

3 ニューロフィードバック技術

3 Neurofeedback Techniques

3-1 人間の感覚・運動機能の理解と機能改善・向上のための研究

3-1 Understanding of Human Sensorimotor Functions to Boost these Functions

内藤栄一 廣瀬智士 池上 剛 平島雅也

Eiichi NAITO, Satoshi HIROSE, Tsuyoshi IKEGAMI, and Masaya HIRASHIMA

人間の生存にとって身体運動機能は必要不可欠である。我々の研究グループでは、超高齢社会の日本で顕在化している運動機能の低下、脳や身体の障害に起因する運動困難など様々な問題に対処するため、人間の感覚・運動機能を正しく理解して、これらの機能を改善・向上させることのできる技術の開発を行っている。我々は、主に機能的磁気共鳴画像装置 (fMRI) を使った脳の神経基盤の可視化、行動学実験による脳の作動原理のモデル化、さらには精巧な筋骨格モデルを使った動作シミュレーションなど、多角的な研究手法を用いて、これらの問題に対処している。

本稿では、特に、運動準備脳活動からその後に実行される運動の内容を推定する技術、他者の動作を観察・予測することにより無意識のうちに観察者の運動を変化させる介入技術、さらには人間の全身運動を正確にシミュレーションできる精巧な人体筋骨格モデルの研究成果を紹介し、今後の研究の展望を解説する。このような多角的アプローチを1つの研究グループで行っている例は世界でも稀有であり、こういった融合研究は、人間の感覚・運動機能の包括的な理解を可能にし、健康、医療、福祉、リハビリテーションやスポーツ分野などにイノベーションを起こすことが期待できる。

Sensorimotor function is a requisite for human existence. In our group, we try to understand how human sensorimotor system works and to develop intervention techniques that may boost sensorimotor functions, in order to solve impairment and disorder of sensorimotor functions that have become evident in the super-aging Japanese society. In our group, we adopt multiple experimental approaches, which are quite rare and unique even in the world, namely visualizing neuronal substrates using functional magnetic resonance imaging, modeling of how the brain works based on behavioral data, and computer simulation of actions using an elaborate human musculo-skeletal model and so on. In this paper, we introduce our recent research outcomes, especially, a decoding technique that allows us to read-out content of motor actions from preparatory brain activity, an intervention technique that may implicitly change observer's motor actions by predicting other's motor outcomes, and development of an elaborate human musculo-skeletal model allowing us to perform precise computer simulation of entire body actions. Such interdisciplinary approaches may enable us to reach comprehensive understating of how human sensorimotor systems work and to expect significant innovations in the broader fields of healthcare, welfare, rehabilitation and sports.

1 まえがき

身体運動機能は人間の生存にとって必要不可欠である。特に超高齢社会を迎えた日本では、高齢化に伴う自然な運動機能の低下や身体や脳の障害などによる運動困難が、日常生活のQOL (Quality of Life) を低下

させているという現状がある。運動機能を向上・改善させるためには、普段からの運動習慣やリハビリテーション介入が有効となることは間違いない。しかし、これを効果的に行うためには、人間の感覚・運動機能の特徴や脳の可塑性の原理を深く理解して、有効な運動習慣やリハビリテーション介入の戦略を立てる必要

