

令和元年6月11日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12971

研究課題名(和文)運動誤差の修正に関わる感覚運動統合の機序を脳波筋電図コヒーレンスから解明する

研究課題名(英文)Clarifying neural mechanisms behind sensorimotor integration related to motor error correction by means of corticomuscular coherence measurements

研究代表者

牛山 潤一 (USHIYAMA, Junichi)

慶應義塾大学・環境情報学部(藤沢)・准教授

研究者番号：60407137

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、運動指令の不正確性や身体システムの冗長性に起因する運動誤差の修正に関わる神経機序を、運動皮質と骨格筋の同期性の指標である「脳波筋電図コヒーレンス(CMC)」から検討した。研究1では、急峻な力発揮と保持を断続的に繰り返す課題を行った結果、運動初期の力の超過が大きいほど、CMCが有意に高まった。研究2では、断続的課題中に、突然自身の力が高すぎる/低すぎるように見せかける実験環境をつくった結果、力の下方修正が必要なときほど、CMCが高まる傾向がみられた。以上の結果から、我々の脳-身体システムは、運動誤差が大きく、力を弱めてこれに対応するときほど、脳と筋の同期性を高めることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで計算論的神経科学の分野において行動実験の結果から議論されてきた、フィードバック制御に関わる情報処理モデルに、神経生理学的なエビデンスを与えた点で基礎科学的な学術的意義がある。こうした議論をさらに積み上げていけば、脳と身体機能の可塑的变化を評価するバイオマーカーの創出につながるとともに、将来的には科学的根拠に裏打ちされた「モデルベースドニューロトレーニング」をスポーツ科学界に提示できるという、大きな社会的インパクトの可能性も秘めている。

研究成果の概要(英文): This study tried to clarify neural mechanisms to correct motor errors depending on inaccuracy of motor command and/or redundancy of our bodily system, by measuring corticomuscular coherence between electroencephalogram signals over the motor cortex and electromyogram signals from activated muscle. In Research 1, participants performed intermittent contraction task by repeating ballistic force development and static force retainment. As a result, the greater the initial force exceedance, the stronger the CMC. In Research 2, we constructed the experimental environment to disguise participants as exceeding or falling their muscle force. As a result, CMC was greater when they need to correct their muscle force downwardly. There results suggest that the motor cortex and muscle enhance their synchronization when we need to correct greater motor error by weakening our muscle force.

研究分野：運動生理学

キーワード：運動皮質 骨格筋 同期性 運動誤差

1. 研究開始当初の背景

人間の身体運動制御の機序を科学する領域として、近年「計算論的神経科学」という研究分野が注目されている。この分野では、特殊な運動環境下における運動行動の変化・適応過程から、脳内における情報処理過程を計算論的にモデリングする、というアプローチがとられ、一連の研究から、脳内には運動の「フィードフォワード制御」と「フィードバック制御」のそれぞれを担う制御器が存在することが示唆されている (e.g. Kawato & Gomi, *Biol Cybern* 1992; Scott, *Nat Rev Neurosci* 2004; Shadmehr et al., *Ann Rev Neurosci* 2010)。フィードフォワード制御器は、主に運動前における運動計画の役割を担い、運動初期に生じる実運動と目標運動との差(すなわち運動誤差)は、フィードフォワード制御器により出力された運動指令の正確性を反映する。ここで生じた運動誤差に関する情報は、フィードバック制御が機能しないような急速な運動を除き、運動実行中にも感覚器を介して中枢へとフィードバックされる。こうした感覚情報を用いて、環境に即した形に運動指令を調整し、運動誤差の柔軟な修正を担うのがフィードバック制御器である。

このように、感覚情報の運動指令への統合過程を解明することは、運動制御のメカニズムを理解するうえで根源的なテーマであるといえる。しかし、上述の議論はあくまでも行動実験の結果から脳・神経系による情報処理過程のモデルを推測するというアプローチであり、運動誤差の修正に関わるフィードバック制御器の更新過程について、その生理学的実態に関するエビデンスを示した研究は皆無である。

