解 説

従来のマニピュレータ解析手法から見た二関節筋構造の優位性

Advantage of Biarticular Muscle Structure Analyzed by Conventional Robot Manipulator Studies

呉 世 訓* 堀 洋 一* *東京大学大学院工学系研究科

Sehoon Oh* and Yoichi Hori* *School of Engineering, The University of Tokyo

1. はじめに

人間の筋肉による動作の解析研究の中でよく議論されてきた二関節筋機構 [1] は、最近ロボット工学だけでなくリハビリやスポーツ科学などの面から注目をされている [2] [3]. 本稿ではその二関節筋のロボット工学への応用を目標とし、マニピュレータ特性解析の既存理論を土台にして二関節筋構造の特性を調べていく.

まず 2 章では複雑な筋肉によるマニピュレータ操作を 3 対 6 筋のモデルを利用して解析を行い、トルクレベルで様々な議論ができるようにする. 3 章では筋肉の粘弾性特徴にも注目しそれを二自由度制御で表すことができることを示す.

そして、4 章では既存のマニピュレータにおける静特性・動特性を二関節筋座標系から見直し、各関節のトルクと手先での力の関係を従来のヤコビアンより簡単な形で表すことができることを示す. またダイナミクス記述における慣性行列が対角化できることも示す.

2. 二関節筋の基本特徴およびモデリング

従来のマニピュレータの静力学・動力学的解析に二関節筋を取り入れていくために、まず二関節筋自体の特徴を定義しておく. 本稿では図 1 のような熊本らが提案した 3 対 6 筋モデル [4] を採択、また従来のマニピュレータ解析との対応をとっていく. この 3 対 6 筋モデルにおいて能動的なアクチュエータとなっているのは六つの筋肉であり、各筋肉は以下の特性を持つ [5].

$$f = u - Kux - Bu\dot{x} \quad (1)$$

この f は収縮力 u 以外に筋肉の収縮量またその収縮速度に比例する粘弾性、またその粘弾性係数が可変（収縮力に比例）である特徴を持っている. この並進力 f , またその変形量 x に図 1 の関節半径をそれぞれかけることで回転運動の次元で表すと以下のようなトルク入力特性を得ることができる.

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1(f_1^f - f_1^e) + r_1(f_3^f - f_3^e) \\ &= r_1(u_1^f - u_1^e) - K_1 r_1(u_1^f + u_1^e) \Delta \theta_1 \\ &\quad - B_1 r_1(u_1^f + u_1^e) \Delta \dot{\theta}_1 + r_1(u_3^f - u_3^e) \\ &\quad - K_3 r_1(u_3^f + u_3^e) \Delta \theta_{12} - B_3 r_1(u_3^f + u_3^e) \Delta \dot{\theta}_{12} \\ &= \tau_1^m + \tau_3^m \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} T_2 &= r_2(f_2^f - f_2^e) + r_2(f_3^f - f_3^e) \\ &= r_2(u_2^f - u_2^e) - K_2 r_2(u_2^f + u_2^e) \Delta \theta_2 \\ &\quad - B_2 r_2(u_2^f + u_2^e) \Delta \dot{\theta}_2 + r_2(u_3^f - u_3^e) \\ &\quad - K_3 r_2(u_3^f + u_3^e) \Delta \theta_{12} - B_3 r_2(u_3^f + u_3^e) \Delta \dot{\theta}_{12} \\ &= \tau_2^m + \tau_3^m \end{aligned} \quad (3)$$

式 (2) が肩関節（第一関節と呼ぶ）回りに働くトルク、式 (3) が肘関節（第二関節と呼ぶ）回りに働くトルクである. ただし、ここで $\Delta \theta_{12}$ は $\Delta \theta_1 + \Delta \theta_2$ を、 r_1 , r_2 はそれぞれ筋肉と関節の結合部の関節中心からの半径を意味する. ただし、 τ_1^m , τ_2^m , τ_3^m は 3 対の力 $f_1^{\{e,f\}}$, $f_2^{\{e,f\}}$, $f_3^{\{e,f\}}$ がそれぞれが生成したトルクで、 τ_1^m , τ_2^m は一関節筋、 τ_3^m は二関節筋がそれぞれ生成するトルクとなる ($r_1 = r_2 = r$ と仮定).

$$\tau_1^m = r(u_1^f - u_1^e) - K_1 r(u_1^f + u_1^e) \Delta \theta_1 - B_1 r(u_1^f + u_1^e) \Delta \dot{\theta}_1 \quad (4)$$

$$\tau_2^m = r(u_2^f - u_2^e) - K_2 r(u_2^f + u_2^e) \Delta \theta_2 - B_2 r(u_2^f + u_2^e) \Delta \dot{\theta}_2 \quad (5)$$

$$\tau_3^m = r(u_3^f - u_3^e) - K_3 r(u_3^f + u_3^e) \Delta \theta_{12} - B_3 r(u_3^f + u_3^e) \Delta \dot{\theta}_{12} \quad (6)$$

