

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009 ～ 2010

課題番号：21800015

研究課題名（和文）ヒトの多関節システムにおける運動制御と力制御の独立性の解明

研究課題名（英文）Exploring motor and force control in human multi-joint movements

研究代表者

平島 雅也 (HIRASHIMA MASAYA)

東京大学・大学院教育学研究科・助教

研究者番号：20541949

研究成果の概要（和文）：

視覚で捕えたターゲットに手を伸ばす際、脳はまず視覚座標系で運動を計画し、次にその運動を実現するための筋活動を計算する。本研究は、このような脳の座標変換処理を模したニューラルネットワークを構築し、一次運動野の基礎的な理解を深めると同時に、「異なる運動計画から物理的に全く同じ運動が生じうる」という冗長性が実際の脳に備わっていることを行動実験で示した。これは、座標変換の過程を操作することで、失った機能を回復させることができる可能性を示唆している。

研究成果の概要（英文）：

In visually-guided reaching movements, the brain makes a movement plan in visual space and then computes muscle activity pattern to achieve the movement. Building a neural network model for the sensorimotor transformation process, the present study provided a finding that gains insight into the fundamental property of motor cortical cell activities and demonstrated that our brain actually have a redundant nature such that a physically identical movement can be executed by two distinct motor planning processes. This implies that disabled motor function can be restored by eliciting the intact transformation process.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,030,000	309,000	1,339,000
2010年度	920,000	276,000	1,196,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,950,000	585,000	2,535,000

研究分野：身体教育学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・身体教育学

キーワード：運動制御、筋力、脳、一次運動野、座標変換、ニューロン、冗長性

## 1. 研究開始当初の背景

私たちは日常生活の中で何気なく目的の運動を遂行しているが、その動きを実現するために脳は実に複雑な計算を行っている。運動遂行には、おおきくわけて二段階の情報処理が必要である。1) 視覚座標系で運動を計画する段階と、2) その運動を実現するために必要な筋力を計算する段階である。これら一連の処理は、目的とする運動を視覚座標系から筋座標系へ変換する座標変換の問題として捉えることができる。この座標変換が脳のどの場所(where)、どのように(how)実行されているのかについて、これまで神経科学、心理物理学の分野で盛んに研究が行われてきた。

しかしながら、脳の座標変換に関しては、この30年間常に論争が絶えず、その脳内メカニズムはいまだ明らかではない。また、この座標変換の特徴をうまく利用したりハビリテーションなどへの応用研究もほとんど行われていない。そこで、本研究では、脳の座標変換を模したニューラルネットワークモデルを構築し、その基礎的な理解を深めると同時に、そのネットワークから予想される脳の柔軟な機能を浮き彫りにすることを大きな目的としていた。

## 2. 研究の目的

(1) 座標変換に関しては長い論争の歴史がある。その中でもとりわけ注目を集めてきたのが、「一次運動野は運動と力のどちらを符号化しているのか」という問いである。1960年代にEvarsは、一次運動野ニューロンの大部分は運動方向ではなく、力の方向に強く相関した活動を示すことを示した。しかし、1980年代にGeorgopoulosらはこれとは全く異なる見解を示した。彼らは単一ニューロンの活動は、運動の方向に依存すること、またそのチューニングパターンはコサイン状であることを示した。また、このような特徴を持つニューロンの活動を足し合わせると、外部座標における運動の方向を極めてよく再現できることを示した。つまり、一次運動野は集団として外部座標系での運動を符号化しているという仮説を提唱したのである。しかし、近年Scottら(2001)は、ニューロン集団活動の総和は、正確には運動方向を向いていないと反証を示した。さらにTodorov(2000)らは、一次運動野ニューロンは筋活動をコードしているという仮定を用い、運動中のニューロン活動を予測したところ、ニューロン集団としてはあたかも運動方向をコードしているかのように振る舞うことを報告し、それ以降、筋座標系仮説が有力と考えられるようになってきている。このように、外部座標仮説と筋座標仮説が対

立する中、Kakei(1999)らは第3の仮説を提唱した。彼らは「外部座標系での運動方向と筋活動の両方を符号化している」という仮説を提唱したのである。しかしながら、彼らの研究では、単一ニューロンの発火頻度と運動(または力)パラメータとの相関だけをもって議論しているため、本当に両方のパラメータをコードしているかどうかは実は不明である。

そこで本研究では、現在有力と考えられている筋座標仮説を用いて座標変換ニューラルネットワークモデルを構築し、そのモデルがKakeiらの実験結果を再現することができるかどうか検証を行った。