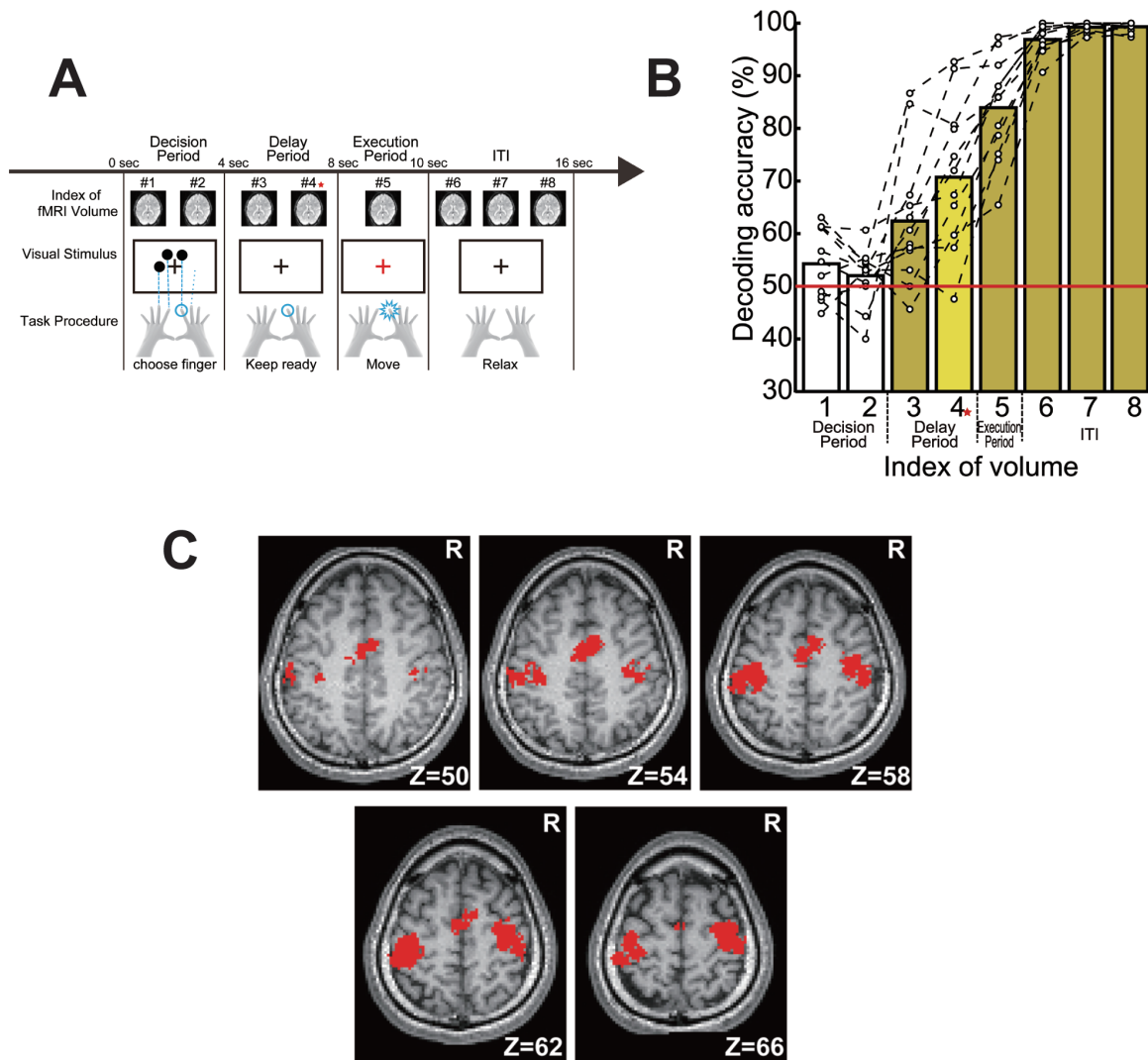


図1 左右手の自由選択課題の方法と結果

A: 被験者は4秒間の Decision Period の間に自分で左右どちらの手の指を動かすか決める。その後、4秒間の Delay Period を経て、先ほど決めた指で運動を行う (Execution Period)。B: デコーディング精度。横軸は、デコーディングに使用した fMRI の volume を示す (パネル A の Index of fMRI Volume に対応)。縦軸は、実際に動かし手 (左手か右手) の予測精度。赤横線は判別のチャンスレベル (50%) を示す。棒グラフは被験者間の平均予測精度、点線で繋がれた円は個々の被験者の結果を表す。黄色棒は予測精度の被験者間平均が有意にチャンスレベルより高かったことを示す。運動開始前に計測した脳活動 (Index of fMRI Volume = 4) から約 70% の平均予測精度で予測可能であった。90% 以上で予測可能な被験者もいた。C: 運動開始前に計測した脳活動 (Index of fMRI Volume = 4) からの予測に主に貢献していた脳領域 (赤色)。両側の背側運動前野、第一次運動野、補足運動野が主に貢献していた。

がある。これを実現するために、我々の研究グループでは、主に fMRI を使った脳の神経基盤の可視化や可塑性原理の解明、行動学実験による脳の作動原理のモデル化、さらに精巧な筋骨格モデルを使った動作シミュレーションなど、多角的な研究アプローチを展開している。

我々の研究は、人間の身体運動機能に関連した幅広い研究対象を網羅し、リハビリテーションやスポーツトレーニングなどへの出口を意識しながら、健康、医療、福祉に貢献することを目的としている。我々はこれまでに、成人の脳が身体運動をどのように知覚・認知して、これを制御・学習しているか [1]-[7]、自己の身体の認知や運動機能が人間の発達とともにどのよう

に獲得され、また加齢とともにどのように劣化していくのか [8]-[12]、さらにはスポーツ選手や視覚障害者など長期にわたり日常的に特殊な感覚処理や身体運動を体験し続けた場合の脳の可塑的变化 [13]-[16] などに関する学術的成果を報告し、主に療法士を対象とした研究成果のわかりやすい解説活動も行ってきた。

本稿では、特に、2章や4章で紹介する脳情報復号 (デコーディング) 技術やブレインマシンインターフェース技術との関連の深い、運動準備脳活動からその後に行われる運動の内容を推定する技術、他者の動作を観察・予測することにより無意識のうちに自己の運動を変化させることのできる介入技術、さらには人間の全身運動を正確にシミュレーションできる精巧

