

ヒト3関節腕の到達運動における手関節制御戦略とそのモデル

Hand-Joint Control strategy and its model in Human Three-Joint Arm's Reaching Movements

○ 松井利一（群馬大） 鈴木琢巳（群馬大） 古屋友博（群馬大） 中沢信明（群馬大）

Toshikazu MATSUI, Gunma University Takumi SUZUKI, Gunma University
Tomohiro FURUYA, Gunma University Nobuaki NAKAZAWA, Gunma University

Abstract: This research clarifies the hand-joint control strategy based on measuring the hand-joint angle and computing all the external torques acting on the hand joint during reaching movements, and moreover, it considers the biological relation between the actual hand-joint control mechanism and its feedback control model. Consequently, the following results are obtained: (1) the hand-joint angle hardly changes during unconstrained reaching movements; (2) the sum (i.e., resultant torque) of the hand-joint torque and the inertia torque integrated over the entire movement approaches zero; (3) the mechanism of the feedback control model corresponds to the biological mechanism that the hand-joint torque is generated by summation of two torques based on agonist and antagonist muscles in co-contraction. These results suggest that hand joint functions with a control strategy such as freezing and that the feedback model can be a plausible model of human hand-joint control mechanism.

Key Words: Hand joint control strategy, Feedback model, Hand joint torque, Inertia torque, Co-contraction

1. 緒言

日常生活において、手関節を動かすことを意識せずに腕を自然に動かす場合（自由な腕運動）には手関節はほとんど動かないが、カップの取っ手をつかむ運動の場合には、取っ手の位置に依存して手関節が動くことを経験する。これは、手関節制御機構が他の関節と異なる特性を持つからであり、手関節も含めたヒト腕の運動制御機構を解明するには、手関節制御戦略の解明が必要となる。ヒト腕の2点間到達運動を再現する数理モデルとしては、これまでに躍度最小モデル⁽¹⁾、トルク変化最小モデル⁽²⁾⁽³⁾、エネルギー最小モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾、分散最小モデル⁽⁶⁾などの手関節を含まない2関節最適制御モデル（肩、肘の2関節）が提案され、2点間到達運動特性の再現に有効であることが示された。手関節も考慮した3関節腕モデルとしては、到達運動で手関節がほとんど動かない実測特性がフリージング現象（主働筋と拮抗筋の共収縮により手関節の剛性を高める）に起因するとの考えの下に、これをフィードバック制御でモデル化し、エネルギー最小規範とトルク変化最小規範を組み合わせた評価関数を最適化する最適制御モデルが提案され、ヒトの3関節腕の2点間到達運動特性の再現に有効であることが示された⁽⁷⁾。しかし、手関節制御戦略は、これまで手関節角度実測結果のみに基づいて議論されており、これだけでは手関節制御機構の十分な解明は困難である。手関節制御戦略の解明には手関節角度特性だけでなく、手関節に作用するトルクなどの他の特性の検討も必要である。また、手関節制御機構のフィードバック制御モデルと実際の手関節制御機構の間の生理学的対応関係も検討されていない。

上記観点から、本研究では、ヒト3関節腕の到達運動軌道を実測し、手関節角度特性だけでなく逆力学解析などを用いて手関節に働くトルクを導出することにより、どのような手関節制御戦略が存在するのかを検討する。さらに、ヒトの手関節制御機構をフィードバック制御でモデル化した場合、そのフィードバック制御モデルと実際の手関節制御機構の間の生理学的対応関係についても検討する。その結果、(1) 自由な到達運動では、手関節角度はほとんど動かないこと、(2) 上記(1)の結果は、手関節トルクと、到達運動により手部に働く慣性トルクの和（合成トルク）を運動時間に亘って積分した値がほぼ0となる特性に起因する

