

GAによる肩肘屈曲伸張運動時の生体二関節筋力特性の同定

長谷川 光 彦*・廣 瀬 彰 久*・塩野谷 明**

GA-Based Identification of Human Bi-Articular Muscle Characteristics in Arm Flexion

Mitsuhiko HASEGAWA, Akihisa HIROSE and Akira SHIONOYA

We propose a GA-based estimation method for human muscle characteristics. We show the performance of the proposed method for isokinetic device attached with two joints link arm. Six main muscle parameters of Hill's two-component model is coded in a genetic code, a computer simulation system is constructed for calculating acting force at grip, and the GA system for evaluating muscle parameters are developed. The dynamic curves obtained by the computer simulation were found to be satisfactorily close to the experimental curves, which show the reliability of the proposed computational model.

Key Words: Genetic Algorithm / Bi-Articular Muscle / Arm Flexion / Human Muscle Characteristics

1 はじめに

運動障害, リハビリ, スポーツトレーニングでは生体筋力特性を知ることが重要である。従来より筋力測定装置が開発・使用されているが, 多くは単関節等速運動時のトルク特性を測定するもので, 一般の運動を定量的に評価することは困難である。それは, 一般の運動では二関節筋が重要な役割をしているが, 二関節筋の特性は生体外に摘出して測定する以外に方法がないためである。

前報¹⁾で遺伝的アルゴリズム (GA) による単関節筋の筋力特性の同定法を提案し, その有効性を明らかにした。本研究では二関節筋測定用のアタッチメントを開発し, 単関節筋力測定装置に装着し, 二関節筋のトルク特性を測定し, GAを用いて二関節筋の筋力特性の同定を可能とする手法の開発を行った。

2 二関節筋の測定方法

二関節筋の筋力を測定するには, 隣り合う2つの関節を同時に使った運動を行う必要がある。そのような運動を行うために, 肩と肘の2つの関節をベルトにより運動的に駆動させる2リンクアーム機構 (Fig. 1) を開発した。このアタッチメントを単関節筋力測定装

置に装着し, 肩関節に相当する部分を測定装置の駆動軸により回転させる。するとベルトを介して, 肘関節に相当する部分が回転し, 肩と肘が同時に屈曲伸張運動する。そして, 手首の部分にセンサーを取り付け, 運動時の手首にかかる作用力を測定することによって二関節筋によるトルク特性の測定を試みた。その概念図をFig. 2に示す。

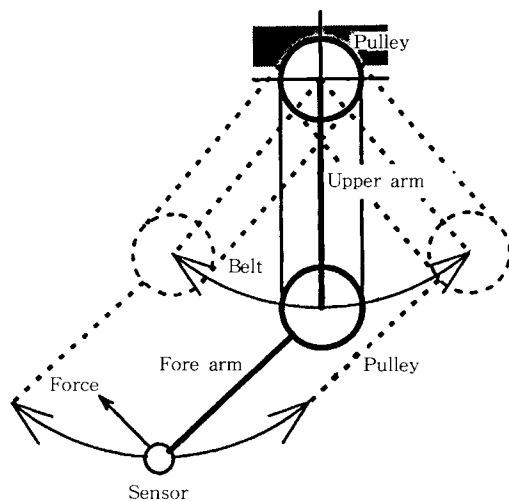


Fig. 1 Mechanism of two joints link arm.

原稿受付: 平成8年6月14日

*長岡技術科学大学計画・経営系

**長岡技術科学大学体育・保健センター

3 解析対象

3.1 二関節筋リンクモデル

単関節筋の筋力は基本的に1つの関節の回転角速度により定まる。一方、二関節筋は2つの関節の回転角速度の影響を受ける。よって、2つの関節の角速度の組み合わせを適切に行えば、単関節筋と二関節筋の筋力特性を分離できることが予想される。

そのため、上腕と前腕からなる2リンク機構を想定し、肩と肘を屈曲させる場合についてのモデル化を行う。モデルとして、静的最大筋力（等尺性筋力）の解析のために提案され、有用性が明らかにされているFig. 3²¹⁾の二関節筋リンクモデルを適用する。ここで、 p_1 ：肩、 p_2 ：肘、 p_3 ：手首、 ℓ_1 ：上腕、 ℓ_2 ：前腕、 r_{j1} ：肩関節の回転半径、 r_{j2} ：肘関節の回転半径、 f_1 と e_1 は肩関節の拮抗単関節筋、 f_2 と e_2 は肘関節の拮抗単関節筋、 f_3 と e_3 は肩関節と肘関節の拮抗二関節筋である。

