

機関番号：94305

研究種目：若手研究（B）

研究期間：平成 21 年度 ～平成 22 年度

課題番号：21700598

研究課題名（和文） 外界との相互作用に関わる感覚運動系の脳調節メカニズム

研究課題名（英文） Sensorimotor control mechanisms for interaction with environments

研究代表者

木村 聡貴（KIMURA TOSHITAKA）

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・研究主任

研究者番号：40447032

研究成果の概要（和文）：運動時の外部環境の変化に巧く対応するうえで、感覚入力から無意識に短時間で実行されるリアクション運動（いわゆる反射）を適切に制御することが極めて有効である。本研究では、体性感覚反射の制御が運動中にどのように行われるのかを検討した。その結果、体性感覚反射の大きさは力学的変化に応じて非常に素早く（0.1 秒程度で）調節されること、また体性感覚反射の調節は視覚的な変化に対しても生じることなどが観察され、運動中の反射は環境に応じて柔軟に制御されることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：To adjust to changes in external environments during movement, it is quite effective to appropriately control the reaction (so-called reflex) unconsciously executed from the sensory input in a short latency. We examined how somatosensory reflex control is done during movement. The results showed that somatosensory reflex amplitude was modulated quickly (about 0.1 sec) in response to dynamical change in environment and that somatosensory reflex modulation also occurred to the visual change, suggesting flexible reflex control depending on external environments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
21 年度	1,200,000 円	360,000 円	1,560,000 円
22 年度	1,100,000 円	330,000 円	1,430,000 円
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000 円	690,000 円	2,990,000 円

研究分野：運動神経科学

科研ひの分科・細目：健康・スポーツ・身体教育学

キーワード：身体システム，運動制御，リアクション調節

1. 研究開始当初の背景

運動場面では様々なかたちで外界と接する。例えば、歩くときは地面への接地が繰り返されるし、球技スポーツを行えば、直接あるいは道具を介してボール等と接触をもつ。このような場合、外界や物体と身体との間には力学的な相互作用が状況に応じて多様に発生することになる。しかしながら、我々は経験や学習を通して、そういった相互作用に

巧みに対応することができる。このような巧みは大きく2つの運動形態に支えられている。一つは、相互作用が生じる環境の知覚や判断に基づく意識的な運動（随意運動）であり、もう一つは、相互作用によって生じた感覚情報から知覚・判断を介さずダイレクトに運動に結びつけるリアクション運動、いわゆる「反射」である。反射は、知覚処理を介さない故に自覚されることはないが、随意的

な反応よりも素早い運動を可能とし、相互作用に適切に対処するうえで不可欠な要素である。

外界との相互作用において重要な役割を果たす反射として、脚気の検査（膝下部をたたく検査）でよく知られている伸張反射がある。この反射は、外部からの刺激に伴い筋が伸ばされることによって筋に内在する筋紡錘から発せられた体性感覚信号が、反射ループを介して筋にもどり、衝撃力や姿勢変化を補償する運動応答である（例えば、ボールキャッチ時の腕姿勢のズレを戻すように作用する）。ただし、その応答は単に刺激（感覚入力）の大きさに依存するわけではなく、行っている運動の条件によって変化することが知られている。特に近年では、大脳を経由すると考えられている上肢筋の応答は、運動を行っている環境（Perreault et al. 2008）や運動の意図（Yamamoto & Ohtsuki 1989）に応じて調節されることが多数報告されている。しかしながら、そのような調節どのような情報処理を経て実現されているのかはよく分かっていない。この点について、最近筆者は、反射調節が相互作用までの時間を予測して実行されることや（Kimura and Gomi 2009）、大脳一次運動野の特定のネットワークが反射調節に主に関与していること（Kimura et al. 2006）などを明らかにしてきたが、反射調節の情報処理メカニズムについて未だ不明な点は多く残されている。

2. 研究の目的

本研究では、筆者の先行研究を発展させ、以下の2点から反射調節の情報処理過程を検討した。

(1) 反射調節の時間的特性に関する検討

筆者の先行研究では、反射調節が外界と相互作用するまでの時間を予測して実行されることが示されたが、“反射調節がいつ決まるのか”という問いについては不明な部分が残っていた。例えばスポーツ場面を考えると、フェイントなどによって予期していた状況が不意に裏切られ、改めて行動の再計画が求められる場面はよくある。そこで、一つ目の課題では、運動実行中の不意の外界変化に対して反射調節が適切に生じるか、という点について検討した。

