

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500739

研究課題名(和文)自己運動に由来する運動誤差の修正を担う神経基盤の理解

研究課題名(英文)Properties of correction of motor error induced by self-body motion

研究代表者

門田 浩二(Kadota, Koji)

大阪大学・医学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50557220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：変動し続ける実環境下で正確な動作を実現するには、運動する者自身の移動や動揺が引き起こす誤差を修正する必要がある。本研究では到達運動中の視野背景運動が誘発する無意識的な修正動作の特性を整理することで、人間の自己運動に対する修正能力を実現している神経メカニズムの理解を深めることであった。実験の結果、この修正動作は同一条件下で繰り返し誘発されると抑制されることが明らかとなった。またこの抑制は単に刺激を見ているだけでは生じないことも明らかとなった。つまり、同じ視覚刺激に対しても、単に「見ているだけ」の状態とその情報を利用して動く状態では、その制御の仕方を無意識的に変化させている可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：We can perform several physical activities with higher accuracy, even there are many kinds of internal and/or external fluctuation. This would imply that our motor system is equipped with some mechanism for compensating the internal and external perturbations automatically. However, it is still unclear that a contribution of visual motion information to adjustment of arm reaching. In the last decade, several visuomotor studies demonstrated that a visual background motion during target reaching induce a reflexive manual response. This response, which called manual following response (MFR), is reflexively evoked with very short latency. In this study, we have examined whether or not MFR are modulated to adjust according to environmental condition. In the result, MFR was implicitly modulated only under effectual condition. Thus, MFR modulator could be independent of processing of explicit visuomotor system.

研究分野：感覚運動制御

キーワード：視覚運動制御 潜在的運動制御 視覚運動 応答潜時 ターゲットリーチング

1. 研究開始当初の背景

たとえ随意的な運動中であっても、視覚や体性感覚、前庭器官などといった感覚受容器から取り込まれた情報は行為者の意図を介さずに筋活動を誘発し、身体運動に影響を与える。つまり、からだの動きの多くは感覚情報から直接的に作り出されているのである。このような潜在的・反射的な運動応答の中には、意図的・随意的な運動応答に比べ短い潜時で引き起こされるものも多く、環境の変動に対する素早い修正に貢献していると考えられている。つまり、特定の運動課題を成功させるためには、行為者自身の意図的・随意的な制御だけではなく、意識には上らない潜在的な運動応答を、課題の要求や環境に応じて適切に調節・修正する必要がある。特に様々な感覚モダリティの中でも、視覚から得られる情報は周辺環境の変化を検出するための主要な情報源になる。視覚的に得られた情報を利用し、素早く運動パターンを生成・修正する能力は身体活動の成否を分ける重要な要因であることは言うまでもない。

最近の感覚運動制御に関する研究では、到達運動中に到達目標や視野背景を移動させると、約 120~140ms という極めて短い潜時で潜在的な運動応答が到達腕に誘発されることが明らかとなった。これは視覚刺激に対する随意的な反応潜時と比較しても短く、特に視野背景運動から運動応答が生成される系は、視覚情報から運動生成に至る処理系の中でも最も高速のものの一つである。この応答は外部環境や姿勢動揺などによって生ずる変化をいち早く捉え、それに対する修正動作を生成するために貢献していると考えられているが、その特性には未解明の部分が多く残されている。

2. 研究の目的

本研究では、視野背景運動から誘発される運動応答のゲイン調整の様相を整理し、その

処理系の特性の理解を深めることであった。具体的には、この応答が示す短期的な適応現象に着目した。この運動応答は繰り返し誘発されると応答の大きさ(振幅)が抑制されることが知られている。この抑制現象が視覚刺激に対する暴露量で決まるのか、もしくは課題の要求に応じた機能的変化であるのかを、2種類の心理物理実験によって検討した。

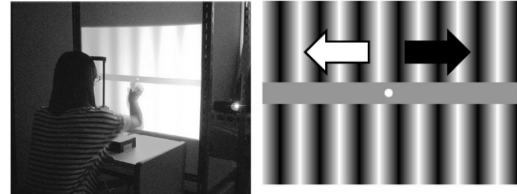


図1. 実験セットアップ(左図)と視覚刺激(右図)

