

# 二関節筋を用いた 2 リンクマニピュレーターの先端剛性の新しい制御手法の提案

小柳 拓也\*、吉田 憲吾、呉 世訓、堀 洋一（東京大学）

A Novel Stiffness Control Method for Robot Manipulator with Biarticular Muscle

Takuya Koyanagi(University of Tokyo)\*, Kengo Yoshida(University of Tokyo)

Sehoon Oh(University of Tokyo), Yoichi Hori(University of Tokyo)

This paper suggests a novel coordinate transformation method with bi-articular muscle. With this coordinate transformation method, we can simplify the controller design of stiffness control. It is found that bi-articular muscle enhances horizontal stiffness of end effector.

キーワード：マニピュレーター、二関節筋、剛性制御、絶対値ヤコビアン、筋粘弾性

(manipulator, bi-articular muscle, stiffness control, absolute jacobian, muscular viscoelasticity)

## 1. まえがき

ヒトや生物の持つ特有の構造として二関節筋の存在が挙げられる。二関節筋は二つの関節に同時に作用する筋であり、一見冗長性を与えているだけのように思われるが、力出力方向制御、手先剛性の制御などにおいて、多大な貢献をしていることが明らかにされている。<sup>(1)-(3)</sup>ヒトや生物の巧妙な身体運動には、二関節筋はなくてはならないものである。

ヒトに優しいモーションコントロール実現に向けて、二関節筋をロボットに応用しようという試みも行われている。沖電気は、3対6筋構造の筋配置を持つロボットアーム「HIPRO」を開発した。<sup>(4)</sup>また、連続跳躍ロボットなどにも二関節筋が取り入れられ、その有用性が確認されている。<sup>(5)</sup>

これらのロボットは、二関節筋をハードウェア的に取り入れている。本研究はこれらの研究とは異なる視点に立ち、二関節筋を座標変換として取り入れる。これを二関節筋座標系と読んでいるが、この座標変換は二関節筋を持たない、関節1つにアクチュエーターを1つ持つロボットアームにも適応することが可能である。

## 2. 二関節筋を含めたアームのモデル

**{2.1} 3対6筋のモデル** 二関節筋を含めた生物型アームのモデルとして、図1に表す3対6筋のアームのモデルを示す。<sup>(6)</sup>

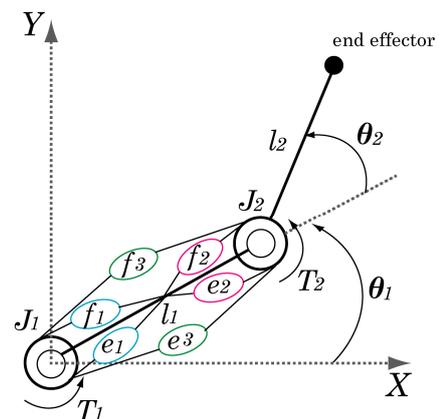


図1 3対6筋のアームのモデル

Fig. 1 Animal's arm model

図1において、 $f_1, e_1$ は関節J1に働く一関節筋、 $f_2, e_2$ は関節J2に働く一関節筋、 $f_3, e_3$ は二関節筋である。筋肉は一方にしか力を発揮することができないため、拮抗駆動を行うことにより、関節を両方向に回転できるようにしている。 $T_1, T_2$ は関節J1, J2におけるトルクを表している。また、 $\theta_1, \theta_2$ は関節J1, J2の角度、 $l_1, l_2$ はリンクの長さである。

**{2.2} 筋モデル** ヒトや生物のアクチュエーターである筋肉は、活性化レベルによって粘弾性が変化する特異な出力特性を持つ。この筋肉特性を表す数式として様々なものが提案されているが、本研究においては最も一般的な図2されるHILLモデルを用いる。