こと、(3) 手関節制御機構のフィードバック制御モデルは、主動筋と拮抗筋の共収縮力の和が手関節トルクになるという生理学的関係をモデル化したものと解釈できることが示される。以上の結果は、自由な到達運動では、手関節角度の変化を抑制する手関節制御戦略（フリージング）が機能していること、及び、本フィードバック制御モデルが、実際の手関節制御機構と生理学的にも対応するモデルになり得ることを示唆する。

2. 手関節制御特性の実測と動作解析

2.1 到達運動実験システムと実験方法

図1は、2点間到達運動軌道を実測する為の実験システムであり、被験者は椅子に座り、実験台に埋め込まれた緑色LEDで表示される到達目標点に向かって到達運動を実行した。被験者の肩と肘と手関節と手先には赤色LEDが取り付けられており、上空に設置されたhi-vision デジタルビデオカメラ(60 frames/sec)で赤色LEDの動きを撮影し、画像解析により到達運動の始点(S1又はS2)から到達目標点(T4~T8)までの軌道が導出された。但し、座標原点を被験者の肩に設定した。到達運動は順方向と逆方向からなり、順方向到達運動の場合は、始点がS1(T7と同一)で到達目標点がT4, T5, T6であり、逆方向到達運動の場合は始点がS2(T5と同一)で到達目標点がT4, T7, T8である。LEDの点灯時間は1 msec単位で計算機制御可能である。2

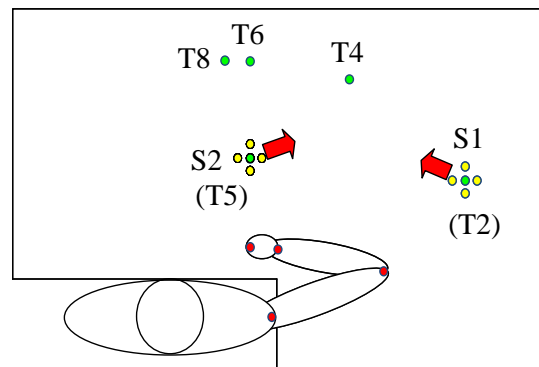


Fig.1 Experimental setup for measuring two-point reaching movements

点間到達運動軌道の実測は、以下の手順で行った。

- (1) 始点 LED (S1 又は S2) が点灯したら、手先を始点 LED (S1 又は S2) に移動する。
- (2) 3 つの目標点 LED (T4, T5, T6 または T4, T7, T8) が 2 sec 点灯した後消灯する。消灯時間は 1~2 sec の間でランダムに変化する。
- (3) 3 つの目標点の内の 1 つがランダムに選択され、選択された到達目標点 LED が点灯したら直ちに手先をその位置まで移動する。

被験者は 3 名 (Y.H., T.S., T.W.) であり、各目標点に対する到達運動を 10 回ずつ行ったので、順方向到達運動と逆方向到達運動で各々合計 30 回ずつ実測した。実験は暗室の中で行い (LED のみ見える状態)、被験者の体を椅子に固定し、右の肩と肘と手首が自由に動かせる状態で、肩の高さの水平面内で到達運動を行った。各 LED の座標値は、デジタルビデオカメラ画像を画像解析することにより算出し、手先と手関節の LED の座標値から手部姿勢角を導出した後、逆運動学を用いて肩関節角度と肘関節角度の算出、及び手関節角度を導出した。3 つの関節角度データを 1/60 sec から 1 msec 間隔のデータに増やす為に、始点と終点の関節角度と角速度と角加速度を保存する条件を付加した最小 2 乗法を用いて多項式近似を行い、データを補間した。関節角速度と角加速度は、補間後の関節角度データを微分することで導出した。

図 2 は、撮影したビデオ画像から画像処理により導出した 2 点間到達運動の実測軌道 (被験者 T.S.) の例であり、10 回分の実測結果が重ねられている。図 2 (1) は順方向到達運動の場合であり、(a) は始点 S1 から目標到達点 T4 への到達運動軌跡、(b)(c) は目標点 T4 と T5 へ向かう到達運動の 3 関節角度特性である。図 2 (2) は逆方向到達運動の場合であり、(a) は始点 S2 から目標到達点 T7 への到達運動軌跡、(b)(c) は目標点 T7 と T8 へ向かう到達運動の 3 関節角度特性である。図 2 から、到達運動軌跡は従来結果⁽⁷⁾と同様に、わずかに外側へ湾曲する傾向が見られた。関節角度

