

二関節筋を持つ 2 リンクロボットアームの 動力学計算から見た二関節筋の特徴解析

福正 博之 **, 杉本 貴大 ***, 古関 隆章 **

Analysis of the Inherent Advantages of Bi-Articular Muscle Mechanism from the Viewpoint of
Dynamics Calculation for 2-link Robot Arm with Bi-articular Muscles Mechanism

Hiroyuki Fukusho, Takahiro Sugimoto, Takafumi Koseki

Although fundamental effects of bi-articular muscles are being described especially on static condition, we have to analyze the inherent advantages on condition of dynamic movement. This paper describes force direction of the tip point based on EMG (Electromyogram) result and acceleration of the tip. Acceleration of the tip of the 2-link robot arm can be calculated from geometry of the arm position, Jacobi Matrix and virtual work principle. In this paper, the authors have considered that force on the tip point can be calculated from such acceleration of the tip and torque reference for each actuator using EMG result continuously. Then, the force direction can be automatically the same when each actuator torque is given to a specific condition. Hence, it has been confirmed that previous research on EMG measurement and its resultant intuitive model give rational explanation of simple dynamic functionality for extending an arm.

Key words: Bi-articular Muscles, Dynamics Calculation, Jacobi Matrix, Lagrange Equation of Motion, Virtual Work Principle

1. はじめに

先行研究 [1][2] などの成果により歩行・立ち上がり・垂直動作時における二関節筋を含めた主要筋の筋電図反応と床反力特性が明らかになってきた。それにより、拮抗する二関節筋の反応は先端の出力方向制御に大きく関わっており、二関節筋の同時収縮を関節駆動に取り入れることは、従来の一関節筋にあたる各関節を独立に駆動制御するロボットシステムよりも本質的に簡便な駆動力指令で、同じ動きを実現することにつながるようになってきている。

本論文では、生体が歩行やジャンプなど様々な動きを行える中でも、先端を真っ直ぐに曲げたり伸ばしたりする運動において二関節筋特徴的に有効に機能していると想定する。そして、負荷を持つ 2 リンクロボットアームが腕を真っ直ぐに伸ばす方向に力を発生させる場合の筋電図特性から、先端の出力方向を定めるための二関節筋の影響を、計算によりある関節角度だけにとどまらず明らかにすることを目的とする。

原理を単純に明確化するため、本論文ではアームのリンク質量を非常に小さくし、それに対して先端にある負荷は十分に大きなものであるという条件を想定する。

2. 静力学計算による手先先端の発生する力と 各アクチュエータトルクの関係

本論文では、リンクの質量が手先の負荷に対して十分に軽く無視できる状態を想定する。これにより、手先先端に発生する力 (F_x, F_y) から手先の加速度を求めることで、質量が無視できるアームの回転角度・角速度等を考えることが出来る。検討に用いるアームモデルを Fig. 1 に示す。先行研究より解明されている、一つの関節角度にアームを固定した場合にアーム

先端から発生される力の方向とその時における 3 対 6 筋の筋電図特性を Fig. 2 に示す。

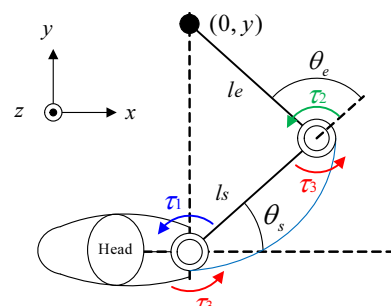


Fig. 1 Fundamental arm model.

幾何学から手先の先端位置と各関節角度の関係は次の式 (1) になる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s \cos \theta_s + l_e \cos(\theta_s + \theta_e) \\ l_s \sin \theta_s + l_e \sin(\theta_s + \theta_e) \end{bmatrix} \dots \dots (1)$$

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を用いて各関節を独立に回転駆動させてきたが、生体は二関節同時駆動を実現する筋肉を持つ。そこで、従来のロボットと同じく肩関節と肘関節を駆動させるアクチュエータが発生する回転トルクを τ_1, τ_2 とし、さらに二関節を同時に駆動させる筋肉が発生する回転トルクを τ_3 とする。各関節の回転トルクと手先先端から発生する力の方向は、ヤコビ行列 J と仮想仕事の原理から次の式 (2) のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = J^T \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \dots \dots (2)$$

* 原稿受付 平成 21 年 8 月 7 日
** 東京大学大学院 工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)
*** 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (東京都文京区本郷 7-3-1)

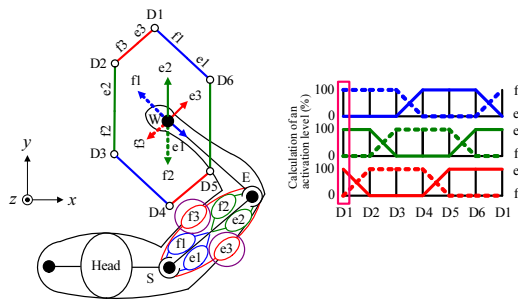


Fig. 2 Force direction from EMG measurement on static condition.