このとき筋の出力  $F$  は次のように数式化される

$$F = u - kux - bu\dot{x} \dots\dots\dots (1)$$

$u$  : 筋収縮力

$x$  : 筋収縮量

$k, b$  : 筋の弾性係数、粘性係数

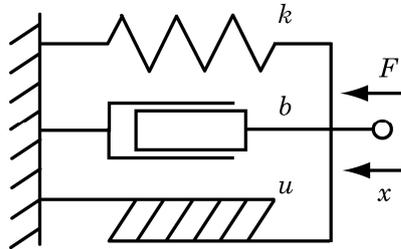


図 2 筋の粘弾性モデル

Fig. 2 muscular viscoelasticity model

{2.3} 関節におけるトルク 各関節におけるトルクが、筋肉の出力によってどのように発生するかを数式にて表す。図 1 において、関節  $J_1, J_2$  の半径を  $r_1=r_2=r$  とする。また各筋肉の出力は前節で示したように可変の粘弾性を持つものとし、

$$F_m = u_m - ku_m x_m - bu_m \dot{x}_m \dots\dots\dots (2)$$

$$(m=f1,e1,f2,e2,f3,e3)$$

とする。このとき、各関節に発生するトルクは、

$$T_1 = (F_{f1} - F_{e1})r + (F_{f3} - F_{e3})r$$

$$T_2 = (F_{f2} - F_{e2})r + (F_{f3} - F_{e3})r$$

$$\dots\dots\dots (3)$$

となる。この式に  $F_m$  を代入して整理すると、次のようになる。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} rD_1 + rD_3 \\ rD_1 + rD_3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} kr^2(P_1 + P_3) & kr^2 P_3 \\ kr^2 P_3 & kr^2(P_3 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} br^2(P_1 + P_3) & br^2 P_3 \\ br^2 P_3 & br^2(P_2 + P_3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

このトルクの式から、関節トルクから見た二関節筋の特徴として、次の二つのことが言える。

- (a) 二関節筋は二つの関節に同時に同じ駆動力を与える
- (b) 二関節筋は二つの関節の和に比例する粘弾性を持つ

### 3. 二関節筋座標系を利用した系先端の剛性制御手法

{3.1} 二関節筋座標系の導入 前節で述べた、二関節筋の関節トルクにおける特徴から、二関節筋を含めたアームのモデルを図 3 のように簡略化して表す。

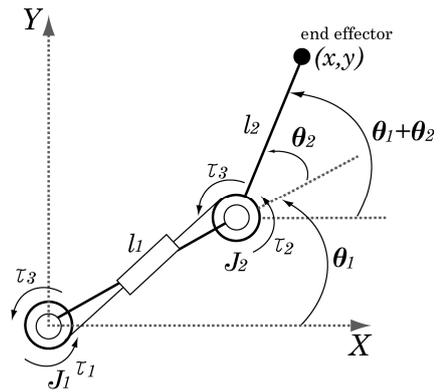


図 3 簡略化したアームのモデル

Fig. 3 Simplified animal's arm model

$\tau_1, \tau_2$  はそれぞれ、関節  $J_1, J_2$  の一関節筋が発生するトルクである。 $\tau_3$  は二関節筋が発生するトルクである。 $(x, y)$  は作業空間上での手先の位置である。このとき、各筋肉が発生するトルクと、関節に発生するトルクの間には次の関係がある。

$$T_1 = \tau_1 + \tau_3$$

$$T_2 = \tau_2 + \tau_3$$

$$\dots\dots\dots (5)$$

また、二関節筋は二つの関節角度の和に比例した粘弾性を持つことから、関節の変数として、関節角度の和

$$\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2 \dots\dots\dots (6)$$

を導入することにする。

{3.2} 二関節筋座標系におけるヤコビアン の導出 作業空間上での微小変化  $dP=[dx \ dy]^T$  と関節座標系での微小変化  $dq=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_{12}]^T$  との関係がヤコビアンを用いて表すことにすると、

$$dP = J \cdot dq \dots\dots\dots (7)$$

また、図 3 に示すような 2 リンク構造のマニピュレータにおいては

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_{12}$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_{12}$$