3. 研究の方法

被験者および装置

スポーツ経験を持つ7名の被験者(男性5, 女性2名, 23~39才)が実験に参加した。全員が右利きであり、視覚および運動機能の異常や関連疾病へのり患歴はなかった。実験は全て準暗室で行った。被験者は視覚刺激が呈示されるスクリーンの前に座り、眼球とスクリーンの距離が35cmになるようにあご台によって頭部を固定した状態で課題を行った(図1)。Matlab(MathWorks社)およびCogent Graphics (Laboratory of Neurobiology, UCL)によって作成した視覚刺激を、DLPプロジェクタ(Pro8500, VeiwSonic社)によってバックプロジェクションスクリーンに120Hzで投影した。この際、刺激提示タイミングをスクリーンに貼付した光ダイオードで検出し、運動データと同期させて記録した。同時に被験者の手元に置かれたボタンの開閉も同期させて記録した。これらのアナログ信号は2kHzでAD変換しPCに保存した。

被験者の右手示指近位部に反射マーカを張り付け、その位置を赤外線反射カメラ(Oqus300, Qualysis社)によって500Hzで記

録した。得られた位置データから、4次バターワースフィルタ(双方向)によって30Hz以上の高周波成分を遮断することで平滑化した後、数値微分によって速度および加速度を算出した。

視覚刺激の呈示サイズは幅70cm、高さ53cm(視野角90度および75度)であった(図2)。視野全体に呈示された正弦波グレーティング(空間周波数0.05c/deg)の中央部にターゲット(白色円盤、3cm)を呈示した。グレーティングモーションとターゲットの干渉を防ぐために、視野中央部に垂直方向5°幅のグレーのバンドを表示し、グレーティングをマスクした(図1右図)。

実験手続き

実験1：反復到達運動課題

被験者は手元のボタンを右示指で押したままターゲットを固視する。ピープ音が呈示されたら動作を開始し、右示指の指先でターゲットに触れるように指示された。ボタンが開放された約50ms後に左右どちらかの方向に視野背景のグレーティングが運動(時間周波数9.0Hz)を開始するが、被験者にはそれを無視して到達運動を継続するように求めた。60試行を1セットとし、セット間に短い休憩をはさみながら連続4セットを行い、視覚運動によって誘発された腕運動の大きさの変化を検討した。視覚刺激の運動方向は左右30回ずつであり、それぞれが乱順で提示された。

実験2：反応時間課題

被験者は実験1と同様の到達運動課題を1セット(60試行)行った後、視覚刺激の運動方向を弁別し随意的に反応する課題を2セット(120試行)行った。この課題に利用された刺激は到達運動課題と全く同じのものであった。まず、被験者はターゲットを固視したまま視覚刺激の運動開始を待つ。運動が開始し刺激の動く方向を弁別できたら、即座に手元の2

つのボタンを押して刺激の運動方向を回答するように求めた。その後、再び1セットと同様の到達運動課題を行った。つまり、視覚運動に対する暴露量は実験1と全く同じであるが、2セット目と3セット目に行う運動課題が異なるような条件を設定した。1セット目と4セット目の運動応答の差を実験1の結果と比較することで、実験1で認められた応答の低下が単に刺激に対する暴露によって生じたものかどうかを検討した。

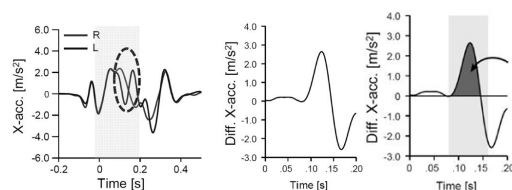


図3. 視野背景運動が到達腕に誘発した運動応答の典型例。左右の刺激移動方向の加速度プロファイル(左図)から両者の差分波形を算出することで応答の成分を抽出した(中図)。このうち80-160ms間(右図中の黒塗り)の平均値を応答の大きさとした。

視覚運動刺激に対する腕運動応答の大きさは、到達運動腕の軌跡(図2)から、以下の手続きによって定量化された。まず、運動軌跡のデータを視覚刺激の条件(右移動・左移動)ごとに分け、視野背景の運動開始時点を時間0として整列した(図3左図)。その後、条件ごとの加速度の平均プロファイルを算出した。視覚運動刺激と同様の方向(X軸)における加速度成分を、条件間の差分を算出

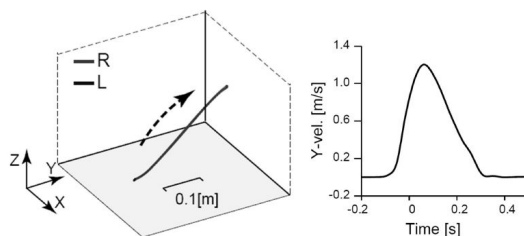


図2. 到達運動時の腕運動の軌跡の典型例(左図)。R、Lはそれぞれ左右に視野背景が動く条件の平均軌跡。その速度プロファイル(右図)。時間0は視野背景の運動開始時点を示す。

