



同じ身体部位における複数身体表現

Multiple body representations for the same body part during motor actions

松宮一道¹⁾

Kazumichi MATSUMIYA

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09, matsumiya@tohoku.ac.jp)

概要: 意図的な運動は、脳内の身体表現 (身体図式と呼ばれる) に依存し、身体図式の異常が運動障害を引き起こす。身体図式は、約 1 世紀もの間、脳内に一つだけ存在し、すべての運動に対して共通に用いられると考えられてきた。しかし、私たちはしばしば複数の運動を同時に実行するが、複数の運動時に身体図式がどのように働いているのかは不明だった。本研究では、身体図式が運動効果器ごとに脳内で別々に表現されていることを報告する。

キーワード: 身体図式、複数身体表現、運動効果器、多感覚統合

1. はじめに

1900 年代に行われた Head と Holmes の研究以降、意図的な運動は脳内の身体表現に依存すると考えられるようになり、この脳内身体表現は「身体図式」と呼ばれている [1]。身体図式の異常は様々な障害を引き起こし、運動機能障害から幻覚まで多くの症例報告がある。身体図式の古典的概念は、自己受容感覚によって与えられる身体の姿勢に関する情報 (求心性信号) と、運動指令に関する情報 (遠心性信号) から抽出される外界における身体部位の位置表現を記述するために用いられてきた。

しかし、身体図式の最近の見解では、外界で身体部位を位置づける能力 (身体定位能力) は求心性信号と遠心性信号だけでなく、脳内に保持された身体の大きさ情報を必要とすることが示唆されている。従って、現在では、身体図式は、求心性信号と遠心性信号に、脳内に保持された身体大きさ情報を結合することで形成される身体の空間構成として定義される。さらに、身体図式は、様々な身体部位 (例えば、眼や足など) からの求心性信号を使って大域的な運動制御に関わると考えられている。これらの知見から、身体図式は、身体全体の運動制御のために用いられる身体の空間構成を含んだ脳内身体表現と見なすことができる。

また、身体図式は、視覚や自己受容感覚などの複数の感覚信号によって構築される。ある特定の身体部位から得られる複数の感覚信号の時空間的な一致により、一つのまとまった身体定位が得られる [2,3]。これは、多感覚統合と呼ばれており、複数の感覚信号は統計的に最適な方法で統合される [4]。身体部位から得られる各感覚モダリティの信号の重みは信頼性に依存して変わる。身体図式における多感

覚統合の重要性は、身体定位が人工物の手の見えによって影響されるクロスモーダル効果によって示されている。

身体図式は、約 1 世紀もの間、脳内に一つだけ存在し、すべての運動に対して共通に用いられると考えられてきた。この考えに基づいて、多くの研究は身体図式を調べるために単一の運動課題を用いてきた。しかし、私たちは日常しばしば複数の運動 (例えば、眼と手を動かすなど) を同時に実行しているが、複数の運動時に身体図式がどのように働いているのかは不明だった。

一方、最近の研究は、複数運動時に、各運動効果器における行為が異なった脳内空間表象によって誘導されることを報告している。例えば、運動物体の空間定位を眼球と手で行うと、それぞれ異なった位置を指す [5]。これらの研究は、物体の脳内空間表現が複数あり、各々の脳内空間表現が異なった運動効果器を誘導することを示唆する。しかし、異なった運動効果器で複数運動を行った時に、身体図式がどのように働くかは分かっていなかった。

身体図式は、自己身体部位に向かう運動計画に寄与する。このような運動計画では、身体部位を知覚するときと同じ身体情報が用いられると考えるのが自然である。しかし、弾道的な運動に対して用いられる身体情報の処理過程は知覚判断に対して用いられる処理過程と異なる。この知見に基づいて、本研究では、複数の運動時の身体図式を計測するための実験方法を開発した。この実験では、実験参加者は自分の手の上に指定された様々な位置 (指先や関節など) に向かって弾道的な運動応答を行った。自分の手の上の様々な位置をランドマークと呼ぶことにすると、二つの