3.2 筋力モデル

各筋の発生筋力 F_i によって、上腕と前腕に次のようなモーメント M_1 、 M_2 を生じる。

$$\begin{aligned} M_1 &= (F_{f1} + F_{f3} - F_{e1} - F_{e3}) r_{j1} \\ M_2 &= (F_{f1} + F_{f3} - F_{e1} - F_{e3}) r_{j2} \end{aligned} \quad (1)$$

3.3 筋力特性モデル

(1) Hill式による筋力-短縮速度関係

$$\begin{aligned} F_i &= A_i \left\{ \frac{(\eta_i F_{0i} + a_i) b_i}{V_i + b_i} - a_i \right\} \\ b_i &= V_{0i} a_i / F_{0i} \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 筋の活動水準

$$A_i = 1 - A_{si} e^{-t/\tau_i}, \quad A_{si} = e^{-t_0/\tau_i} \quad (3)$$

(3) 筋長の影響

$$\eta_i = 1 - \{(\kappa_i - 1)/0.2\}^2 \quad (0.7 \leq \kappa_i < 1.6) \quad (4)$$

$$\eta_i = \begin{cases} 1 - \{(\kappa_i - 1)/0.2\}^2 & (0.7 \leq \kappa_i < 1.0) \\ 1 - \{(\kappa_i - 1)/0.6\}^2 & (0.7 \leq \kappa_i < 1.6) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 F_i ：筋力、 F_{0i} ：最大等尺性筋力、 V_i ：収縮速度、 V_{0i} ：最大収縮速度、 a_i 、 b_i ：定数、 A_i ：活動水準、 t ：運動開始時からの時間、 A_{si} ：運動開始時の活動水準、 t_0 、 τ_i ：定数、 η_i ：筋長係数、 κ_i ：筋長比（筋長/最適筋長）である。

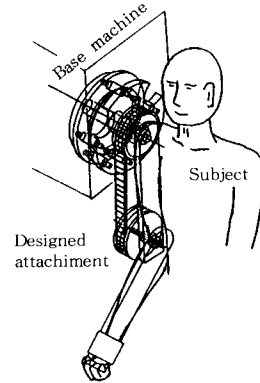


Fig. 2 View of attachment.

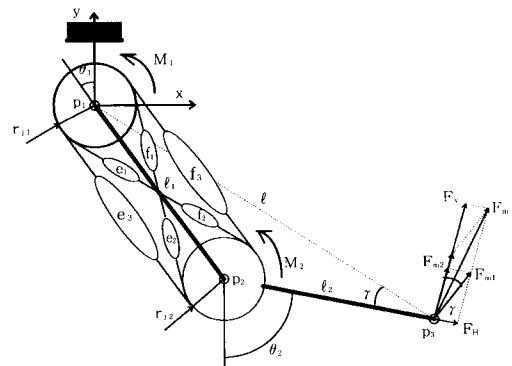


Fig. 3 Simulation model²¹⁾.

3.4 計測筋力

各筋の短縮速度 V_i は次式で表せる。ここで、は各関節の回転角速度である。

$$\begin{aligned} V_{f1} &= -r_{j1} \dot{\theta}_1, \quad V_{e1} = r_{j1} \dot{\theta}_1 \\ V_{f2} &= -r_{j2} \dot{\theta}_2, \quad V_{e2} = r_{j2} \dot{\theta}_2 \\ V_{f3} &= -r_{j1} \dot{\theta}_1 - r_{j2} \dot{\theta}_2, \quad V_{e3} = r_{j1} \dot{\theta}_1 + r_{j2} \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (6)$$

測定部での手首の作用力 F_i は次式で表される。ここで、 ℓ ：肩から手首までの距離、 γ ： ℓ_2 と ℓ のなす角である。

$$\begin{aligned} F_m &= \sqrt{F_v^2 + F_h^2} \\ F_v &= F_{m1} \cos \gamma + F_{m2} \\ F_h &= F_{m1} \sin \gamma \end{aligned} \quad (7)$$

$$F_{m1} = M_1 / \ell, \quad F_{m2} = M_2 / \ell_2 \quad (8)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left\{ \frac{\ell_1}{\ell} \sin(\theta_2 - \theta_1) \right\} \quad (9)$$

$$\ell = \sqrt{\ell_1^2 + \ell_2^2 + 2 \ell_1 \ell_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad (10)$$

4 GAによる逆解析の手法

GAによる逆解析の流れをFig. 4 に示す。以下に詳細を示す。

(1) 筋力特性パラメータのコーディング (Coding)