$$\dots\dots\dots (8)$$

であることから、

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_{12}} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_{12}} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & 0 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & 0 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix}$$

$$\dots\dots\dots (9)$$

{3.3} 力と関節トルクの関係 系先端における力と関節トルクの関係も同様にヤコビアンを用いて表すことができる。マニピュレーターの先端に外力  $f=[f_x \ f_y]^T$  が加わり、 $dP=[dx \ dy]^T$  の微小変位が生じたとする。このときの微小仕事  $dW$  は

$$dW = f^T dP \dots\dots\dots (10)$$

となる。これが各筋肉によるトルクとそのため発生した微小回転  $dq=[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_{12}]^T$  に等しくなることから、

$$\begin{aligned} f^T dP &= \tau^T dq \\ \tau^T &= f^T dP / dq = f^T J \\ \tau &= J^T f \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

また、ヤコビアンにおいて第2列が0になることから、

$$\tau_2 = 0 \dots\dots\dots (12)$$

として第2列を無視するとヤコビアンは次のようになる。

$$J_{abs} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

これは絶対値ヤコビアンと呼ばれるもので、二関節筋が二つの関節にまたがって作用することから、二関節筋座標系と非常に相性が良い。この絶対値ヤコビアンを用いると、作業空間での位置の微小変化と関節角度の微小変化の関係、系先端の力と筋肉トルクとの関係は、それぞれ次のように表される。

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = J_{abs} \begin{pmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = (J_{abs})^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

今、静的な状態において、手先に力  $F$  を発生させるとする。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \cos \theta_f \\ F \sin \theta_f \end{pmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

このとき、関節に発生させるトルクは、二関節筋座標系を用いて計算すると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} &= (J_{abs})^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} l_1 F \sin(\theta_f - \theta_1) \\ l_2 F \sin(\theta_f - \theta_{12}) \end{pmatrix} \end{aligned} \dots\dots\dots (17)$$

絶対値ヤコビアンを用いると、筋肉のトルク、手先の出力の関係は単純な回転変換となり、計算が非常に簡略化される。

{3.4} 手先剛性を実現するコントローラ的设计 今ロボットマニピュレーターがコントローラによって制御され、

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = K_p \begin{pmatrix} \theta_1^{ref} - \theta_1 \\ \theta_{12}^{ref} - \theta_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

$\theta_{12}^{ref}, \theta_{12}^{ref}, x^{ref}, y^{ref}$  を関節角度の目標値、作業空間上での手先の位置目標値とし、

が成り立っているとすると、このとき図4のように剛性を実現したい。このための  $K_p$  を求める。剛性は二次元平面内で定義されるため、 $k_1, k_2$  を軸とする楕円体で表される。この楕円体を、剛性楕円と呼ぶ。

いま、系先端に外力

$$f = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

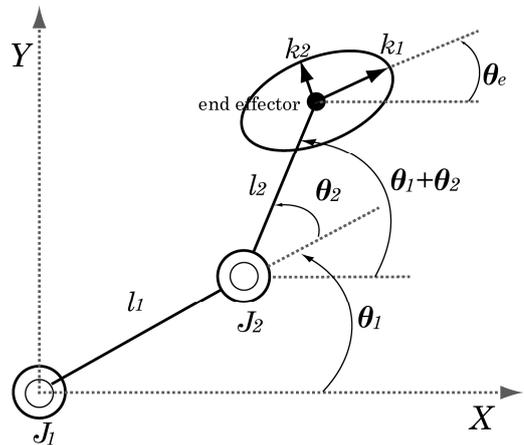


図4 剛性楕円

Fig. 4 stiffness ellipse

が加わり、関節角が

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_1^{ref} + \Delta\theta_1 \\ \theta_{12} &= \theta_{12}^{ref} + \Delta\theta_{12} \end{aligned} \dots\dots\dots (20)$$

