

物体投げ上げ動作における手指運動の解析

Analysis on human hand motion in tossing an object

○門間好功*, 佐藤友昭*, 長谷秀之介*, 梶川伸哉*

○Yoshinori Monma*, Tomoaki Sato*, Hidenosuke Hase*, and Shinya Kajikawa*

*東北学院大学 工学部 機械知能工学科

*Dept. of Mechanical Engineering and Intelligent Systems, Tohoku Gakuin University

キーワード: 手 (hand), 関節運動 (joint movement), 筋電位 (EMG), 関節剛性(joint stiffness), 投げ上げ(tossing)

連絡先 〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-1-3-1

東北学院大学 工学部機械知能工学科 梶川伸哉

Tel/Fax : 022-368-7124 E-mail : kajikawa@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

近年, 人と共存し, より高度な作業の代行を目的としたヒューマノイド型のロボットの開発が盛んに行われている¹⁾. これらのロボットの構造は, 関節駆動に人工筋の拮抗配置を用いるなど, 人の筋骨格構造を手本としたものが多く見られる. このような構造は人と同じように関節運動とその運動特性 (剛性等) を独立に制御できる利点を持ち²⁾, 人と同じような器用な運動の実現を期待させるものである.

しかしながら, その特徴を利用した動的な器用さの実現は未だ研究の段階と言える. これは, 高速に関節を制御することに対する機械的な応答性能の限界と, 関節の運動と特性を如何に協調して制御するかという制御法構築の難しさが要因となっていると考えられる.

本研究では, 後者の関節運動と関節特性の制御方法を構築するための手がかりを得ることを目的とし, その第一段階として, 動的な人の手指運

動の解析を行う.

動的な手腕系の運動においては, これまでスポーツ運動解析の分野で盛んに行われている. 例えば, 投球動作などでは関節の運動開始のタイミングを体幹側から末端側へとずらすことにより, 手先の速度を高速化させる運動連鎖³⁾や, 関節筋の伸縮機能を利用したスナップ動作⁴⁾など, 人の持つ筋肉の特性と関節構造の利点を生かした運動スキルが報告されている. また, 筋電位の計測を行い, 筋活動の面から運動スキルの評価しているものもある⁵⁾.

本研究では, 手首と指の運動により行われる, 物体の投げ上げ動作を取り上げ, その動作中の両関節の運動について解析を行う. 特に, 両者の運動タイミングや関節駆動筋の筋電位計測から関節構造や筋の特性を巧みに利用した運動の特徴を解析し, さらに骨格筋のモデルから動作中の各関節の剛性変化の違いについて推察する.

2. 実験方法

今回解析の対象とする動作は、振り子の先端に取り付けられた錘を指先に載せ、手首と指関節の運動により、上方に投げ上げる動作である。この動作は二関節の協調運動と関節特性の適切な制御により実現されるものと考えられる。以下に実験方法の詳細について示す。

2.1 実験装置の概要

実験装置の概要を Fig.1 に示す。実験装置は剛体振り子、手首関節、指根元関節（以下 MP 関節と呼ぶ）の運動を計測する光学式モーションキャプチャー、関節駆動筋の活動を計測する筋電位計によって構成される。また、物体と指の間の力の計測を行うため、両者の間には力センサが挿入されている。

次に、各部の詳細について説明する。振り子は長さ 0.6m のものであり、先端には 440 g 或いは 880 g の 2 種類の物体が取り付けられる。モーションキャプチャーは 300Hz のサンプリング間隔で、指先、MP 関節、手首関節、前腕基準位置の計 4 箇所の計測を行う。また、それらの位置計測を基に MP 関節角度(θ_1)、手首関節角度(θ_2)の算出を行う。これらの角度は、Fig.3 に示すように各関節の初期角度からの変化量として定義する。

次に、筋電位センサは、湿式タイプの電極を用い、Fig.2 に示すように手首関節、MP 関節の屈曲、伸展運動に寄与する尺側手根屈筋(ECUM)、長橈側手根伸筋(ECRLM)、浅指屈筋(FDM)、総指伸筋(EDM)の 4 つの筋肉の筋電活動を計測する。電極の取り付け位置を Fig.2 に示す。これらの筋電位波形の計測は 1ms 毎に行われ、同時に、遮断周波数 4.8Hz の 2 次ローパスフィルタを用いた積分波形も取得する。