本研究では、体性感覚と運動の統合を反映すると議論される「脳波筋電図コヒーレンス」を用いて、運動誤差の修正に関わるフィードバック制御の神経生理学的エビデンスを収集する。脳波筋電図コヒーレンスは、神経生理学の世界で伝統的に用いられてきた誘発電位法(運動や刺激に対する一過性の神経系の応答を評価する手法)とは異なり、運動行動を阻害することなく、自然行動下での皮質-筋システムの動態を非侵襲に評価できる手法である。運動の発現・制御に関わる一連のシグナルフローを意識し、中枢(脳)と末梢(筋)をつなぐ神経ネットワークの振舞い(身体内部環境)と運動出力(身体外部環境への働きかけ)の関連性を検証することで、計算論的神経科学分野で提案されてきた、脳・神経系による情報処理モデルに確かな生理学的エビデンスを加えていく。

一方、運動生理学分野領域では、「脳波筋電図コヒーレンス」は「感覚情報と運動指令との間の対応関係の再校正(リキャリブレーション)」過程を反映する現象と考えられている(図1)。しかし、この仮説は未だ概念の枠をはずし、それを直接的に示すエビデンスは皆無である。本研究は、計算論的枠組みを導入した実験プロトコルによって「脳波筋電図コヒーレンス」研究のブレイクスルーを図る。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者の先行研究(Ushiyama et al., *J Appl Physiol* 2010; Ushiyama et al., *J Appl Physiol* 2011; Ushiyama et al., *J Neurophysiol* 2011; Ushiyama et al., *J Appl Physiol* 2012)で用いてきた「脳波筋電図コヒーレンス」をバイオマーカーとし、「感覚-運動再校正」の観点から、運動誤差の修正に関わるフィードバック制御器の更新過程の生理学的実態を明らかにすることを目的とした。

