GA による肘屈曲運動時の筋力特性の同定*

長谷川 光彦^{*1}, 松本 博幸^{*2}, 塩野谷 明^{*3}GA-Based Estimation Method for Human Muscle Parameter
in Elbow Flexion

Mitsuhiko HASEGAWA, Hiroyuki MATSUMOTO and Akira SHIONOYA

We propose a GA based estimation method for human muscle characteristics. We show the performance of the proposed method for fly wheel rotating motion with elbow bending. Four main muscle parameters of Hill's two component model are coded in a genetic code, the dynamic analytical system is made, and the GA system for evaluating muscle parameters is developed. The dynamic curves obtained by the computer simulation were found to be satisfactorily close to the experimental curves, which shows the reliability of the proposed computational model. Additionally, the dynamic analysis of constant speed elbow flexion was simulated using the obtained parameter values. An actual experiment using an isokinetic device was performed, and both the simulation and real data were found to be in agreement with each other.

Key Words: GA, human muscle parameter, elbow flexion, fly wheel rotating motion

1. はじめに

生体筋力特性を知ることは、運動障害、リハビリ、スポーツトレーニングの際に重要である。従来より筋力測定装置として、一つの関節を一定回転速度で駆動したときの最大筋力を測定する方法が開発され、一般に利用されている。しかし、運動を評価するのに重要であるが測定できない特性が多く残されている。

一般に、生体筋力特性をHillの三要素モデル⁽¹⁾によって表す場合、特性パラメータとして筋収縮力・筋収縮速度の関係(Hill式)、並列弾性要素(PEC)の作用力・伸び量の関係、直列弾性要素(SEC)の作用力・伸び量の関係が欠かせない。しかし、これらの正確な値を求めるには解剖学的方法によらなければ得られない。さらに、一つの関節に複数の筋が付着して、複雑な動作を行っていることや、二つ以上の関節にまたがる筋が重要な働きをしているので、個々の筋力特性を分離し難くしている。したがって、一つの関節ごとに求めた筋力特性のみでは運動を説明することは困難である。

一方、従来より筋力特性を逆解析手法により求めることは知られていた⁽²⁾。しかし、実用的な逆解析手法がなかったことより、ほとんど行われていなかった。最近、逆解析の新しい手法として遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)⁽³⁾の有効性が注目されている。

そこで、本研究では、このGAを用いて筋力特性の同定を行う新しい手法を提案する。その第1段階として上述の三要素モデルに基づく単関節を屈曲させるときの筋力特性のパラメータを同定することを試みた。ここで古くから研究の多い慣性車輪をワイヤロープを介し肘屈運動により回転させる運動を取上げた。同定した筋力特性値を用いて従来の単関節駆動式の筋力特性をシミュレーション解析し、実験結果と比較した。その結果、おおむね妥当であり、本提案手法が筋力特性の同定に有効であることを明らかにしている。

2. GAによる筋力特性同定システム

提案する遺伝的アルゴリズムによる筋力特性の同定法のシステムを図1に示す。遺伝的アルゴリズムの一般的繰返しの流れの中に、動解析シミュレーションがあるのが特徴である。ある遺伝子がもつ筋力パラメータの値を使って、慣性車輪を肘屈曲動作によって牽引

* 1995年3月31日 第72期通常総会講演会において講演、原稿受付 1995年8月8日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学(〒940 21 長岡市上富岡町1603 1)。

^{*2} (株)島津製作所(〒604 京都市中京区西ノ京桑原町1)。

^{*3} 正員、長岡技術科学大学体育保健センタ。

Fig. 1 Flow chart of GA-based inverse analysis

し、そのときの慣性車輪の回転速度と牽引力の時間変化を求め、実験結果と比較して評価値を付ける。その後、とう汰、交差、突然変異の遺伝的操作を行い、次の解析へ移り同様の作業を繰り返す。

3. 慣性車輪の運動および肘屈曲筋力のモデル化

3.1 解析モデル 慣性車輪を肘屈曲動作によって牽引するときの運動解析モデルを図2に示す。三つの屈曲筋群を上腕二頭筋(p_2-p_3)で代表させた筋モデルが収縮力 F を発生させて、腕の先端の手首(p_1)でワイヤーロープ(p_1-p_6)を引き、慣性車輪(p_7)を回転運動させる。