式(2)から式(5)の筋力特性を表すパラメータ F_{0i} , a_i , V_{0i} , 引き戻し運動時の τ_i (以後 τ_{i1}), 突き出し運動時の τ_i (以後 τ_{i2}) の5個を遺伝子にコーディングする。コーディングは、それぞれのパラメータを浮動小数点の値で表し、1つの遺伝子座に割り当てる。1本の筋に対して F_0 , a , V_0 , τ_1 , τ_2 の5個のパラメータがあり、筋が6本あるので、1つの個体は $5 \times 6 = 30$ 個の遺伝子座で表す。

(2) 初期集団の生成 (Initialization)

n 個の個体からなる初期の集団を生成する。各個体の遺伝子座の値は、以下に示す範囲内の乱数で生成した。

F_0 : 500~4000 [N], a : $0.1F_0 \sim 0.5F_0$ [N],
 V_0 : 0.1~3.0 [m/s], τ : 0.01~1.0

(3) 作用力解析シミュレーション

(Acting force Analysis)

各世代において、それぞれの個体のパラメータによって定まる筋力特性を式(1)から式(10)に代入し、作用力解析シミュレーションを行う。

(4) 評価 (Valuation)

作用力解析で得られた結果と実験値を比較して各個体の評価値を決定する。

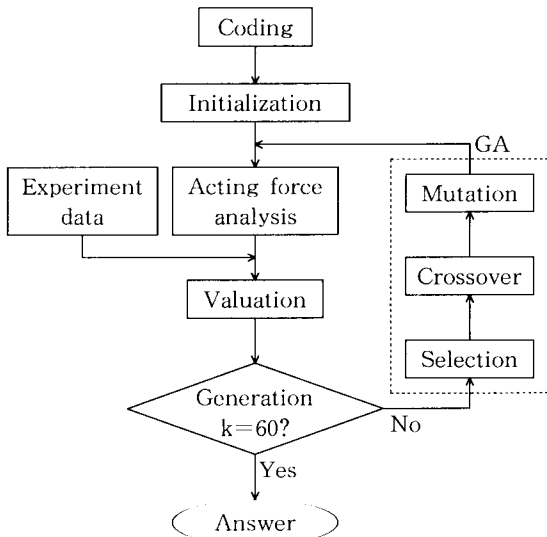


Fig. 4 Flowchart of GA-based inverse analysis.

(5) 選択 (Selection)

k 世代と $k-1$ 世代をあわせた $2n$ 個の個体を n 個にする操作を行う。ここでは、エリート保存戦略を用いた。

(6) 交叉 (Crossover)

集団の中から $n/2$ 個のペアを選択し、一点交叉を行う。ペアおよび交叉位置は乱数で決定する。

(7) 突然変異 (Mutation)

n 個の集団の中から30から50%の割合で突然変異を行う。突然変異は、選択された個体の1つの遺伝子座に対してランダムに値を変える。

(3) から (7) までの操作を k 世代繰り返すことで集団の評価値がよくなり、評価値が最もよくなったときの上述の筋力特性パラメータを解とする。

5 実験結果と同定結果

実験条件をTable 1 に示す。実験はFig. 5 に示すような引き戻し運動 (Fig. 5 (1)) と突き出し運動 (Fig. 5 (2)) の2種類の動作を行った。引き戻し運動は肘を曲げながら肩を後方に回す運動で、筋 f_2 , f_3 , e_1 が収縮する。突き出し運動は肘を伸ばしながら肩を前方へ回す運動で、筋 f_1 , e_2 , e_3 が収縮する。ただし、ブーリー比が1:1の場合、前腕アームの角度は一定に保たれる。Table 1 において、No. 1 は引き戻し運動時の条件、No. 2 は突き出し運動時の条件である。被験者の身体的パラメータをTable 2 に示す。

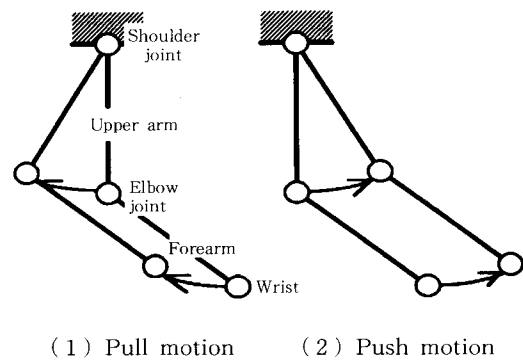


Fig. 5 A push and pull motion of two joints link model.

Table 1 Experimental condition.

No.	ブーリー比 ($\theta_1:\theta_2$)	$\dot{\theta}_1$ [rad/s]
1	1:1 (1:2)	-0.349
2	1:1 (1:2)	0.349

Table 2 Physical Parameters.

Parameter	Value
ℓ_1 [m]	0.29
ℓ_2 [m]	0.25
r_{j1} [m]	0.043
r_{j2} [m]	0.043

Table 3 Identification values.

