

運動学習システムにおける視覚と固有感覚の割り算的情報処理

1. 発表者：

林 拓志（ハーバード大学 工学・応用科学部 博士研究員）
加藤 悠太郎（東京大学 大学院教育学研究科 研究当時：修士課程 2 年生）
野崎 大地（東京大学 大学院教育学研究科 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆誤差に基づく身体運動の学習においては、視覚と固有感覚（注 1）誤差情報の両者が **Divisive Normalization**（注 2）と呼ばれる計算様式に則って処理・活用されていることを明らかにしました。
- ◆視覚と固有感覚を統合した情報に基づいて身体運動記憶が形成されるという従来の考え方とは異なり、それぞれの情報が別々に身体運動記憶の形成を促すことも示されました。
- ◆スポーツや楽器演奏などの身体運動スキル獲得を効果的に促すために、視覚や固有感覚へのフィードバックを工夫するなど新しいトレーニング方法の開発につながる可能性があります。

3. 発表概要：

ボールにバットがうまく当たらなかった、バスケットボールのフリースローが外れたなどのように身体運動に誤差が生じたとき、脳はこの情報に基づいて、次に運動を行うときには誤差が生じないように運動指令を修正（運動学習）します。脳は視覚や固有感覚など複数の感覚誤差情報を同時に受け取っていますが、こうした複数の情報がどのように組み合わせられ、運動学習に活用されているのかはよくわかっていませんでした。今回、ハーバード大学の林拓志研究員と東京大学の野崎大地教授らの研究チームは、ロボットアーム装置（図 1）を用いた精密な運動学習実験を行うことにより、視覚誤差と固有感覚誤差の両情報が、**Divisive Normalization** として知られる様式に則って処理され、運動学習に活用されていることを明らかにしました。多様な環境で身体を自在に動かし、さまざまな道具を使いこなす人間の能力は、複数の感覚誤差情報をうまく利用して運動指令を修正する運動学習能力に支えられています。本研究の知見は運動学習機序の理解を進めたのみならず、スポーツや楽器演奏などの身体運動スキルを学ぶ際に、複数の感覚情報をコントロールすることで効率的な学習を促すなどのトレーニング方法の開発に活用できる可能性があります。

4. 発表内容：

私たちが物に向かって手を伸ばす、目を向けるなどの運動を行うとき、運動の誤差が気づかないような僅かなものであっても、次に同じ動作を行うときには、その誤差が小さくなるよう無意識のうちに動作が修正されます。脳の運動学習系が持つ、こうした感覚誤差情報に基づいた運動指令修正（運動学習）能力は、日常生活で行う動作の恒常性の維持はもちろんのこと、野球やテニスでボールを打つ動作や、バスケットボールのフリースローなどのスポーツ動作の制御や学習でも重要な役割を担っています。

身体運動に伴う感覚誤差情報は、私たちの身体に備わっている視覚や固有感覚など多様なモダリティの感覚器から脳に伝達されます。物の大きさの知覚、四肢の位置知覚などにおいては、視覚と固有感覚の両情報が両者の情報の確からしさに依存して最適な割合で活用・統合されているというアイデアが提唱されていますが、無意識的に行われる身体運動の制御・学習と知覚

では異なった処理様式が存在する可能性があります。事実、運動学習システムが複数の感覚誤差情報をどのように統合し、運動指令の修正に活用しているのかはこれまでよくわかっていませんでした。

本研究では、ロボットアームと呼ばれる運動制御・学習研究用の特殊な装置（図1）を用いて、被験者が標的に向かって手を伸ばす運動（腕到達運動）を行うとき、視覚および固有感覚の誤差が、次の試行を行うときの運動指令の修正にどのように活用しているかを調べる実験を行いました。このとき、カーソルの動き（視覚情報）、ハンドルの動き（固有感覚情報）をロボットアームを用いてコントロールすることで精密な誤差情報を加えるようにしました（図2A）。視覚誤差は-45度から45度までの7種類、固有感覚誤差は-30度から30度までの5種類とし、これらを組み合わせた合計35種類の誤差が強制的に加えられます。次の試行では、ハンドルの動きをロボットアームによって作り出された「壁」によって直線上に拘束し、この壁を押す力を計測することにより運動指令修正量を定量化しました（図2B）。例えば、カーソルに+30度、ハンドルに+15度の誤差を加えると（+は右方向の誤差）、次の試行では、脳は動作を誤差とは反対方向に修正しようとする（壁を左方向に押す）はずです（図2B右下パネル）。

