

二関節筋力学体系のエネルギー論からのアプローチ

東京大学 工学系研究科電気系工学 呉 世訓, 吉田 憲吾, 小柳 拓也, 肥田 知仁, 堀 洋一

1. はじめに

二関節筋の特性をマニピュレータ制御の既存の理論と比べながら確かめる。そして、その静特性・動特性議論に基づきエネルギー論的なアプローチの可能性を調べる。

まず 2 節で従来のロボット工学でマニピュレータ解析のために利用されてきた静力学・動力学をおさらいする。そしてそれらの項目を 3 節で二関節筋を取り入れたマニピュレータで展開する。そのためまず二関節筋のシステムとしての特徴、入出力特徴を定義し、それに基づいて静力学・動力学を定式化する。そして 4 節で提案した二関節筋を取り入れた静力学・動力学を元にエネルギー論からどのようにアプローチしていくべきかに関して論じる。

2. 従来のロボット工学でのマニピュレータ分析

関節に回転モータを駆動系としておいた従来のマニピュレータの静特性・動特性分析をまず復習する。

はじめに静特性・動特性の定義を限定しておく。

静特性はマニピュレータの手先が固定されて動かない時の力だけの伝達特性を意味する。各ジョイントが出すトルク値と手先で生成される力の大きさ・方向の特性は手先が固定されることから仮想仕事の原理で導かれ、その結果ヤコビアン行列の転置でその関係式が確定される。

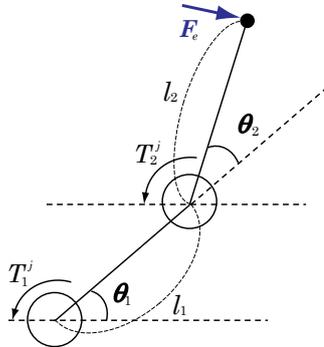


図 1 関節にモータがある二次元ロボットマニピュレータ

図 1 に関節にモータが入っている二次元ロボットマニピュレータを示した。 θ_1, θ_2 は各関節の角度、 l_1, l_2 はリンクの長さ、 T_1^j, T_2^j は各関節に発生しているトルクを意味する。このような構成のマニピュレータの手先を固定し、そこから F_e の力を発生させるために関節トルク T_1^j, T_2^j の値をどのように決めればよいか、その関係式は以下の式(1)のように決まる。

$$\begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = J^T F_e \quad (1)$$

また、動特性とは、手先が固定されず関節トルクによって自由に運動するときのダイナミクスを意味するのであって、コリオリ力などを考慮した運動方程式が確立されている。以下の式(2)に図 1 の二次元マニピュレータのダイナミクスを書いた。 I_1, I_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。

$$\begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 + I_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & I_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_1^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} g(m_2 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

これらの静特性・動特性はすべて関節だけにアクチュエータを入れたマニピュレータに関する解析であって、二関節筋を考慮していない。以下、二関節筋を取り入れたマニピュレータの静特性・動特性を同じく解析していく。

3. 二関節筋を取り入れたマニピュレータの静特性・動特性解析

1) 二関節筋の特徴およびダイナミクス定義

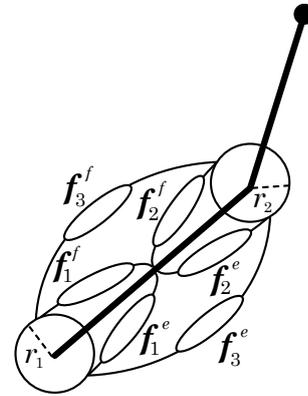


図 2 マニピュレータにおける 3 対 6 筋構

本節では従来のマニピュレータの解析に二関節筋を取り入れていく。そのために二関節筋自体の特徴を定義しておく必要がある。本稿では図 2 のような熊本らが提案した 3 対 6 筋モデルを採択、また従来のマニピュレータ解析との対応をよくするためそれをより簡略化したモデルを利用することにする。