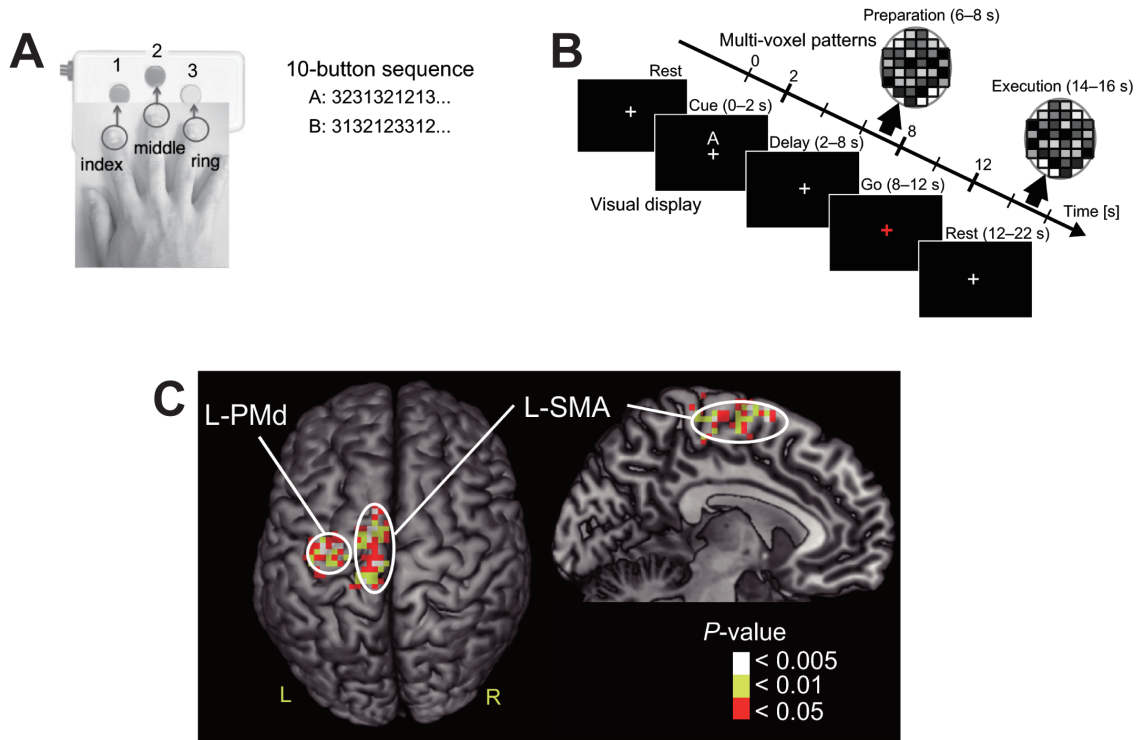


図2 系列指運動課題の方法と結果

A: 被験者は脳活動計測中、AとBの系列指運動を行った。B: 課題1試行の流れ。試行の開始を0秒とする。まずモニタに“A”か“B”の文字が2秒間(Cue: 0-2秒)出て、行うべき運動が指定される。6秒間のDelay(2-8秒)の後、運動を実行する(Go: 8-12秒)。Cue開始から6-8秒の間に計測した脳活動を運動準備脳活動(Preparation: 6-8秒)とした。C: 運動準備脳活動からのデコーディングに主に貢献した脳領域。手と反対側(左)の背側運動前野(PMd)や補足運動野(SMA)の活動が主に判別に貢献していた。

な人体筋骨格モデルの研究成果を紹介し、今後の研究の展望を解説する。

2 運動準備脳活動から実行される運動の内容を判別する

人間が運動を行う場合、脳はこの運動を準備する必要がある。古くから、人間が随意的に手指の運動を開始しようとする、運動開始に先立って前頭部の頭皮上から事象関連電位(脳波)が観察できることが知られており、この活動が運動の準備過程を反映すると考えられる(運動準備電位)[17]。このように運動準備のための脳活動(運動準備脳活動)は運動開始前に存在する。この準備脳活動は、その後の運動の実行のためであるので、この活動の中には、その運動に関する具体的な情報が表現されているはずである。だとすれば、運動準備脳活動からその後に実行される運動の内容を判別し、これを予測することが可能なはずである。近年のデコーディング技術はこれを可能にする[18][19]。1でも紹介したが、デコーディングとは記録した脳活動から知覚、意図など、脳に含まれる情報を取り出す技術のことであり、機械学習を使って、大量のデータから脳活動と情報の関係性をコンピュータに学習させ、学習後に作られた計算式に基づいて、新たに計測した

脳活動から情報を抽出することができる。この技術は、4章で紹介するブレインマシンインターフェースの基盤技術であるが、この技術を使って、運動開始前の脳活動からその後に実行される運動の内容(動かす身体部位や動かす方向など)を読み取る試みが盛んに行われている[20]-[22]。

2.1 fMRI デコーディングによる手指運動の予測

前述の運動準備電位は脳活動の総和を反映しているため、脳のどの領域の準備活動がその後に実行される運動の情報を保持しているかを同定するには限界がある。我々は空間分解能に優れたfMRIを用いて、被験者が左右どちらの手で運動を実行するかを運動準備期間の脳活動から判別する実験を行った[23]。どちらの手を選ぶかは被験者の自由意思に任されており、準備期間中の行動を観察しただけではどちらの手で運動するかは予測できない。しかし、我々が開発したデコーディング手法を用いると[24]、運動準備期間の脳活動から左右どちらの手で運動するかを平均70%の精度で判別可能であることがわかった(図1)。このような判別は、両側の背側運動前野、第一次運動野や補足運動野の準備活動から可能であり、判別の成績が良い人(=恐らく運動がよく準備できている人)ほど反応が速いという結果も得られた(図1)。

我々はまた、運動準備脳活動から手指の系列運動の種類を判別するという試みも行った [25]。手指の系列運動とは、ピアノを弾くときなどに見られる連続した一連の手指運動であり、脳はこのような一連の運動を行う場合、個々の指を独立に制御するのではなく、チャック（ひとまとまり）化された運動の塊を一挙に実行すると考えられている。被験者は、実験に先立って、系列の1つ目の運動を同じ指で開始する、2つの似て非なる系列指運動を学習した。学習が完了した後、この課題を行っている際の運動準備期間の脳活動をfMRIで計測すると、両側の広範な前頭-頭頂領域や運動関連領域が活動していることがわかった。しかしながら、デコーディングを用いると、背側運動前野や補足運動野という高次運動領野の活動のみから、次にどちらの系列運動が実行されるかの判別が可能であることがわかった (図2)。これらの脳領域は古くから運動を心的に想像する (運動をイメージする) 場合に活動することが知られている [15]。この研究結果は、これらの高次運動領野の運動準備脳活動には、その後実行される運動の具体的な内容に関する情報が表現されている可能性を示唆している。

現在のデコーディング技術は、人間が運動を開始する前の脳活動から、その後どのような運動が実行されるのかを予測することを可能にしつつある。このような技術は、人間の危険行動への予測的警告やロボットなどを用いた運動機能支援を可能にするため、更なる予測精度の向上や携行可能な脳計測装置での実現など技術的な改善が望まれる。一方で、脳情報というこれまで人類が扱ったことのないレベルの個人情報扱うことになるため、安心・安全に運用できるような倫理的側面からの議論も必要である (図2)。