特性では、肩と肘関節角度は時間と共に大きく変化しても手関節角度はほとんど変化しない特性がみられ、この特性は目標点や運動方向に依存しなかった。この手関節角度特性は、フリージングのような手関節を動き難くする制御戦略が手関節に存在することを意味すると考えられる。以上の実測特性は、他の被験者でも同様であった。

2.2 手関節動作解析

到達運動中に手関節がほとんど動かないという手関節制御戦略を、手関節に作用する外力 (トルク) の観点から検討する。到達運動中には手関節に 2 種類の外力 (トルク) が作用する。一つは、手関節を動かす筋肉により作り出される手関節トルク τ_3 、もう一つは、到達運動により手部に生じる慣性トルク τ_I である。水平面内で動く 3 関節腕を模擬した 3 関節 3 リンクマニピュレータの場合、手関節の粘性抵抗トルク τ_V を考慮すると、手関節における運動方程式は以下となる。

$$J_h(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) = \tau_3 + \tau_I + \tau_V \quad (1)$$

但し、 $J_h, \ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \ddot{\theta}_3$ は、手関節周りの慣性モーメント、肩と肘と手首の関節角加速度である。したがって、手関節の粘性係数を D_3 とすると、手関節トルク τ_3 及び粘性抵抗トルク τ_V は以下となる。

$$\tau_3 = J_h(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2 + \ddot{\theta}_3) - \tau_I - \tau_V, \quad \tau_V = -D_3\dot{\theta}_3 \quad (2)$$

到達運動により手関節に生じる xy 座標系の加速度ベクトルを \mathbf{a}_3 、手部の重心に作用する慣性力ベクトルを \mathbf{F}_G 、手関節から手部重心までのベクトルを \mathbf{r}_h とすると、手部に作用する慣性トルクベクトル τ_I は以下で表わせる。

$$\tau_I = \mathbf{r}_h \times \mathbf{F}_G, \quad \mathbf{F}_G = -m_3\mathbf{a}_3 \quad (3)$$

但し、 \times はベクトル積、 m_3 は手部の質量を表わす。したがって、慣性トルクベクトル τ_I の大きさ τ_I は以下となる。

$$\tau_I = -m_3 L c_3 [L_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_1^2 + L_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) \ddot{\theta}_1 + L_2 \sin(\theta_3) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + L_2 \cos(\theta_3) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)] \quad (4)$$