ここで、ヤコビ行列 J は位置の微小変化を指す。

$$J = \begin{bmatrix} -\{l_s \sin \theta_s + l_e \sin(\theta_s + \theta_e)\} & -l_e \sin(\theta_s + \theta_e) \\ l_s \cos \theta_s + l_e \cos(\theta_s + \theta_e) & l_e \cos(\theta_s + \theta_e) \end{bmatrix} \quad (3)$$

二関節筋の特徴である二関節同時駆動機構を式 (2) のように行列で表現したが、さらにもう一つの二関節筋の特徴を先行研究 [2] から Fig.2 を用いて説明する。Fig.2 の左は上肢における筋肉の配置を示している。このような姿勢すなわち関節角度で手先を固定し、任意の方向に力を発生させた場合の力の発生方向と各筋肉の筋電信号を測定した結果が Fig.2 の右側である。Fig.2 の左側の六角形は、手先先端から例えば図上 D1 方向へ力を出した場合、そこから少し半時計向きに力を発生させた場合といった要領で方向を徐々にずらし、D1 から D1...D6 へ手先から出す力を変化させた場合、手先から発する力のベクトルを結んだものである。そして、Fig.2 右はこの D1 から D6 方向へ力の方向をずらした場合、二関節筋を含む 3 つの拮抗する筋肉が比例配分された指令信号により機能していること示している²⁾。

Fig.2 右側の筋電信号が 0-100% で表されていることから、アクチュエータが発生するトルクの最大値を $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$ とする。そして、任意の静止状態における手先の力 (F_x, F_y) を求める。式 (2) を展開すると、手先の力 (F_x, F_y) は次の式 (4) のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} l_e \cos(\theta_s + \theta_e) - \{l_s \cos \theta_s + l_e \cos(\theta_s + \theta_e)\} \\ l_e \sin(\theta_s + \theta_e) - \{l_s \sin \theta_s + l_e \sin(\theta_s + \theta_e)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで、行列式 $\Delta = J_{11}J_{22} - J_{21}J_{12} \neq 0$ となる。力の方向が D1 方向になるのは、筋電図結果より f1, e2, e3 の筋肉が主動筋となっている。そこでこれらの筋肉が作用する場合の各アクチュエータトルクを Fig. 1 にあるように反時計まわりを正方向として、 $\tau_1 = \tau, \tau_2 = -\tau, \tau_3 = -\tau$ と仮定する。この条件で式 (4) を用いて手先の力を計算すると、確かに先行研究 [2] の筋電図結果と同じ結果が得られた³⁾。

3. 筋電図結果を用いたアクチュエータトルク特性と手先特性

3.1 筋電図結果を用いて各アクチュエータトルクを決定した場合の手先から発生する力と各関節の関係

前章を基に、二関節筋を加えたアクチュエータ出力と手先特性の関係を検討する。式 (2), (3), (4) において各リンク長を

$l_s = l_e = l$ と仮定すると、式 (4) は以下の式 (5) のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{2\tau l}{\Delta} \begin{bmatrix} \cos \theta_s + \cos(\theta_s + \theta_e) \\ \sin \theta_s + \sin(\theta_s + \theta_e) \end{bmatrix} \quad \dots \quad (5)$$

リンク長 l_s, l_e を等しくしたことにより、式 (3) の行列式 Δ は以下ようになる。

$$\Delta = l^2 \sin \theta_e \quad \dots \quad (6)$$

これは肘が伸びきるという特異点以外はゼロにならないため、式 (5) は特異点以外において常に成り立つ。

ここで、アーム自身の質量は非常に小さくアーム先端に負荷 m_L (例えば、アームに対して十分に大きく 10(kg) など) がある場合を想定すれば、手先先端の力 (F_x, F_y) はアーム先端の負荷 (m_L) を運ぶ力とみなせる。それにより、 $F = m_L \ddot{x}$ という仮定が成り立つため、式 (5) から手先先端の加速度 (\ddot{x}, \ddot{y}) を求めることができる。