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 6 つの筋肉であり、各筋肉は以下の特性を持つ。

$$f = u - kux - bu\dot{x} \quad (3)$$

この筋肉の力 f の特性を見ると収縮力 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(式通りだと収縮力に比例)である特徴を持っている。この筋肉特徴はあくまでも線形運動に対する力 f 、またその変形量 x であるが、この線形運動は関節とのつながりにより関節の回転運動になって表される。そこで、筋肉の線形運動特性(3)とリンク構造までを考えて関節の回転運動の次元で表した筋肉特性を以下再記述する。この再記述は二関節筋のマニピュレータ応用においてよく行われてくる変形である。

<腕関節(第一関節と呼ぶ)回りに働くトルク>

$$\begin{aligned} T_1 &= r_1(f_1^e - f_1^f) + r_1(f_3^e - f_3^f) \\ &= r_1(u_1^e - u_1^f) - r_1 k_1(u_1^e + u_1^f) r_1 \Delta \theta_1 - r_1 b_1(u_1^e + u_1^f) r_1 \Delta \dot{\theta}_1 \\ &\quad + r_1(u_3^e - u_3^f) - r_1 k_3(u_3^e + u_3^f) r_1 \Delta \theta_{12} - r_1 b_3(u_3^e + u_3^f) r_1 \Delta \dot{\theta}_{12} \end{aligned} \quad (4)$$

<肘関節（第二関節と呼ぶ）回りに働くトルク>

$$T_2 = r_2(f_2^f - f_2^e) + r_2(f_3^f - f_3^e) \\ = r_2(u_2^f - u_2^e) - r_2k_2(u_2^f + u_2^e)r_2\Delta\theta_2 - r_2b_2(u_2^f + u_2^e)r_2\Delta\dot{\theta}_2 \\ + r_2(u_3^f - u_3^e) - r_2k_3(u_3^f + u_3^e)r_2\Delta\theta_{12} - r_2b_3(u_3^f + u_3^e)r_2\Delta\dot{\theta}_{12} \quad (5)$$

ただし、ここで $\Delta\theta_{12}$ は $\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2$ を意味する。

このトルク式(4)と(5)を見ると二関節筋によって生成されるトルク $r_2(u_3^f - u_3^e) - r_2k_3(u_3^f + u_3^e)r_2\Delta\theta_{12} - r_2b_3(u_3^f + u_3^e)r_2\Delta\dot{\theta}_{12}$ は $r_1=r_2$ の場合、両トルク T_1, T_2 にまったく同じ量で働くことがわかる。この特徴に注目し本稿では3対の筋肉が作るトルクをそれぞれ以下の式のように $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ として定義し、以下関節トルクとの関係を導く。

$$\tau_1^m = r(u_2^e - u_2^f) - rk_1(u_1^e + u_1^f)r\Delta\theta_1 - rb_1(u_1^e + u_1^f)r\Delta\dot{\theta}_1 \quad (6)$$

$$\tau_2^m = r(u_2^f - u_2^e) - rk_2(u_2^f + u_2^e)r\Delta\theta_2 - rb_2(u_2^f + u_2^e)r\Delta\dot{\theta}_2 \quad (7)$$

$$\tau_3^m = r(u_3^f - u_3^e) - rk_3(u_3^f + u_3^e)r\Delta\theta_{12} - rb_3(u_3^f + u_3^e)r\Delta\dot{\theta}_{12} \quad (8)$$

この定義により筋肉レベルのトルク $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ は関節レベルのトルク T_1, T_2 と以下のように関係付けられる。

$$T_1^j = \tau_1^m + \tau_3^m \quad (9)$$

$$T_2^j = \tau_2^m + \tau_3^m \quad (10)$$

ただし、この関節トルクと筋肉トルクの関係は図2の筋肉構造を充実に書き下した式(4)、(5)通りではない。式(4)、(5)の関係式から導くと T_2 は T_2^j のままでよいが T_1 は $T_1 = \tau_1 - \tau_3$ となってしまう。これは今後紹介する絶対値ヤコビアンなどとの対応性が良くなく、ここでは式(9)、(10)を二関節筋とトルクの関係式とする。またこの関係式は他の研究でもよく見受けられる一般的に用いられる関係式であり、図2の二関節筋の第一関節と第二関節との接点をクロスしてつけたことを意味する。以下、図3にその模式図を示す。