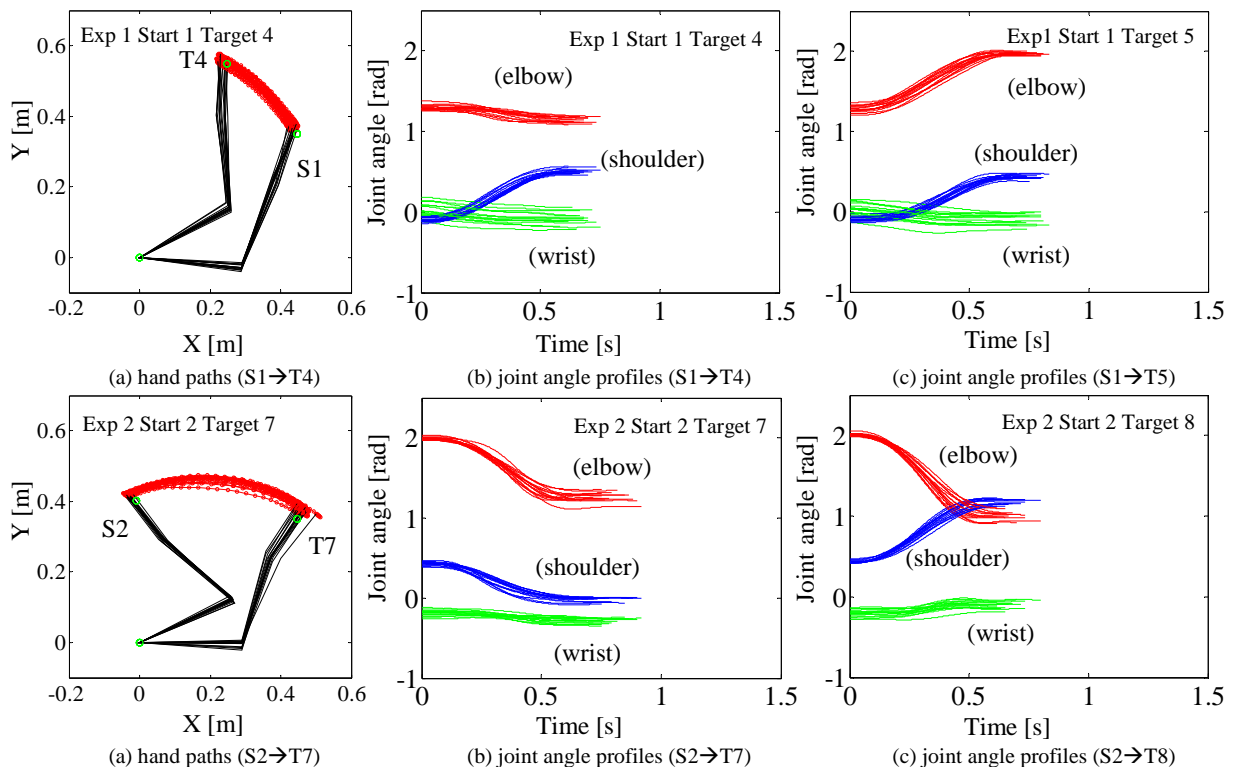


Fig. 2 Experimentally measured trajectories of two-point reaching movements (subject: T.S.).

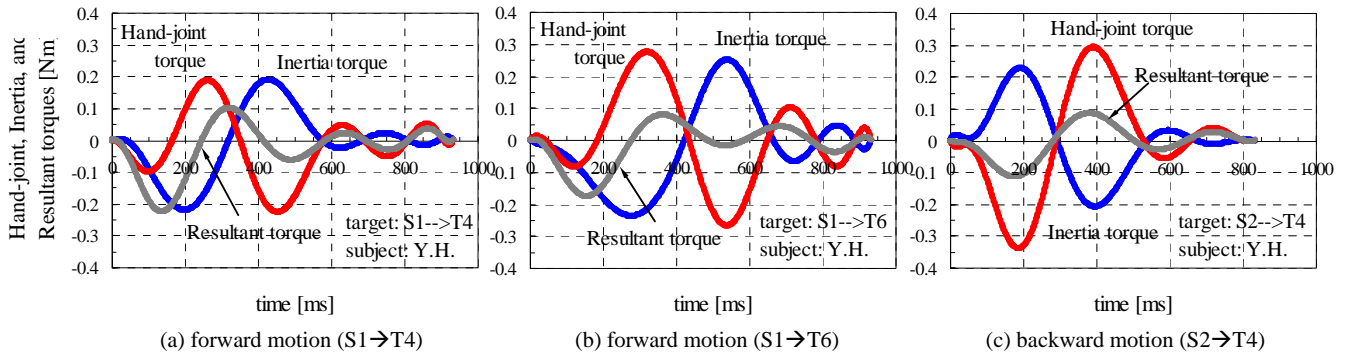


Fig. 3 Hand-joint torque (τ_3), inertia torque (τ_I), and their resultant torque (τ_R) profiles derived from experimentally measured trajectories of two-point reaching movements (subject: Y.H.).

