつき関節を同時に曲げる特徴を持つ^[1]。従来のロボット制御においては各関節に配置されたアクチュエータにおいて各関節を独立に回転させてきたが、我々生体は二関節同時駆動を実現する筋肉を持つために各関節の発生するトルクは以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 + T_3 \\ T_2 + T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1, 0, 1 \\ 0, 1, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

J^T は手先の先端位置の微小変化をみたヤコビ行列 J の転置行列であり、ヤコビ行列に関しては後述する。

ここで図1左にあるように生体の各筋肉 e1, f1, e2, f2, e3, f3 は本来収縮時のみに力を発生して関節を動かすものであるが、本論文では肩関節 A についている筋肉 e1, f1 が肩関節を回転させるトルクを発生する、肘関節 B では筋肉 e2, f3 が肘関節を回転させるトルクを発生させるものとみなす。同様に、二関節筋も筋肉 e3, f3 により二つの関節を同時に回転させるトルクを発生させるものとして考える。これは回転型モータなどを使えば一つのモータで時計・半時計方向にトルクを発生できることに基づいている。上肢を半時計方向に回転させる場合にかかるトルクをプラスの値、時計方向にトルクをかける場合をマイナスの値とする。

各関節にかかるトルク (T_a, T_b) と肘・肩関節と二関節筋の役割をするアクチュエータの発生するトルク (T_1, T_2, T_3) および、各関節角度 (θ_a, θ_b) は図2のような関係にある。式(1)と以下に説明する図1右の筋の活動レベル変化に基づき、ロボット先端にかかる力と各アクチュエータの発生するトルクの関係について方程式を解いて検討する。

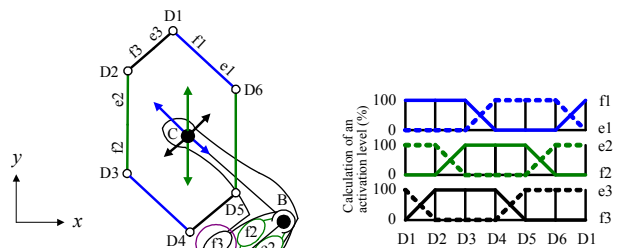


図1 二関節筋をもつ上肢の手先出力関係^[1]
Fig.1. Relationship of a tips of an arm with bi-articular muscle mechanism^[1]

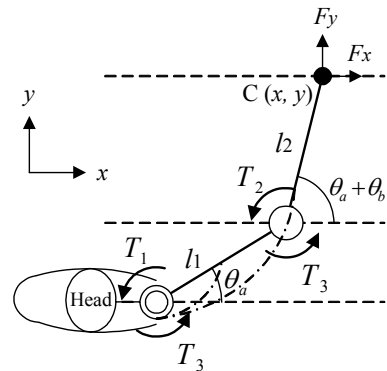


図2 上肢の関節角とトルクと先端座標
Fig.2. Coordinate system, joint angle and torque of an upper body

3. ロボットアーム先端にかかる力とトルク変化

<3・1>先端座標系に基づく基礎方程式 従来のロボット工学において使われている方程式に前節の式(1)を取り入れることを考える。

ロボットの手先位置 $C(x, y)$ は前腕・上腕の長さで肘・肩の各関節角度により次の式(2)と定められる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_a + l_2 \cos(\theta_a + \theta_b) \\ l_1 \sin \theta_a + l_2 \sin(\theta_a + \theta_b) \end{bmatrix} \quad (2)$$

これを用いて、ヤコビ行列 J を求めることでアーム先端にかかる力と各アクチュエータトルクの関係を求める。

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_a - l_2 \sin(\theta_a + \theta_b) & -l_2 \sin(\theta_a + \theta_b) \\ l_1 \cos \theta_a + l_2 \cos(\theta_a + \theta_b) & l_2 \cos(\theta_a + \theta_b) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(1)と式(3)から先端にかかる力(F_x, F_y)は次の(4)式になる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = (J^T)^{-1} \begin{bmatrix} 1, 0, 1 \\ 0, 1, 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_a + \theta_b) & -(l_1 \cos \theta_a + l_2 \cos(\theta_a + \theta_b)) & -l_1 \cos \theta_a \\ l_2 \sin(\theta_a + \theta_b) & -(l_1 \sin \theta_a + l_2 \sin(\theta_a + \theta_b)) & -l_1 \sin \theta_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix}$$

