

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22454

研究課題名(和文) 手指の動きの進化 ロコモーションとマニピュレーションの間で

研究課題名(英文) Evolution of hand and finger motions - between locomotion and manipulation

研究代表者

平崎 鋭矢 (HIRASAKI, Eishi)

京都大学・霊長類研究所・准教授

研究者番号：70252567

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：手の機能の進化を理解するには、歩行と物の操作という異なる役目を果たすために手が取ってきた戦略を探ることが不可欠である。本研究ではヒトを含む霊長類が多様な課題を遂行する際の手指の動きについて、無標点3D運動分析法、圧分布分析法を用いたバイオメカニクス解析を試みた。マニピュレーション実験からは、ヒトではサル類に比べ、手の機能軸が内側に移動していることが示唆された。ロコモーション実験からは、樹上歩行を模した水平ポール上歩行において、拇指の役割が大きくなることが明らかになった。COVID-19の影響で遅れが生じているが、今後、手指の動きの制御システムモデルに実験データをフィードすることで分析を進める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本申請は、手指の動きについて、その進化的背景、すなわちロコモーション器官としての手を視野に入れ、ヒトを含む霊長類でバイオメカニクス解析を行うことで手の機能進化の探索を試みた最初の研究である。本研究の実験結果の分析が進めば、手の進化に関する新たな知見をもたらすのみならず、手指に関する人間工学や把握が重要な要素となるロボット工学、さらには手機能の病的低下や老化による低下に関する臨床医学領域に対して、重要な情報を提供できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：To understand the evolution of hand function, it is essential to explore the strategies that the hand has adopted to perform the two different roles of locomotion and manipulation. In this study, I attempted to analyze the biomechanics of hand movements during the performance of various tasks in primates, including humans, using markerless 3D motion analysis and pressure distribution analysis. Manipulation experiments suggest that the functional axis of the hand is medially shifted in humans compared to monkeys. From locomotion experiments, we found that the role of the thumb becomes more important in quadrupedal walking on a horizontal pole, which simulated arboreal locomotion, as compared with terrestrial walking. Although there is a delay due to COVID-19, I will continue to analyze the experimental data by feeding them into a control system model of hand movement which my collaborator and I have developed.

研究分野：生物学的人类学

キーワード：手機能の進化 無標点運動解析 バイオメカニクス 圧分布解析 霊長類

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの繁栄の理由のひとつが手の器用さにあることは疑いない。しかし、手の形態進化と比較して機能の進化については驚くほどわかっていない。その理由は2つあり、1つはバイオメカニカルな知見の不足であった。これまでの手の機能に関する研究は、主として臨床目的あるいは人間工学的なタスクベースの「パフォーマンス検査」であり、バイオメカニカルな考察はなされていなかった。そのため、個々の指の動きの知見が不足し、把握やマニピュレーションの戦略、その進化について検討できていなかった。2つ目はロコモーション時の手指の使い方についての知見の欠如である。ヒト以外の霊長類では、ロコモーション時にも重要な役割を果たす。そして、ヒトの手は霊長類の手の進化の上に成り立っている。つまり、手の進化を知るためには、ロコモーション時の手の動きについても十分に知り、ロコモーションとマニピュレーションという全く異なる力学的要請の下で、手が取ってきた戦略を知る必要がある。手指の動きについての知見がこれほどまでに不足している理由は、計測の困難さにあった。指の動きを調べようとすると、計測行為自体が(マーカー装着などによって)指の動きを制限するというジレンマに陥る。そのため、手の進化の研究は、ヒトの手においても非ヒト霊長類の手においても、形態学的知見と肉眼観察のみに頼らざるを得なかった。しかし、申請者らが開発した無標点3D運動解析法(Sellers & Hirasaki, 2014)は、従来の手法の欠点を克服し、手の進化の理解に不可欠な手指運動の解析に可能性を拓いた。

## 2. 研究の目的

手の機能の進化を理解するには、歩行と物の操作という2つの異なる役目を果たすために手が取ってきた戦略を探ることが不可欠である。本研究では、上述の2点を克服することを目的とし、ヒトとヒト以外の霊長類が多様な課題を遂行する際の手指の動きについて、無標点3D運動解析法、圧分布分析法を用いた生機構学的解析を試みた。

## 3. 研究の方法

### (1) マニピュレーション実験

ニホンザル(成体オス2頭)、オマキザル(成体オス4頭)、クモザル(成体オス1頭)を対象とし、彼らが多様な対象物(固形飼料、1cm角あるいは4cm角に切ったサツマイモあるいはリング、レーズン等)を把握あるいは精密操作する際の手指の動きについて無標点3D運動計測法(Sellers & Hirasaki, 2014)による運動解析を行った。これは、多方向からの高精度ビデオ映像を用い、分析対象の表面形状を三次元的に再構成し、運動データを抽出する手法である。本研究では同期させた8台のビデオカメラ(Canon, XF-105)からの映像を用い、再構成には写真測量ソフトウェア(Agisoft社、Metashape)を使用した(実験承認番号:京都大学霊長類研究所2019-005, 2020-009; ヒト実験については研究協力者によるデータの提供を受けた)。