3 他者動作の観察・予測により自己の運動を変化させる

fMRIなどの脳計測技術は、ある脳機能を実装する神経基盤の可視化において極めて有効な研究ツールである。一方で、頭部の動きを伴う全身運動とは相性が悪いという限界もある。身体運動研究の究極の目的は、脳が全身運動をどう制御しているかを解明することであるため、脳計測技術だけではこの理解に到達することはできない。これを可能にする方法は、運動行動を詳細に解析し、その背後にある脳の制御モデルを明らかにするアプローチである。我々の研究プロジェクトでは、このアプローチも動員して包括的な研究を展開している。

2では、運動準備中の脳活動に、既にその後実行される運動に関する具体的な情報が準備されていること

を示した。言い換えれば、この運動準備中の脳活動を何らかの方法で変えることができれば、その後実行される運動も変えることができる。これを効果的に実現する方法の1つに、他者動作を観察するという手段がある。例えば、スポーツを観戦しているとき、テレビの前でアスリートと同じように、思わず身体を動かしてしまいそうになった、あるいは実際に動かしてしまった経験を持つ人は多いはずだ。このように他者の動作 (他者動作) の観察によって自己の動作 (自己動作) が無意識的に影響を受ける現象を運動伝染と呼ぶ [26]。運動伝染は20年ほど前から心理学の分野を中心に盛んに研究され、他者動作の意図や目的を理解するメンタライジングの基盤としても提案されている [26]。近年、我々は従来の運動伝染とは異なる新しい種類の運動伝染が存在することを突き止めた [27]。以下では、従来の運動伝染を紹介しながら、新しい運動伝染に関する一連の研究を紹介する [27]-[31]。

3.1 従来の運動伝染：模倣運動伝染 他者動作の観察が自己動作に影響する

従来の運動伝染は、以下の2つの特徴を示す。1) 他者動作を見ることによって自己動作が無意識のうちに影響を受ける。2) 自己動作は、他者動作を模倣するように変化する (自動模倣) [32]。後者の特徴に基づき、従来の運動伝染をここでは「模倣運動伝染」と呼ぶ。模倣運動伝染によって、自己動作は、キネマティクス、目標、結果といった様々な動作特徴、または動作全体において、他者動作を無意識的に模倣するようになる。例えば、野球のバッティングでは、前の打者がヒットを打った同じ方向に、次の打者もヒットを打ちやすくなる (動作結果の運動伝染) [33]。また、誰かと会話している際に、相手が腕を組むと無意識のうちに自分も腕を組む動作を行いやすくなることなどが知られている (動作全体の運動伝染) [34]。

3.2 新しい運動伝染：予測運動伝染 他者動作の予測が自己運動を変化させる

我々は、近年、模倣運動伝染のように他者動作を単に観察するだけではなく、他者動作の予測に依存して生じる新しい運動伝染を発見した。この現象を「予測運動伝染」と呼び、以下で一連の研究成果を紹介する。

まず、他者動作に対する予測能力の変化が自己動作に与える影響について解説する [29]-[31]。この研究では、ダーツのエキスパートが被験者になった。エキスパートは、自分が実際にダーツを投げる運動課題と、素人がダーツを投げる映像 (ダーツの軌道や的は見えないように撮影) を見て、ダーツが的のどこに刺さったかを予測する予測課題の2つを行った。予測課題で

は、素人動作の目標（狙っている場所）や結果（ダーツが刺さった場所）といった運動情報のフィードバックを実験的に操作することによって、素人動作に関するエキスパートの予測能力が向上する条件（実験1）と、向上しない条件（実験2）を設定した。

【実験1】

- ・エキスパートに、素人がダーツを投げている映像を見せ、ダーツがどこに命中したかを予測させる。
- ・素人が中心を狙ってダーツを投げているというヒントを与え、毎回予測の答え合わせをする。

【実験2】

- ・エキスパートに、実験1と同じ映像を用いた予測課題を実施する。
- ・素人が中心を狙ってダーツを投げているというヒントを与えず、さらに、毎回の予測の答え合わせもしない。

両条件とも同じ素人動作を観察したにもかかわらず、予測能力が向上する条件のみで、運動課題におけるエキスパートのダーツ成績が無意識のうちに悪化した（図3）。この結果は、単に他者動作を見ることによって生じる従来の模倣運動伝染では説明できない。つまり、予測に依存した新しい運動伝染の存在が示唆された。加えて、エキスパートが、予測能力を向上させるために、動作観察に伴う予測誤差の情報を利用してしていると推測された。この予測誤差とは、エキスパートが予測した素人動作と、実際に素人が行った動作との間の誤差のことである。我々は、他者動作観察中の予測誤差こそが、自己動作を変化させるという仮説を立て、