図 1 3 対 6 筋構造を持つマニピュレータ

原稿受付 2010 年 5 月 10 日

キーワード: Biarticular Muscle, Kinematics, Absolute Jacobian

*〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

図2 二関節筋トルクを導入したマニピュレータ構造

図3 拮抗筋によって駆動されている関節

このような二関節筋によるトルクをより具体的に表したのが図2である。 τ_1^m と τ_2^m がそれぞれ第一関節，第二関節の一関節筋が作るトルク， τ_3^m が二関節筋の力 F_m を通して二つの関節に働くトルクとなっている。今後，この図2の三つの筋肉レベルのトルク τ_1^m ， τ_2^m ， τ_3^m に注目して解析を行っていく。

3. 拮抗筋構造の二自由度制御入力特性による近似

図3に一つの関節に二つの筋肉が拮抗的に働く模式図を示す。 f^f が屈筋 (flexor) で f^e が伸筋 (extensor) であり， r がジョイント (関節) の半径， θ は二つの力 f^f ， f^e によるアームの回転角度， Δx が θ の角度変位によって筋肉が伸び縮みした筋肉長の変化分とする。本稿では拮抗筋の最も基本的な働きを見るため r は Δx と関係なく不変とする。そして各筋肉は式 (7) (8) のような収縮力 u に比例する粘弾性を持った力出力特性を持つとする。

$$f^f = u^f + K u^f \Delta x + B u^f \dot{\Delta x} = u^f - u^f (K + B s) r \Delta \theta \quad (7)$$

$$f^e = u^e + K u^e \Delta x + B u^e \dot{\Delta x} = u^e + u^e (K + B s) r \Delta \theta \quad (8)$$

ただし， u は各筋肉の収縮力， K は弾性係数， B 粘性係数となり， Δx は $r \Delta \theta$ として表している。 θ によって二つの筋肉は反対方向の筋肉長の変化をもつ。すなわち屈筋肉長の変化が $\Delta x = -r \Delta \theta$ となるなら伸筋肉では $\Delta x = r \Delta \theta$

図4 二自由度制御入力特性として表した筋肉の構造

となる。このような特徴を踏まえこの拮抗構造の筋肉の関節への働きを，式 (7) (8) の粘弾性が入った筋肉の特性を制御工学の観点から再解釈する。

$r(f_e - f_f)$ が θ を動かすトルク入力になることを利用する。式 (7) (8) に基づきこのトルク入力を整理すると図4の構造として表される。式 (7) (8) における収縮力 $u_{\{e,f\}}$ 以外の粘弾性は，筋肉の自然長からの変化分 Δx によって生成される反力である。この Δx を制御における指令値からの誤差 $\Delta \theta$ として等価的に読み替え，図4では筋肉の粘弾性を角度の指令値 θ^{ref} に対する復元力として解釈した制御器を構成した。ただし，簡略化のため粘性項は省略してある。この解釈は文献 [6] の virtual trajectory mode とも似ているが，本稿ではこれを上位から自由に与えられる位置の指令値として解釈している。

以上，一つの拮抗筋に関する解析であるが，式 (4)～(6) の3対の筋肉によるトルクすべてに同じ解析を行うことができる。各筋肉の拮抗構造によって生成されるトルクを解析すると図4のようにプラントを駆動するトルク分 (収縮力の差，式 (4)～(6) の第一項) と指令値との誤差またその誤差の速度に比例するフィードバックトルク分 (式 (4)～(6) の第二，三項) とに分けることができる。

特に収縮力の和はそのフィードバックゲインを可変にする特徴があり，位置指令からの誤差に $K(u_f + u_e)$ のゲインをかけてフィードバックするのは位置の比例 (P) 制御，誤差の微分に $B(u_f + u_e)$ をかけてフィードバックするのを微分 (D) 制御としてみることができる。すなわち，拮抗筋の二つの入力の和のモードはフィードバックゲインに，差のモードは回転を作るトルクに関与しているといえる。

文献 [7] で測定されている実際にセンサで測った人間の筋活動パターンを見ると各拮抗筋対の出力の和が一定で，差だけが変化している。提案する解析法で見れば手先に特定の力を出すために人間の筋肉は固定ゲイン下 (図4の K が固定) でのフィードフォワードトルク (図4の $u_f - u_e$) だけが変化するトルク入力を出していると解釈できる。