3.2 手先加速度と関節角速度・角加速度の関係

本節では、式 (1) から手先と関節角度の関係を細分化する。式 (1) を時間微分することで、手先の速度 (\dot{x}, \dot{y}) と関節の角速度 $(\dot{\theta}_s, \dot{\theta}_e)$ がヤコビ行列 J を使って表されることは自明である。これをもう一度時間微分することで、手先の加速度 (\ddot{x}, \ddot{y}) と関節の角加速度 $(\ddot{\theta}_s, \ddot{\theta}_e)$ を求めることができる。これにより、手先の加速度 (\ddot{x}, \ddot{y}) と関節の角加速度 $(\ddot{\theta}_s, \ddot{\theta}_e)$ の関係は、ヤコビ行列 J を用いて次のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_s \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} + \dot{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} \quad \dots \quad (7)$$

この式 (7) を用いることで、関節角度の変化から手先加速度を求めることができる。

ゆえに、式 (5) と式 (7) から各アクチュエータトルクが $\tau_1 = \tau, \tau_2 = -\tau, \tau_3 = -\tau$ の時の力の方向と関節角度の関係を求めることができる。

4. アクチュエータトルクを一意に決めた場合の関節角度の特性

4.1 回転トルクに関する細分化

3 章で得られた式 (5), (7) を解くことで、各アクチュエータに D1 方向へ力を出す指令を与えた場合の特性を検討する。式 (2) と式 (7) から、二関節筋の有無に関わらず関節トルクと先端の力には以下の関係がある。ここで関節角度ベクトルを $q = [\theta_s, \theta_e]^T$ と置く。

$$\tau = J^T F = m_L J^T \ddot{x} = m_L J^T (J \ddot{q} + \dot{J} \dot{q}) \quad \dots \quad (8)$$

この式 (8) の中身を詳しく計算する。ここで $\sin \theta_s = S_s, \cos(\theta_s + \theta_e) = C_{se}$ のように記述する。

$$\begin{aligned} J^T J &= l^2 \begin{bmatrix} -(S_s + S_{se}) & C_s + C_{se} \\ -S_{se} & C_{se} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(S_s + S_{se}) & -S_{se} \\ C_s + C_{se} & C_{se} \end{bmatrix} \\ &= l^2 \begin{bmatrix} 2 + 2S_s S_{se} + 2C_s C_{se} & 1 + S_s S_{se} + C_s C_{se} \\ 1 + S_s S_{se} + C_s C_{se} & 1 \end{bmatrix} \\ &= l^2 \begin{bmatrix} 2(1 + C_{se}) & 1 + C_{se} \\ 1 + C_{se} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 J^T \dot{J} &= -l^2 \begin{bmatrix} -(S_s + S_{se}) & -S_{se} \\ C_s + C_{se} & C_{se} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s C_s + \dot{\theta}_{se} C_{se} & \dot{\theta}_{se} C_{se} \\ \dot{\theta}_s S_s + \dot{\theta}_{se} S_{se} & \dot{\theta}_{se} S_{se} \end{bmatrix} \\
 &= l^2 \begin{bmatrix} S_{se} C_s - S_s C_{se} & S_s C_{se} - S_{se} C_s \\ S_{se} C_s - S_s C_{se} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s & 0 \\ \dot{\theta}_{se} & \dot{\theta}_{se} \end{bmatrix} \\
 &= l^2 \begin{bmatrix} S_e & -S_e \\ S_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s & 0 \\ \dot{\theta}_{se} & \dot{\theta}_{se} \end{bmatrix} = l^2 S_e \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_e & -\dot{\theta}_{se} \\ \dot{\theta}_s & 0 \end{bmatrix} \quad (10)
 \end{aligned}$$