3.2 運動方程式 図2の運動方程式は次式となる。

$$\ddot{\theta} = \frac{Fl_0 \sin \beta - C_1 - (l_a/r_D)^2 J_a \dot{\theta} \dot{\xi} \sin \xi \cos \xi}{(l_a/r_D)^2 J_a \sin^2 \xi + J_\theta}$$

$$C_1 = (m_1 l_a + m_2 l_{os})g \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $\ddot{\cdot}$ は2回の、 $\dot{\cdot}$ は1回の時間微分を表し、 F は収縮力、 J_θ 、 J_a は肘および慣性車輪の慣性モーメント、 θ は肘屈曲角、 α は慣性車輪の回転角、 β は筋の p_3 での付着角、 ξ は p_1 での腕とロープのなす角である。また、 m_1 と m_2 は手首および腕の質量、 l_a は腕の長さ、 l_{os} は筋の付着距離、 l_{os} は腕の重心距離、 r_D は慣性車輪のロープ巻付けドラム半径、 g は重力加速度である。

3.3 筋モデル 慣性車輪を牽引する際に、筋収縮による肘屈曲動作のみを対象とし、筋を伸展させる動作を対象にしない。この場合の生体筋力モデルは、図3(a)に示す収縮要素CCと直列弾性要素SECからなるHillの二要素モデルとなる。この筋力特性モデル式を以下のようにする。

Fig. 2 Mechanical model of fly wheel rotation motion with elbow bending

(a) Two element model (b) Three element model

Fig. 3 Muscle element model

Fig. 4 3 D plot showing the change in contractile element tension as a function of both velocity and length

(1) CCの収縮特性⁽¹⁾

$$F = A \left\{ \frac{(\eta F_0 + a)b}{V + b} - a \right\}$$

$$b = V_0 a / F_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) CCの活動水準特性⁽⁴⁾

$$A = 1 - A_s e^{-t/\tau}, \quad A_s = e^{-t_0/\tau} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3) CCの筋長係数特性⁽⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} \eta &= 1 - \{(\kappa - 1)/0.2\}^2 \quad (0.8 \leq \kappa < 1.0) \\ \eta &= 1 - \{(\kappa - 1)/0.6\}^2 \quad (1.0 \leq \kappa < 1.6) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\kappa = l/l_m$$

(4) SECの非線形弾性特性⁽⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} dl_s &= 0.0116 r_1 \ln\{(F + 272 r_2)/272 r_2\} \\ r_1 &= l_m/0.316 \\ r_2 &= F_0/1570.0 \\ l_m &= 0.336 \text{ m} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 F_0 は F の最大値、 V は収縮速度、 V_0 は V の最大値、 a は定数、 A はCCの活動水準、 A_s は A の初期値、 t は屈曲開始からの時間、 η は筋長係数、 κ

Table 1 Allowable value range of the estimated parameters

Param. [unit]	Allowable value range
F_0 [N]	1000~3000
a [N]	$0.2F_0 \sim 0.5F_0$
V_0 [m/s]	0.85~1.6
τ [s]	0.01~0.1

は筋長比, l は筋長, l_m は最適筋長, dl_s は SEC の伸びである.

ただし, 筋力 F は V と l により大きく影響される. 図 4 に, $A=1$ のときのようなすを三次元的説明図により示す. また, l_m の値は $\theta=1.4$ rad となるとき $[p_2 \ p_3]-dl_s(F_0)$ の値とする.

4. GA へのコーディング

4.1 筋力特性パラメータのコーディング 3.2

節で定義した筋力特性パラメータ F_0 , a , V_0 , τ を 4 個の遺伝子座に割りあて, 浮動小数点の値で表し, 一つの個体とする.

4.2 初期集団の生成 n 個 (30~100 個) の個体を

初期に生成する. 各個体の遺伝子座の値は表 1 に示す値の範囲内の乱数で発生させる.

4.3 動解析シミュレーション 式 (1)~(5) に

各個体のパラメータ値を代入して動解析を行い, n 個体の屈曲角速度 $\dot{\theta}_s$ とロープ張力 T_s の時間応答データを得る.

