

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656063

研究課題名（和文） ニホンザル精密把握の神経制御機構：筋骨格モデルによるアプローチ

研究課題名（英文） Biomechanical analysis of precision grip in the Japanese macaque based on a musculoskeletal model

研究代表者

荻原 直道 (OGIHARA NAOMICHI)

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：70324605

研究成果の概要（和文）：

本研究では、ニホンザルの解剖学的に精密な手部筋骨格モデルを構築し、その精密把握動作の生体力学的解析を行うことを通して、精密把握の神経制御機構の一端を明らかにすることを試みた。具体的にはニホンザルの手指の運動と指先に作用する反力を計測し、逆動力学的計算により運動中に各筋が発揮すべき筋張力を推定した。その結果、算出された筋張力波形は把握時の筋電図波形と類似し、モデル解析の妥当性が示唆された。本研究で構築した枠組みは、手部筋骨格系の冗長自由度を神経系がどのように制御しているのかを解析する上で有効なツールとなる。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we constructed an anatomically-based musculoskeletal model of the Japanese macaque hand and biomechanically analyzed the precision grip movement based on inverse dynamic calculation. Specifically, we measured hand kinematics and forces applied to fingertips during a precision grip task in a macaque, and the obtained data were then input to the constructed model to estimate muscular forces exerted based on inverse dynamic calculation. The estimated muscular force patterns are generally in accordance with reported electromyographic data, demonstrating the validity and efficacy of the constructed model for comprehensive understanding of precision grip control in primates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	0	1,800,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	390,000	3,490,000

研究分野：バイオメカニクス・知能機械工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：把握、筋骨格モデル、逆力学、ニホンザル、脊髄

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの手部筋骨格構造は27個の骨に約30の筋が付着することで形成される極めて複雑な系である。ヒトは、この複雑冗長システムをいかにコントロールすることで、人類進

化の源泉とも言うべき優れた精密把握機能を獲得するに至ったのであろうか？

精密把握の神経制御機構を明らかにするためには、把握運動に関わる多数の脊髄神経細胞と手指筋の活動を運動と同時に記録し、

その制御機構を力学的に分析する必要がある。しかし、それを生体のヒトで行うことは、実際には非常に難しい。それに対して、毛繕いを上手に行うことから霊長類の中でも優れた精密把握能力を有するニホンザルを実験モデルとして用いて把握運動の神経生理学的データを蓄積し、それに基づいて把握の運動学と動力学を手の解剖学的・生体力学的特性を考慮して解析すれば、ヒトを含む霊長類の優れた把握機構のメカニズムについて、新規的かつ革新的な知見が得られると期待される。

研究代表者（荻原）は、ヒトとチンパンジーの解剖学的に精密な筋骨格モデルを構築し、把握の物理現象を仮想空間内で再現することを通して、骨格形状や筋配置といった手部筋骨格系の形態的特徴が精密把握機能に与える影響を明らかにしてきた。一方、研究分担者（関）は、ニホンザルの精密把握運動を対象として、脊髄ニューロン活動、手指筋の筋電図、手指キネマティクス、指先力を同時計測する実験系を確立し、脊髄介在ニューロンによる筋シナジー（協働的活動）を明らかにするなど、神経生理学的に把握のメカニズムに迫ってきた。両者のアプローチを融合すれば、把握の神経機構を解明する上で画期的な進展をもたらすことができると強く期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、解剖学的筋骨格モデルによる生体力学的アプローチと、神経生理学的アプローチの機能的融合をはかり、脊髄神経活動から把握の力学までを包括的に分析することを通して、精密把握の神経制御機構の一端を明らかにすることを試みた。具体的には、ニホンザルの解剖学的に精密な筋骨格モデルを構築し、それをを用いて神経生理学的実験データを生体力学的に分析することにより、神経活動と運動出力の因果関係を生体力学的に分析する枠組みを構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 解剖学的手部筋骨格モデルの構築

手部筋骨格構造の運動を正確に再現するために、ニホンザル屍体手部（成体オス）のCT撮像を行い、連続断層画像を取得した。ここから各骨の3次元形状を抽出し、慣性主軸を用いて部材座標系を定義した。そして、中手骨・指骨の遠位関節面に対してそれぞれ球、円柱を最小自乗法によりフィットし、関節回転軸と回転中心を求めた。第一中手手根関節は、サドル状の関節面を持つため、二次曲面をフィットして関節回転軸と回転中心を求めた。そして、手部骨格系を計20節の直鎖リンクとしてモデル化した。モデルの自