ゆえに、式 (9), (10) から関節トルクは次のように書くことが出来る。

$$\begin{aligned}
 \tau &= m_L l^2 \begin{bmatrix} 2(1+C_e) & 1+C_e \\ 1+C_e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_s \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} \\
 &+ m_L l^2 S_e \begin{bmatrix} -\dot{\theta}_e & -\dot{\theta}_{se} \\ \dot{\theta}_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} \\
 &= m_L l^2 \begin{bmatrix} (1+C_e)(2\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e) \\ (1+C_e)\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} + m_L l^2 S_e \begin{bmatrix} -(2\dot{\theta}_s \dot{\theta}_e + \dot{\theta}_e^2) \\ \dot{\theta}_s^2 \end{bmatrix} \\
 &= m_L l^2 \begin{bmatrix} (1+C_e)(2\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e) - S_e(2\dot{\theta}_s \dot{\theta}_e + \dot{\theta}_e^2) \\ (1+C_e)\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e + S_e \dot{\theta}_s^2 \end{bmatrix} \\
 &= m_L l^2 \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left((1+C_e)(2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) \right) \\ (1+C_e)\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e + S_e \dot{\theta}_s^2 \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (11)
 \end{aligned}$$

4.2 D1 方向へ力を発生させる筋電図特性を用いた場合の回転トルク

各筋肉の出すトルクの最大値が等しいと仮定した場合に、D1 方向へ力を発生させる場合に収縮する筋肉による回転トルクの関係 $\tau_1 = \tau, \tau_2 = -\tau, \tau_3 = -\tau$ を用いると、関節の回転トルク τ_s, τ_e には次の関係がある。

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2\tau \end{bmatrix} \quad (12)$$

ゆえに、D1 方向へ力を出す場合には肩関節トルク τ_s が一関節筋と二関節筋の発生するトルクによって打ち消され 0 になる。これを式 (11) に適用すると、各関節角度には次の関係が導ける。

$$\tau_s = m_L l^2 \times \frac{d}{dt} \left((1+C_e)(2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) \right) = 0 \quad \dots \dots (13)$$

ここで初期条件として、初期時刻においては $2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e = 0$ が成立すると仮定すると、各関節角度には以下の関係がある。ただし、ここでは初期条件として関節角度を $(\theta_s, \theta_e) = (0, \pi)$ と仮定した。それにより以下の関係を導くことが出来る。

$$2\theta_s + \theta_e = \pi \quad \dots \dots \dots (14)$$

4.3 D1 方向へ力を発生させる筋電図特性を用いた場合の手先から発生する力

式 (5),(6) を整理すると、D1 方向へ力を発生させる場合の手先加速度 (\ddot{x}, \ddot{y}) は、各アクチュエータトルクが $\tau_1 = \tau, \tau_2 = -\tau, \tau_3 = -\tau$ であることから以下のように書くことが出来る。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{2\tau}{lS_e} \begin{bmatrix} C_s + C_{se} \\ S_s + S_{se} \end{bmatrix} \quad \dots \dots \dots (15)$$

式 (15) から y 方向への力の大きさ F_y を具体的に計算する。まず、式 (14) から式 (15) 中の S_e を次のように置き換える。

$$S_e = \sin(\pi - 2\theta_s) = \sin(2\theta_s) = 2 \sin \theta_s \cos \theta_s \quad \dots \dots (16)$$

加えて、式 (15) 中の F_y における $S_s + S_{se}$ を次のように変換する。

$$S_s + S_{se} = \sin \theta_s + \sin(\pi - \theta_s) = 2 \sin \theta_s \quad \dots \dots (17)$$

式 (16) から式 (17) は次のようにまとめることが出来る。

$$F_y = \frac{2\tau}{2l \sin \theta_s \cos \theta_s} \times 2 \sin \theta_s = \frac{2\tau}{l \cos \theta_s} \quad \dots \dots (18)$$

同様の計算を F_x に関しても行くと、 $F_x = 0$ が導ける。式 (18) より、D1 方向へ力を出すために各アクチュエータトルクを $\tau_1 = \tau, \tau_2 = -\tau, \tau_3 = -\tau$ と仮定すると、肩関節の角度 θ_s により y 方向へ出せる力の大きさが変化することが分かった。これは、腕が曲がっている状態、すなわち肩関節角度 θ_s が小さい場合は y 方向へ出せる力が小さく、腕が伸びるに従い肩関節角度 θ_s が大きくなることで y 方向の力 F_y は大きくなるということから、先行研究における成果と一致する。そして、もし F_y を一定に保ちながら腕を伸ばしたいと考える場合には、各アクチュエータトルク τ を肩の関節角度 θ_s を変数とした cosine の関数にすればいいことが明らかになった。