ここで $\Delta = J_{11}J_{22} - J_{12}J_{21}$ である。

これから先端にかかる力が各アクチュエータトルクによりどのように変化について検討する。

<3・2> ロボット先端にかかる力と各関節角度の関係
ロボット工学においては、一つの関節に複数の駆動系が作用する場合を冗長マニピュレータなどと呼ばれている。その時、どのアクチュエータを駆動させるかという問題を解決する一つの方法に疑似逆行列を用いるものがある。

対して本論文では、二関節筋構造を持つヒトの各筋肉の筋電図測定結果(図1右)^[1]を用いた。図1左のような肩・肘の関節角度で固定した状態にて各方向(図中矢印)に力を発生した場合に、手先から発生する力のベクトルの先端を繋ぐと、D1からD6のような六角形軌道を描くことが測定されている。その際の各筋肉の筋電図結果が図1右であり、この結果を式(4)に代入して先端にかかる力の変化を式で確かめた。

その際に、計算を簡単化するために $l_1 = l_2 = l$ とし、D1の瞬間における各アクチュエータのトルクを図1右の筋電図結果から以下のように定めた。

$$T_1 = T, T_2 = -T, T_3 = -T \quad (5)$$

これを式(4)に代入すると先端にかかる力(F_x, F_y)は以下の式(6)のようになる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{2Tl}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos \theta_a + \cos(\theta_s + \theta_b) \\ \sin \theta_a + \sin(\theta_s + \theta_b) \end{bmatrix} = \frac{4Tl}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos(\frac{2\theta_a + \theta_b}{2}) \cos(-\frac{\theta_b}{2}) \\ \sin(\frac{2\theta_a + \theta_b}{2}) \cos(-\frac{\theta_b}{2}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

これより、力の方向は次式で表される。

$$\frac{F_y}{F_x} = \tan(\theta_a + \frac{\theta_b}{2}) \quad (7)$$

ゆえに、各アクチュエータトルクを式(5)の条件で一定とすると、先端にかかる力の方向は次の図3で表すように支点となる肩関節と手先先端を結んだ方向で常に一定となることが証明された。

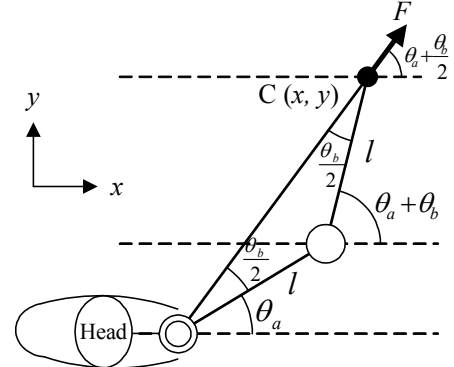


図3 特定条件下における先端にかかる力
Fig.3. Force of the tip under specified condition

次に、手先位置Cにかかる力がD2方向になる場合において考えるとアクチュエータのトルクは式(5)と同様で式(8)のように記述することができ、先端にかかる力(F_x, F_y)は以下の式(9)示される。

$$T_1 = T, T_2 = -T, T_3 = T \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{2Tl}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s + \theta_b) \\ \sin(\theta_s + \theta_b) \end{bmatrix} \quad (10)$$

これより力の方向は、

$$\frac{F_y}{F_x} = \tan(\theta_s + \theta_b) \quad (11)$$

となる。よって式(9)のように各アクチュエータトルクを与えた場合は常に前腕と平行な向きに力を発生できることが証明された。

4. まとめ

本論文では、生体の持つ二関節筋機構をヒューマノイドロボットに取り入れた場合のロボット先端にかかる力と関節にかかるトルク・二関節同時駆動によるトルクの関係を検討した。

その際に、二関節駆動に対して利用するトルクが3つある冗長性を持つこのシステムに制約をつけるために、参考文献[1]の理論的検証および人体での測定が行われている静止状態で任意の方向に力を出す場合の各筋肉の筋電図変化を用いた。

それにより各アクチュエータトルクを式(5)のように一定とすることで、各関節角度がいかなる場合においても常に肩関節の支点と手先先端を結んだ方向に力を発生できることが証明され、その方向への弾性・粘性制御が可能であることが分かった。これを利用することで従来よりも簡単なトルク制御を行う手法について今後検討する。

文献