式(4)で、 $\theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ は肘と手関節の角度と肩と肘の角速度であり、 L_1, L_2, Lc_3 は上腕と前腕の長さ、手関節から手部の重心位置までの距離である。

図3は、手関節トルク τ_3 と慣性トルク τ_I と手関節トルクと慣性トルクの合成トルク $\tau_R (= \tau_3 + \tau_I)$ の時間応答特性を表す。図3で、(a), (b)は各々目標点が T4, T6 の順方向到達運動（始点 S1）の場合、(c)は目標点が T4 の逆方向到達運動（始点 S2）の場合であり、被験者は Y.H. である。手関節トルク τ_3 と慣性トルク τ_I は、各々式(2), (4)から計算し、関節角度、角速度、角加速度は、実測軌道から導出した角度とその1階微分と2階微分である。図3から、以下の結果が得られた。

- (1) 手関節トルク τ_3 と慣性トルク τ_I の大きさは多少異なり、互いに逆方向に作用する場合が多い。
- (2) 合成トルク τ_R の正・負の値は、手関節角度の正方向・負方向への変化と対応する。
- (3) 手関節角度がほとんど動かない場合、合成トルク τ_R の運動時間に亘る積分値はほぼゼロになる。
- (4) 手関節角度が正方向または負方向に多少動く場合、合成トルク τ_R の運動時間に亘る積分値は正または負のバイアスを持つ。

以上の結果から、手関節では慣性トルク τ_I をほぼ相殺するような手関節トルク τ_3 が作り出され、その結果、手関節の動きが抑制されること、及び、到達運動中の手関節角度は、合成トルク τ_R により変化し、手関節の動く方向は、合成トルク τ_R の運動時間に亘る積分値の符号と対応していることが理解される。このトルク解析結果は、慣性トルク τ_I を相殺させるような手関節トルク τ_3 を作り出す制御戦略が手関節に存在すること、見方を変えれば、手関節トルク τ_3 と慣性トルク τ_I の相殺により手関節の動きが抑制されるのであるから、フリージングのような手関節を動き難くする制御戦略が手関節に存在することを意味すると考えられる。以上のトルク特性は、他の被験者でも同様であった。

3. 手関節制御機構のフィードバック制御モデル

3.1 フィードバック制御モデル

2.では、フリージングのような手関節を動き難くする制御戦略が手関節に存在することが示された。我々は、この手関節制御機構をフィードバック制御でモデル化することにより、3 関節腕の到達運動特性が再現可能になることを示した⁽⁷⁾。そこで、このフィードバック制御モデルの制御特性を調べることに、実際の手関節制御機構とそのフィードバック制御モデルの間の対応関係を生理学的観点から検討する。

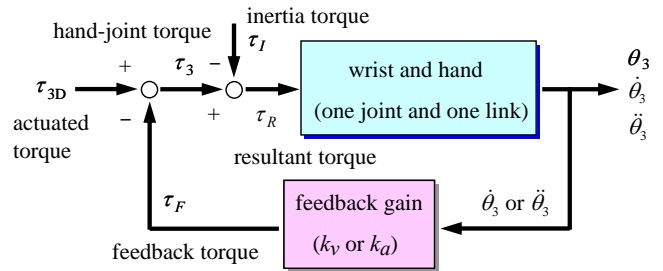


Fig. 4 Block diagram of a feedback control model of the human arm's hand-joint control mechanism.

図4は、手関節フィードバック制御モデルのブロック図である。手関節を動き難くするフィードバック制御なので、フィードバックトルク τ_F を手関節角加速度と角速度を用いて以下のように表現する。

$$\tau_F = -k_a \ddot{\theta}_3 - k_v \dot{\theta}_3 \quad (5)$$

但し、 k_a, k_v は各々角加速度ゲインと角速度ゲインであり、フィードバック信号が手関節角加速度の場合は $k_v = 0$ 、角速度の場合は $k_a = 0$ とする。ヒト3 関節腕の到達運動において、手関節に式(5)のフィードバックトルク τ_F が作用しているとすると、手関節に作用する外力（トルク）は、手関節を動かす筋肉により作り出される手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F と到達運動により手部に生じる慣性トルク τ_I の3つになる。フィードバック制御を考慮しない場合(2.)の手関節トルク τ_3 (式(1)(2)) は、以下の様に、手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の和で表わせる。