Muscle	Suffix of muscle i					
Parameter	f_1	f_2	f_3	e_1	e_2	e_3
F_{0i} [N]	2448.6	2411.9	519.7	2102.4	859.4	878.4
a_i [N]	496.2	586.1	15.1	350.1	854.2	409.7
V_{0i} [m/s]	1.928	0.431	1.342	1.054	1.861	2.268
τ_{i1}	0.104	0.046	0.726	0.501	0.191	0.270
τ_{i2}	0.420	1.915	0.187	0.245	0.682	0.131

被験者が引き戻し運動、突き出し運動をしたときの実験結果、および同定したパラメータによるシミュレーション結果をFig. 6, Fig. 7に、同定したパラメータをTable 3に示す。逆解析は個体数60, 世代数60で行った。個体数, 世代数をこのように設定したのは、実験条件が少なく、また、これ以上個体数, 世代数を増やしても解析精度が向上しなかったためである。

6 考 察

実験結果と、GAで同定したパラメータによるシミュレーション結果は、生体筋力特性の同定としてはよく一致した結果が得られた。しかし、同定に使われている実験データは、それぞれの運動で使われている筋の合力であり、引き戻し運動では f_2 , f_3 , e_1 の筋が、突き出し運動では f_1 , e_2 , e_3 の筋が使われる、というように運動によって使われる筋がまったく異なっている。そのため、それぞれの運動での実験データとシミュレーション結果があえば、評価値はよくなってしまうので、同じ実験データを用いて同定を行っても、同定を行うたびに、得られるパラメータが異なる。よって、使われる筋の組み合わせや寄与度の異なる種類の動作について多数の実験を行うことにより、同定パラメータの精度の向上がはかれる。

7 結 論

実験結果と、GAで同定したパラメータによるシミュレーション結果は、よく一致した結果が得られた。

よって、提案手法により二関節筋の筋力特性を表わす F_0 , a , V_0 , τ_1 , τ_2 の5個×筋の本数6本=30個のパラメータが基本的には同定できることを明らかにした。

今後は、同定パラメータの精度を向上するための動作種類の選定が必要である。また、本手法を上肢のみならず、下肢の二関節筋にも適用し、その有効性を確認していくことが欠かせない。

8 参考文献

- 1) 長谷川光彦, 松本博幸, 塩野谷明: GAによる肘屈曲時の筋力特性の同定, 日本機械学会論文集, No.95-1 (1) pp527-528, 1995
- 2) 藤川智彦, 大島徹, 熊本水頼, 山本倫久: 二関節筋機能モデルに基づくシミュレーションモデル, 日本機械学会論文集, No.96-26, pp179-180, 1995

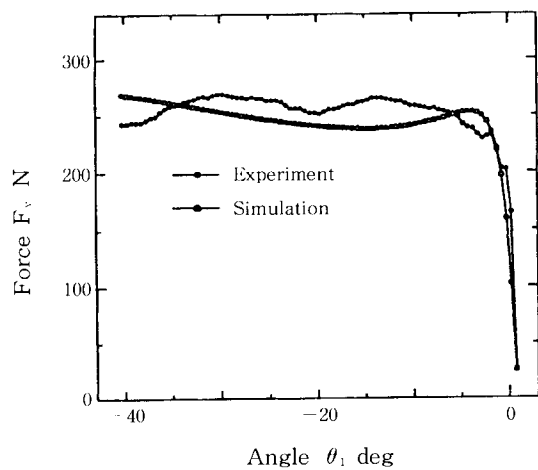


Fig. 6 Force F_v - Angle θ_1 curve ($\dot{\theta}_1 < 0$)

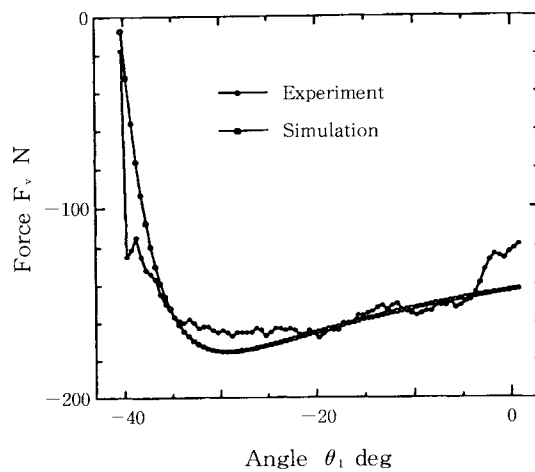


Fig. 7 Force F_v - Angle θ_1 curve ($\dot{\theta}_1 > 0$)