(2) 反射調節の空間的特性に関する検討

二つ目の課題では、伸張反射調節に対する視覚フィードバックの影響を調べた。ここでは、腕運動を行っている際に間接的に視覚提示される手先位置に操作を加え、そのときの反射応答を評価する。既述したように、伸張反射は体性感覚情報に基づく姿勢補償反応と一般的に考えられているが、この実験を通

して、体性感覚反射の調節に視覚情報がどのように影響するか、という反射調節の空間的特性について検討した。

3. 研究の方法

(1) 反射調節の時間的特性に関する検討

基本的な実験セットアップおよび実験パラダイムは先行研究（Kimura et al. 2006）の設定を踏襲した。具体的には、マニピュランダム装置（以下、PFM）を用いて、被験者がPFMのハンドルを握って水平面で右上肢運動（手前から奥へのリーチング）を行っている際に、運動後半で運動に対して右あるいは左方向に一定力を発する仮想力場を設けた。被験者にはこれらの力場に抗して、できるだけ真っ直ぐのリーチングを行うように教示した。このとき、ハンドルが力場に至る前に小さな力摂動を左右いずれかの方向に加え、それによって誘発される上肢筋（肩関節の屈筋と伸筋）の反射応答を表面筋電計（EMG）から評価した（図1A）。リーチング運動の開始合図はブザー音で提示し、ブザー音の鳴る1秒前に各力場方向を視覚キュー（矢印）として提示した（コントロール条件として、力場を与えない条件も加えた、四角）（図1B）。これにより、被験者は運動後半で与えられる力場の方向を運動開始前に予測することができる。また、被験者は、事前にこれらの試行がランダム与えられる練習を十分に行うことで、力場に備えた運動、ひいては力場に応じた反射調節を獲得した。

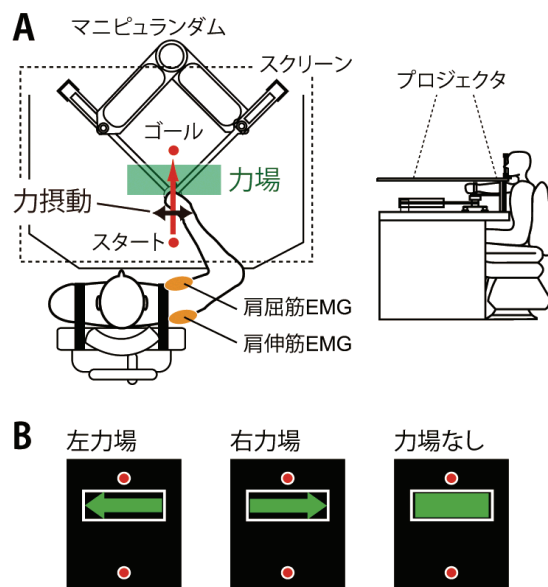


図1 A: 実験セットアップと被験者に課したリーチング運動課題、および運動中に与えた力場や力摂動のタイミング。B: 運動開始前に提示された各力場に対する視覚キュー

本番の計測では、事前に見せる矢印をわざと逆向きにして、運動中に正しい方向へ反転させる試行をある確率で挿入した。これにより、被験者は、矢印の反転に合わせて、行っている運動を実際の力場方向に合わせて修正する必要がでてくる。反転する時間は、リーチング開始後に力摂動が入る 50msec 前あるいは 150msec 前とした。

また、追加実験として、矢印の反転に対する意識的な反応時間（随意反応時間）を計測した。ここでは、被験者は、リーチング中の矢印の反転に反応して、リーチングの軌道をその方向へ曲げるように反応することが求められた。その際の EMG 波形から、反応時間を評価した。

(2) 反射調節の空間的特性に関する検討

基本的な実験セットアップは、一つ目の課題と同様であった。また、被験者は手前から奥へのリーチング運動を行い、運動の後半で力場が与えられた。ただし、この課題で用いた力場は、理想軌道（スタートとゴールを結んだ直線）から左右にズレると、その方向にズレた分だけ大きな付加力が加わる設定であった。また、本課題では、力場が課される空間での被験者の手先（グリップ）位置を、リアルタイムでマーカーとして提示した。被験者は、マーカーを手がかりとしながら、できるだけ真っ直ぐのリーチングを行うように教示された。