4.4 評価値 シミュレーション結果 $\dot{\theta}_s$, T_s の値

と実験結果 $\dot{\theta}_e$, T_e の値の差で二乗和を取り, 各個体の評価値とする. L を負荷の数, M を 1 負荷での実験データ数, N_j をデータ j のデータ数, $\dot{\theta}_{\max}$ を $\dot{\theta}_e$ の最大値, $T_{\max}$ を T_e の最大値とすれば, 評価値 fitness は式 (6)~(9) で表される.

$$\text{fitness} = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \text{fit}_k \quad (6)$$

$$\text{fit}_k = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \left\{ \left(\frac{\Delta \dot{\theta}}{\dot{\theta}_{\max}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_{\max}} \right)^2 \right\} \right] \quad (7)$$

$$\Delta \dot{\theta} = (\dot{\theta}_s)_i - (\dot{\theta}_e)_{ij} \quad (8)$$

$$\Delta T = (T_s)_i - (T_e)_{ij} \quad (9)$$

4.5 選択・交差・突然変異 遺伝子の個体数を 30

として遺伝的操作を繰返し, 世代数が 30 になるまで続ける. 世代交代に際し, 前の世代と今の世代の個体数を合せた $2n$ 個体を n 個体に減ずる選択の操作を行う. 選択の方法には種々あるが, ここでは適応度順位方式を用い, 適応度の少ない個体も生き残れるようにする. その後, 2 本の個体間に対する一点交差の操作,

Table 2 Geometry and physical parameters

Param. [unit]	Value	Param. [unit]	Value
l_a [m]	0.310	J_a [kgm ²]	0.435
l_b [m]	1.953	J_b [kgm ²]	0.073
l_m [m]	0.315	m_1 [kg]	0.59
l_{03} [m]	0.310	m_2 [kg]	0.99
l_{04} [m]	0.043	r [m]	0.065
l_{05} [m]	0.103		0.095
h [m]	0.132		0.125
θ_0 [rad]	$\pi/3$		0.140
θ_b [rad]	0.0	—

Fig. 5 Illustration of measurement

および 1 本の個体に対する突然変異の操作を行う. 突然変異の確率は全個体数の 30~50% と比較的高い値とし, 対象個体の遺伝子座の一つをランダムに選んで, その値に 0.7~1.3 の範囲の乱数を掛けることにより遺伝子の値を突然変異させる.

5. 実験結果および同定結果との比較

5.1 被験者・慣性車輪の諸元・測定装置 身長 165 cm, 体重 65 kg, 年齢 35 歳の男子アマチュア競技選手を被験者とした. また, 測定に使用した実験システムを図 5 に示す. 表 2 に被験者の身体パラメータ, および慣性車輪等のパラメータを示す. 実験では慣性車輪の半径 r を表 2 の 4 種類選び, 肘屈曲角 θ の測定範囲は $\pi/3 \sim 2.0$ rad とした.

5.2 実験結果 実験結果を図 6, 7 に示す. ただし, 同一実験条件で 3 回データを取り, 上下限值と平均値で示している. 0.1 s 以後の実験データの幅は狭く, 生体測定データとしてはよい精度で得られている. ただし, 図 6 で $r=0.095, 0.065$ の測定データで, 初期の $t < 0.15$ s の間は角速度 $\dot{\theta}$ がほとんど上昇せず, その後に急上昇している. これは肘関節の固定方

Fig. 6 Angular velocity plots obtained by Fig. 5 measurement system

Fig. 7 Tension plots obtained by Fig. 5 measurement system

法が不十分だったことが原因と思われる。また、図6で角速度曲線の上昇が後半で鈍くなるのは、被験者の牽引意識が低下したためと思われる。そこで、鈍くならない範囲 $\pi/3 \leq \theta \leq \pi/2$ rad の角速度データで同定した。

5.3 同定結果 上述の実験データを用いて提案手法により同定した筋力パラメータの値を表3に示す。30個体で30世代行い、これを5回繰返し、それぞれで最も評価のよいものを同定値としている。Case 1の同定値を用い、実験と同じ条件でシミュレーションした結果を図6、7に併せて示す(ただし、 $\theta \leq \pi/2$ rad の範囲までを表示)。同定パラメータによる角速度曲線およびロープ張力曲線は実験結果と良く一致し、精度良く同定できていることがわかる。

6. 等速性負荷実験結果との比較

6.1 実験結果 同一被験者について、サイベックスタイプの等速性負荷装置により筋力特性を測定した。負荷装置としては、2種類の代表的制御方式のMYORET(サーボモータ制御式)およびKIN COM(油圧モータ制御式)を用いた。その実験結果を図8、9に示す。肘屈曲角の等角速度として $3.5 \sim 35$ rad/s(常