2.2 実験条件

実験は二種類の重さの物体を投げ上げる動作について、手首関節を拘束し、MP 関節運動のみ

で行う場合と手首関節と MP 関節の双方を同時に利用する動作の二つを行った。つまり、錘の種類と使用関節の種類組み合わせで合計 4 種類の実験を行うことになる。

- <Exp. 1> 物体(440g), MP 関節のみ
- <Exp. 2> 物体(880g), MP 関節のみ
- <Exp. 3> 物体(440g), MP 関節+手首関節
- <Exp. 4> 物体(880g), MP 関節+手首関節

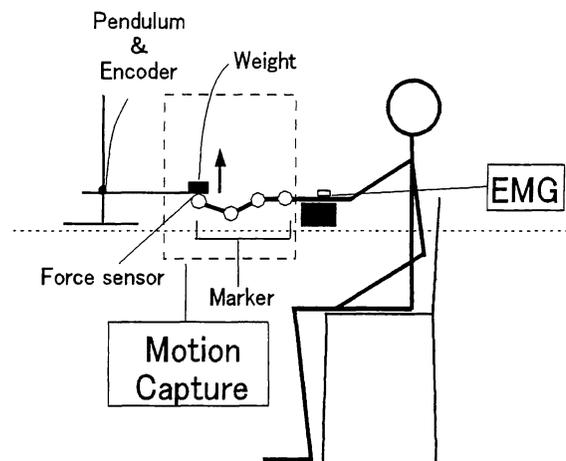


Fig.1 Experimental setup.

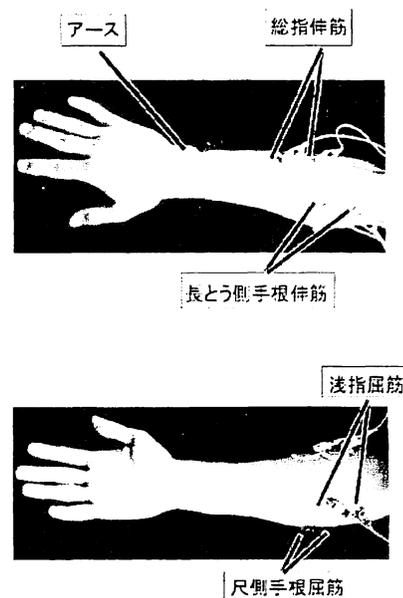


Fig.2 EMG sensor positions.

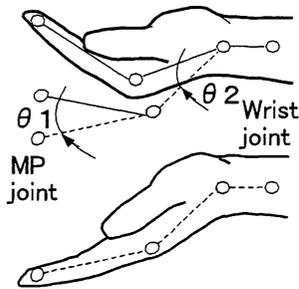


Fig.3 Definition of joint angle.

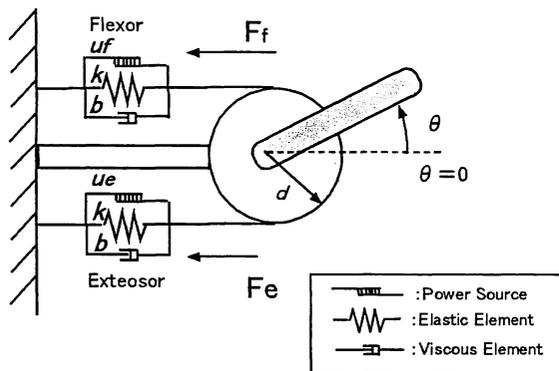


Fig.4 Model of joint impedance

実験の手順はまず、初期の姿勢として腕固定台に腕を載せ、指先から前腕までの水平姿勢を保つ。

次に、振り子が水平姿勢になる位置で指先に振り子先端の物体が載るように固定台の高さを調節する。その後、できるだけ高く物体を投げ上げるよう指示を出し、被験者自身のタイミングで投げ上げ動作を行ってもらった。疲労の影響を考慮し、<Exp. 1>~<Exp. 4>の実験は休憩を入れながら3回ずつ行ってもらった。

被験者は男子大学生3名であり、いずれも利き腕である右手を用いて実験を行ってもらった。

3. 双線形モデル

今回は、関節運動と関節剛性の両者を考察の対象とする。ここでは、その考察に用いるモデルについて述べる。関節の運動特性は筋の特性とその配置が大きく関与していると考えられ、これまで