35種類の誤差の組み合わせに対する運動指令修正量は非常に複雑なパターンを示しました（図3A）。従来提唱されている多感覚情報統合の数理モデルではこの複雑なパターンを説明することはできませんでした。しかし **Divisive Normalization** 則に基づいたモデルを構築してみたところ、4つのパラメータを操作することで実験結果に近いパターンが再現されることがわかりました（図3B）。さらに追加して行った実験結果から、視覚・固有感覚誤差情報が一旦統一誤差登場として統合される（図4A）のではなく、それぞれの感覚毎に別々の運動記憶の形成を促すこと（図4B）も明らかになりました。

多様な環境で身体を自在に動かし、さまざまな道具を使いこなす人間の能力は、複数の感覚誤差情報をうまく利用して運動指令を修正する運動学習能力に支えられています。本研究は運動学習システムが複数の感覚情報をどのように処理・統合して運動指令を修正するかという問題に対して新しい描像を提案した点で重要性を持つものです。また、この基礎的知見は、スポーツや楽器演奏などの身体運動スキルを学ぶ際に、複数の感覚情報をコントロールすることで効率的な学習を促すなどのトレーニング方法の開発に活用できる可能性も考えられます。

本研究は科学研究費基盤研究A（17H00874）等の支援を受けて行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*The Journal of Neuroscience*（オンライン版：1月10日）

論文タイトル：Divisively normalized integration of multisensory error information develops motor memories specific to vision and proprioception

著者：Takuji Hayashi*, Yutaro Kato, Daichi Nozaki*

6. 問い合わせ先：

東京大学大学院教育学研究科 身体教育学コース

教授 野崎 大地（ノザキ ダイチ）

Tel: 03-5841-3983

E-mail: nozaki@p.u-tokyo.ac.jp

7. 用語解説：

注1 固有感覚

筋、腱、関節に存在する機械的受容器によって伝えられる身体部位の位置や動きの感覚。

注2 Divisive Normalization

神経細胞の活動が属する神経細胞集団全体の活動度によって除される（正規化される）という神経系の計算様式。1990年代初めの視覚野の神経細胞の活動パターンを説明する機構として提案された。

8. 添付資料：

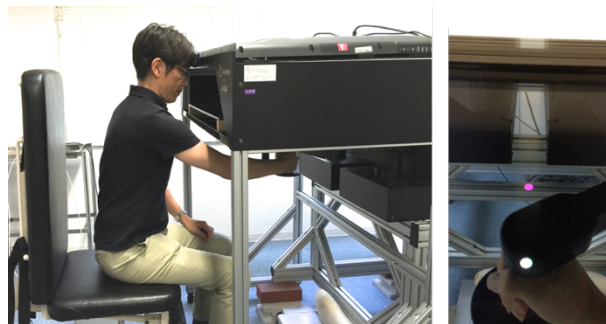


図1：ロボットアーム：被験者はハンドルを握り、VRシステムを用いて呈示された標的に向かって、手を伸ばす運動（腕到達運動）を行う（実験中、ハンドル位置はカーソルのみによって呈示され、腕は見えない設定になっている）。

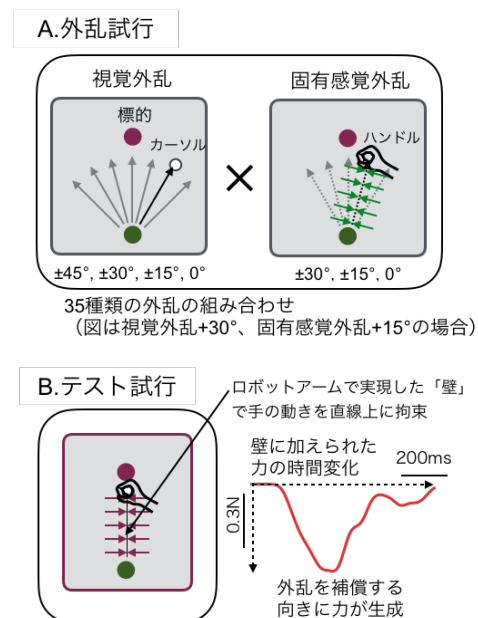


図2：実験方法：被験者はロボットアームのハンドルを動かすことでカーソルを標的に到達させる。このときカーソルの動きおよびハンドルの動きに強制的に誤差を加える（A：カーソルに $+30^\circ$ 度、ハンドルに $+15^\circ$ 度の誤差を加えた場合）。この誤差を与えた試行（外乱試行）の次のテスト試行ではハンドルの軌道を直線上に拘束し、この擬似的な「壁」に対して加えられた力を運動指令修正量として定量化した(B)。