### (2) ロコモーション実験

ニホンザル(成体オス2頭)を対象とし、彼らが床上四足歩行、樹上環境を模した水平ポール(直径49mm)上四足歩行、垂直木登り(直径49mmのポール上)をする際の手指の動きとその圧分布計測を行った。動きの分析はマニピュレーション実験と同様に無標点3D運動計測法を用い、圧分布分析には圧分布計測シート(Bigmat 1/4, Nitta社)を用いた(実験承認番号:京都大学霊長類研究所2019-003, 2020-007)。

### (3) シミュレーション解析

研究協力者(マンチェスター大、William Sellers教授)の助力を得て、手の把握戦略を探るためのシミュレーションモデルの開発を試みた。形態計測と関節可動域計測から得た情報に基づき手の筋骨格モデルを作成し、運動データを外挿することで、手の運動戦略の考察が可能となる。関節可動域計測については、屈伸はビデオ映像から、回旋は本申請で購入した関節角度計測装置を用いて行った。

## 4. 研究成果

### (1) マニピュレーション実験

小さな対象物をつかむ際に、ヒトでは第2、3指が第1指に対向して用いられることが多かったが、ニホンザル(図1)、オマキザル(図2)では第1指の対向性の程度が弱く、また第2、3指にくわえて第4指が参加する傾向が高かった。把握に参加しない第5指も第4指と同じように動いていた。大きな対象物をつかむ際にも、ヒトは第1~3指を中心的に用い、第5指の貢献

は小さかった。一方、ニホンザルとオマキザルでは、第5指も把握に参加することが多かった。ヒトに比べ、手の機能的な軸が外側にあると考えられる。また、指の動きの分化が十分ではなかった。前腕および手全体の姿勢が、ヒトに比べて回内位にあった。

クモザル(図3)には第1指が無いので、比較的大きな対象物をつかむ際には、第2~5指を用いた「鷲つかみ」となり、小さな物をつかむ際には前腕を過回内させ、第2指の内側縁を下に向ける姿勢で第2指のみで対象物をつかみ取った。しかし、その場合でも第3~5指は第2指と同調した動きを示した。

COVID-19のパンデミックによる所属部局のロックダウンをはじめとする種々の規制があり、予定していた実験は研究期間内に遂行したものの、分析については大きく遅れている。



図1.ニホンザルの左手による把握



図2.オマキザルの左手による把握

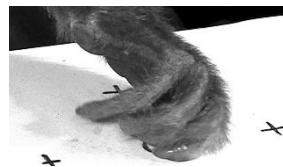


図3.クモザルの右手による把握

## (2) ロコモーション実験

水平床上歩行(図4)時には、ニホンザルの手は外側の中手部と第5指から着地していた。圧力中心はその後やや内側へ動くが、足底圧のように後退することはなかった。母指と他の指には同程度の圧力がかかっていた。体重を多く支えるSupport相中期に圧力が高くなるのは第3、4中手骨頭付近であった。その後、足の着地とともに手にかかる圧は小さくなった。第2-4指が最後に床面を離れた。

水平ポール上歩行(図5)において、最初に支持体に接するのは第5中手骨頭付近だが、直後に小指球がポールのトップに接し、特に近位部の圧が最大になった。その後、圧の中心は手掌の外側を前方に移動するが、同時に拇指の圧も上昇した。体重を多く支えるサポート中期には第2-5中手骨頭付近と拇指の圧が高いが、足の着地とともに手の圧は減少した。第2中手骨頭付近が最後に支持体を離れた。第2-5指は支持体に触れるが圧は極めて低かった。

垂直木登り(図6)では、第3、4指が最初に支持体に接することが多い。その後、第2-4中手骨頭付近、小指球の近位部、および2-4指の圧が上昇した。水平支持体上でのロコモーション時と比べ、圧分布の変化は小さく、サポート期を通じて第2-4の末節、第2-3中手骨頭付近、および小指球の近位部の圧が高かった。第3中手骨頭付近が最後に支持体を離れた。拇指は支持体に触れるが圧は極めて低かった。

ロコモーションへの指(MP関節より遠位部)の関与を比較すると、拇指と第2-5指とでは貢献が大きいロコモーション様式が異なっていた。拇指は水平ポール上歩行時には、ポールのtopを挟んで手の他の部分とは反対側に接し、第2-5中手骨頭部とともにポールを挟むようにして身体の安定的な支持に貢献していた。一方、垂直登攀時には他の指と揃うように支持体に接しており、体重支持や推進力産生、あるいは安定性にはほとんど関与していないことが示唆された。逆に、第2-5指は、水平ポール上歩行ではロコモーションへの関与は小さいが、垂直登攀では重要な働きをしていることが、高い圧から示唆された。床上歩行では、体重の多くは中手骨頭部で支えられていた。拇指や他の指も地面に接してはいたが、圧は小さく、ロコモーションへの関与も比較的小さいと考えられる。