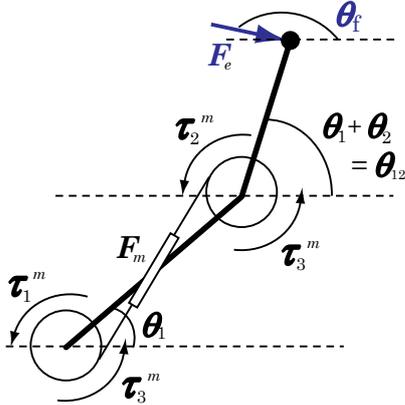


図3 トルクレベルに直した3対6筋構造

図3はロボットマニピュレータに式(9)、(10)に表した二関節筋をトルクレベルで取り入れたもので τ_1^m と τ_2^m が第一関節、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 をとおして二つの関節に働くトルクとなっている。今後、図3の三つの筋肉レベルのトルク $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ に注目して解析を行っていく。

2) 二関節筋特徴を取り入れた静特性分析

従来のヤコビアンは二つの関節のトルク入力に対する二つの関節の回転角度出力の観点から

$$\begin{pmatrix} T_1^j \\ T_2^j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (11)$$

の変数を利用した関係式となっている。これは関節にモータなどのアクチュエータを入れ、そのアクチュエータの角度を直接測るシステムの入出力関係によく対応している。

このヤコビアンを、二関節筋トルク τ_3^m とその出力角度 $\theta_{12} (= \theta_1 + \theta_2)$ を取り入れて再導出する。これは式(3)と式(8)の筋肉特性を考慮したものであり、二関節筋の筋肉は二つの関節の回転角の和に比例する粘弾性を持つことから θ_{12} をその出力として定義した。この出力定義は後ほど述べるダイナミクスの解析にも非常に有利な設定となっている。

前節で述べたように静力学とは手先固定時に手先に働く力(図1、図3の F_e) と各アクチュエータが出すトルクとの関係(図1の T_1, T_2 または図3の $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$) を本稿では意味する。従来の図1の静力学は式(1)のように確立されている。この静力学を図3の $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ を考慮して書き直すことにする。そのため本稿では式(11)の代わりに以下の式(12)の関係に注目する。

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_2^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (12)$$

外部への力 F_e を出力するために出すべき関節の力は式(1)により

$$J^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 f_x \sin \theta_1 + l_1 f_y \cos \theta_1 \\ 0 \\ -l_2 f_x \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 f_y \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_2 f_x \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 f_y \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (13)$$

と記述することができる。この式をよく見ると式(13)のように T_1^j と T_2^j の両方に現れる力項と T_1^j だけに現れる力項に分けられることがわかる。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

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 f_x \sin \theta_1 + l_1 f_y \cos \theta_1 \\ -l_2 f_x \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 f_y \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix} \quad (14)$$

が、手先に力 $F_e = (f_x, f_y)$ を出力するために必要な筋肉レベルのトルクであると言える。 τ_1^m の方に θ_1 が、 τ_3^m の方に $\theta_1 + \theta_2$ が入っているのが興味深い。この特徴を利用すると手先に出る作業空間上での力 F_e と筋肉レベルのトルク τ_1^m, τ_3^m の間の関係を以下のように絶対値ヤコビアンを利用して表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_{12} \\ l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix} = J_{abs}^T F_e \quad (15)$$

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て、たとえば手先の力 F_e を以下の式(16)のように出力方向を明記して記述すると式(15)は式(17)のように非常に見通しのよい力関係式になる。