5. リンクに質量が存在する場合のラグランジュの運動方程式を用いた二関節筋と関節トルクの関係

5.1 ラグランジュの運動方程式を用いた関節トルクの計算

前章までは各リンクの質量が負荷の質量に対して無視出来るほどに小さい状況を検討していたが、実際には質量のあるアームの運動に伴う位置エネルギーと運動エネルギーから、関節トルクと関節角加速度などを計算し、一関節筋・二関節筋の発生するトルクの特性を検討する必要がある。はじめに、そのために用いるラグランジュの運動方程式について述べる。

Fig. 1 は静止状態における手先先端位置と回転角度を示すものであるが、動力学計算においてもこの図の関係を考えていく。ラグランジュの運動方程式から関節トルクと関節角加速度の関係を求める際に必要となる各パラメータを以下の Table 1 に示す。また、ロボットアームを設計する上での具体的な数値を Table 2 に示す。ここで、アームの回転半径・リンク質量とリンク長を $r_s = r_e = r, m_s = m_e = m, l_s = l_e = l$ 、および各関節から各リンクの重心までの長さ $l_{gs} = l_{ge} = \frac{1}{2}l$ とおく。

次に、各リンクの重心を通り z 軸に平行な軸まわりの慣性モーメント I_s, I_e を定義する。上腕および前腕が中身の詰まった円柱形状であると仮定すると、関係モーメントは関節半径 r とリンク長 l から次のように表すことができる。

$$I_s = I_e = m \left(\frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{12} \right) \quad \dots \dots \dots (19)$$

Table 1 Parameters of a robot arm.

θ_i	Angular position of joint i
m_i	Mass of link i
l_i	Length of link i
l_{gi}	Length between joint i and centre of gravity of link i
I_i	Moment of inertia through the centre of gravity of link i
τ_i	Rotational joint torques (τ_s, τ_e)
τ_j	Each actuator torque (τ_1, τ_2, τ_3)

Table 2 Values of the arm.

Radius of rotation of an arm : $r (r_s, r_e)$	0.03 (m)
Length of each link : $l (l_s, l_e)$	0.3 (m)
Mass of each link : $m (m_s, m_e)$	2 (kg)
Moment of inertia of each arm : $I (I_s, I_e)$	0.0155 (kgm ²)
Initial position of the tip of an arm : (x, y)	(0, 0) (m)
Mass of load (5 patterns) : m_L	2,4,6,8,10 (kg)

また、今回は動摩擦のない壁を押すような場合を想定し、肘関節の回転運動によるエネルギーを考慮しないため、肘関節の回転モーメント $I_e = 0$ である。加えて、手先と壁には常に作用反作用の関係があると仮定すると、前腕の重心位置は変化しない ($l_{ge} = \frac{1}{2}l$)。

リンク 1(肩関節)・リンク 2(肘関節) と手先先端の負荷のエネルギー変化をそれぞれ分けて考えることにより、各関節の回転トルクと関節の角加速度の関係は、次の式 (20) のようになる。

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_s \\ \ddot{\theta}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \quad \dots (20)$$

行列内のそれぞれの項は次のようになる。

$$L_{11} = I_s + I_e + m_s l_{gs}^2 + m_e (l_s^2 + l_{ge}^2 + 2l_s l_{ge} C_e) + m_L (l_s^2 + l_e^2 + 2l_s l_e C_e) \quad \dots (21)$$

$$L_{12} = L_{21} = I_e + m_e (l_{ge}^2 + l_s l_{ge} C_e) + m_L (l_e^2 + l_s l_e C_e) \quad (22)$$

$$L_{22} = I_e + m_e l_{ge}^2 + m_L l_e^2 \quad \dots (23)$$

$$G_1 = -m_e l_s l_{ge} S_e \dot{\theta}_e (2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) - m_L l_s l_e S_e \dot{\theta}_e (2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) + g \{ m_s l_{gs} C_s + m_e (l_s C_s + l_{ge} C_{se}) + m_L (l_s C_s + l_e C_{se}) \} \quad (24)$$

$$G_2 = m_e l_s l_{ge} S_e \dot{\theta}_s^2 + m_L l_s l_e S_e \dot{\theta}_s^2 + g (m_e l_{ge} C_{se} + m_L l_e C_{se}) \quad \dots (25)$$

5.2 筋電図結果から得られる各アクチュエータ特性を考慮した関節トルク特性

ここで、水平運動を想定することで重力項を無視し、手先の移動に伴い肘関節は回転運動を行わない ($I_e = 0$) ことを仮定する。各リンクの質量を無視する、すなわち $m_s = m_e = 0$ として式 (20) に代入すると式 (11) と一致する。