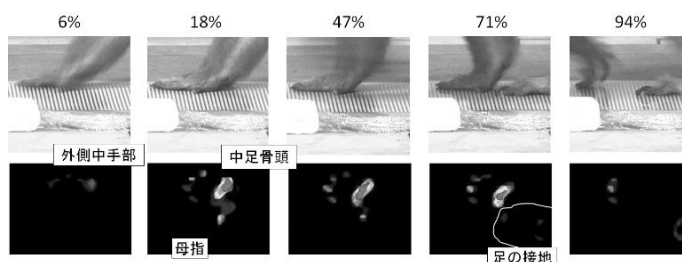


図4.ニホンザルの床上四足歩行時における手の動き(上段)と手掌圧分布(下段)

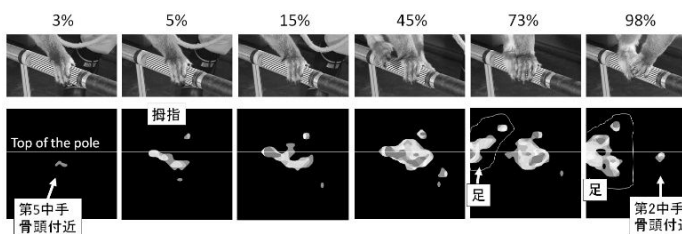


図5.ニホンザルの水平ポール上四足歩行時における手の動き(上段)と手掌圧分布(下段)

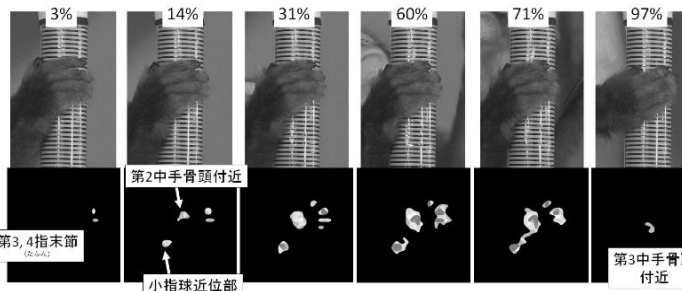


図6.ニホンザルの垂直木登り時における手の動き(上段)と手掌圧分布(下段)

### (3) シミュレーション解析

COVID-19 パンデミックの影響で英国の研究協力者との共同研究が制限されたため、当初の予定を一部変更し、手の運動やの指の動きの制御システムモデルを作成することを目標とし、身体運動制御システムの作成を試みた。土台として、我々が以前に公表したチンパンジーのコンピュータシミュレーションモデル (Sellers & Hirasaki 2018) を用い、そこにヒューリスティックに基づく新しいターゲティングシステムを追加した。このターゲティングシステムにより、手、あるいは指を到達可能な任意の点に移動させるために必要な筋の動きを計算することができる。この情報をもとに、関節の自由度よりも筋の数が多いことや、目的の到達動作を実現するための方法が多数存在することに伴う問題を解決することができる。この手法で腕のリーチングタスクに用いたところ、高精度な位置制御を実現することができた。今後、手と手指の動きの実データを大量にフィードすることで、手指の制御システムモデルの作成に繋げてゆく。



#### < 引用文献 >

Sellers WI, Hirasaki E. (2014). Markerless 3D motion capture for animal locomotion studies. *Biology Open* 3: 656-668.

Sellers WI, Hirasaki E (2018). Quadrupedal locomotor simulation: producing more realistic gaits using dual-objective optimization. *Roy Soc Open Sci* 5:171836.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Hirasaki E, Sellers WI  | 4. 巻<br>127       |
| 2. 論文標題<br>Analysis of the palmar pressure distribution during locomotion in Japanese macaques. | 5. 発行年<br>2019年   |
| 3. 雑誌名<br>Anthropological Science   | 6. 最初と最後の頁<br>178 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>なし   | 査読の有無<br>無        |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-         |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>平崎鋭矢、William Sellers       |
| 2. 発表標題<br>二ホンザルのロコモーション時における手掌圧分布の分析 |
| 3. 学会等名<br>第73回日本人類学会大会               |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Sellers WI, Hirasaki E                                      |
| 2. 発表標題<br>Functional classification of dynamic hand shape in primates |
| 3. 学会等名<br>International Congress of Vertebrate Morphology 2019（国際学会）  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>平崎鋭矢、William Sellers                    |
| 2. 発表標題<br>二ホンザルのロコモーション時における拇指の重要性 - 手指手掌圧分布の分析から |
| 3. 学会等名<br>第36回日本霊長類学会大会                           |
| 4. 発表年<br>2020年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hirasaki E, Oishi M   |
| 2. 発表標題<br>Variation in the arrangement of the foot interosseous muscles in great apes.                  |
| 3. 学会等名<br>The 89th annual meeting of the American Association of Physical Anthropologists (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Sellers WJ, Hirasaki E   |
| 2. 発表標題<br>A bio-robotic solution to achieve targeted hand and foot placement in primate musculoskeletal simulation experiments |
| 3. 学会等名<br>European Society for the Study of Human Evolution 2020 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|