

2関節筋ロボットアームの運動解析とプログラムの実装

苫小牧高専 ○小林 憲弘, 苫小牧高専 吉村 斎, 群馬高専 重松 洋一, 苫小牧高専 阿部 司
要 旨

近年, 人間の四肢における筋の配置をモデルにした2関節筋の研究がなされている. 人間の2関節筋モデルをロボットアームに装備することで, より柔軟で安定な動作を行う事が知られている. 本研究では, 2関節筋ロボットアームを製作するための運動解析における逆動力学解析とプログラムの実装について検討を行う.

1. はじめに

関節ごとに電動モータが直列に接続されたロボットアームでは, 動物のような生体における動作を行う事ができない. ロボットアームが動物のような自然な動作を行うには, 2関節筋を組み込む必要がある.

陸上で歩行する動物には, 隣り合った2つの関節を同時に動かす拮抗2関節筋が存在する. そしてその存在が, 動物特有の柔軟で, 正確かつ素早い動作を実現している事が知られている¹⁾. 本研究では, 2関節筋を含む3対6筋の力を求めるために, モータ代数を適用し, 2関節6筋(以下2関節筋と呼ぶ)モデルの逆動力学解を求めた.

2. 研究の目的

本研究の目的は, 2関節筋ロボットアームを製作するために2関節筋ロボットアームの運動解析を行い, 様々な条件下において各筋がどのような力を発生させているかを解析することである. この目的を達成するために, 運動解析シミュレータを用い, 図1のような2関節筋モデルをマルチリンクシステム(以下MLSと呼ぶ)として定義して, シミュレーションを行う.

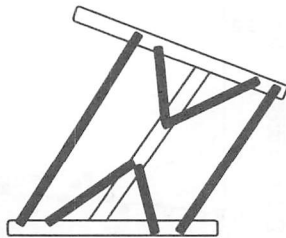


Fig.1 Biarticular six muscles model

3. モータ代数を用いた運動方程式の定式化

図2のようにリンクの角速度を ω とし, リンク上の任意の一点 p の速度を v_p とすると, 形式和 $M_p = \omega + \varepsilon v_p$ をリンクの速度モータと定義する. ここで $p, \omega, v_p, \varepsilon$ を各々, モータの基準点, ベクトル部 $v(M_p)$, デュアル部 $d(M_p)$, デュアル単位という. 基準点を p から q に変更すると次式が成立する.

$$v_q = v_p + \omega \times pq \tag{1}$$

一般に次式のモータ変換則が成立するとき M_p をモータという.

$$v(M_q) = v(M_p) \tag{2}$$

$$d(M_q) = d(M_p) + v(M_p) \times \overline{pq} \tag{3}$$

基準点が p で, $v(M_p), d(M_p)$ の表現座標系が e であるモータを以下, 適宜 M_{pe} と表す.

リンクの加速度モータ A_p 力モータ F_p を次式で定義すると各々, モータ変換則を満たす.

$$A_p = \dot{\omega} + \varepsilon(\dot{v}_p + v_p \times \omega) \tag{4}$$

$$F_p = f + \varepsilon n_p \tag{5}$$

ここで f, n_p は各々, リンクに作用する力, トルクである. リンク i とリンク $i-1$ の速度加速度モータに関して次式のような漸化式が成立する.

$$V^i = V^{i-1} + \dot{q}_i M^{i-1,i} \tag{6}$$

$$A^i = A^{i-1} + V^{i-1} \times \dot{q}_i M^{i-1,i} + \ddot{q}_i M^{i-1,i} \tag{7}$$

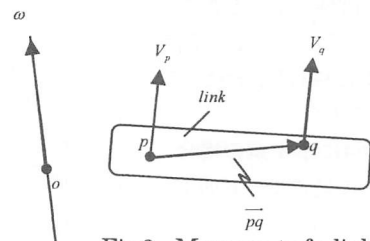


Fig.2 Movement of a link

ここで上添字はリンク番号である. また, $M^{i-1,i}$ は $\dot{q}_i = 1$ のときのリンク i のリンク $i-1$ に対する相対速度モータであり, 対偶モータという.

一方, Newton方程式とEuler方程式は次式のような一本の式になる.

$$F^i = J^i A^i + V^i \times J^i V^i \tag{8}$$

式(6), (7)を用いて逆運動学モデルを構築し, すべての $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ とすべてのリンクの (V^i, A^i) を計算でき, 従って式(8)よりすべてのリンクの F も計算できる.