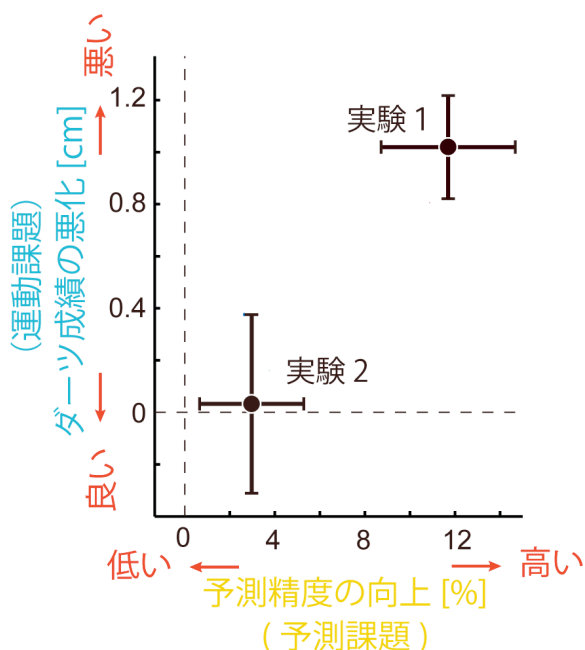


図3 エクスパートの素人動作に対する予測能力とダーツ成績の関係

次の実験を行った [27]。

この研究では、大学野球部員が被験者になった。被験者は、自分がターゲットの中心を狙って実際にボールを投げる運動課題と、他者のピッチャーが主にターゲットの右上方向にボールを投げる映像を見る観察課題を行った。予測誤差を操作するために、予測誤差ありのグループには「ピッチャーは真ん中を狙っている」、予測誤差なしのグループには「ピッチャーは様々な場所を狙っている」と異なる教示をした。前者の教示によって、被験者は「ピッチャーが投げるボールは真ん中付近にくるだろう」と予測する。しかし、実際には、ボールは主に右上に投げられるため、ここに予測誤差が生じる。一方、後者の教示によっては、被験者は特定の予測ができないため、予測誤差は生じない。実際の運動課題のデータを解析すると、予測誤差がない場合、被験者が投げたボールの位置は、観察したピッチャーが投げたボールの位置と同じ方向、つまり右上方向にずれていった（図4青丸）。この結果は、模倣運動伝染が起きていることを示唆した。一方で、同じ動作を観察したにもかかわらず、予測誤差がある場合、被験者のボールの位置は、予測誤差の方向と真逆の左下方向にずれていくことがわかった（図4赤丸）。この結果は、単なる模倣運動伝染では説明ができなく、これとは異なる、他者動作観察中の予測誤差によって生じる新しい運動伝染、予測運動伝染の存在が強く示唆された（図4）。

以上より、運動伝染には、少なくとも模倣運動伝染と予測運動伝染の2種類が存在することが明らかとなった。これら2つの運動伝染には、異なる脳の情報処理過程が関与すると推測できる。他者動作を観察する際、まるで自分が行っているように、脳はその動作を内的にシミュレーションすると考えられている [35]。他者動作の観察中や直後は、このシミュレーションの

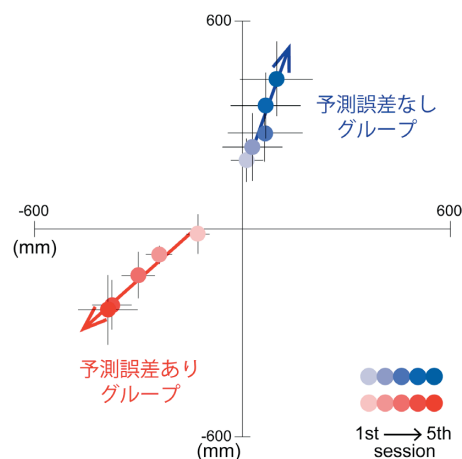


図4 右上方向に投げるピッチャー動作を観察後に被験者が投げたボール位置の変化

影響を受けるため、観察者は他者動作に類似した動作を生成しやすくなると推測される [26]。一方、動作観察中に予測誤差が生じる場合、その予測誤差が脳のシミュレーション過程を修正するため、観察者の動作が予測誤差を修正する方向に変化すると想定している [27]-[31]。このような運動伝染には、脳内のミラーニューロンシステム (MNS) が関与しているだろう。近年のニューロイメージング研究より、MNS の中核である腹側運動前野は下前頭葉と下頭頂葉などを広汎につなぐ脳内神経線維 (上縦束第3ブランチ) のネットワークに所属していることがわかってきた。実際、このネットワークは、運動の模倣だけでなく、運動の心的シミュレーション、運動結果の予測、予測誤差処理、身体認知など多岐にわたる機能に関与している [1][3][5]-[7]。

上述の結果は、自己の運動を変化させる運動伝染の有効性を示している。このような方法は、観察者の動作を無意識のうちに望ましい方向へと導くことのできる、新しい運動トレーニングやリハビリテーション法の開発へとつながっている。

4 冗長な筋を制御する脳の仕組み

我々の身体には何百という数の筋が存在し、脳はこれらをうまくコントロールしている。個々の筋へ意識を向けることなく、膨大な数の筋を協調させることができる脳の情報処理の仕組みは一体どのようなものなのだろうか。我々は、この仕組みを明らかにすることで、高齢者や運動疾患患者の運動機能改善やスポーツ選手のフォーム改善を支援するシステムの開発に役立てる試みも行っている。

膨大な数の筋の制御について、情報処理の観点から重要な点は、関節を動かすために最低限必要とされる

数よりも多くの筋を有しているという点である。これを筋の冗長性と呼ぶ。冗長性は代替が効くという意味では生体にとって非常に有意義であるが、それを制御する中枢神経系の側から見ると非常に厄介な問題である。ある運動を行おうとした際に、これを実現し得る筋活動パターンは無数に存在するため、脳はその無数の解の中から1つの解を選び出さなければならないからである。

解を1つに絞り込むために脳が用いている方略として、「最適化仮説」[36][37]と「筋シナジー仮説」[38]が候補として挙げられている。最適化仮説とは、何らかの基準 (評価関数) に基づいて、無数の解の中から最適な解を選び出しているとする仮説である。筋シナジー仮説は、協調して活動すべき筋群はあらかじめ神経的に結合しており、それが拘束条件となって解が絞り込まれるという仮説である。これら2つの仮説は決して排他的なものではなく、互いに補完し得る考え方を含んでいる。以下では、数学的定義が厳密に行える最適化仮説を用いて脳が冗長問題を解決する仕組みを解説する。