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

$$\begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_2^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & l_1 \cos \theta_1 \\ -l_2 \sin \theta_{12} & l_2 \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \cos \theta_e \\ F \sin \theta_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F l_1 \sin(\theta_f - \theta_1) \\ F l_2 \sin(\theta_f - \theta_{12}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

式(17)は手先に出力したい力の大きさと方向が決まれば今までの複雑な行列計算なしに、簡単な \sin 関数だけで出力すべき筋肉レベルのトルクの量が決まってくることを意味する。この簡潔さこそが二関節筋を取り入れた筋肉座標系を利用するメリットのひとつである。

ここで注意すべき点は τ_2^m が考慮されていない点である。二つの関節トルク T_1^j, T_2^j を三つの筋肉レベルのトルク $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ に分配する方法は一意的に決まらない。本稿で提案する式(14)のような τ_2^m を無視した分配は数多くある分配方法のひとつに過ぎない。しかし、式(14)のように τ_1^m, τ_3^m だけに力を分配することで式(17)のように非常に見通しのよい手先での力との力関係が成り立つようになる。

また導出した式(17)を利用して従来の筋活動パターンを利用した力出力方向解析が説明できる。

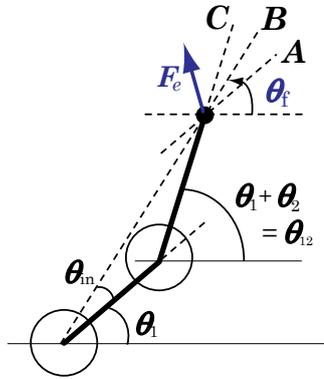


図4 絶対値ヤコビアンと手先の力の方向関係

文献(1)では二つの一関節筋、一つの二関節筋の3つの筋肉対が交互に活性化(式(3)の u の値が大きくなる)していくとき、3対それぞれが最大活性化したときにその各対に対応する特定方向の力が手先に出力されると解析している。その特定方向とは図4のA,B,C方向であり、それぞれA:腕と肘を結ぶ(第一リンク)方向、B:腕と手先を結ぶ方向、C:肘と手先を結ぶ(第二リンク)方向である。それぞれの方向の力の角度は

$$A: \theta_f = \theta_1$$

$$B: \theta_f = \theta_1 + \theta_m$$

$$C: \theta_f = \theta_{12}$$

となっている。それぞれの方向の角度を式(17)に代入すると

$$A: \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ F l_2 \sin \theta_2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$B: \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F l_1 \sin \theta_m \\ F l_2 \sin(\theta_2 - \theta_m) \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$C: \begin{pmatrix} \tau_1^m \\ \tau_3^m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F l_1 \sin \theta_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

となる。この式からA方向の力は二関節筋のトルクだけで、C方向の力は第一関節の一関節筋のトルクだけで生成することができる。またB方向は、マニピュレータの内側の三角形における正弦定理を利用すると $\tau_1^m = -\tau_3^m$ の関係にある

ことがわかり、等価的に第二関節の一関節筋(τ_2^m)のトルクだけでB方向の力が出せることがわかる。

以上のことから本稿で導出した式(17)は従来の筋肉活動パターンでされてきた静力学分析までを含む、より一般的な二関節筋の静力学特性分析式として利用できることがわかる。

3) 二関節筋特徴を取り入れた動特性分析

2節で述べたように従来の関節トルクに基づくマニピュレータの動特性は式(2)で定義される。静力学分析のときと同じく、関節レベルのトルク T_1^j, T_2^j を、二関節筋トルクを取り入れた $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ に配分、再定義することで二関節筋マニピュレータの動特性を定義する。そこで、式(2)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以下のように $\tau_1^m, \tau_2^m, \tau_3^m$ のダイナミクスを定義する。

$$\begin{aligned} \tau_1^m &= (I_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + g(m_1 d_1 + m_2 l_1) \cos \theta_1 \\ \tau_2^m &= -m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ \tau_3^m &= (I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) - m_2 l_1 d_2 \sin \theta_2 (\dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \\ &\quad + g m_2 d_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (21)$$