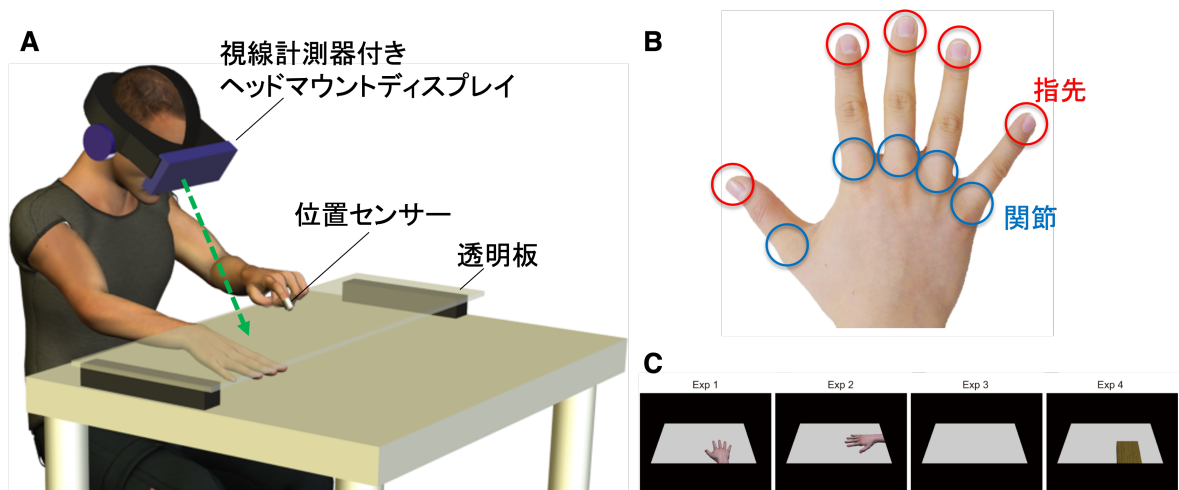


図 1: 実験装置の概略。(A) 実験装置。(B) ランドマークの位置。(C) 実験 1 から 4 で用いられた視覚刺激。

近接するランドマーク間の距離は、それらをつなぐ身体の大きさ情報だけに依存する。一方、単一のランドマークの定位（絶対位置）は、定位誤差が必ず影響するが、ランドマーク間の相対位置は定位誤差の影響を受けない。そのため、複数のランドマークを使ってランドマーク間の相対位置を計測することで、身体図式に含まれる脳内に保持された身体大きさ情報を抽出することができる。本研究では、これらのランドマークに向かって、眼球運動と手の到達運動の両方を同時に行うように実験参加者に教示した。そして、眼球運動と到達運動の各々に対して得られるランドマークの定位結果を使って、手の身体図式を分析した。さらに、本研究では、コンピュータグラフィックスで描画された手（CG ハンド）を使って、ランドマークの定位における視覚と自己受容感覚の重みが眼球運動と到達運動の間で異なるのかどうかを調べた。

2. 実験方法

実験参加者（平均年齢 22.42 歳の大学生で健常者 12 名）に、自分の眼と左手で同時に、自分の右手の様々な部位（指先や関節）を指すように教示した。実験参加者は、視線計測器付きヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着し、左手の人差し指に位置センサーを取り付け、右手は透明板の下に置いた（図 1）。実験参加者自身の右手は見えない状態で、心の中で感じている右手の指先や関節の位置（10 箇所あるうちのひとつ）を眼と左手を使って同時に指し示した。眼と左手の各々について指した箇所を分析することで、眼と左手の運動の各々を制御するために用いられる身体図式を可視化した。本実験は、東北大学情報科学研究科倫理委員会により承認された。

実験 1 と 2 では、3 次元形状をもつ右手の CG ハンドが呈示され、CG ハンドの形状は実験参加者の右手とほぼ同じであった。実験 3 では、CG ハンドは呈示されなかった。実験 4 では、CG ハンドの代わりに、木の板のテクスチャで構成された CG 物体を呈示した。

各セッションは、最初に実験参加者の右手を撮影し、眼

球運動のキャリブレーションから始まった。各試行では、前もって録音された女性の声で、どのランドマークに眼と左手を指すかをコンピュータが教示した。実験参加者は、女性の声で教示されたランドマークに向かって、眼と左手を同時に動かし、かつ、途中で止まったり、速度を遅くしたりせずに、弾道的にランドマークを指すように教示された。試行が始まる前に、実験参加者は仮想空間の灰色の面に呈示される赤い点を注視した。この赤い点の位置は、CG ハンドの手前、奥、右、左のうちの 4 つの場所からランダムに選ばれた。また、試行が始まる前に、実験参加者は自分の左手を透明板の上の左側に配置されたトラックボールの上に置き、このトラックボールのボタンをクリックすることで試行を開始した。トラックボールのボタンをクリックし、500 から 1500 ミリ秒のランダムな遅延時間後に、注視していた赤い点が消失した。この消失が試行開始の合図となり、消失後できるだけ早く実験参加者は自分の眼球と左手の両方を同時にランドマークに向かって弾道的に動かしした。ランドマークの順番は被験者を通してカウンターバランスされた。各条件は、10 試行×4 セッションで構成された。