Fig. 8 Torque plots obtained under the constant angular velocity (using KIN COM machine)

Fig. 9 Torque plots obtained under the constant angular velocity (using MYORET machine)

用単位 $20 \sim 200$ deg/s)の範囲で5種類を選んでいる。

6.2 同定パラメータによる等速性負荷解析 等速性負荷による駆動であっても、始動時の速度上昇期および終了時の速度下降期は角速度を変化させるが、その変化特性は負荷装置に固有のものとなる。そのため、全駆動範囲を対象とするならば負荷装置の慣性特性や速度制特性を考慮した運動方程式を用いるべきである。しかし、ここでの目的は慣性車輪を駆動して生ずる不等速運動により得られた筋力特性値が、等速性運動時にも成り立つことを確認することにある。そこで、等速性を満足する範囲のみを対象とし、一定の角速度に対するシミュレーション解析を行うことにする。そこで、一定の角速度に対するシミュレーション解析を行うことにする。そこで、式(1)において $\ddot{\theta} = 0$ 、 $\xi = \pi/2$ とした式(10)の関節トルク T_q を用いる。

$$T_q = Tl_a = Fl_{04} \sin \beta - (m_1 l_a + m_2 l_{05}) g \cos \theta \quad \dots\dots\dots (10)$$

負荷装置の駆動特性は運動の始動時や終了時には速度変化が大きくあり、また等速性の範囲といえども完全

な等速性になりにくい。そこで、実験時の時間 t ～ 角度 θ の関係を測定し、それを用いて式(10)の解析を行い、関節トルク T_q を算出する。KIN COM は時間 t ～ 角速度 $\dot{\theta}$ のデータを出力するので、運動の始動時から終了時までの角速度特性の測定値を数値積分して t ～ θ 特性を求め、関節トルク T_q を算出する。一方、MYORET はそのような駆動特性を出力できないので、やむをえず KIN-COM の角速度特性で代用した。なお、ここで取上げた二つの負荷装置の違いは基本的には角速度の制御方式の違いのみである。KIN-COM は油圧モータ式であり、流量制御により定速性を実現しているが、始動時に蓄えられている油圧エネルギーを利用して短時間内に定速性を得ている点に特徴がある。しかし、立上がり時の角速度特性に山谷状のオーバシュートを伴う。一方、MYORET はサーボモータを使用しているので立上げ特性はスムーズな台形状をしているが、出力パワーが油圧式より低く、定速になるまでに時間を要する。そのため、低速度条件での実験では初期の測定駆動トルクが定速時より過大な値になりやすい欠点がある。よって、解析結果と実験結果の比較にあたっては、定速性の成り立つ範囲で行う必要がある。そこで、本実験においては、KIN-COM では 1.15 rad (66 deg) 以上、MYORET では 1.3 rad (75 deg) 以上で比較することとした。

6.3 実験結果との比較 表2の中の Case 1 の同定値を用いたシミュレーション解析の結果を、実験結果の図8, 9に併せて示している。肘屈曲角 θ が

1.3～1.66 rad (75～95 deg) の範囲では、解析結果が実験結果とよく一致している。よって、慣性車輪の運動から同定した筋力パラメータ値が、まったく違った等速負荷運動においても駆動特性を予測できるといえる。

7. 考 察

7.1 同定値の偏差 表3の5組の同定値を比較すると、 F_0 および τ の違いは約7～9%程度であるが、 a および V_0 の違いは約50～30%とかなり大きい。しかし、同定値を Hill 式のグラフ図10で比較すると、 $F > 500$ N の範囲ではかなりよく一致した曲線である。大きな違いがあるにもかかわらずよく一致したことから、パラメータ値に偏差があっても、 a と V_0 の値の組合せが適当な関係にあれば、対象の実験データを十分説明する Hill 式となることが推察される。そこで、同定値の a と V_0 の関係を調べたところ次式の直線関係のあることがわかった。

$$V_0 \approx (2.050 - a) / 1.520 \quad \text{..... (11)}$$

7.2 筋力特性同定問題の多峰性 式(11)が、本

Fig. 11 3 D plots showing the multiple peaks of inversed fitness on the $a - V_0$ plane