することにより抽出し、反射的な応答の成分と見なせる 80-160ms 間の平均値を、運動応答の大きさとして定量化した(図 3 中・右図)。

4. 研究成果

実験 1：反復による応答ゲインの変化

各条件において、視覚刺激は刺激の運動方向に一致した短潜時(約 100ms)の腕運動応答が誘発された(図 3)。繰り返しのある分散分析の結果、この運動応答の大きさは、セットを重ねるごとに低下する傾向が認められた($p = .0343$, 図 5)。特に 1 セット目から 2 セット目で顕著な応答の低下(約 70%)が認められた。これは先行研究の報告と一致する(8)。この課題の条件では、視覚運動により誘発される応答は到達運動の最終位置の精度を低下させるため、運動応答は機能的でなく、む

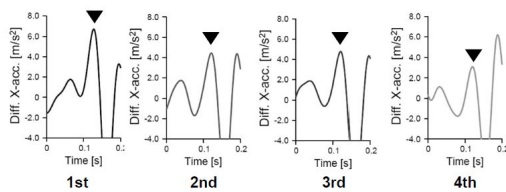


図 4. 各セットにおける応答の変化。図は 1 名の典型的な被験者の結果。矢印は潜在的な応答部分を示す。

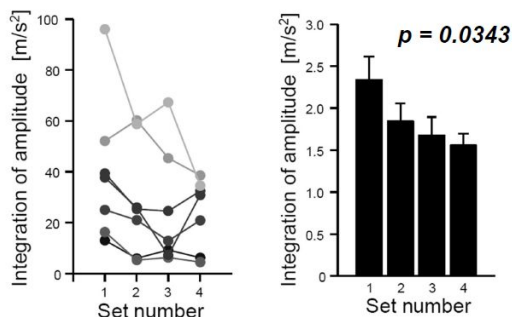


図 5. 各セットにおける応答の変化。左図は各被験者、右図は平均値と標準誤差を示す。

しろ外乱として見なすことができる。つまり、繰り返しによる応答の減少は運動の精度を保つために抑制された可能性も否めない。他方、視覚運動刺激への連続的な暴露が視覚情報の処理系自体の疲労や馴化を引き起こし、

応答が低下した可能性もある。そこで、この可能性を実験 2 において検証した。

実験 2：視覚運動刺激の暴露による影響

この条件では、被験者の網膜に与えられる視覚運動刺激は実験 1 と全く同量となるように設定した。異なるのは到達運動を行った回数、つまり腕運動応答が誘発された回数である。したがって、この条件においても実験 1 と同様の応答抑制が認められれば、網膜に与えられた視覚運動刺激の量が、この腕運動応答の抑制の原因と見なせることになる。しかしながら、この条件では運動応答に低下傾向が認められたものの、その変化は非有意であり、実験 1 と比較しても僅かな低下に留まった(図 5)。つまり、全く同じ視覚刺激に対して意図的に反応する課題を行っても、到達運動中の視覚運動に対する応答の適応は同じ

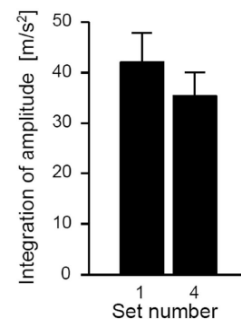


図 6. 視覚運動刺激のみに暴露した条件における応答の変化(平均値)

にはならない。このことは、運動応答の変化が刺激の暴露量だけでは決まらないことを意味している。したがって、単に視覚運動処理系によるボトムアップの抑制が原因ではなく、より高次の処理系からのトップダウンによる応答のゲイン調節が存在している可能性が示唆された。

考察

本研究の結果は、到達運動中の視野背景の移動が引き起こす反射的・短潜時の運動応答が、課題要請に応じて合目的的に調節される可能性を示唆している。このような課題に応

じた反射ゲインの調整は、これまでも伸張反射や姿勢反射などで報告されている。また本実験と同様の反射的・短潜時の運動応答においても、いくつかの研究で合目的なゲイン調節の例が報告されているが、感覚受容器（ここでは視運動処理系）の馴化との関連性を検討した報告はなされていなかった。他方、視覚運動に対する知覚に関しては、視覚的な運動に連続暴露されると、それを処理するための神経系が短期適応を示し、運動視知覚の様相を変化させることが知られている。これは視覚運動刺激が引き起こす適応と考えられる。本実験においても被験者は実験1、実験2ともに240回という膨大な数の刺激に反復暴露されているため、同様の馴化適応が認められることも予想できた。しかしながら、この予想に反して、実験2では運動応答の振幅に有意な低下は認められなかった。このことは、この運動応答を生成する処理系と視覚運動の知覚を担う処理系が、少なくとも部分的に異なる可能性を示していると考えられる(13)。