ランドマークの分析には、プロクラステス解析を用いて、実際のランドマークの位置と実験参加者が応答したランドマークの位置を比較した。プロクラステス解析は、位置、回転、スケールの差を除去し、形状の差だけを抽出することができる。

3. 結果と考察

3.1 実験 1

実験 1 では、CG ハンドを見ながら眼球運動と手の到達運動を行った。プロクラステス解析により、眼球運動によって構成された手の形状も、手の到達運動によって構成された手の形状も、実際のランドマークの位置によって構成された手の形状と異なっていた。眼球運動の場合は、実際の手の形状と類似しているが、手の到達運動の場合はかなり歪んでいた。

3.2 実験 2

実験 1 の結果 (指の長さが圧縮され、手の横幅が広がる) は、CG ハンドの見えが HMD の影響で歪んでいたために得られた可能性がある。そこで実験 2 では、CG ハンドと実験参加者の手の両方を 90 度回転させて、指先が左向きになるように配置して実験を行った。もし実験 1 の結果が単に HMD の影響で得られたならば、実験 2 の結果は指の長さが伸びて、手の横幅が圧縮されるはずである。しかし、結果は、実験 1 と同じ結果となった。これは、HMD の影響では説明できないことを意味している。

3.3 実験 3

実験 1 と 2 で得られた眼球運動と手の到達運動で異なる結果は、CG ハンドに依存しているのか？もしこれが本当であるならば、CG ハンドを画面から消すと実験 1 と 2 の結果は消失することが予想される。予想通り、実験 1 と 2 の結果は消失し、眼球運動によって構成された手の形状と手の到達運動によって構成された手の形状は同じ形状となり、ともに大きく歪んだ。この結果は、CG ハンドが眼球運動と手の到達運動の結果の差異を生み出す上で重要であることを示唆する。

3.4 実験 4

実験 1 と 2 で得られた眼球運動と手の到達運動で異なる結果は、手に特有の結果なのだろうか？もしこれが本当であるならば、CG ハンドの代わりに、木のテクスチャを貼った手でない物体に置き換えると実験 1 と 2 で得られた眼球運動と手の到達運動で異なる結果は消失することが予想される。予想通り、実験 1 と 2 の結果は消失し、眼球運動によって構成された手の形状と手の到達運動によって構成された手の形状は同じ形状となり、ともに大きく歪んだ。この結果は、眼球運動と手の到達運動の結果の差異は手に特有であることを示唆する。

4. むすび

本研究は、バーチャルリアリティ技術を使って、複数の

運動を行っているときの身体図式を計測した。その結果、眼と左手が同時に同じ右手の部位を指しているにも関わらず、眼で指した結果に比べると左手で指した結果から得られた右手形状はより歪んでいた。さらに、実験 1 から 4 を通して、CG ハンドが呈示されているときに、眼と左手で右手形状が異なることが示された。これは、視覚と自己受容感覚の重みが眼球運動と手の到達運動では異なることを示しており、身体図式を構築する多感覚統合の処理過程の違いを反映していると考えられる。これらの結果は、身体図式が運動効果器の種類に応じて異なり、運動効果器ごとに脳内で別々に表現されていることを示唆する。

研究の詳細については、

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2112318119>

を参照してください[6]。

謝辞 本研究は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進機構 さきがけ (JPMJPR16DB) および JSPS 科研費 JP22H00087、JP21K12102 の助成を受けた。

参考文献

- [1] H. Head, G. Holmes, Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102-254 (1911).
- [2] K. Matsumiya, S. Shioiri, Moving one's own body part induces a motion aftereffect anchored to the body part. *Current Biology*, 24(2), 165-169 (2014).
- [3] K. Matsumiya, Awareness of voluntary action, rather than body ownership, improves motor control. *Sci. Rep.*, 11, 418 (2021).
- [4] K. Matsumiya, Separate multisensory integration processes for ownership and localization of body parts. *Sci. Rep.*, 9, 652 (2019).
- [5] M. Lisi, P. Cavanagh, Different spatial representations guide eye and hand movements. *J. Vis.*, 17, 12 (2017).
- [6] K. Matsumiya, Multiple representations of the body schema for the same body part. *PNAS*, 119(4), e2112318119 (2022).