肩関節と肘関節の2自由度の身体を冗長な数の筋 (8つの筋) で制御する状況を考える (図5 A, B)。図5 B は、各筋が単独で活動した時に発揮するトルクベクトルを示したものである。例えば、肩の単関節屈筋である三角筋前部 (濃青) は、横軸 (肩トルクの軸) に沿ったベクトルとして表現され、肩と肘の両方に作用する二関節屈筋である上腕二頭筋 (シアン) は、2つの軸の成分をもつ斜めのベクトルとして表現される。ところが、人間の二関節筋は、屈筋-屈筋、または、伸筋-伸筋の組み合わせしか存在しないため、トルク空間内の筋の分布には偏りがある。つまり、脳は、このような偏りのある8つの筋トルクベクトルをうまく組み合わせることによって、目標とする2次元トルク

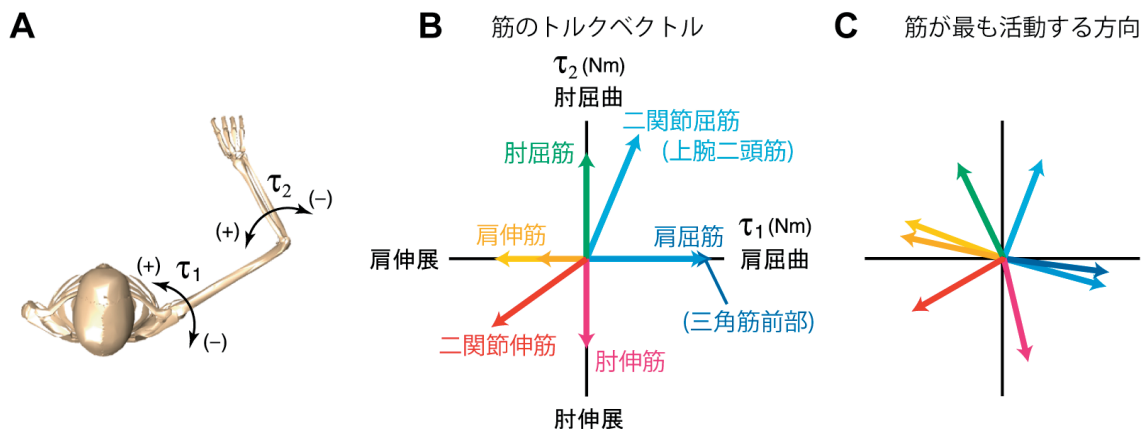


図5 A: 水平面内での肩関節と肘関節のトルク発揮課題 B: 各筋が単独で活動した時に発揮するトルクベクトル。図中には合計8本の筋が描かれている。肩屈筋と肩伸筋には各2本のベクトル (アウターマッスルとインナーマッスル) が描画されている。C: 筋が最も活動する方向。色使いはBと同じである。A,B,C: [41] より改編

ベクトルを生み出す必要がある。

直感的には、肩屈筋の活動レベルは、肩で要求される屈曲トルクにだけ依存して変化すると考えられるが、実際にはそうはならない。肩屈曲トルクに加えて肘伸展トルクも同時に要求されたときの方が、より強く活動する。つまり、筋の力学的作用方向と最も活動する方向には乖離があるのである(図5BとCを比較)。この一見不可解な現象は、長年の謎とされてきたが、最適化仮説によってうまく説明されることが最近の研究からわかってきた。

図5Bのように筋群の分布に偏りのある場合、これらの活動度の二乗和が最も小さくなるような筋活動パターンをシミュレーションしてみると、上記のような一見不可解な筋活動パターンが現れることがわかった[39]。この結果は、脳が、肩の筋の活動レベルを決定する際に、肩だけではなく肘の状況も踏まえて、身体全体としての最適なパターンを選び出していることを示している。この考え方をを用いると、上肢だけでなく下肢の筋活動パターンも推定できる[40]ことから、脳はこのような最適化の原理に基づいて、筋活動パターンを選んでいると考えることができる[41][42]。

4.1 筋骨格モデル「デフ マッスルDef Muscle」の開発

従来の研究では、上肢や下肢の運動を2次元平面内に限定した場合でしか検証が行われておらず、3次元運動においてもこの最適化仮説が当てはまるのかは実は明らかではない。3次元運動においては、筋トルクベクトルの関係性が時々刻々と複雑に変化するが、このような筋骨格系の変化を正確に表現できるモデル(筋骨格モデル)は存在せず、最適化仮説の検証は不十分な状態であるのが現状である。

そこで、我々は今までにない新しいタイプの筋骨格モデルの開発にも着手している。現在普及している筋骨格モデルの最大の欠点は、筋をボリュームのない線や折れ線で表現していることである。ボリュームのないモデルでは、筋同士または筋と骨の干渉を正確に表現することができず、筋肉が骨の中に埋まったり、本来表層にあるべき筋肉が深層の筋肉の内部に埋まったりといった不自然な状況が起きてしまう場合がある。特に、肩関節や股関節など筋が3次元的に複雑に絡まった部位では、筋の力学的作用方向を正確に表現することがほぼ不可能であった。

この問題を根本的に解決するため、筋肉のボリューム(大きさ・形状)と干渉(ぶつかり合い)による変形を考慮したデフォーマブル筋骨格モデル「Def Muscle」の開発を行っている(図6)。ボリュームの変形の計算には多大なコストがかかるが、近年急速に発展したGPU並列プログラミング手法を取り入れるこ