前章で D1 方向へ力を出すためのアクチュエータトルクと関節の回転トルクには式 (12) の関係があることを述べたが、この関係はリンクに質量がある場合も同様に適用可能なので、肩の関節トルクには次の関係がある。

$$\tau_s = L_{11} \ddot{\theta}_s + L_{12} \ddot{\theta}_e + G_1 = 0 \quad \dots (26)$$

この式 (26) の計算は非常に複雑であるが、この式を満たすような関節角度を求めることが出来れば、式 (15) からリンクに質量がある場合や負荷の大きさによってリンクの重心位置が変わる場合にも手先の力の方向が計算出来ると考えられる。

重力加速度 g を無視し、式 (20) を具体的に整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \tau_s = & m_L l^2 \frac{d}{dt} \left((1 + C_e) (2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) \right) \\ & + \frac{1}{4} m_e l^2 \frac{d}{dt} \left((1 + 2C_e) (2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e) \right) \\ & + (I_s + I_e + \frac{1}{4} m_s l^2 + \frac{3}{4} m_e l^2) \ddot{\theta}_s + I_e \ddot{\theta}_e \quad \dots (27) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_e = & m_L l^2 \{ (1 + C_e) \ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e + S_e \dot{\theta}_s^2 \} + I_e (\ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e) \\ & + \frac{1}{4} m_e l^2 \{ (1 + 2C_e) \ddot{\theta}_s + \ddot{\theta}_e + 2S_e \dot{\theta}_s^2 \} \quad \dots (28) \end{aligned}$$

これにより、肩関節トルク τ_s は式 (27) にあるようにリンク質量と負荷質量に関わる項に $2\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_e$ を含むため式 (14) のように持っていければ綺麗にまとめることが出来るが、リンクに質量が存在する時点で慣性モーメントを含んだ項を無視することは出来ないで、第 4 章と同じようにはならず生体は運動をスムーズに行うために常に何らかの補正を行っている考えられる。

6. まとめと今後の課題

本論文では、二関節筋を持つロボットアームの運動時の特性を評価するために、先行研究 [1][2] などから明らかになっている、腕を真っ直ぐに曲げ伸ばしする時に収縮する筋肉が作り出す回転トルクと手先加速度の関係から、手先先端の力の方向の特性と関節角度の関係を理論計算により明らかにした。そのために、リンクの質量が無視出来るほど小さく手先に十分な質量を持つ負荷がある状況を想定した。D1 方向に力を発生させるために収縮する筋肉は Fig. 2 でいう f1, e2, e3 であることから、反時計回りの回転トルクを正方向として、肩関節の一関節筋による回転トルク $\tau_1 = \tau$ 、肘関節の一関節筋による回転トルク $\tau_2 = -\tau$ 、二関節筋による回転トルク $\tau_3 = -\tau$ であると仮定すると、手先先端から発生する力は常に y 方向になることが分かった。加えて、その大きさは肩関節角度の cosine 関数の逆数 $\frac{1}{\cos \theta_s}$ に依存することが明らかになった。

また、実際のロボットアームのようにリンクに質量がある場合は、運動エネルギーと位置エネルギーからラグランジュの運動方程式を解いて各リンクの回転トルクを求めることが必要である。リンク質量を考慮した場合においても筋電図結果を利用したアクチュエータトルク入力から手先先端の力の特性と関節角度の関係を考えるためには、リンク質量と負荷質量の割合と各関節の z 軸に平行な軸まわりの慣性モーメントが影響する。今後の課題は、これらのロボットアーム自体が持っている特性の補正を考えると、筋肉の同時収縮による二関節筋アクチュエータトルクの影響及び、ジャンプする時に腓腹筋が効果的に作用しているなど方向・剛性制御に貢献している別の筋肉の働きをロボットにも適用し、簡単な運動制御を実現させることである。

参考文献

- 1) 奈良 勲, 熊本水頼, 内山 靖, 畠 直輝: “二関節筋 運動制御とリハビリテーション,” 医学書院, 2008
- 2) 熊本水頼 著書: “ヒューマノイド工学 生体進化から学ぶ 2 関節筋ロボット機構,” 東京電機大学出版局, 2006
- 3) 福正 博之, 古閑 隆章: “生体の二関節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,” 平成 21 年電気学会全国大会, 3-081, pp.116-117, 札幌 2009.3