Table 3 Estimated values

Param[unit]	Estimated values of Hill's parameter				
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
F_0 [N]	1718	1816	1810	1797	1696
a [N]	701.8	431.9	550.2	708.5	951.6
v_0 [m/s]	0.943	1.110	0.957	0.832	0.777
τ [s]	0.038	0.035	0.035	0.036	0.035

Fig. 10 Shortning velocity muscle force plots using estimated values

Fig. 12 Shortning velocity muscle force plots under the fly wheel rotation with elbow bending

Fig. 13 Tilted bends showing the prevention of gravitational body force

研究の同定問題とどのようなかわりをもっているのかを少し検討する。このために、実験的要因を含まない筋モデル式(2)~(5)のみを用いて筋力パラメータ値の同定を行う探索空間の適応度(fitnessの逆数)のようすを調べた。その一例として、 $F_0=1700\text{ N}$, $a=700\text{ N}$, $V_0=1.00\text{ m/s}$, $\tau=0.035$ を解とする場合の、 a と V_0 の探索平面と適応度の成す探索空間を図11に示す。多数のピークが式(11)の直線上で連なる多峰性の問題であることがわかる。そして、本来は適応度が ∞ となる a と V_0 の値の組合せが唯一解である。しかし、ばらつきのある実験データを複数個用いて同定するので、実際には実験データを平均的に満たすパラメータ値を同定することになる。そのような場合には適応度(山頂)は大幅に低下し、探索空間はある似通った高さの山が複数直線上に連なった山脈を形成することになる。このような探索問題であるために、複数の山頂近くの解が複数個得られ、そこで同定された値は一見ばらついていようであるが式(11)をほぼ満たし、Hill式の曲線が同じようになることが理解できる。よって、本手法では複数の準最適解が得られる。ただし、準最高解は同定に用いた実験内容の範囲でしか保証されない。そのため、実用化に際しては解の適用範囲を明示することも必要である。

7.3 CCの収縮速度 V と収縮力 F の時間推移

図12はシミュレーション解析によるCCの収縮速度 V と収縮力 F の時間推移曲線である。曲線は前半の活動水準 A が0.1~1.0に急上昇している時期と、後半の $A \approx 1.0$ に従う時期に分けて整理できる。前半では、最初は慣性車輪がほとんど動かず、活動水準の急上昇によりまずCCが高速収縮して V が急上昇し、

それに伴いSECが伸張する時期がある。その後は、筋収縮力 F が上昇し出すが、SECの伸張特性が対数関数的であるために、収縮速度 V は緩やかに低下し、曲線は F_0 に向かう。この曲線は慣性車輪の半径 r によらずほとんど同じ軌跡である。

後半に入ると、慣性車輪が大きく動き、CCの収縮速度が上昇に転じ、 $A \approx 1.0$ のHill式の曲線に乗ると左上方に向きを変え、収縮力 F が低下しながら収縮速度 V を増す挙動を示す。以上より、Hill式のパラメータ同定は後半の実験データを用いて決定されていることがわかる。

7.4 同定値によるHill式の曲線の偏差

7.1, 7.2節で同定値の偏差の原因を考察した。しかし、図10で明らかのように、同定値によるHill式の曲線が $F \leq 500\text{ N}$ の範囲で精度がよくない問題が残されている。そこで、その理由を図12から考察すると、以下のことがいえる。Hill式のパラメータ同定に有効なデータは、7.3節で述べた後半時期のみである。そして、慣性車輪の半径 r を0.065~0.140で4種類に取っているが、それらの挙動は図12で $A \approx 1.0$ 上の実線の範囲、すなわちHill式の曲線の右下半分の $F=650 \sim 1400\text{ N}$ に限られている。したがって、実験データの無い $F \leq 500\text{ N}$ の範囲で同定精度が低いのはしかたのないことである。使用した慣性車輪ではこれ以上高速域の運動は実施しがたい。しかし、低慣性の慣性車輪を開発して実験したり、空振りによる実験を行い、低負荷・高速運動のデータを得れば解決できる。ただし、この範囲の高速運動は一般にまれで、このままでも特に問題とはならない。