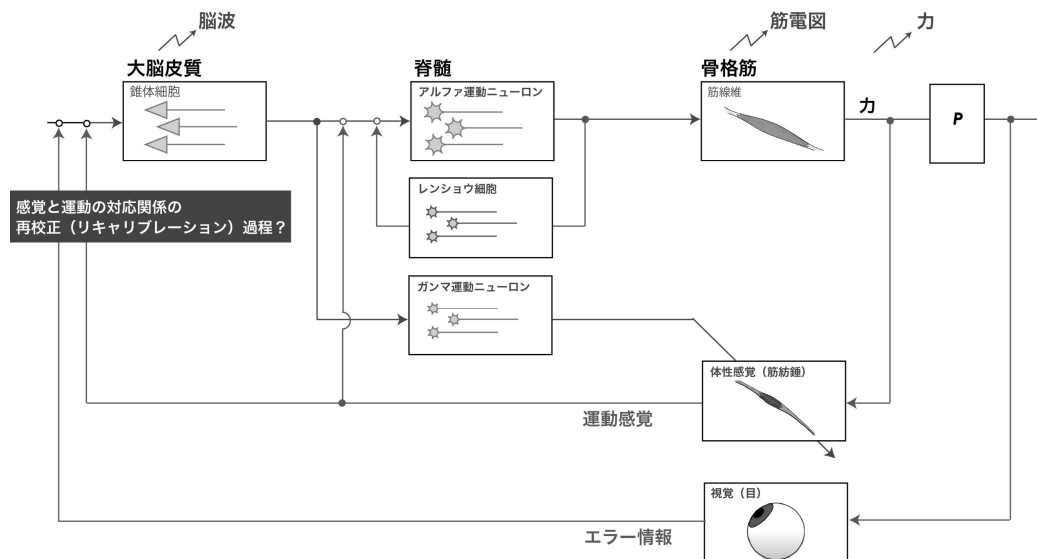


図1 脳波筋電図コヒーレンスに関わる神経システム

3. 研究の方法

(1) 研究1「断続的筋収縮課題中の初期運動誤差と脳波筋電図コヒーレンスの相関関係」

脳波筋電図コヒーレンスの研究分野では、等尺性随意収縮における力の維持期において、運動皮質と筋の相動性がどのようなメカニズムのもとに生成されているのか、が研究の主たる話題であった(e.g., Pohja & Salenius, *Neuroreport* 2003; Riddle & Baker, *J Physiol* 2005; Witham et al., *J Physiol* 2011). その一方で、この現象の運動制御における機能的意義は未だ解明されていない。そもそも、一口に「等尺性収縮」といっても、どのように力を立ち上げ、運動初期にどの程度運動誤差が生じたかによって、力の維持期における筋活動の制御則は大きく異なるはずである。研究1では、力の立ち上げ期を「フィードフォワード制御局面」、力の維持期を「フィードバック制御局面」と分類し、フィードフォワード制御局面における力の立ち上げ方の違いによって、フィードバック制御局面での脳波筋電図コヒーレンスにどのような差異が生じるか、を検討した。

研究立案当初は、0.5 秒以内に急峻に目標張力レベルまで力を到達させた後、これを保持する「Ballistic-and-Hold 課題」と、1 秒程度ゆっくりと時間をかけて力を立ち上げたのちこれを維持する「Ramp-and-Hold 課題」をランダムに与える課題を行っていた。しかし、課題間の差異が明瞭でなかった。そのため、課題を「Ballistic-and-Hold 課題」にしぼり、収縮 5 秒-弛緩 10 秒程度のリズムで随意筋収縮を断続的に繰り返してもらう課題を、健常成人被験者 20 名を対象に実施した。強度は最大努力の 10% または 15% とし、両強度はランダムに出現するようにした。力の維持期における脳波筋電図コヒーレンスの課題間比較を行った。また、力の立ち上げ値における初期運動誤差(急峻に発揮された力のピークと目標レベルとの差)についても各試行より導き出し、フィードフォワード制御器による指令の正確性の指標とした。またリファレンスデータとして、70 秒間の持続的収縮課題についても、10%・15%それぞれの強度にて行なわせた。

(2) 研究2:「運動誤差修正と脳波筋電図コヒーレンスの因果関係」

研究2では、研究1より見えてきた運動誤差と脳波筋電図コヒーレンスの関係性をもう一步先にすすめ、運動誤差の方向(力の超過/不足)や量(ターゲットレベルと発揮張力の差)と脳波

筋電図コヒーレンス対応関係について、研究2ではその因果の解明に取り組んだ。

被験者には、課題は研究1と同様の断続的な等尺性収縮課題であり、強度は最大努力の15%とした。ランダムに選ばれた試行時に発揮張力値に一定の値を加算もしくは除算するといった操作を人為的に行ない、視覚的なフィードバックを一部変調させ、カーソルが突然ジャンプし、発揮張力が高すぎる/低すぎるように見せかける環境を作り出した。本研究では、このように「実際の発揮張力」と「スクリーン上の発揮張力」を乖離した際に、被験者はターゲットと自身の力の間に誤差をどのように修正するか、脳波筋電図コヒーレンスの挙動から解析した。研究開始当初は、運動誤差の方向や量をさまざま設定して実験を行なったが、傾向にばらつきがあったため、量の要素は除外し、発揮張力が高すぎる/低すぎる(±3%)ように見せかける2パターンのカーソルジャンプにしぼった。