図6 GPUを用いて開発された肩周辺のデフォーマブル筋骨格モデル「Def Muscle」

とでこの問題の解決を図り、現在では、従来の線モデルでは表現しきれなかった肩の複雑な筋走行を再現できるモデルの開発に至っている[43]。

今後は、このモデルから各筋のトルクベクトルを抽出し、これらが姿勢変化に伴ってどのように変化するかを定量的に示すとともに、このような特徴をもつ筋群に最適化仮説を適用した場合に、どのような筋活動パターンが出現するのかを予測することで、実際に観察される筋活動を説明できるかを検証していく予定である。「Def Muscle」は、脳科学だけでなく、人間の運動を扱うすべての分野で有用なツールになることが期待できる。現在、MRI画像を基に個人の形状をそっくり写し取ったパーソナルモデルの開発も進めている。これを導入することで、これまでになく高精度な筋骨格運動の計測、整形外科的診断、運動機能向上アドバイスが可能となり、健康・スポーツ分野にイノベーションを起こすことが期待できる。

謝辞

本稿で紹介した研究は、多くの共同研究者のご協力の下、行った。ここにすべての共同研究者に感謝の意を表します。小池美穂、片桐奈央子、河上千恵、藤江陽子各氏の研究支援に心より感謝いたします。

【参考文献】

- 1 内藤栄一, 守田知代, “ヒトの身体図式の脳内表現と身体的自己意識,” *BRAIN and NERVE*, vol.66, no.4, pp.367–380, 2014.
- 2 K. Amemiya, and E. Naito, “Importance of human right inferior frontoparietal network connected by inferior branch of superior longitudinal fasciculus tract in corporeal awareness of kinesthetic illusory movement,” *Cortex*, vol.78, pp.15–30, May 2016.
- 3 E. Naito, T. Morita, and K. Amemiya, “Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness,” *Neuroscience Research*, vol.104, pp.16–30, March 2016.
- 4 N. Mizuguchi, S. Uehara, S. Hirose, S. Yamamoto, and E. Naito, “Neuronal substrates underlying performance variability in well-trained skillful motor task in humans,” *Neural Plasticity*, vol.2016, Article ID 1245259, June 12. 2016, DOI:10.1155/2016/1245259.
- 5 内藤栄一, “運動制御と身体認知を支える脳内身体表現の神経基盤,” *理学療法学*, vol.43, no.3, pp.59–62, 2016.
- 6 内藤栄一, 雨宮薫, 守田知代, “頭頂連合野と身体情報,” *BRAIN and NERVE*, vol.68, no.11, pp.1313–1320, 2016.
- 7 内藤栄一, 雨宮薫, 守田知代, “固有感覚,” *Clinical Neuroscience誌*, vol.35, no.2, pp.140–144, 2017.
- 8 守田知代, 内藤栄一, “Neuroimaging から見た発達研究,” *児童心理学の進歩*, vol.55, pp.274–298, 2016.
- 9 T. Morita, M. Asada, and E. Naito, “Contribution of neuroimaging studies to understanding development of human cognitive brain functions,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.10, Article 464, Sept. 15. 2016, doi:10.3389/fnhum.2016.00464.
- 10 T. Morita, D. N. Saito, M. Ban, K. Shimada, Y. Okamoto, H. Kosaka, H. Okazawa, M. Asada, and E. Naito, “Self-face recognition shares brain regions active during proprioceptive illusion in the right inferior fronto-parietal superior longitudinal fasciculus III network,” *Neuroscience*, Vol.348, pp.288–301, April. 21. 2017.
- 11 E. Naito, T. Morita, D. N. Saito, M. Ban, K. Shimada, Y. Okamoto, H. Kosaka, H. Okazawa, and M. Asada, “Development of right-hemispheric dominance of inferior parietal lobule in proprioceptive illusion task,” *Cerebral Cortex*, vol.27, no.11, pp.5385–5397, Aug. 31. 2017.
- 12 T. Morita, D. N. Saito, M. Ban, K. Shimada, Y. Okamoto, H. Kosaka, H. Okazawa, M. Asada, and E. Naito, “Self-face recognition begins to share active region in right inferior parietal lobule with proprioceptive illusion during adolescence,” *Cerebral Cortex*, vol.28, no.4, pp.1532–1548, Feb. 6. 2018.
- 13 E. Naito and S. Hirose, “Efficient foot motor control by Neymar’s brain,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol.8, Article 594, Aug. 1. 2014, doi:10.3389/fnhum.2014.00594.
- 14 D. E. Callan and E. Naito, “Neural processes distinguishing elite from expert and novice athletes,” *Cognitive and Behavioral Neurology*, vol.27, no.4, pp.183–188, Dec. 2014.
- 15 内藤栄一, 南部功夫, 廣瀬智士, “イメージトレーニングによる運動学習と脳内機構,” *体育の科学*, vol.66, no.1, pp.11–18, 2016.
- 16 内藤栄一, “超一流サッカー選手の脳活動の特殊性,” *計測と制御*, vol.56, no.8, pp.588–594, 2017.
- 17 H. H. Kornhuber and L. Deecke, “Brain potential changes in voluntary and passive movements in humans: readiness potential and reafferent potentials,” *Pflügers Archiv-European Journal of Physiology*, vol.468, no.7, pp.1115–1124, July 2016.
- 18 Y. Kamitani and F. Tong, “Decoding the visual and subjective contents of the human brain,” *Nature Neuroscience*, vol.8, no.5, pp.679–685, May 2005.
- 19 F. Pereira, T. Mitchell, and M. Botvinick, “Machine learning classifiers and fMRI: a tutorial overview,” *Neuroimage*, vol.45, no.1, pp.S199–S209, Nov. 21. 2009.
- 20 J. P. Gallivan, D. A. McLean, K. F. Valyear, C. E. Pettepiece, and J. C. Culham, “Decoding action intentions from preparatory brain activity in human parieto-frontal networks,” *Journal of Neuroscience*, vol.31, no.25, pp.9599–9610, June 29. 2011.
- 21 J. P. Gallivan, D. A. McLean, J. R. Flanagan, and J. C. Culham, “Where one hand meets the other: limb-specific and action-dependent movement plans decoded from preparatory signals in single human fronto-parietal brain areas,” *Journal of Neuroscience*, vol. 33, no. 5, pp.1991–2008, Jan. 30. 2013.