だけ変化し、

$x, y$  が,

$$\begin{aligned} x &= x^{ref} + \Delta x \\ y &= y^{ref} + \Delta y \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (21)$$

だけ変化したとする。このとき式(18)から、

$$\begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \end{pmatrix} = K_p \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_{12} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (22)$$

である。今手先の剛性が図 4 のように実現されているとすると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \\ &= K \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (23)$$

であり、式(14)、式(15)、式(23)から、

$$K_p = (J_{abs})^T K J_{abs} \quad \dots\dots\dots (24)$$

として  $K_p$  を決定することができる。

実際に  $K_p$  を計算すると、

$$K_p = \begin{pmatrix} K_{p11} & K_{p12} \\ K_{p21} & K_{p22} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\begin{aligned} K_{p11} &= l_1^2 (-k_1 \sin(\theta_e - \theta_1) \sin \theta_1 + k_2 \cos(\theta_e - \theta_1) \cos \theta_1) \\ K_{p12} &= l_1 l_2 (-k_1 \sin(\theta_e - \theta_1) \sin \theta_{12} + k_2 \cos(\theta_e - \theta_1) \cos \theta_{12}) \\ K_{p21} &= l_1 l_2 (-k_1 \sin(\theta_e - \theta_{21}) \sin \theta_1 + k_2 \cos(\theta_e - \theta_{12}) \cos \theta_1) \\ K_{p22} &= l_2^2 (-k_1 \sin(\theta_e - \theta_{12}) \sin \theta_{12} + k_2 \cos(\theta_e - \theta_{12}) \cos \theta_{12}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。

この手法により手先の剛性が実際に制御できることをシミュレーションにより確認した。

$\theta_1^{ref} = \theta_2^{ref} = \pi/6$  となるように位置制御を行っているマニピュレーターに対して、外力  $[f_x \ f_y]^T$  を  $\pi/6$  ごとに方向を変えながら加え、そのとき発生する誤差  $[\Delta x \ \Delta y]$  を測定した。また、ロボットマニピュレーターの変位が小さくなるように力を加え、絶対値ヤコビアンは固定としている。理論値に関しては、式(23)を用いて計算した。

図は  $k_1=20, k_2=10, \theta_e=0$  とし、 $|[f_x \ f_y]^T| = 0.1$  としたとき、図は  $k_1=30, k_2=10, \theta_e=\pi/6$  とし、 $|[f_x \ f_y]^T| = 0.1$  としたときの結果である。

どちらも設計どおりに剛性が実現できていることが分かる。また、二関節筋座標系を用いることにより、従来の関節トルクによる方法に比べて計算を簡略化することができる。

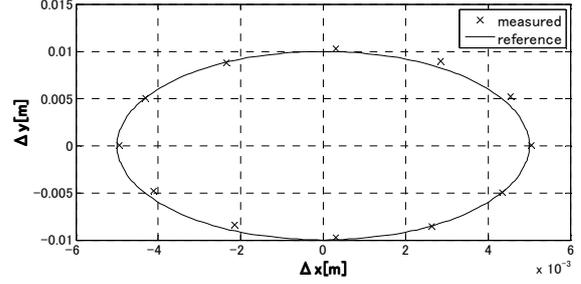


図 5  $k_1=20, k_2=10, \theta_e=0$  のときの剛性楕円

Fig. 5 stiffness ellipse at  $k_1=20, k_2=10, \theta_e=0$

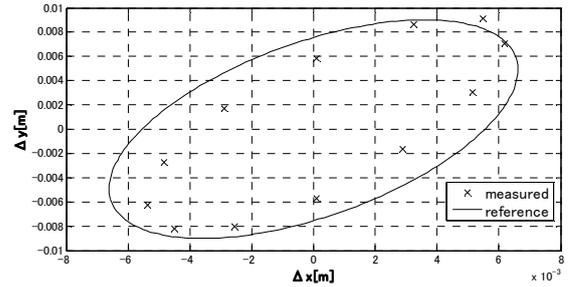


図 6  $k_1=30, k_2=10, \theta_e=\pi/6$  としたときの剛性楕円

Fig. 6 stiffness ellipse at  $k_1=30, k_2=10, \theta_e=\pi/6$

{3.5} 二関節筋が系先端剛性制御に果たす役割 式(25)を変形すると、

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{p11} + K_{p12} + K_{p21} + K_{p22} & K_{p21} + K_{p22} \\ K_{p12} + K_{p22} & K_{p22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (27)$$