に関節駆動筋のモデルとして、Bahler⁹⁾や藤井ら⁷⁾の2要素モデル、伊藤らの双線形モデル⁸⁾などが提案されている。筋は力発生要素としての機能に加え、筋の活動レベルに合わせてその粘弾性特性を調節する機能も持ち合わせている。伊藤らの提案する双線形モデルはその特徴を簡潔に表しており、今回はこのモデルを用いて簡便に関節の特性の評価を行うことにする。

Fig.4に1自由度を用いて示した、双線形モデルの概要を示す。

この系で示されるリンクの運動は以下の式で表される。

$$I/d \cdot \ddot{\theta} = (u_f - u_e) - (u_f + u_e)(k\theta + b\dot{\theta}) \quad (1)$$

ここで、 I 、 d はそれぞれリンクの慣性モーメント、モーメントアーム長、 u_f 、 u_e は屈筋と伸筋の収縮力である、また、 θ は関節角度であり、 k 、 b は定数である。

この式からわかるように、関節周りの粘弾性特性は、屈筋と伸筋の収縮力の和($u_f + u_e$)に比例する形で調節される。よって、収縮力 u_f 、 u_e を推定することで関節の粘弾性の変化(以降、これを単に関節剛性の変化と呼ぶ)を推測することが可能になる。筋の収縮力と筋電信号の大きさの対応については、筋の収縮速度等の条件も考慮すべきであるが、ここでは、小林ら⁹⁾の方法を用いて、静的な負荷実験から簡便に筋電位信号から収縮力 u_f 、 u_e を推定する。

まず、筋の収縮力 u_f 、 u_e は積分筋電位のレベル r_f 、 r_e に比例すると仮定する。

$$u_f = g_1 \cdot r_f \quad (2)$$

$$u_e = g_2 \cdot r_e \quad (3)$$

ここで、 g_1 、 g_2 が収縮力と積分筋電位のレベルを調節するパラメータとなる。このパラメータを同定は、一定姿勢を保った状態($\theta = \dot{\theta} = \ddot{\theta} = 0$)で関節に一定の負荷トルクを加え、その際観測さ

れた積分筋電位のレベルと負荷トルクの関係から求めることができる。

4. 実験結果および解析

4.1 関節運動の計測結果と考察

まず、<Exp. 1>～<Exp. 4>の各実験で計測された振子の最大振り角の平均値を Fig.5 に示す。この図から、手首を利用できる動作<Exp. 3>、<Exp. 4>の方が、各被験者とも、より高い投げ上げができていことがわかる。また、物体の重量によって振り上げ角が減少する傾向もあることがわかる。

次に、関節運動の典型例として<Exp. 2>、<Exp. 3>の実験において計測された MP 関節、および手首関節の時間変化を Fig.6、Fig.8 に示す。これらの関節角は初期角度からの変位量で表している（時計回りを正）。さらに両実験における振子の運動を Fig.7、Fig.9 に示す。これら、Fig.6～Fig.9 中には、物体と指先の間にかかる力センサによる接触力の計測結果も合わせて表示している。

まず、Fig.6、Fig.8 から、投げ上げ動作は各関節の背屈運動から開始されることがわかる。これは背屈運動により、事前に屈筋の伸展状態を作りあげ、投げ上げ時にその収縮反応を指先の加速運動に利用しようとするスキル動作であると考えられる。また、関節の運動域を広げ、加速区間を長くする意味もあると考えられる。

その後、Fig.6 に示す MP 関節のみの運動の場合、背屈後、一気に屈曲運動を行い、投げ上げを完了させていることがわかる。力センサの値からは MP 関節の屈曲最大位置で物体が指先から離れていることが確認される。