4. 研究成果

(1) 研究1「断続的筋収縮課題中の初期運動誤差と脳波筋電図コヒーレンスの相関関係」

70秒間の持続的課題では、脳波筋電図コヒーレンスに強度間の差異は確認されなかった($p = 0.361$)。この結果は、研究代表者自身が過去に発表した先行研究の結果を支持するものであった(Ushiyama et al., *J Appl Physiol* 2013)。しかし断続的課題では、10%課題で有意に大きな脳波筋電図コヒーレンスが確認された($p = 0.017$)。ここで、運動初期の力の誤差値に注目すると、10%課題は15%課題よりも平均値($p < 0.01$)・標準偏差($p < 0.01$)ともに有意に大きかった。よって、10%課題時のほうが、フィードフォワード制御が不安定であり、急峻な力発揮によって生じた初期誤差の修正のために、脳と筋の同期性が高まることが示唆された。計算論的神経科学の世界では、運動系が出力した運動指令が大きいほど、内包されるノイズの影響で系は不安定になり、フィードバック制御器の更新が強く必要となる、というSignal-dependent-Noise仮説が提唱されている(Harris & Wolpert, *Nature* 1998)。本研究の結果はこれを支持するものであり、運動誤差(力のオーバーシュート)が顕著で、力の下方修正がとくに要求される10%課題において、感覚と運動の統合が促進し、脳波筋電図コヒーレンスが増加したものと考えられる。

今後、運動強度・力の立ち上げ方・ランダム化するか否か、などのパラメーターを修正しながら同様の研究を積み上げることで、異なる運動環境・運動要求に対して我々の感覚運動系はどのような神経戦略をもとに柔軟に対応しているのか、理解を深めていく。

(2) 研究2:「運動誤差修正と脳波筋電図コヒーレンスの因果関係」

10名中7名の被験者において、発揮張力が高すぎると見せかけた(すなわち、力の下方修正が必要な)課題時に脳波筋電図コヒーレンスが高まる傾向が認められた。一方、力が弱すぎると見せかけた(すなわち、力の上方修正が必要な)課題では、カーソルジャンプのなかった課題時と比較して、顕著な脳波筋電図コヒーレンスの差はなかった。このことから、力のオーバーシュートを下方修正する際には、感覚と運動の対応関係を再校正することで運動出力の調整をしているのに対し、力の不足分を上方修正する際には、感覚運動再校正を進めることなく、運動出力の調整のみで運動誤差を調整している可能性が示唆された。

今後、運動誤差が知覚できるレベルか否かなどを個人ごとに厳密に調整し、本研究課題から一旦外した要素である運動誤差の量(ターゲットレベルと発揮張力の差)との関係も再度検討することで、運動誤差と感覚運動統合の因果律について、理解を深めていく。

上記の研究に関連した研究成果は、「5. 主な発表論文等」にも記載のとおり、現在のところ学会発表3件にとどまっているが、2019年度には6回程度の学会発表をおこなう予定(うち2件についてはすでにNEURO2019にて発表予定・抄録受理済)であるほか、すでに投稿論文執筆の準備にとりかかっており、2019年度内の論文受理をめざしている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計3件)

鳥山央人, 牛場潤一, 牛山潤一. 運動イメージの心理学的鮮明度と頭皮脳波にみられる感覚運動リズムの関連性. 第12回 Motor Control 研究会, 2018年8月(上智大学/東京).

Toriyama H, Ushiyama J. EEG Sensorimotor rhythm is associated with the subjective vividness of kinesthetic motor imagery across healthy individuals. The 41st Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, July 2018 (Kyoto / JAPAN).

鳥山央人, 牛山潤一. 頭皮脳波にみられる感覚運動リズムと運動イメージ能力の関連性. 第21回マルチモーダル脳情報応用研究会, 2018年1月(慶應義塾大学/神奈川).

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等: <http://hmn.sfc.keio.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究分担者: なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 上野 良揮

ローマ字氏名: (UENO, yoshiki)

研究協力者氏名: 鳥山 央人

ローマ字氏名：(TORIYAMA, hisato)

研究協力者氏名：鈴木里奈

ローマ字氏名：(SUZUKI, rina)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。