となる。二関節筋を、例えばばねなどでハードウェア的に装備した場合、二関節筋は二つの関節に同じ弾性を与えるので、非対角成分は等しくなる。このとき、剛性楕円がどのようなようになるか考える。

$$\begin{aligned} K_{p22} + K_{p21} &= K_{p22} + K_{p12} \\ \therefore K_{p21} &= K_{p12} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (28)$$

式(26)より、

$$\begin{aligned} -k_1 \sin(\theta_e - \theta_1) \sin \theta_{12} + k_2 \cos(\theta_e - \theta_1) \cos \theta_{12} &= \\ -k_1 \sin(\theta_e - \theta_{21}) \sin \theta_1 + k_2 \cos(\theta_e - \theta_{12}) \cos \theta_1 & \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\therefore \sin \theta_e \sin \theta_2 (k_1 + k_2) = 0 \quad \dots\dots\dots (30)$$

であるから

式(30)を満たす剛性楕円の角度は

$$\theta_e = 0, \pi \quad \dots\dots\dots (31)$$

である。

したがって、二関節筋を取り入れることによって、水平方向に長軸を持つ剛性楕円が形成される。このことから、二関節筋は水平方向に剛性を発生させる働きを持つと考えられる。

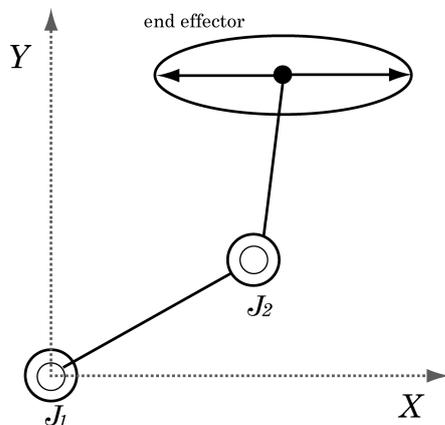


図 6 二関節筋が強める剛性の方向

Fig. 6 stiffness directions enhanced by bi-articular muscle

#### 4. 結論

本報告では、二関節筋を取り入れた新しい座標変換を導入し、それを利用した手先剛性の制御手法を示した。二関節筋座標系を導入することで、コントローラ設計の計算を簡略化することができる。

また、二関節筋が手先剛性を水平方向に強くする働きを持つことを明らかにした。

#### 文 献

- (1) 熊本水頼：「ヒューマノイド工学」、東京電機大学出版局、2006
- (2) 大島徹、藤川智彦、熊本水頼：「一関節および二関節筋を含む筋座標系によるロボットアームの機能的特性」、精密工学会誌、vol.64, No. 1, pp.141-146 (2000)
- (3) 藤川智彦、大島徹、熊本水頼、横井信安：「拮抗筋群による協調制御機能」、日本機械学会論文集（C編）、vol.63, No.607, pp.135-142 (1997)
- (4) 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」」、精密工学会生体応用制御・応用技術専門委員会第1回 Workshop (2005. 10)
- (5) 高山仁志、田熊隆史、細田耕：「二関節筋を含めた筋骨格構造を持つロボットによる連続跳躍の実現」、ロボティクス・メカトロニクス講演会 08' 予稿集、vol. CD-ROM, 2008 (2P2-I17)
- (6) 大島徹、鳥海清司、藤川智彦、熊本水頼：「一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実行筋力評価」、精密工学会誌論文集、vol.71, No.8, pp. 1041-1045 (2005)