

生体の機構と特徴を取り入れた ヒューマノイドロボットの運動学計算

学生員 福正 博之* 正員 古関 隆章 (東京大)
学生員 杉本 貴大*

Dynamics calculation for a humanoid robot with life mechanisms and characteristics

Hiroyuki Fukuho*, Student Member, Takafumi Koseki, Member, Takahiro Sugimoto*, Student Member,
(The University of Tokyo),

Humanoid robot technology is greatly advancing these days. However, component of the robot and control theory is still based on mechanics and robotics technology. Therefore, research in order to mix human and life mechanisms for the humanoid robot is advancing. In this paper, the authors has taget on the bi-articular muscle mechanisms of life which operate two joints simultaneously and the authors have calculated the dynamics using characteristics of bi-articular mechanisms. On simulation, trajectory of a tip of a robot arm has confirmed by purposely given one simple input torque reference and joint torques.

キーワード：二関節筋, 動力学, ヒューマノイドロボット, ヤコビ行列, ラグランジュの運動方程式

Keywords: Bi-articular muscle, Dynamics, Humanoid robot, Jacobian matrix, Lagrange equation of motion

1. はじめに

ここ数年ヒューマノイドロボットの性能は著しく進化しており、様々な試みがなされている。しかしながら、その運動制御とハードウェア構成はロボットが歩くことが出来るようになった時から大きく進化しておらず、従来の機械・ロボット工学に基づいた制御手法を用いているのが現状である。生体・医療分野の研究者は生体の運動メカニズムとヒューマノイドロボットの運動メカニズムの違いに違和感を覚えており、ロボットの構造およびその制御手法に生体のメカニズムを取り入れる研究が進められている。その一つに、二関節筋と呼ばれる筋肉とその周りの構造がある。二関節筋はその名の通り隣接する二つの関節にまたがり、その両関節を同時に駆動する働きをする筋肉であり、現在の多くのロボットには未だ搭載されていないが、ヒトをはじめ昆虫など多くの生体が持っている筋肉である⁽¹⁾。

本論文では、ロボットアームが平面運動する状況において二関節同時駆動機構を実現するアクチュエータを従来の各関節を駆動させるアクチュエータと加えて考慮する。加えて、先行研究で行われている筋電図特性を数式で表現し、二関節筋の特徴を入れた運動学を計算する。

2. 二関節筋と静止状態におけるその特性評価

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 Fig.1 左の e3, f3 にあたる筋肉を指し、関節を同時に曲げる特徴を持つ⁽¹⁾。本論文で議論するアームモデルを Fig. 2 に示す。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。

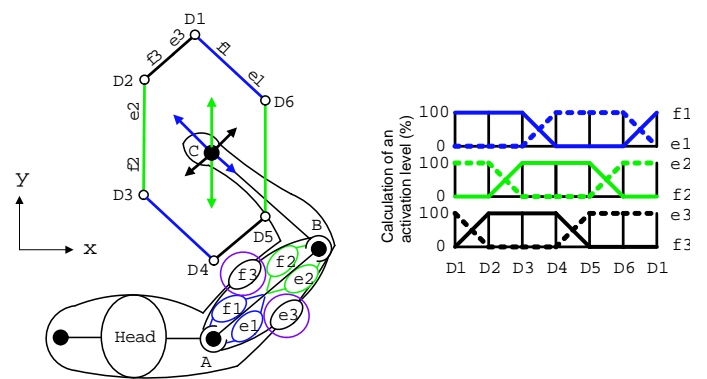


Fig. 1. Component of upper body and calculation from EMG measurement on static condition.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \theta_a + l \cos(\theta_a + \theta_b) \\ l \sin \theta_a + l \sin(\theta_a + \theta_b) \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

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、我々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で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 τ_3 を考える。各関節を回転する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 を用いて次の式 (2) のようになる。