一方、Fig.8 に示す手首関節も利用する場合は、MP 関節の屈曲運動は、途中で一旦停留する箇所（図中矢印地点）確認される。この位置の直前では

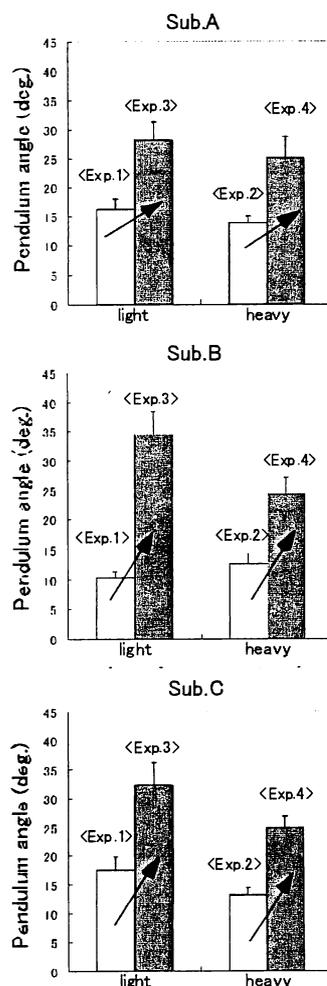


Fig.5 Maximum values of swing up angle

物体と指先の接触力が最大となり、直後には、物体が指先から離脱する。つまり、動作中に最も関節への負荷の状態が変化する地点に相当する。この特徴は他の被験者においてもよく確認されている。この点については後の筋電位波形との関係で考察を加えたい。

また、手首関節の運動は MP 関節の屈曲運動に同調し、ほぼ等しい速度変化で運動が生成されていることが確認される。投球動作中に見られる上腕、前腕、手先の間の運動連鎖とは異なる形態である。これは、錘を含めた指部と手首部の慣性モーメントの差が小さく、手首から指といった運動の伝播が生じにくい状況であることを示してい

と考えられる。その代わりに背屈運動を生成し、指先の速度を確保することが行われると考察される。

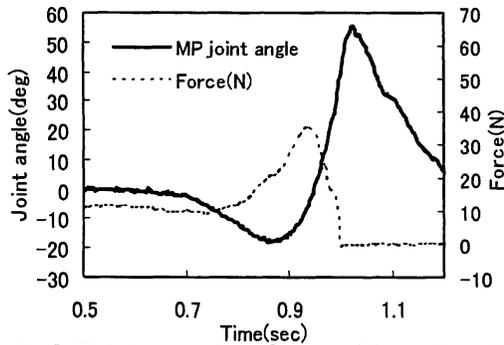


Fig.6 MP joint motion observed in <Exp. 2>

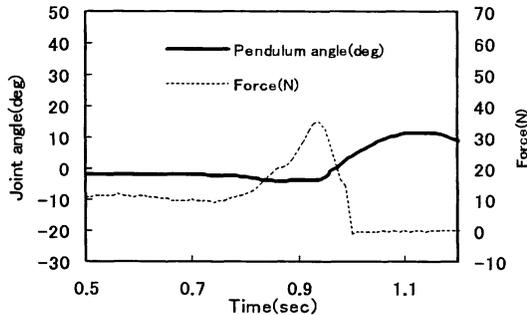


Fig.7 Pendulum motion observed in <Exp. 2>

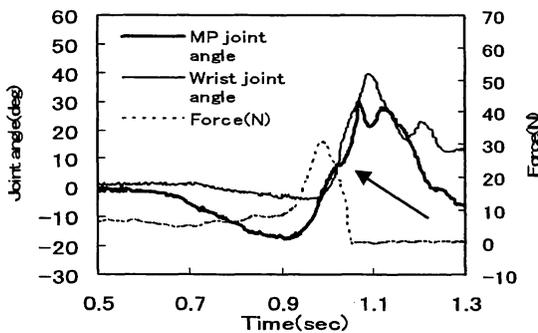


Fig.8 Each joint motion observed in <Exp. 3>

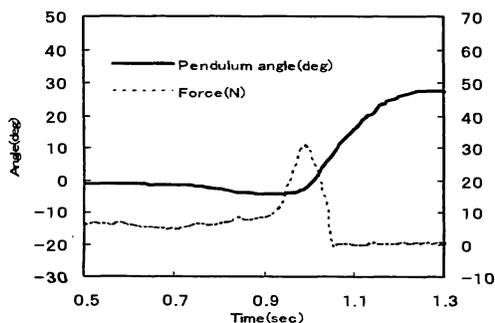


Fig.9 Pendulum motion observed in <Exp. 3>

4.2 筋電位信号の計測結果と考察

Fig.7 に示した<Exp. 3>実験時の関節運動に対する筋電位波形およびその積分波形を Fig.10, Fig.11 に示す。これらの図では、上から順にMP関節運動に寄与する浅指屈筋(FDSM), 総指伸筋(EDM), 手首運動に関与する尺側手根屈筋(FCUM), 長橈側手根伸筋(ECRLM)が表示されている。