7.5 低回転角・高回転角での誤差

図8, 9の等速性負荷において、肘屈曲角 θ が75 deg以下の範囲ではシミュレーション解析結果のずれが目立つ。これはオーバーシュートの無いMYORETの角速度特性にオーバーシュートの見られる過渡応答のKIN COMのデータを用いたためとみなせる。また、肘屈曲角 θ が95 degを超える範囲でMYORETの実験結果が大きいのは、肘屈曲角が90 deg以上になると体重を利用して負荷するためである。一方、KIN COMではこの対策として図13のような30 degの三角台を肘の下に当てて、上体を30 deg前かがみにセットする対策を行ったので、体重負荷の影響は見られない。

7.6 同定された筋力特性の利用

慣性車輪の運動で同定した筋力パラメータ値が、等速負荷運動での駆動特性を予測可能であるということは、同じ関節の他の運動に対しても定量的評価が可能であり、はん用性を有している。

実際の肘屈曲筋は上腕二頭筋(二関節筋)、上腕筋(単関節筋)、腕橈骨筋(単関節筋)の3本からなる。本研究では、肘の単関節を運動する場合を対象とするので、1本の単関節の等価筋に置き換えて、その筋力パラメータ値を同定している。したがって、同定される筋力パラメータは実在しないが、予測する関節の駆動特性は同等である。

ただし、もし二つの関節を同時に動かす運動を対象とする場合には、単関節筋と二関節筋に分けて二つの等価筋モデルを考慮することが必要であり、今後の課題である。

8. 結 論

GAを用いた逆解析手法による筋力特性の同定法を提案し、慣性車輪を肘屈曲運動により駆動するときの筋力特性を同定するシステムを試作し、実験的に検証し、以下の結論を得た。

(1) 慣性車輪を駆動したときのロープ張力と肘屈曲角の角速度の時間データをシステムに入力すれば筋力特性パラメータ値の同定が容易にできることを示した。

(2) 同定値を用いて行ったシミュレーション結果は、実験結果とよく一致を示し、本手法の妥当性を明らかにした。

(3) 得られた同定値を用いて等速運動シミュレーションを行い、等速性負荷装置の実験により得られた実験トルク特性曲線と比較した結果、両者はよく一致することを明らかにした。

(4) 上述の結果より、本手法で同定される筋力特性は別の運動動作に対しても定量的予測が可能であり、同定値がはん用性を有しているとみなせる。

(5) 同定筋力パラメータのうち、Hill 式の定数 V_0 と a の間に直線関係がある。

(6) 誤差のある複数の実験データを平均的に満たすパラメータ値を同定するので、最適解は求められず、準最適解が得られる。

(7) 問題の探索空間が V_0 と a に関して多峰性を有するので、 V_0 と a の値が飛び飛びの直線関係を有する複数の解が得られる。

(8) Hill 式のパラメータ同定は実験データの後半を用いて決定されている。

(9) 同定されたパラメータの精度は、用いた実験データの範囲内では良いが、それを超える部分では精度が低下する傾向にある。

本研究にあたって慣性車輪の実験と解析の助力をいただいた東大保健体育・小嶋武次先生に感謝する。また、筋力測定でお世話になった新潟大学の牛山幸彦・八坂剛史・橋本修諸先生(MYORET)、および燕労災病院の野口潔氏、田中護氏、ならびにジャパンチャタヌガ(株) 齊藤貞宏氏(KIN·COM)に深く感謝する。万能筋力測定装置の借用では竹井機器にお世話になった。

文 献

- (1) 機械学会編, 生体力学, (1991), 253-261, オーム社.
- (2) Rawlins, G. J. E., *Foundation of Genetic Algorithms*, (1991), 1-10, Morgan Kaufmann Publishers.
- (3) Hill, A. V., The heart of shortening and the dynamic constants of muscle, *Proc., R. Soc.*, **126**(1938), 136-195.
- (4) 小嶋武次, 跳躍動作における伸張性筋収縮の意義, *J. J. SPORTS SCI.*, **9** 3(1990), 123-129.
- (5) 長谷川光彦・ほか2名, 生体筋による自転車エルゴメータ駆動シミュレーション, *機論*, **60** 579, B(1994), 3732-3740.
- (6) 小嶋武次, 慣性負荷に対するヒトの肘屈曲中の肘屈筋群の働き, *J. J. SPORTS SCI.*, **6** 10(1987), 648-656.
- (7) 吉福康郎, スポーツ上達の科学, (1990), 47, ブルーバックス (ただし, x, y, z 軸の表記を改変).