この三つのトルクに対するダイナミクスを式(9),(10)の関係で関節トルクに戻すと式(2)のダイナミクスになるような三つのトルクへの配分になっている。しかし、静力学定義と同じく、動力学的3つのトルクへの振り分けも一意的ではない。しかしここで注目したのは慣性行列の対角かであり、式(21)のダイナミクス定義により式(2)の慣性行列は以下のように対角化される。

$$\begin{pmatrix} I_1 + I_2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \\ I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & I_2 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} I_1 + m_2 l_1^2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & -m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_2 + m_2 l_1 d_2 \cos \theta_2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

また、各筋肉トルクが駆動する加速度も $\tau_1^m \rightarrow \ddot{\theta}_1, \tau_2^m \rightarrow \ddot{\theta}_2, \tau_3^m \rightarrow \ddot{\theta}_{12}$ と、各トルクの出力との対応が非常によく、まとまった定義となっている。

著者らは文献(2)でこの提案二関節筋ダイナミクスを利用して逆ダイナミクスを設計、それによるフィードフォワード制御をシミュレーションで成功させ、提案ダイナミクスの有効性を確認した。

4) アクチュエータ制御面からみた筋粘弾性特性の意味

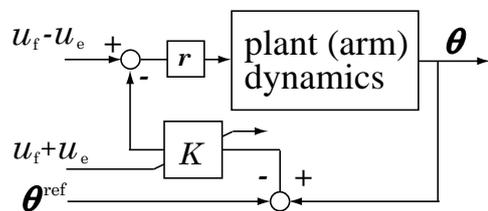


図5 制御器の観点からみた筋肉特性

以上、二関節筋を取り入れたマニピュレータの静特性・動特性を調べ、従来のマニピュレータ制御と対応付けた。最後に式(3)から(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。

式(3)の筋肉の出す力は、収縮力 u 以外に筋肉の長さの変形とその変形の数値に比例する粘弾性が入っている。この変形分 Δx もしくは $\Delta \theta$ は筋肉の自然長からの変化分であるが、この自

然長を制御における指令値と読み替えると以下の図 5 のような制御器構成としてみる事ができる。

拮抗構造の、式(3)の特性を持つ筋肉によって生成されるトルクを分析すると図 5 のようにプラントを駆動するトルク分(収縮力の差)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と分けることができる。また、二つの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る。位置フィードバック制御の P 制御は外力に対する弾性、D 制御は外力に対する粘性と等しい(文献(3))ことから筋肉の粘弾性は位置フィードバック制御の PD 制御と等価であり、収縮力の和の変化はこの PD 制御のゲインを可変にすることを意味する。

文献(1)に見られる人間の筋活動パターンのように和が一定で、差だけが変化するモードでは固定ゲイン下(図 5 の K が固定)でのフィードフォワードトルク(図 5 の $u_f - u_e$)に変化するトルク値が入ることを意味する。

5) 二関節筋特徴を取り入れたロボットマニピュレータ制御

以上の筋肉の粘弾性特性、また二関節筋を考慮したマニピュレータの静特性・動特性を利用すれば二関節筋モデルに基づくマニピュレータの制御が可能になる。特に筋の粘弾性を忠実に再現することはフィードバック制御を位置の PD 制御として設計することを意味し、その特徴を生かした剛性楕円制御をシミュレーションで実現した研究を著者たちは行った(文献(2)、(4))。

また、 $u_f - u_e$ のフィードフォワード入力にダイナミックスの逆モデルを入れて応答性改善ができることも示している(文献(2))。これらは従来のロボット工学の観点からはそれほど新しいことではないが、そのすべてを二関節筋を導入したダイナミックスを利用して行った点が注目すべき点である。

最後にこれらの解析の延長線として二関節筋の筋剛性がマニピュレータの手先の水平方向(腕関節と手先を結ぶ直線に直交する方向)の剛性を強くすることも明らかにしている(文献(4))。