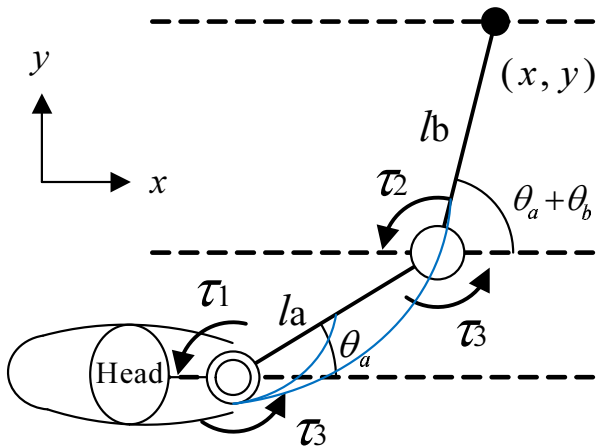


Fig. 2. Fundamental calculation model of an arm.

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

ここで、ヤコビ行列 J は位置の微小変化のことを指す。

$$J = \begin{bmatrix} -\{l \sin \theta_a + l \sin(\theta_a + \theta_b)\} & -l \sin(\theta_a + \theta_b) \\ l \cos \theta_a + l \cos(\theta_a + \theta_b) & l \cos(\theta_a + \theta_b) \end{bmatrix} (3)$$

二関節筋の特徴である二関節同時駆動機構を上式 (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から Fig.1 を用いて説明する。Fig.1 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・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ている。その結果が Fig.1 の右側である⁽¹⁾。Fig.1 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の、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.1 右はこの D1 から D6 方向へ力の方向をずらした場合の、二関節筋を含む 3 つの拮抗する筋肉が指令信号を比例配分させることによって機能していること示している⁽¹⁾。Fig.2 を用いてそれぞれのアクチュエータが発生するトルクの最大値を $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$ とし、Fig.1 のようにアクチュエータトルクを比例配分させた場合の静止状態での手先の力の方向 F_x および F_y を求めた。式 (2) を展開すると、手先の力の方向は次の式 (4) のように書くことが出来る⁽²⁾。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} l_b \cos(\theta_a + \theta_b) & -l_a \cos \theta_a + l_b \cos(\theta_a + \theta_b) \\ l_b \sin(\theta_a + \theta_b) & -l_a \sin \theta_a + l_b \sin(\theta_a + \theta_b) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} (4)$$

ここで、 Δ はヤコビ行列の行列式であり、 $\Delta \neq 0$ となる。

力の方向が D1 方向になる場合の筋電図結果より、各アクチュエータトルクを $\tau_1 = -\tau, \tau_2 = \tau, \tau_3 = \tau$ と定める。この条件で式 (4) を用いて手先の力を計算すると、確かに先行研究の筋電図結果と同じ結果が得られた。また、その場合には上腕と前腕の長さ $l_a = l_b$ であることが力の方向を決める上で重要なことがわかり、我々ヒトをはじめ多くの生体がある特徴を持っていることが進化の過程から裏付けられていると考える。 $l_a = l_b = l$ とした場合の力の方向 F_x と F_y の関係は次の式 (5) となる。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \tan(\theta_a + \frac{\theta_b}{2}) \dots\dots\dots (5)$$

これより、各アクチュエータトルクが $\tau_1 = -\tau, \tau_2 = \tau, \tau_3 = \tau$ の場合、手先先端の力の方向は各関節角度がどの状態においても Fig.2 で見る、支点となる肩関節から手先先端を結んだ方向になることが分かる。このように、静止状態では二関節筋機構を持つことによって任意の方向に力を発生させる場合に、Fig.1 にあるような非常に簡単なアクチュエータの出力配分を行うことで力の方向が決められる⁽²⁾。

3. 手先が動く場合の二関節筋の特徴と動力学計算

3.1 ラグランジュの運動方程式に基づく動力学と二関節筋の関係 本節では、ロボットアーム先端が動いた場合の手先加速度とアクチュエータトルクの間をラグランジュの運動方程式に二関節同時駆動の概念を導入する。前章で述べた知見を基に、リンクの長さは各等しく $l_a = l_b = l$ 、さらにリンクの質量も等しく $m_a = m_b = m$ であると仮定し、各リンクの重心位置は $l_{ga} = l_{gb} = \frac{1}{2}l$ として計算する。