由度は、第一中手手根関節(CMC)が2、各中手指節関節(MCP)が2、各指節間関節(IP, DIP, PIP)が1の計21自由度である。手根骨は互いに運動しないものとし、1つの節としてモデル化した。第二～五中手骨も手根節に対して動かないものとして自由度を拘束した。各節の質量や慣性テンソルは、X線CT画像から抽出した手部体表面データを関節点で分割して算出した。このとき身体材料の密度は、組成の違いによらず1.0 g/cm<sup>3</sup>とした。

ニホンザルの手部運動に関与する筋の解剖学的データを取得するために、CT撮影した屍体手部の解剖を行った。そしてすべての筋について起始・停止・走行を確認するとともに、筋重量と筋線維長を計測し、生理学的断面積を求めた。この結果に基づいて、中様筋を除く計23筋をモデルに考慮した。筋走行は起始点から停止点までを経由点を介して結ぶ線分として定義し、各筋の最大筋張力は生理学的断面積に基づいて決定した。指の背面を覆う指背腱膜は網目構造で表現し、分岐点での力配分は、ヒトの指背腱膜モデルの分配式に基づいて決定した。

構築したニホンザル手部筋骨格モデルを図1に示す。ニホンザルの手部筋骨格構造を精密に模擬できていることがわかる。

### (2) ニホンザル精密把握運動の計測

左手の示指と母指でレバーを把持する課題の訓練を受けている成体ニホンザル1頭を対象として、精密把握運動の運動計測を行った(図2A,B)。具体的には、モンキーチェアに固定されたサルの前方にモニタを設置し、そこに表示されるターゲットの動きに合わせてレバーを開閉するタスクを行わせ、そのとき的手指の運動とレバーに作用する力を計測した(図2C)。

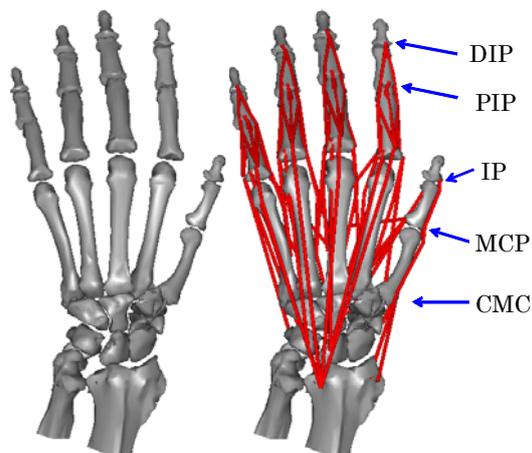


図1. ニホンザル手部筋骨格モデル（背側から見た図）。記号は関節名を示す。

手指運動の計測には、手を囲むように配置した4台のデジタルビデオカメラ iVIS HF S21 (キャノン) を用いた。得られた画像を動作分析ソフトウェア WinAnalyze 3D (Mikromak, Germany) に取り込み、各関節点等の位置をフレーム毎にマニュアルでデジタル化した(30Hz)。デジタル化した点は、母指の手根中手(CMC)関節、各指の中手指節(MCP)関節、母指と示指の指節間(IP,PIP,DIP)関節、指先、および尺骨茎状突起の計12点である。4台のカメラの撮影空間のキャリブレーションには、縦横250mm、高さ200mmの直方体のゲージを用いた。3次元位置の計測誤差は約2.5mmであった。これにより各画像上のデジタル点の2次元座標から、ステレオカメラ法を用いて各点の3次元位置を算出することができる。

計測した各点の3次元位置に対して構築した筋骨格モデルをマッチングすれば、モデルに仮想空間内で把握運動を再現させることが可能となる。本研究では計測した標識点座標とモデル上の対応する点の距離の自乗和を最小化する骨格の姿勢をフレーム毎に求め、手部の3次元骨格運動を再構成した。

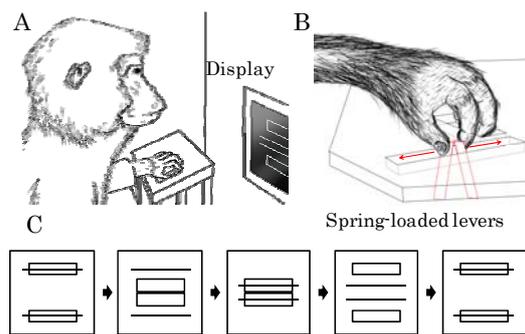


図2. ニホンザルの精密把握動作の計測。(A) 実験の様子。(B) レバーに作用する力の計測。(C) モニタに表示されるターゲット(2つの長方形)の動きに合わせてレバー(2本の横線)を開閉する。