4. 二関節筋構造導入によるマニピュレータ制御特性改善

二関節筋導入による新しいトルク入力 τ_3^m は $\theta_1 + \theta_2$ を出力とする新しい制御入力としてみることができる。この

図5 2リンクマニピュレータの構成

新しい制御入力によって制御器設計が大きく簡略化され、制御特性改善が期待できる[8]。

4.1 二関節筋トルクを取り入れた静力学の導出と力制御への応用

図5のマニピュレータ構成下で手先に $\mathbf{F}_e$ の力を発生させるために関節トルク T_1^j 、 T_2^j は以下の式(9)のようにヤコビアン J によって決まる。

$$\begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} = J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (9)$$

このヤコビアンを利用した力とトルクの関係式は以下のように書き直すことができる。手先力 $(f_x, f_y)^T$ を生成するためのトルクを、 T_1^j だけに現れる力項と T_1^j と T_2^j の両方に現れる力項に分けることができる。

$$J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 f_x + l_1 \cos \theta_1 f_y \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \\ -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

そこで T_1^j だけに現れる力を τ_1^m に、 T_1^j と T_2^j の両方に現れる力を τ_3^m にあてると

$$\tau_1^m = -l_1 \sin \theta_1 f_x + l_1 \cos \theta_1 f_y, \quad \tau_2^m = 0 \quad (11)$$

$$\tau_3^m = -l_2 \sin \theta_{12} f_x + l_2 \cos \theta_{12} f_y \quad (12)$$

が、手先力 $\mathbf{F}_e = (f_x, f_y)^T$ を出力するために必要な筋肉レベルのトルクとなる。ただし、二関節筋トルクを取り入れると冗長性を持つようになるので、このようなトルク配分以外の配分も考えられるがこの配分が力制御の構造をより簡単にできることを以下に示していく。また、 τ_1^m のほうに θ_1 が、 τ_3^m のほうに θ_{12} が入っているのが興味深い。

これら式(11)(12)は手先に出る作業空間上での力 $\mathbf{F}_e$ と筋肉レベルのトルク τ_1^m 、 τ_3^m の間の関係が絶対値ヤコビアン(以下 J_{abs})を利用して表すことができることを示

図6 3種類の筋肉によって生成される手先力の主な方向

している。さらにこの絶対値ヤコビアンは回転変換に非常に都合のよい行列になっていることから、手先の力 $\mathbf{F}_e = (F \cos \theta_f, F \sin \theta_f)^T$ のように大きさ F と出力方向 θ_f を明記して記述すると次式のように非常に見通しのよい力関係式になる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \\ &= (J_{abs})^T \begin{pmatrix} F \cos \theta_f \\ F \sin \theta_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F l_1 \sin(\theta_f - \theta_1) \\ F l_2 \sin(\theta_f - \theta_{12}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

4.2 各筋肉による手先力の方向解析

式(13)に基づき三つの各筋肉のトルクによって生じる手先力の方向を解析する。三つの筋肉を、それぞれ一つずつトルクを出すようにし、他の筋肉トルク出力は0にしたときの手先力を測ることで各筋肉のメインの手先力方向を調べる。その結果が図6である。 $\theta_f = \theta_1$ であるA方向の力は τ_3^m のトルクが、 $\theta_f = \theta_1 + \theta_{in}$ のB方向では τ_2^m が、 $\theta_f = \theta_{12}$ のC方向では τ_1^m がメインにトルクを発生していることが分かる。これは文献[7]で臨床的に計った実際の筋肉の活性度と手先で発生する力の関係にも一致する結果である。

4.3 二関節筋導入による慣性行列の対角化

次に図1のマニピュレータの動力学が二関節筋導入によってどのように再定義できるかを述べる。従来の図5のマニピュレータの動特性は式(14)で定義される。

$$\begin{aligned} &\begin{pmatrix} J_1 + J_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & J_2 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} \\ &+ \begin{pmatrix} g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

ただし J_1 , J_2 は各関節の慣性, m_1 , m_2 は各質量, l_1 , l_2 は各リンクの長さ, d_1 , d_2 はリンクの重心までの距離, g は重力加速度である.