加えて、本論文ではロボットアームは平面運動することを想定し、重力項と回転動作に伴うコリオリ力などを無視して、アクチュエータトルクと手先の関節角加速度項のみを考量する。また、本論文では各関節の重心を通り、z 軸方向 (Fig.2 で言う紙面上向き) に平行な軸まわりの慣性モーメント (I_a, I_b) を算出する際に、上腕及び前腕は中身の詰まった円筒形上であると、その円筒の半径すなわち関節半径 r をヒトとほぼ同じ大きさとして仮定した。それにより、慣性モーメントは関節半径 r とリンク長 l を用いて次のように書くことが出来る。

$$I_a = I_b = m(\frac{r^2}{4} + \frac{l^2}{12}) \dots\dots\dots (6)$$

また、各関節の回転トルク τ_a, τ_b と関節角加速度 $\ddot{\theta}_a, \ddot{\theta}_b$ は以下の行列 L を用いて式 (7) のように表すことが出来る。加えて、ロボットの質量・リンク長や慣性モーメントを考慮し、ラグランジュの運動方程式から各関節の角加速度項と各関節トルクの関係は行列 L を用いて式 (8)-式 (11) となる。

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

$$L_{11} = \frac{1}{2}mr^2 + \frac{5}{3}ml^2 + ml^2 \cos \theta_b \dots\dots\dots (9)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 \cos \theta_b \dots\dots\dots (10)$$

$$L_{22} = \frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2 \dots\dots\dots (11)$$

これを式 (2) と同様に各関節の回転トルクから二関節筋を含めた 3 つのアクチュエータトルクに置き換えて考える。行列 L は行列式が $\Delta = (\frac{1}{2}mr^2 + \frac{5}{3}ml^2 + ml^2 \cos \theta_b) \times (\frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2) - (\frac{1}{4}mr^2 + \frac{1}{3}ml^2 + \frac{1}{2}ml^2 \cos \theta_b)^2 \neq 0$ で逆行列が存在する。そこで、式 (7) から以下の式 (12) を得る。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} = L^{-1} \begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \end{bmatrix} = L^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

これより、二つの関節を同時に同じ大きさのトルクによって駆動する概念を取り入れた、各関節の角加速度とアクチュエータトルクの関係が導かれた。

3・2 筋電図結果を用いたアクチュエータトルク入力特性と手先特性の関係

前節までの検討を基に、二関節筋を加えたアクチュエータのトルク入力に対する手先の特性を検討する。具体的には、静止状態で測定された筋電図結果を用いて、各アクチュエータトルクを Fig.1 右のように変化させた場合の手先の加速度を式 (12) から求める。しかし、式 (12) は各関節の角加速度を求めるものであるため、ここから手先の加速度を得るために以下のことを考える。

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 $\dot{\theta}_a, \dot{\theta}_b$ 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 $\ddot{\theta}_a, \ddot{\theta}_b$ を求めることが出来る。これにより、手先の加速度 \ddot{x}, \ddot{y} と関節の角加速度 $\ddot{\theta}_a$ の関係はヤコビ行列 J を用いて次のように表すことが出来る。

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_a \\ \ddot{\theta}_b \end{bmatrix} + \dot{J} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_a \\ \dot{\theta}_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

この式 (13) を用いることで、アクチュエータトルクの変化から手先加速度を求めることが出来る。

4. 手先が直進運動するときのアクチュエータトルクと加速度の関係

本章では、手先が動く場合のアクチュエータトルクと二関節筋の関係を数値を用いて考える。本論文では、手先を肩からまっすぐ伸ばすことを考える。すなわち、Fig.2 の肩の

位置を $x = 0$ であるとし、手先を曲げた状態から $x = 0$ の点を保ちながら y 方向に手先を伸ばしていく。手には何も持たない条件 (リンク以外の質量は 0) で y 方向に次の Fig.3 に示すような時間関数で手先を移動させる。これにより、