まず, Fig.10 より, MP 関節の屈曲運動の開始と共に FDSM の活動レベルが上昇し, 遅れて EDM のレベルが上昇することがわかる。

一方, 手首運動に関わる FCUM, ECRLM の比較では FCUM の活動レベルが投げ上げ動作全般を通して高く, ECRLM は活動レベルが上昇, 下降という変化を示していることがわかる。手首の場合は手先全体を常に支持し続けるため屈筋活動が常に高いと考えられる。

また, これらの傾向は, 筋の収縮力の変化を表す積分筋電位波形でより明確に確認できる。(Fig.11 参照) 積分筋電位は筋の収縮力と関係するといわれている。また, 屈筋と伸筋の収縮力の差が関節の駆動トルクとして作用するため, この活動レベル上昇時刻のずれは関節運動を生成されるためのものと考えられる。

次に, 筋電波形と関節運動の関係について詳しく対応関係を検討してみる。力センサにより計測した物体と指との接触力と筋電位波形との関係では, 屈筋群の筋電レベルのピークが接触力のピーク位置とほぼ一致することが確認できる (Fig.9 と Fig.10 の時刻 1.0 s 付近)。また, その直後に EDM の活動レベルが一時的に増加することが確認できる。これは, 負荷の増大に対して伸筋 EDM の反射的な収縮活動が生じたものと思われる。

つまり, 負荷増大に対する関節剛性の増加調節が行われた結果であると考えられる。このことにより MP 関節運動の一時的な停留が生じたもの

と考えられる。この EDM の活動は、物体が指先から離脱した後は消失していることから反射的な反応と考えられる。

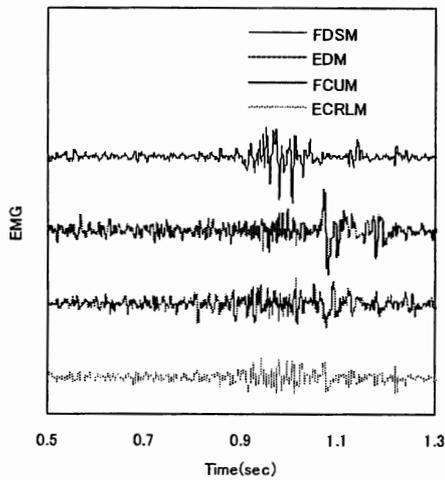


Fig.10 EMG signal measured in <Exp. 3>

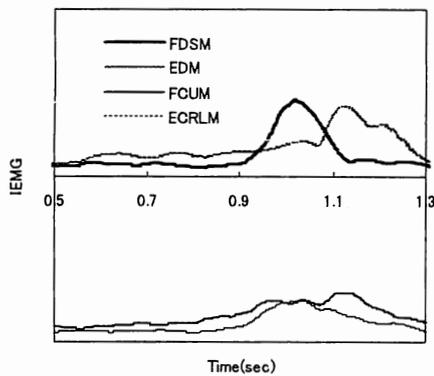


Fig.11 IEMG signal measured in <Exp. 3>

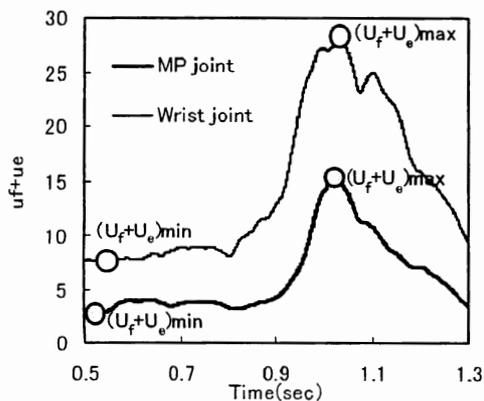


Fig.12 Index u_f+u_e of MP and wrist joint observed in <Exp. 3>

最後に、双線形モデルをもとに運動中の関節剛性の変化を推測した結果の一例を Fig.12 に示す。これは、各実験における積分波形から求めた屈筋レベル r_f 、伸筋レベル r_e と第3章に示した方法から、筋電位レベルに見合った収縮力 u_f 、 u_e を求め、その和を持って関節スティフネスの変化を評価したものである。