4. 静特性・動特性、そしてエネルギーの関係

二関節筋を取り入れた場合の静特性・動特性を明らかにしたが、それがどうやって結ばれそしてそれをエネルギーの面でどのように解析できるか、それに関する考え方をここで少し述べておく。

エネルギーフローを考えるためまず、モータ、もしくは筋肉のようなアクチュエータの最も簡単な入出力の式を考える。それが以下の式である。

$$\tau_m = I\ddot{\theta} + \tau_e \quad (22)$$

τ_m はあるプラントへの入力トルク、 $\ddot{\theta}$ はその入力トルクの一部によって加速された加速度、 τ_e はそのプラントが接触している(あるいは拘束している)違う物体へ及ぼす力を入力トルクのプラントを加速させた分以外の残りのトルクである。

エネルギーフローはこの力の流れによって行われる。たとえば式(22)では $\tau_m \dot{\theta}$ だけのエネルギーが消費され、残りのトルク τ_e はまた接触している物体へ流れ、その物体に速度を生じさせればまた消費されるようになる。

注目してほしいのは、式(22)は 3 節で導出した静力学と動力学をつなぐ式にもなるということである。右辺の $\ddot{\theta}$ にかかわる

項は動力学を、 τ_e 項は静力学を意味する。すなわち、筋肉が(もしくは従来通りのモータが)発生した力はマニピュレータを加速させる力(動力学)にもなりまた拘束されている分に関しては外部へ出す力出力(静力学)にもなるということである。加速度に変わり速度を出した分のトルクは消費され(動力学)、残って他の物体の運動に働きかけた力(静力学)はまたその物体の運動によって消費されるようになる。

また式(22)は著者らが文献(5)で提案した二関節筋のインピーダンス楕円の概念ともつながる。インピーダンス楕円は動的可操作性楕円体と操作力楕円体を両方あわせている概念である。動的可操作性楕円体はマニピュレータの動力学的特性を表す指標、操作力楕円体はマニピュレータの静力学特性を表す指標であり、インピーダンス楕円はこの二つの指標を足し算で合わせている。この足し算は式(22)の足し算と本質的に同じ意味合いを持つ。ということで著者らが提案している二関節筋を取り入れたインピーダンス楕円は二関節筋の動特性・静特性を合わせた評価指標といえる。

今後の課題は二関節筋を取り入れることで従来の二関節筋のない関節レベルでのトルク入力だけを考慮したモデルとエネルギーフロー的な面でどのような違いが出てくるのかを調べることである。エネルギー消費の面やエネルギー伝達効率の面などが解析できると思われる。

最後に式(22)はモーションコントロールでより用いられている外乱オブザーバの基本式でもあることを付け加えておく。

5. 結論

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。まず、力学的な解析を可能にする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 \sin 関数だけで外部力との関係付けができた。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。

さらに筋肉の粘弾性特性を制御器設計の面から再解釈、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。

最後にエネルギーフローを力の伝達及びそれによる運動として解釈、導出した静力学・動力学がエネルギーフローの面で一つの式として表せることを示した。今後このエネルギーフローの面で見えた二関節筋の特徴をより詳細に調べていく必要がある。

文 献

- (1) 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)
- (2) S. Oh, Y. Hori, "Development of Two-Degree-of-Freedom Control for Robot Manipulator with Biarticular Muscle Torque", American Control Conference, 2009 (to be presented)
- (3) S. Oh, Y. Hori, "Generalized Discussion on Design of Force-sensor-less Power Assist Control", in Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 492-497, 2008.
- (4) 小柳拓也, 吉田憲吾, 呉世訓, 堀 洋一:「二関節筋を用いた 2 リンクマニピュレータの先端剛性の新しい制御手法の提案」電気学会産業計測制御研究会, IIC-09-120, 2009.
- (5) 吉田憲吾, 島直輝, 呉世訓, 堀洋一:「拡張した可操作性指標による二関節筋を持つロボットアームの評価」平成 20 年電気学会産業応用部門大会, 2-16.