$$\tau_3 = \tau_{3D} + \tau_F \quad (6)$$

3.2 フィードバック制御特性

図5は、手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F と式(1)(2)の手関節トルク τ_3 の時間応答特性を表わし、フィードバック信号が手関節角加速度の場合 ($k_v = 0$) である。図6(a), (b)は各々目標点が T4, T6 の順方向到達運動（始点 S1）の場合、(c)は目標点が T4 の逆方向到達運動（始点 S2）の場合であり、被験者は Y.H. である。フィードバックトルク τ_F は、実測軌道から導出した角度の2階部分を用いて式(5)から計算した。手関節駆動トルク τ_{3D} は、式(2)から計算した手関節トルク τ_3 (図4) とフィードバックトルク τ_F 用いて式(6)から計算した。フィードバックゲイン k_a の値は、手部重心周りの慣性モーメントの300倍に設定した。図6から、以下の結果が得られた。

- (1) 手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の極性は常に同じではなく、互いに入れ替わる場合が多い。
- (2) 手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の大

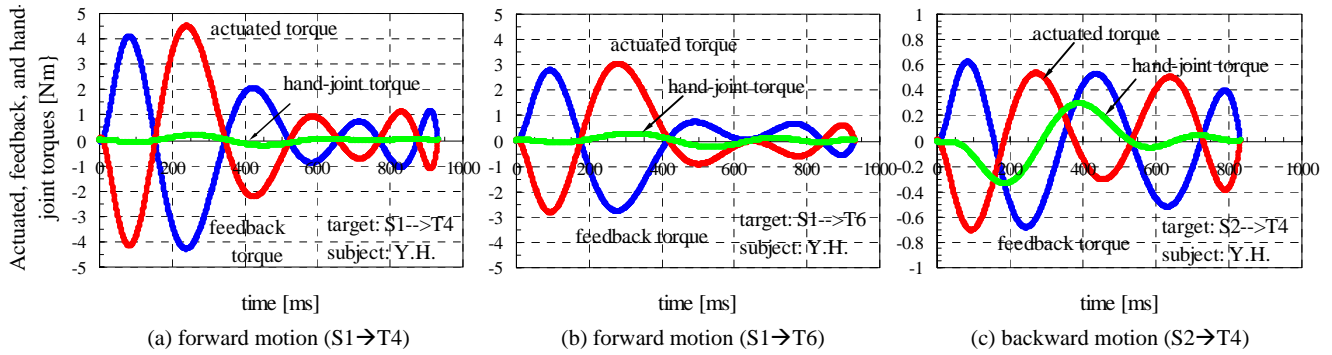


Fig. 5 Hand-joint's drive torque (τ_{3D}), feedback torque (τ_F), and hand-joint torque (τ_3) profiles derived from experimentally measured trajectories of two-point reaching movements (subject: Y.H.).

きさはほぼ同程度であり、互いに逆方向に作用してほぼ相殺する関係である。フィードバックゲインにも依存するが、両トルク (τ_{3D} と τ_F) は、両者の和である手関節トルク τ_3 よりも大きい。

- (3) トルクの極性の観点では、手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の正極性部分のみの和と負極性部分のみの和はほぼ相殺する関係であり、正極性部分のみの和と負極性部分のみの和は、両者の和である手関節トルク τ_3 よりも大きい。