先行研究(Gomi et al. *J. Neurosci.* 2006)では様々な種類(時空間周波数)の視覚運動刺激に対する「知覚的」な感度と、本実験と同様の腕運動応答振幅の違いを比較検討している。その結果、知覚と運動の感度の分布が大きく異なることから、全く同じ視覚運動刺激が網膜に与えられた場合においても、その後の処理が知覚と運動で異なる可能性が高いことを示した。これに対して、本実験の結果では視覚刺激への暴露量が全く同じであっても、課題が異なると運動応答の振幅の変化量が異なっていた。この結果は、同一の視覚運動刺激に対する知覚処理系と運動処理系の分離が、課題実行時において既に生じている可能性を示唆するものと考えられる。つまり課題が違えば、たとえ同じ刺激が与えられたとしても、その処理のために動員される系が異なるのかもしれない。もしそうであ

れば、スポーツ現場において良く見られる「眼を慣らす」という行為、つまりボールの動きや相手選手の動きを傍から見ることで、その後のパフォーマンスを改善しようとしても、実際に自分自身がその動作を行う場合とは異なる情報処理系が利用されることになり、目的とした効果は得られない可能性もある。この点は現場での検証実験も含め、さらに検討が必要であろう。

実環境下では、視野背景運動は主に眼球運動と自己運動によって生じる。これに起因する網膜像のブレは知覚表象をゆがめることになる。そこで視覚情報の処理系がそのブレをキャンセルすることで最終的に意識に上る知覚の安定化が図られている。これに対して、到達運動の場合には状況が大きく異なる。動作中に生ずる自己運動は身体運動のノイズとなるため、動作の精度を維持するためには、視野背景運動の情報を積極的に利用して自己運動が引き起こす運動誤差をキャンセルする必要がある。このような運動と知覚の機能的側面の違いからすると、両者が異なる機構によってゲインが調節されていることは、生体にとっては妥当なのかもしれない。スポーツ選手の感覚刺激に対する反応の早さの評価には、ボタン押しなどの反応時間課題が利用されることが多い。しかしながら、知覚認知と運動の潜在的な修正のための情報処理が異なっているということは、このような刺激の知覚を前提としている反応時間課題では、動作中の素早い運動応答の能力を捉えきれない可能性を強く示唆する。つまり、スポーツ選手の反応の早さをより正確かつ直接的に計測するためには、本実験のようなオンライン修正を含んだ課題を利用することも必要であろう。

まとめ

本実験の結果から、視野背景運動が引き起こす運動応答の抑制は、視覚刺激に対する暴

露量ではなく、運動応答の生成回数が強く影響することが明らかとなった。この抑制は単に視覚情報処理系の短期適応に起因するのではなく、運動生成系もしくはより高次のトップダウンによるゲイン調節による可能性が高い。両者の関係性を整理するために、文脈に応じたゲイン調節の特性を整理すると同時に、経頭蓋磁気刺激などを利用した脳神経系への直接的な介入を行い、この応答生成に関する神経基盤を解明していく必要がある。

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3件)

- (1) 門田浩二, 木下博, 高齢者の無意識的且つ高速の視覚運動応答を実現する神経基盤の理解, 三井住友海上福祉財団研究報告集, 査読有, 2014
- (2) 門田浩二, 木村大輔, 平松祐一, 那須大毅, 木下博, 高齢者に残存する素早い反応動作を活かすための運動制御方略の解明, 大阪ガスグループ福祉財団調査・研究報告書, 査読無, Vol. 25, 2015
- (3) Kadota K., Kimura D., and Kinoshita H., Minimal effects of the context-dependent modulation of reflexive correction movements during target reaching. Proceedings of the 44th annual meeting of Society of Neuroscience, 査読有, 2014

[学会発表](計4件)

- (1) 木村大輔, 門田浩二, 平松祐一, 木下博, 到達運動中に誘発される反射的な修正動作の機能的役割とその加齢影響, 第50回日本理学療法学会大会, 2015
- (2) 門田浩二, 木村大輔, 木下博, 到達運動中に誘発される反射的な修正運動のゲイ

ン調節メカニズム, 第23回日本バイオメカニクス学会大会, 2014

- (3) Kadota K., Smart and functional: Implicit-visuomotor control during volitional movement. Asian-South Pacific Association of Sport Psychology 7th International Congress(招待講演), 2014
- (4) 門田浩二, 巧みな動きを作り出すもう一人の自分, 大阪市まちづくり情報発信施設(招待講演), 2015

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

門田 浩二 (KADOTA, Koji)

大阪大学・大学院医学系研究科・助教

研究者番号: 50557220

(2) 研究分担者

木下博 (KINOSHITA, Hiroshi)

大阪大学・大学院医学系研究科・教授

研究者番号: 60161535