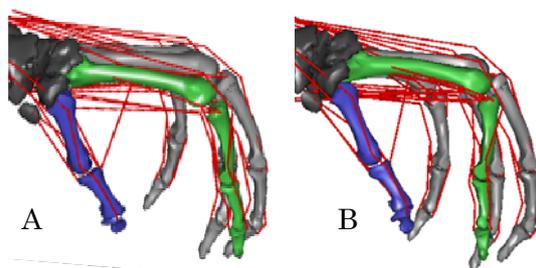


図3. 再構築された精密把握時のニホンザル手部筋骨格運動。(A) レバーに反力が作用していない(開いている)とき。(B) レバーに反力が作用している(閉じている)とき。

### (3) 逆動力学計算による筋張力の推定

逆動力学計算とは、運動方程式に基づいて、計測した運動データからそれを実現するのに必要な筋張力や筋活動パターンを逆算的に算出する手法である。本研究では、再構成した骨格運動と、計測したレバー反力を運動方程式に代入し、把握運動を実現するのに必要な筋張力を力学的に推定した。この計算には、逆動力学解析ソフトウェア AnyBody Modeling System (Anybody Technology, Denmark) を用いた。筋張力の配分問題には、筋応力の三乗の総和を評価関数とした。

今回計測対象としたニホンザルには、筋電図を記録するためのワイヤ電極がまだ埋め込まれていない。そのため本研究では同様のタスクを行った他個体の筋電図記録と算出した筋張力の比較を行い、モデル解析の評価を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 解剖学的手部筋骨格モデルの構築

把握運動は、神経系と筋骨格系の相互作用により織りなされる複雑な力学現象である。したがって、把握の神経制御機構の解明には、神経系と筋骨格系の数理モデルを構築し、その力学的相互作用を計算機内で再現する構成論的アプローチが重要であることが近年指摘されている。そのため本研究では、CTおよび解剖から取得したデータに基づいて、解剖学的に精密なニホンザルの3次元手部筋骨格モデルを構築した。筋骨格系の形態情報と、その動きを支配する物理学的法則を解剖学的に詳細に記述した本モデルは、ニホンザルの把握動作の力学現象と神経制御メカニズムを解析する上で重要なツールとして機能する。

### (2) ニホンザル精密把握運動の計測

計測した運動データに基づいて、ニホンザル手部筋骨格モデルに精密把握運動を行わせた結果を図3に示す。計測した運動データに構築した筋骨格モデルを最小二乗法によりマッチングしてやることにより、精密把握時の母指と示指の骨格運動とそのときの筋走行の変化を計算機内に再現することが可能となった。

### (3) 逆動力学計算による筋張力の推定

逆動力学計算により推定された筋張力の時間変化の一例を図4に示す。図4Aはレバー反力の時間変化を、Bは精密把握動作に関係すると予想される代表的な筋、すなわち第一背側骨間筋(1DIOa)、母指内転筋横頭(ADPt)、短母指外転筋(ABPB)、浅指屈筋2(2FDS)の筋張力の推定結果を示した。これより、レバーに反力が作用するときに1DIOa, ADPt, 2FDSの筋活動が大きく、ABPBのそ

れは小さくなり、逆にレバーに反力が作用しないときにその逆となることがわかる。同様のタスクを行った他個体の筋電図記録と筋張力の比較を試みた結果、本研究での筋張力推定結果とほぼ一致した傾向を示し、モデル解析の妥当性が示唆された。

解剖学的に精密なニホンザルの手部筋骨格モデルを構築し、それに基づいて神経系の活動と運動出力の関係を生体力学的に解析する試みは世界的にみても前例がなく、こうした試みが把握の神経制御機構を明らかにする上でのブレークスルーとなることが期待される。近年、手部筋骨格系の冗長多自由度を制御する神経機構として、脊髄介在ニューロンによる複数筋の協働的活動（筋シナジー）が注目されている。今後本枠組みを用いて、筋シナジーのメカニズムについて解析を進めていきたいと考えている。