二関節筋の出力を θ_{12} と定義し, まず二関節筋の駆動トルク τ_3^m によるダイナミックスを以下のように定義する.

$$\begin{aligned}\tau_3^m &= (J_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2)(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ &\quad - m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2(\ddot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ &\quad + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2).\end{aligned}\quad (15)$$

そして, この導出動特性に基づき, 残りの一関節筋トルク τ_1^m , τ_2^m のダイナミックスを以下のように決める.

$$\begin{aligned}\tau_1^m &= (J_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2)\ddot{\theta}_1 \\ &\quad + g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}\tau_2^m &= -m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 \\ &\quad + m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2\end{aligned}\quad (17)$$

やはり動力学においても冗長系になることからその関係式は一意には決まらず, 特に加速度に関係する慣性力以外の力要素の配分はまだ工夫が必要なところである. ただし, ここで提案する式 (15)~(17) のダイナミックスは式 (14) の慣性行列の非対角成分要素の大きさが同じであることに注目して, それを対角化するように自由度を利用した動力学の再定義である. また, 二関節筋トルク τ_3^m の出力を θ_{12} とすることでこのような対角化が実現されたことは, 式 (6) との対応のよさからも興味深い点である.

5. お わ り に

本稿では二関節筋の筋肉特性を従来のマニピュレータ解析に取り入れ静力学・動力学的な面でこの二関節筋の特徴を明らかにした. そのため筋肉の特徴から二関節筋のアクチュエータとしての性質を定義, それに基づき解析を行った. その結果, 静力学的な面では従来の複雑なヤコビアンでなく非常に簡単な三角関数一つで手先力と関係付けることができた. また動力学的な面からも慣性行列が対角化で

きることを確認できた.

特に手先力とその発生のための筋肉の力 (もしくはトルク) の大きさが簡単に関係付けられた意味は大きく, これを利用すれば各筋肉アクチュエータに適切な粘弾性を持たせておくことにより外力に対するモータの反発力を簡単に制御することができる.

また二自由度制御入力特性を利用して筋骨格系の拮抗構造を解釈できることを示し, 自然長を指令値と読み替えることで筋粘弾性とマニピュレータの PD 制御との対応を明らかにした.

今後人間の動作における二関節筋の働きの解析と理解がより深められれば, 従来のロボットマニピュレータにそれを適用することで効率的, かつ人間に近い動作が期待できる. またより自然な人間へのアシストができるアシスト機器の開発にも繋がるに違いない.

参 考 文 献

- [1] N. Hogan: "Impedance Control: An Approach to manipulation: Part II - Implementation," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.107, pp.8-16, 1985.
- [2] D.W. Franklin, G. Liaw, T.E. Milner, R. Osu, E. Burdet and M. Kawato: "Endpoint Stiffness of the Arm Is Directionally Tuned to Instability in the Environment," *Journal of Neuroscience*, vol.27, no.29, pp.7705-7716, 2007.
- [3] H. Gomi and M. Kawato: "Task-Dependent Viscoelasticity of Human Multijoint Arm and Its Spatial Characteristics for Interaction with Environments," *Journal of Neuroscience*, vol.18, no.21, pp.8965-8978, 1998.
- [4] M. Kumamoto, T. Oshima and T. Yamamoto: "Control Properties Induced by the Existence of Antagonistic Pairs of Bi-articular Muscles—Mechanical Engineering Model Analyses," *Human Movement Science*, vol.13, pp.611-634, 1994.
- [5] 伊藤宏司, 辻敏夫: "筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用", *電気学会論文誌*, vol.105-C, no.10, pp.201-208, 1985.
- [6] M. Katayama and M. Kawato: "Virtual Trajectory and stiffness ellipse during multijoint arm movement predicted by neural inverse model," *Biological Cybernetics*, vol.69, pp.353-362, 1993.
- [7] 藤川智彦, 大島徹, 熊本水頼, 横井信安: "ヒト上肢における系先端の出力と拮抗筋群の協調活動", *日本機械学会論文集 C 編*, vol.65, no.632, pp.1557-1564, 1999.
- [8] S. Oh and Y. Hori: "Development of Novel Two-Degree-of-Freedom Control for Robot Manipulator with Biarticular Muscle Torque," *Proc. American Control Conference*, pp.325-330, 2009.

吳 世訓 (Sehoon Oh)

2005 年東京大学工学系研究科電気系工学専攻で博士 (工学) 取得. 同大学生産技術研究所の研究員を経て, 現在同大学電気系グローバル COE 特任助教. 人間生活アシストおよび福祉応用に関係した人間親和型モーションコントロールに関する研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)

堀 洋一 (Yoichi Hori)

1983 年東京大学大学院博士課程修了 (電子工学). 助手, 講師, 助教授を経て, 2000 年 2 月より電気工学科教授. 2002 年 10 月より生産技術研究所教授. 2008 年 4 月より新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻教授. 専門は, モーションコントロール, 電気自動車の制御など. 現在, 電気学会産業応用部門長, キャパシタフォーラム会長, 日本能率協会モータ技術シンポジウム委員長, IEEE Fellow.

(日本ロボット学会正会員)