(2) 次に、私は、この座標変換ネットワークが一見不可能と思えるような状況を予測することに着目した。その状況とは、「視覚座標系で異なる運動を計画していたとしても、物理的には全く同じ運動を実行してしまう」というものである。もし本当に同じ運動が異なる処理経路によって実現できるのだとすれば、ある経路に障害が起きたとしても、他の経路でそれを補うことができる可能性が期待できる。そこで、このような冗長な機能が脳内に本当に存在するのかどうかを行動実験により検証を行うことにした。

## 3. 研究の方法

(1) 座標変換ネットワークには4層のニューラルネットワークを用いた。第一層は入力層であり、外部座標系における目標運動方向が入力される。第二層は、一次運動野の層であり、1000個のニューロンから成り、各ニューロンは、第一層から目標運動方向を受け取る。第三層は、筋の層であり、一次運動野から運動指令を受け取り、筋トルクを發揮する。第4層は出力層であり、トルクの総和を出力する。

運動タスクは、Kakeiらと同じタスクを用いた。つまり、手首の伸展屈曲軸と尺屈橈屈軸の二次元空間におけるリーチング動作である。Kakeiらのタスクの重要な点は、前腕の姿勢を回内位、回外位、中間位の三種類の姿勢を用いることである。こうすることで、外部座標系における運動方向と、筋座標系における運動方向を分離することができる。

本ニューラルネットワークモデルでは、視覚座標系における目標運動方向が、手首の姿勢(回内位、回外位、中間位)によってゲイン変調された信号が、一次運動野ニューロンに入力されるという仮定を用いた。

(2) 「視覚座標系で異なる運動を計画していたとしても、物理的には全く同じ運動を実行してしまう」という、計画と運動の多対一の関係が実現できるかどうかを検証する際に

は、肩、肘関節で行う上肢リーチング動作を用いた。

#### 4. 研究成果

(1)上記のニューラルネットワークモデルに、**Kakei** らの実験と同じ運動タスク、つまり、手首の回内位、中間位、回外位の3姿勢において8方向へのリーチング運動タスクを学習させた。**Kakei** らは、ニューロンの反応特性が、手首の姿勢によらず変化しなければ、そのニューロンは、外部座標系における運動方向をコードしているニューロン (Extrinsic neuron) であると考え、逆に、手首姿勢の変化に伴って反応特性が変化すれば、そのニューロンは、筋活動をコードしているニューロン (muscle-like neuron) であると考えていた。しかしながら、本研究の結果は、この考え方そのものを改めるべきであることを示すものであった。本ニューラルネットワークモデルでは、一次運動野ニューロンは筋を活動させている (筋座標系仮説) 以外にも関わらず、筋力と相関を持つニューロン (muscle-like neuron) だけではなく、視覚座標系における運動方向と相関を持つニューロン (Extrinsic neuron) も、「見かけ上」出現しうるということが明らかとなった (図1)。

本研究の結果は、見かけ上の相関だけをもって、ニューロンの情報コードを理解することはできないということを示している。今後、ニューロンが何をコードしているかを議論する際には、相関だけではなく、ネットワーク全体の振る舞いをとらえる必要があることを示唆している。

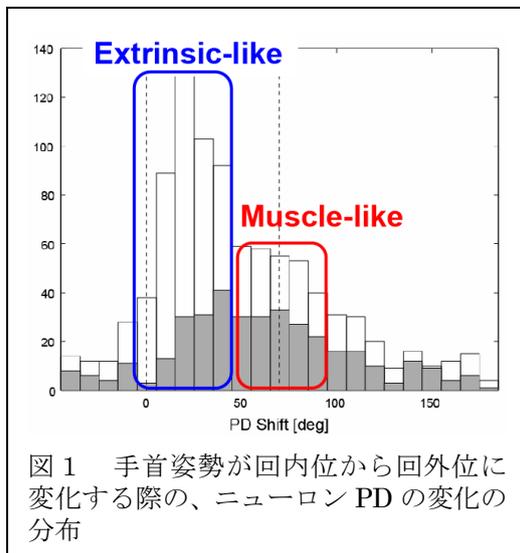


図1 手首姿勢が回内位から回外位に変化する際の、ニューロンPDの変化の分布

(2) この座標変換ネットワークの冗長性を考えれば、結果的に生じる運動が同じでも、それを生み出す脳内過程が異なる可能性は十分にある。そこで、視覚運動変換を用いてこの状況を作り出し、同じ運動に対して異なる