- 22 G. Ariani, M. F. Wurm, and A. Lingnau, “Decoding internally and externally driven movement plans,” *Journal of Neuroscience*, vol.35, no.42, pp.14160–14171, Oct. 21. 2015.
- 23 S. Hirose, I. Nambu, and E. Naito, “Cortical activation associated with motor preparation can be used to predict the freely chosen effector of an upcoming movement and reflects response time: An fMRI decoding study,” *bioRxiv*, 2018, DOI:10.1101/295345.
- 24 S. Hirose, I. Nambu, and E. Naito, “An empirical solution for over-pruning with a novel ensemble-learning method for fMRI decoding,” *Journal of Neuroscience Methods*, vol.239, pp.238–245, Jan. 15. 2015.
- 25 I. Nambu, N. Hagura, S. Hirose, Y. Wada, M. Kawato, and E. Naito, “Decoding sequential finger movements from preparatory activity in higher-order motor regions: an fMRI multi-voxel pattern analysis,” *European Journal of Neuroscience*, vol.42, no.10, pp.2851–2859, Sept. 5. 2015.
- 26 S. J. Blakemore and C. Frith, “The role of motor contagion in the prediction of action,” *Neuropsychologia*, vol.43, no.2, pp.260–267, Jan. 7. 2005.
- 27 T. Ikegami, G. Ganesh, T. Takeuchi, and H. Nakamoto, “Prediction error induced motor contagions in human behaviors,” *eLife*, vol.7, e33392, 2018, doi: 10.7554/eLife.33392
- 28 G. Ganesh and T. Ikegami, “Beyond Watching: Action understanding by humans and implications for motor planning by interacting robots,” in *Dance Notations and Robot Motion*, Springer International Publishing, pp.139–167, 2016
- 29 T. Ikegami and G. Ganesh, “Watching novice action degrades expert motor performance: Causation between action production and outcome prediction of observed actions by humans,” *Scientific reports*, vol.4, 6989, Nov. 11. 2014, doi: 10.1038/srep06989.
- 30 T. Ikegami and G. Ganesh, “Shared Mechanisms in the estimation of self-generated actions and the prediction of other’s actions by humans,” *eNeuro* vol.4, no.6, Jan. 13. 2017, doi:10.1523/ENEURO.0341-17.2017.
- 31 池上剛, “運動システムを介した他者動作の予測,” *計測と制御*, vol.56, no.8, pp.573–579, 2017.
- 32 C. Heyes, “Automatic imitation,” *Psychological Bulletin*, vol.137, no.3, pp.463–483, May 2011.
- 33 R. Gray and S. L. Beilock, “Hitting is contagious: experience and action induction,” *Journal of experimental psychology Applied*, vol. 17, no. 1, pp.49–59, March 2011.
- 34 T. L. Chartrand and J. A. Bargh, “The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction,” *Journal of Personality and Social Psychology*, vol.76, no.6, pp.893–910, June 1999.
- 35 M. Jeannerod, “Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition,” *Neuroimage*, vol.14, no.1, pp.S103–109, July 2001.
- 36 R. D. Crowninshield and R. A. Brand, “A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion,” *Journal of Biomechanics*, vol.14, no.11, pp.793–801, 1981.
- 37 S. E. Engelbrecht, “Minimum principles in motor control,” *Journal of Mathematical Psychology*, vol.45, no.3, pp.497–542, June 2001.
- 38 A. d’Avella, P. Saltiel, and E. Bizzi, “Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior,” *Nature Neuroscience*, vol.6, no.3, pp.300–308, March 2003.
- 39 I. Kurtzer, J. A. Pruszynski, T. M. Herter, and S. H. Scott, “Primate upper limb muscles exhibit activity patterns that differ from their anatomical action during a postural task,” *Journal of Neurophysiology*, vol.95, no.1, pp.493–504, Jan. 2006.
- 40 D. Nozaki, K. Nakazawa, and M. Akai, “Muscle activity determined by cosine tuning with a nontrivial preferred direction during isometric force exertion by lower limb,” *Journal of Neurophysiology*, vol. 93, no. 5, pp.2614–2624, May 2005.
- 41 M. Hirashima and D. Nozaki, “Learning with Slight Forgetting Optimizes Sensorimotor Transformation in Redundant Motor Systems,” *PLoS Computational Biology*, vol. 8, no. 6, e1002590, June 28. 2012, doi: 10.1371/journal.pcbi.1002590.
- 42 M. Hirashima and T. Oya, “How does the brain solve muscle redundancy? Filling the gap between optimization and muscle synergy hypotheses,” *Neuroscience Research*, vol.104, pp.80–87, March 2016.
- 43 日本特許, 国立研究開発法人情報通信研究機構, 運動解析装置および運動解析方法, 特開 2017-037553.



内藤栄一 (ないとう えいいち)
脳情報通信融合研究センター
脳情報通信融合研究室
研究マネージャー
博士(人間・環境学)
身体認知、運動制御、ニューロイメージング



廣瀬智士 (ひろせ さとし)
脳情報通信融合研究センター
脳情報通信融合研究室
研究員
博士(人間・環境学)
ニューロイメージング、デコーディング



池上 剛 (いけがみ つよし)
脳情報通信融合研究センター
脳情報通信融合研究室
研究員
博士(学術)
運動制御、感覚認知



平島雅也 (ひらしま まさや)
脳情報通信融合研究センター
脳情報通信融合研究室
主任研究員
博士(学術)
運動制御・運動学習、バイオメカニクス