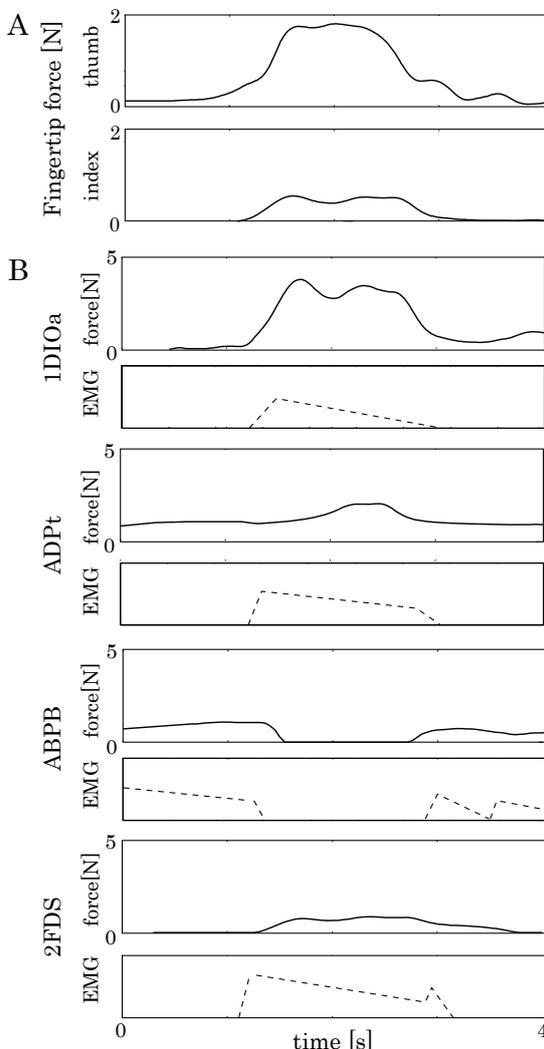


図 4. (A)精密把握時に指先に作用するレバー反力。(B)筋張力の算出結果(実線)と筋電図記録(点線)の比較。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Ogihara, N., Oishi, M., Muscle dimensions in the Japanese macaque hand, *Primates*, (in press). 査読有
2. Seki, K. and Fetz, EE, Gating of Sensory Input at Spinal and Cortical Levels during Preparation and Execution of Voluntary Movement, *Journal of Neuroscience*, 32: 890-902, (2012). 査読有
3. Jonas B Zimmermann, Seki K., Andrew Jackson, Reanimating the arm and hand with intraspinal microstimulation, *Journal of Neural Engineering*, 8: 1741-2560, (2011). 査読有
4. 荻原直道、工学的手法を応用した人類進化研究の新展開、計測と制御、49: 837-843, (2010) 査読無
5. Matsuura, Y., Ogihara, N., Nakatsukasa, M., A method for quantifying articular surface morphology of metacarpals using quadric surface approximation, *International Journal of Primatology*, 31: 263-274, (2010). 査読有

[学会発表] (計 9 件)

1. 齋藤剛、荻原直道、武井智彦、関和彦、解剖学的筋骨格モデルに基づくニホンザル精密把握動作の逆動力学的解析、日本機械学会 2012 年度年次大会、2012.9.9-12、金沢、(accepted)
2. 齋藤剛、荻原直道、武井智彦、関和彦、3次元筋骨格モデルに基づくニホンザル精密把握動作の生体力学的解析、第6回 Motor Control 研究会、2012.6.21-23、岡崎、(accepted)
3. 関和彦、霊長類における手指運動の制御メカニズム--神経機構とそれを利用した運動再建技術の開発--、神経科学セミナー、2012.2.6、京都
4. 関和彦、手と指の運動は脳によってどのように制御されているか、第8回NBR公開シンポジウム、2011.12.9、東京
5. Takei T., Seki K., Neural basis for hand muscle synergy in primate spinal cord. 41st Annual meeting of the Society for the Neuroscience, 2011.11.13, Washington D.C., USA.
6. Takei T., Seki K., Neural basis for hand muscle synergy in primate spinal cord, 5th SfN Satellite

Symposium on Motor Systems,  
2011.11.11, Bethesda, MD, USA.

7. 関和彦, 武井智彦、把握運動の筋シナジー形成における脊髄介在ニューロンの役割、第 34 回日本神経科学大会、2011.9.17、横浜
8. 荻原直道、霊長類筋骨格モデルの構築と応用、京都大学霊長類研究所共同利用研究会「CTを用いた霊長類研究の新展開」、2011.3.7、犬山
9. N. Ogihara, M. Nakatsukasa, Morphofunctional study of hominoids hands using computer simulation technique, International Primatological Society XXIII Congress, 2010.9.13, Kyoto.

6. 研究組織

(1)研究代表者

荻原 直道 (OGIHARA NAOMICHI)  
慶應義塾大学・理工学部・准教授  
研究者番号：70324605

(2)研究分担者

関 和彦 (SEKI KAZUHIKO)  
独立行政法人国立精神・神経医療研究センター・モデル動物開発部・部長  
研究者番号：00226630

(3)連携研究者

該当なし