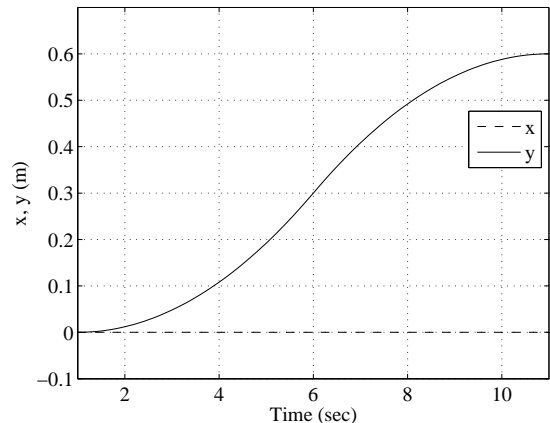


Fig. 3. Trajectory of the tip.

各関節の角加速度 $\ddot{\theta}_a, \ddot{\theta}_b$ が時々刻々変化しながら手先が移動する。計算は MATLAB を用い、 $t = 1$ から $t = 11$ (sec) の間にアームが曲がった状態から伸びることを検討する。ロボットアームのパラメータを Table 1 に示す。

Table 1. Parameters of an arm.

Radius of a joint of an arm : r	0.05 (m)
Length of links : l	0.3 (m)
Mass of links : m	2 (kg)
Morment of inertia : I	0.0163 (kgm ²)
Initial position of an arm : (x, y)	(0, 0) (m)

手先位置から逆運動学を計算することで各関節角度 θ_a, θ_b を求め、その時間微分を取ることで角速度及び角加速度を求める。その結果から、従来のロボット工学と同じように式 (7) を用いて各関節の回転トルク τ_a および τ_b を求める。その時の回転トルクは次の Fig.4 のようになる。

ここで、静止状態と同じように二関節筋の特徴を取り入れて、式 (12) のように回転トルク τ_a, τ_b を各アクチュエータトルク τ_1, τ_2, τ_3 の出力配分で求めることを考える。しかし、 $\tau_1 = -\tau, \tau_2 = \tau, \tau_3 = \tau$ に固定してしまうと、拘束条件が多すぎて、関節角度が時々刻々変化する中で運動学から得られる関節角速度・角加速度は実現不可能になる。

そこで、本論文では $x = 0$ を保ちながら y 方向に手先が動く状態において $-\tau_1 = \tau_2 = \alpha\tau_3$ という仮定を入れる。すなわち、3 つのアクチュエータを用いて二関節を駆動させる中で一自由度のみを拘束し、 τ_3 を先端部の運動を実現するための主たる駆動トルク、 $-\tau_1 = -\tau_2$ を腕の回転に伴うダイナミクスの影響を補償する調整トルク分と考え、 τ_3 と、静止状態で考えた標準状態からのトルク補正係数 $1 - \alpha$

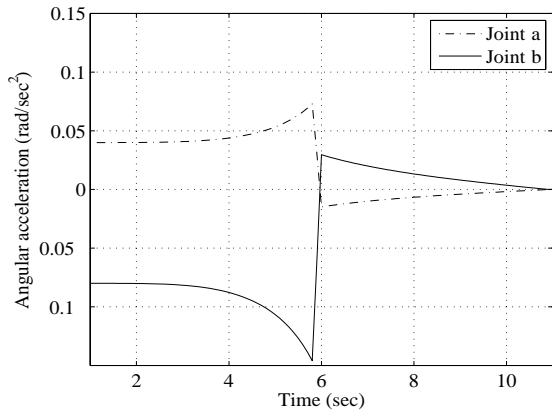


Fig. 4. Rotational torque of each joint.

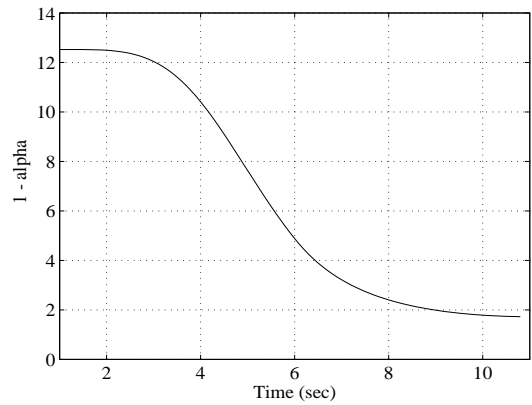


Fig. 6. $(1 - \alpha)$: Factor of compensating torque for canceling arm-inertia effects.