4. 数値解析

閉リンク機構や冗長な機構を持つMLSの機構学や動力学などをシミュレートするためにモータ代数を用いると, リンクの直動に関するベクトルと回転に関するベクトルとを一つの物理量で表現できるのでオブジェクト指向のコードで

のアブストラクションが容易になる。吉村等は、モータを数として定義して、対偶の速度、加速度、力/トルクを求めるプログラムをC++で実装した²⁾。この研究では、MLSの運動解析を行うために機構の構成要素をクラスとして定義し、リンクと対偶の接続関係を連結リストを用いて表現している。逆力学解析の計算スキームは、MLS構築、MLSのパラメータの設定、速度、加速度、力—モーメントモータ解析の5部分から構成される。

本研究では、2関節筋モデルを解析するために、図1に示した2関節筋モデルを図3に示す筋骨格系リンクモデルに置き換え、逆力学数値解析を行った。また、筋はアクチュエータとリンクに置き換えられるとし、筋の付着や摩擦は考慮しないものとする。機構モデルを剛体リンクと剛体対偶で構成している。各リンクは半径0.05[m]、密度1.0[kg/m³]の円柱とする。リンク1とリンク3の長さをそれぞれ3[m]、リンク9の長さを4[m]、リンク3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11の長さをそれぞれ0.7071067[m]、リンク12, 13, 14, 15の長さを1.5[m]とした。図3において、黒丸で示されている対偶3, 6, 9, 13, 16, 19を直動の能動対偶とした。また、白丸で示されている対偶1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20を回転の受動対偶とした。さらに、リンク1は接地しているとした。

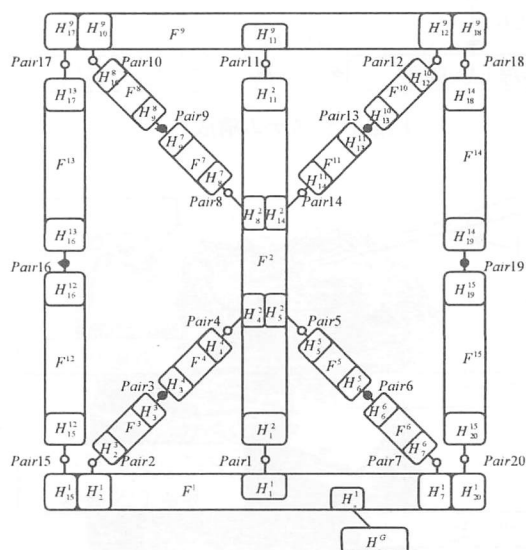


Fig.3 Biarticular musculoskeletal link model

5. 結果と考察

表1に力/トルクを、表2に速度 \dot{q} 、加速度 \ddot{q} を示す。単関節筋モデルの結果については、共同研究者の研究結果³⁾を参照した。結果からわかるように、能動対偶とした対偶3, 6, 9, 13, 16, 19に必要な力が計算されている。力は、計算によって得られた速度 \dot{q} 、 \ddot{q} を入力としてHの自由度に対応する係数 α を全て1.0として求めた。また、表2より、(m n rk)=(36 20 18)となっている。ここで、m,n,rkはそれぞれ速度と加速度モータの成分行列の行数、列数、ランクである。したがって、機構の自由度は2となる。

Table1 force/torque analysis results

Active Pair No.	二関節筋モデル	単関節筋モデル
	τ	τ
3	1.48×10^4	-2.91×10^3
6	-4.52×10^3	3.01×10^3
9	-1.17×10^1	3.60×10^2
13	-3.15×10^2	2.84×10^2
16	1.34×10^3	
19	1.15×10^3	
(m n rk)	(84 106 84)	(60 74 60)
Hdof	22	14

Table2 Velocity and Acceleration analysis results

Pair No.	二関節筋モデル		単関節筋モデル	
	\dot{q}	\ddot{q}	\dot{q}	\ddot{q}
1	-1.000000	-9.916667	1.414214	2.414213
2	-0.500000	-9.708331	0.707107	1.207106
3	0.707106	2.062388	-1.000000	-2.414213
4	-0.500000	-0.208332	0.707107	1.207106
5	-0.500000	-6.958335	0.707107	1.207106
6	-0.707107	-17.265190	1.000000	1.000000
7	-0.500000	-2.958329	0.707107	1.207107
8	0.166667	1.208331	-0.707107	-1.207107
9	-0.235702	-0.098206	1.000000	1.000000
10	0.166667	0.374998	-0.707107	-1.207106
11	0.333333	1.583329	-1.414213	-2.414213
12	0.166666	0.041663	-0.707107	-1.207106
13	0.235702	0.491042	-1.000000	-2.414212
14	0.166667	1.541669	-0.707107	-1.207107
15	-1.000000	-9.638885		
16	1.000000	1.000000		
17	0.333333	1.305551		
18	-0.666667	-8.333335		
19	1.000000	1.000000		
20	-1.333333	-16.666670		
(m n rk)	(36 20 18)	(36 20 18)	(24 14 12)	24 14 12
dof	2	2	2	2

6. おわりに

ここでは運動解析シミュレータを用い、2関節筋骨格系リンクモデルのリンク間の力/モーメントHの一般解と対偶トルク τ を求めた。

参考文献

- 1)熊本水頼, ヒューマノイド工学(2006)
- 2)吉村 齋 重松洋一 久保 洋, マルチリンクシステムの運動解析, 日本ロボット学会誌, Vol. 13 No.2, pp. 257~262 (1994)
- 3)吉村 齋, 学位論文, マルチボディシステムの運動解析(1994)