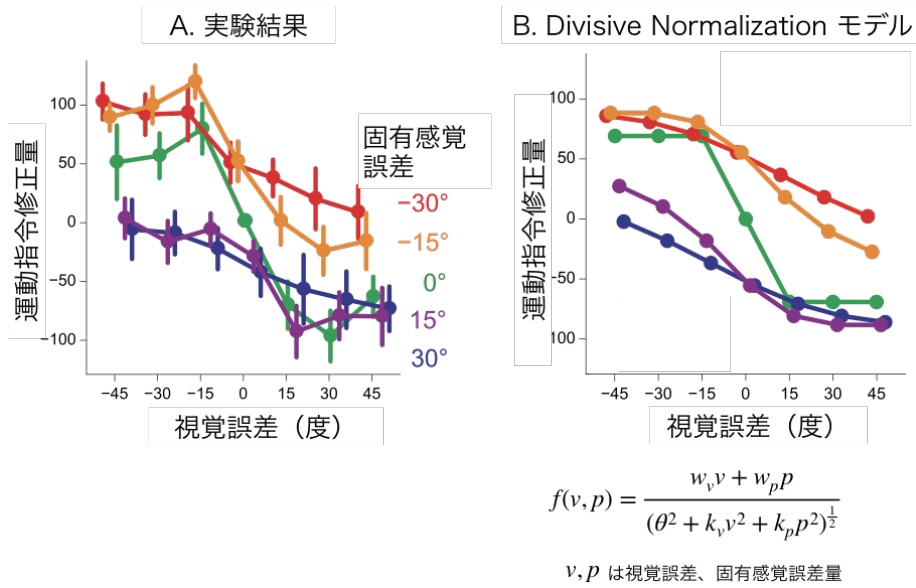
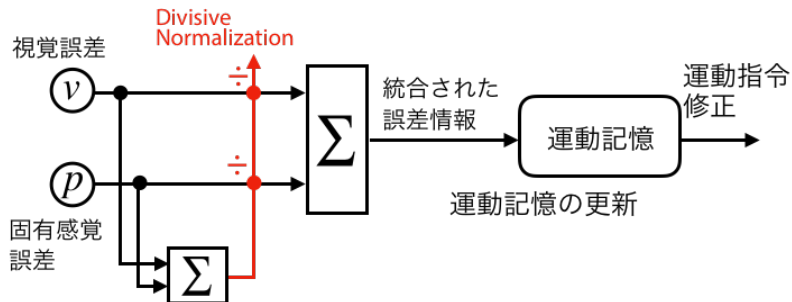


図3：実験結果：35種類の誤差の組み合わせに対する運動指令修正量の実験結果（A）と Divisive Normalization モデル（数式）でフィッティングした結果（B）。

A. 単一の運動記憶



B. 感覚モダリティ毎の運動記憶

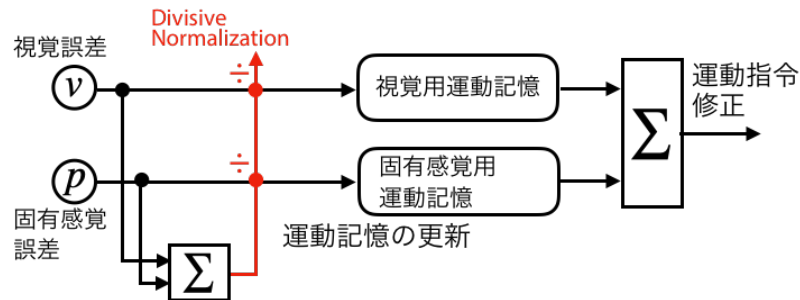


図4：視覚誤差・固有感覚誤差統合スキーム：各誤差情報が Divisive Normalization 則によって処理された後、誤差として統合され単一の運動記憶の更新に用いられるスキーム(A)と、視覚・固有感覚が別々の運動記憶の更新に用いられるスキーム(B)。実験から B のスキームが正しいことが明らかになった。