結果(1)(2)は、手関節をほとんど動かないようにするために、手関節にフィードバック制御が働いていること、及び、このフィードバック制御機構が、極性の異なる2種類の比較的大きなトルク（手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F ）を相殺させることにより、慣性トルク τ_I を相殺させるのに必要な手関節トルク τ_3 (式(1)(2)) を生成させる機能を持っていることを意味する。結果(3)は、手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の正極性部分のみの和と負極性部分のみの和がそれぞれ主動筋と拮抗筋により作られる2種類の相反する方向に作用するトルクに対応し、両者が共収縮の関係にあると見なせること、主導筋と拮抗筋により生じると見なせる2種類の相反する方向に作用するトルクがそれぞれ手関節駆動トルク τ_{3D} とフィードバックトルク τ_F の一方のみで構成されているのではなく、両トルクが混合していること、及び、手関節では、主動筋と拮抗筋の共収縮により生成された比較的大きな2種類の逆方向トルク（または張力）を相殺させることにより、両トルクの和として比較的小さい手関節トルク τ_3 を作り出し、手関節の動きを抑制していることを意味する。これは、生理学的には、主動筋と拮抗筋の共収縮により剛性を高めるフリージング現象⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾と同様の特性である。関節で発揮されるトルクは、通常、主動筋と拮抗筋の共収縮活動の和(差)によって決定されること、及び、リーチング運動中の肩と肘の関節を共収縮させることで到達運動の精度が向上することが実測されていることから⁽¹⁰⁾、手関節でも到達運動の精度が向上のために共収縮が生じている可能性は十分考えられる。したがって、手関節制御機構のフィードバック制御モデルは、手関節制御機構の適切な数理モデルになり得ると判断される。

4. 結言

ヒト3関節腕の到達運動の手関節角度特性と手関節に働くトルク特性に基づいて手関節制御戦略の明確化を行い、手関節制御機構のフィードバック制御モデルと実際の手関節制御機構の間の生理学的対応関係を検討した。その結果、(1) 自由な到達運動では、手関節角度はほとんど動かない

こと、(2) 上記(1)の結果は、手関節トルクと慣性トルクの和（合成トルク）の運動時間に亘る積分値がほぼ0となる特性に起因すること、(3) フィードバック制御モデルは、主動筋と拮抗筋の共収縮力の和が手関節トルクになるという生理学的関係をモデル化したものと解釈できることが示された。以上の結果は、自由な到達運動では、手関節角度の変化を抑制する手関節制御戦略（フリージング）が機能しており、フィードバック制御モデルが実際の手関節制御機構と生理学的にも対応する有効なモデルになり得ることを示唆する。

参考文献

- (1) T. Flash and N. Hogan, The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model, *J. Neuroscience*, vol. 5, pp. 1688-1703, 1985.
- (2) Y. Uno, M. Kawato, and R. Suzuki, Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement - Minimum Torque-Change Model, *Biol. Cybern.*, vol. 61, pp. 89-101, 1989.
- (3) E. Nakano, H. Imamizu, R. Osu, Y. Uno, H. Gomi, T. Yoshioka, and M. Kawato, Quantitative Examination of Internal Representations for Arm Trajectory Planning: Minimum Commanded Torque Change Model, *J. Neurophysiol.*, vol. 81, pp. 2140-2155, 1999.
- (4) 加島正, 石動善久, ヒトの上肢運動の軌道生成, 計測自動制御学会論文誌, Vol.34, pp. 1440-1447, 1998.
- (5) 加島正, 石動善久, ヒトの上肢運動における軌道制御, 計測自動制御学会論文誌, Vol.31, pp. 1416-1422, 1995.
- (6) C.M. Harris and D.M. Wolpert, Signal-Dependent Noise Determines Motor Planning, *Nature*, Vol. 394, No. 20, pp. 780-784, Aug. 1998.
- (7) T. Matsui, K. Takeshita, and T. Shibusawa, Optimal Control Model of Human Three-Joint Arm System Characterized by Hand-Joint's Freezing-Like Mechanism, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 5, No. 7, pp. 1531-1544, 2011.
- (8) N. Bernstein, *The Co-ordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press, London (1967).
- (9) A. Smith, The Coactivation of Antagonist Muscles, *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, Vol. 59, pp. 733-747, 1981.
- (10) P.L. Gribble, L.I. Mullin, et al., Role of Cocontraction in Arm Movement Accuracy, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 89, pp. 2396-2405, 2003.