本実験でのポイントは、提示される視覚マーカーを操作し、実際の手先位置よりも左右いずれかの方向に大きくズレる条件、あるいは小さくしかズレない条件を設けた点である。つまり、力場によって物理的に同等の手先ズレが生じて、見た目のズレに変動が与えられるという状況となる。これらの条件をブロックに分けて実施し、一つ目の課題と同様に、反射を誘発させる力摂動を手先が力場に至る前に加えた。また、見た目のズレの大小に対応するように、力場で生じる付加力が大きいあるいは小さい条件のブロックを実施した（このとき、視覚マーカーは実際のとおり提示した）。

4. 研究成果

(1) 反射調節の時間的特性に関する検討

先行研究のとおり、運動中に与えられる力場の方向に応じて、手先が力場に到達する前に誘発された肩筋群の反射は変化した。すなわち、肩屈筋は右方向の力場条件で、肩伸筋は左方向への力場条件で、それぞれ逆方向の力場条件に比べて増大した。各筋の反射増大は、力場に伴う姿勢ズレを補償するうえで有効である（例えば、肩屈筋の反射増大は、右方向にズレた手先を素早く左方向へ戻すうえで効果的である）ため、これらの知見は伸

張反射が、運動前に提示されたキューを手がかりに、予測的かつ機能的に調節されることを示唆している（Kimura et al. 2006）。

それでは、視覚キューを運動中に不意に反転させた場合はどうであろうか？結果としては、力摂動の 150msec 前あるいは 50msec 前いずれの場合で反転させた場合でも、先の反射調節が観察された（50msec 前では、調節が不明瞭な被験者も見られたが）。なお、追加実験から評価した視覚キュー反転に対する反応時間は平均で 150msec ほどであった。50msec 前で反転した場合のキュー提示から反射出現までの時間はおおよそ 100msec であることから（摂動が入って反射が誘発されるまで 50msec 弱かかるため）、運動中の反射調節の修正は随意反応時間よりも短い時間で起こり始めていることが示唆される。本結果から、例えばフェイントなどによって、運動中に不意に環境への修正が必要となった場合でも、反射応答は非常に素早く適応できることを示された。

先行研究の結果を踏まえると、伸張反射の出力は、学習をとおして来るべき環境までの時間を予測して調節される一方で、不意の環境変化に対しても素早く修正が可能な柔軟な時間的特性を有していることが明らかとなった。

(2) 反射調節の空間的特性に関する検討

本実験では、力場によって運動軌道がズラされた場合に、（物理的な手先位置のズレは同程度であっても）ズレの大きさの見え方（視覚フィードバック）が伸張反射の応答に影響を与えるかを調べた。その結果、ズレの見え方の大小に伴って、伸張反射の応答も（視覚フィードバックを操作しない条件に比べて）増減することが観察された。例えば、右方向にズレが拡大する条件では、肩屈筋の反射応答は増大した（上述したように、肩屈筋の反射増大は、手先を左方向へ戻すように働く）。この課題で被験者は、なるべくズレを小さくするよう運動を行うことを教示されているため、見た目のズレが大きく生じた際に、それを補償するように反射が増大することは利に叶っている。

一般的に、伸張反射は体性感覚に基づく姿勢補償反応と考えられてきた。しかしながら、体性感覚と視覚情報とにギャップを作り出した本実験の結果から、必ずしも体性感覚情報だけで反射調節のゴールが決まるわけではなく、求められる課題の状況に応じて応答の大きさを調節していることが示唆された。すなわち、伸張反射は、他の感覚情報も統合して、空間的に望ましいかたちの調節を行っているのかもしれない。

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)

[学会発表] (計2件)

1) 木村聡貴, 五味裕章. 運動遂行中の体性感覚反射のオンライン調節. Neuro2010. 2010年9月3日, 神戸.

2) Toshitaka Kimura, Hiroaki Gomi. Online reflex gain setting to dynamical interaction during movement. 脳と心のメカニズム 第10回冬のワークショップ. 2010年1月12日, 留寿都.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 聡貴 (KIMURA TOSHITAKA)

日本電信電話株式会社NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・研究主任

研究者番号 : 40447032