の両者を評価する。

τ_1 と τ_3 の関係は二関節を同時に駆動する二関節筋を考えることで次の式 (14) のように書くことができる。

$$\begin{bmatrix} \tau_a \\ \tau_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 + \tau_3 \\ \tau_2 + \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \dots\dots (14)$$

2行2列で逆行列が存在するため、逆運動学により求めた関節トルク τ_a および τ_b を用いて一関節筋補正トルク τ_1 および二関節筋駆動トルク τ_3 が求まる。

このアクチュエータトルクの特徴を、二関節筋駆動トルク τ_3 と、一関節筋による標準駆動パターンからの補正係数 $1 - \alpha(t)$ として求める。その結果の一例を以下の Fig.5 および Fig. 6 に示す。

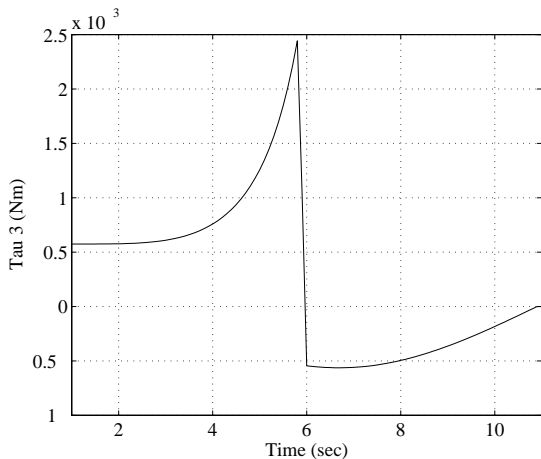


Fig. 5. τ_3 : Main torque from bi-articular muscle for driving end point.

ここでは、一関節筋を用いた補正トルク分を、 $-\tau_1 = \tau_2 = \alpha\tau_3$ とした。先端部の目標軌道を生成する二関節筋アクチュエータ駆動トルク τ_3 は、Fig. 5 に示されているように、先端部の質量がゼロであるために小さい。一方、腕の慣性の回転の影響を補正する一関節筋によるトルク補償量 $1 - \alpha(t)$ は、Fig. 6 に示されている通り、シミュレーシ

ン初期すなわち、腕の曲がり大きい時に無視できないほど大きくなってしまふ。二関節筋力学体系が、運動制御上重要な役割を果たせるのは、全体の動きがゆっくりしている場合、腕や脚が比較的伸びている状態で先端部変位が小さな場合、あるいは、腕や脚の慣性に対して負荷部の慣性が比較的大きな場合であることが、このケーススタディから考察される。

5. まとめ

生体の持つ、隣り合う二つの関節にまたがり両関節を同時に駆動する二関節筋機構をヒューマノイドロボットに取り入れることを想定し、二関節同時駆動の考えで運動方程式の入力トルクを整理した。手先を肩の位置からまっすぐに伸ばす軌道 ($x = 0$ と仮定した) を考えた場合に、逆運動学から各関節の角度が求まり、ラグランジュの運動方程式からアームの特性・角加速度と回転トルクの関係が求まる。本論文では、二関節筋が重要な役割を果たす、腕を曲げた状態からまっすぐに伸ばす軌道を描く場合のアクチュエータトルクの1つの配分ルールを仮定し、その仮定の下で動的な腕の伸張動作をした際にトルク配分の時間履歴がどのようなになるかを計算した。

今後の課題として、先端部の負荷質量が有限値である場合の運動解析を通じ、負荷質量と腕の慣性の関係を変化させながら一関節筋トルクによる補正量の変化の様子を観察することで、二関節筋力学体系が制御上有用性を持つ条件をより明確にしたい。また、今回は予見的に適用した二関節筋、一関節筋のトルク配分ルールを、何らかの最適化を通じ合理的に導出する方法を求めたい。

文 献

- (1) 熊本 水頼 著：“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
- (2) 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