また、すべての評価波形についてその最大値 $(u_f+u_e)_{max}$ を最小値 $(u_f+u_e)_{min}$ で割った値 α ($\alpha = (u_f+u_e)_{max} / (u_f+u_e)_{min}$) の平均値を Fig.13 に示す。つまり、これは、動作中の剛性の変化の割合を示すものと考えている。Fig.12 の結果から、指先にかかる力の増大とともに各関節の剛性指標 u_f+u_e も増加することがわかる。

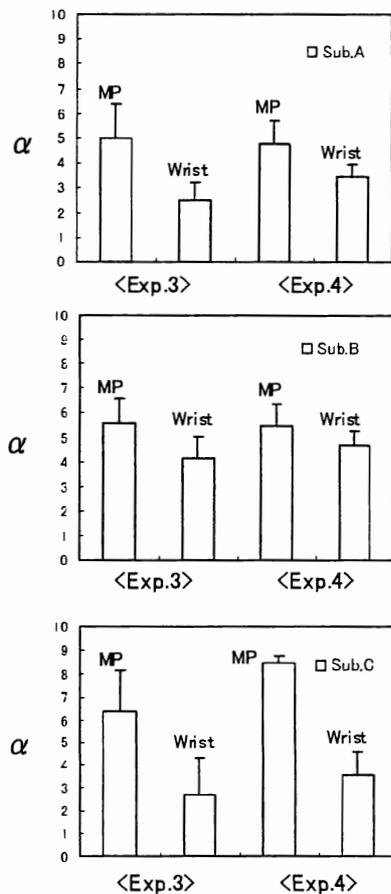


Fig.13 Ratio of maximum and minimum values of (u_f+u_e)

一方, Fig.13 に示す指標 u_r+u_e の変化率から, 各被験者とも手首関節よりも MP 関節の指標の変化幅が大きくなっており, MP 関節の剛性が動作中に大きく変化していることが推察される.

5. おわりに

本研究では, 物体の投げ上げ作業における MP 関節と手首関節の運動について解析を行った. その結果, 以下のことが確認された.

- 1) 投げ上げ開始直前に, 関節の背屈運動が確認された. これは筋の収縮反応を投げ上げ動作(屈曲運動)に利用するためと考えられる.
- 2) MP 関節の運動中に停滞する部分の確認された. これは, 負荷の増大に対する伸筋の反射的な作用と考えられ, 関節剛性を一時的に高めていると考えられる.
- 3) 双線形モデルから推察した収縮力を用いた剛性変化指標は, 物体の重量に伴い増加することが確認された.

また, MP 関節の指標がより大きく変動することが確認され, MP 関節の剛性調節が投げ上げ運動に大きく関係していることが推察された.

今後は, 剛性調節の特徴, および調節方策をより詳しく解析する. また, 物体の受け取りから投げ上げと推移する運動を取り上げ, 関節運動, 剛性特性の変化について解析する予定である.

参考文献

- 1) Koh Hosoda, Takashi Takuma, Atsushi Nakamoto, and Shinji Hayashi : Biped Robot Design Powered by Antagonistic Pneumatic Actuators for Multi-Modal Locomotion . Robotics and Autonomous Systems, Vol.56, No.1, 46/53, (2008).
- 2) 田中大資, 中村太郎: 人工筋肉マニピュレータの関節剛性制御, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集(CD-ROM), 1A2-M02, (2009)
- 3) 阿江通良, 藤井範久: スポーツバイオメカニクス 20 講, 119/130, 朝倉書店(2002)
- 4) 三浦健, 関子浩二, 鈴木章介, 清水信行: バスケットボールにおける長距離シューターの動作分析, 鹿屋体育大学研究紀要, 32 号, 11/18, (2004).
- 5) 森田淳一, 木村聡貴, 西條直樹, 五味裕章: 打撃動作における上肢筋制御メカニズムに関する考察, 信学技法, NC103(734), 103/108, (2004).
- 6) A.S.Bahler : Modeling of Mammalian Skeltal Muscle, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, BME-15(4), 249/257, (1968).
- 7) 藤井克彦, 赤沢堅造: 筋収縮の力学とモデル, 日本機械学会誌, 76(656), 1044/1049, (1973).
- 8) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, 133/135, 計測自動制御学会, (1991).
- 9) 小林秀明, 池浦良淳, 猪岡光: 追従制御における操作性の筋電位を用いた評価, 人間工学会誌, 34(2), 89/95, (1998).