脳内過程が存在しうることを行動実験を用いて示した。リーチング課題で2種類のターゲットを交互に提示し、右斜め30度のターゲットの場合には、右30度の視覚運動変換を与え、左斜め30度のターゲットの場合には、左30度の変換を与えた。この課題を達成するには、左右どちらのターゲットに対しても、手をまっすぐ前に動かさねばならない。このような視覚運動変換の角度を徐々に増加させたところ、被験者はこの変換に徐々に適応することができた。つまり、被験者の実際の手の運動方向は徐々に前方向にシフトしていったのである (図2右)。興味深いことに、被験者は、結果的に生じる手の運動が殆ど同じであることに全く気付かず、画面上のカーソルの向きに手を動かしていると信じきっていた (図2左)。これは、物理的にはほとんど同じ運動が、異なる運動計画によって実現される、つまり、異なる座標変換処理によって実現されることを示している。

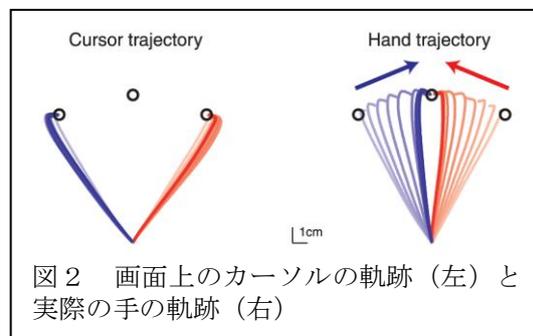


図2 画面上のカーソルの軌跡 (左) と実際の手の軌跡 (右)

さらに、この視覚運動変換の存在下で、それぞれのターゲットに相反する力場を課したところ、被験者は同時に適応することができた。これは同じ運動に対して異なる神経集団が動員されていることを強く示唆している。

このように、我々の脳は、本研究でモデリングした座標変換ニューラルネットワークと同じような冗長性を有していることが明らかとなった。これは、ある運動機能を失った場合でも、座標変換処理の過程を少し操作することで、機能を回復させることができる可能性を示唆している。

#### 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4件)

- ① 平島雅也、運動学習モデルから「不器用」を考える、精神科、査読無、18巻、5号、2011年、印刷中。
- ② Tsuyoshi Ikegami, Masaya Hirashima, Gentaro Taga, Daichi Nozaki, Asymmetric

transfer of visuomotor learning between discrete and rhythmic movements, Journal of Neuroscience, 査読有、30(12), 2010, 4515-4521.

- ③ Makoto Miyazaki, Masaya Hirashima, and Daichi Nozaki, The "Cutaneous Rabbit" Hopping out of the Body, Journal of Neuroscience, 査読有, 30(5), 2010, 1856-1860.

[学会発表] (計 15 件)

- ① Masaya Hirashima, Daichi Nozaki, Distinct motor plans enable simultaneous adaptation to conflicting force fields, Inaugural International Academy of Sportology, 2011.3.5, Tokyo.
- ② 平島雅也、野崎大地、筋座標系仮説に基づく一次運動野モデルから生じる見かけ上の筋及び空間情報表現ニューロン、第 4 回生理学研究所 Motor Control 研究会 2010.5.27-29、岡崎
- ③ Masaya Hirashima, Daichi Nozaki, Simultaneous adaptation to conflicting force fields by adopting different motor plans, Society for Neuroscience, 2009 年 10 月 17-21 日, Chicago.
- ④ 平島雅也、野崎大地、異なる運動計画が可能にする相反力場環境への同時適応、第 32 回日本神経科学大会、2009 年 9 月 16-18 日、名古屋
- ⑤ 平島雅也、野崎大地、身体運動制御に潜む脳内情報処理の冗長性、第 3 回 生理学研究所 Motor Control 研究会、2009 年 5 月 28-30 日、岡崎
- ⑥ Masaya Hirashima, Daichi Nozaki, Adaptation to conflicting force fields by adopting different motor plans, Society for the Neural Control of Movement, 2009 年 4 月 28 日-5 月 3 日, Hawaii.

[図書] (計 2 件)

- ① 平島雅也、市村出版、シリーズ：ヒトの動きの脳・神経科学 1 巻 姿勢の脳・神経科学、第二章：スポーツにおける姿勢とフォーム、2011 年、印刷中
- ② Masaya Hirashima, InTech, "Biomechanics /Book 1", ISBN 978-953-307-312-5, Induced acceleration analysis on three-dimensional multi-joint movements and its application to sports movements,

2011, In press.

6. 研究組織  
(1)研究代表者

平島 雅也 (HIRASHIMA MASAYA)  
東京大学・大学院教育学研究科・助教  
研究者番号：20541949