

氏 名	は ぐら のぶ ひろ 羽 倉 信 宏
学位(専攻分野)	博 士 (人間・環境学)
学 位 記 番 号	人 博 第 394 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	人 間 ・ 環 境 学 研 究 科 共 生 人 間 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Sensing hand movement from visual and kinesthetic information —— Neuronal correlates of multisensory processing in estimating the location of hand —— (視覚と運動感覚情報を用いた手位置知覚：多感覚情報を用いた手位置推定の 脳内機構)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 村 道 一 教 授 齋 木 潤 教 授 船 橋 新 太 郎 内 藤 栄 一

論 文 内 容 の 要 旨

本学位申請論文は、ヒトがどのように視覚情報と運動感覚情報を統合して自己身体的位置を算出しているのかについて、その基盤にある脳内機序を調査したものである。

ヒトがどのように自己身体状態を認識（身体図式を生成）しているのか、という問いは、認知神経科学の分野における、中心的な問いの一つである。身体部位の空間位置を伝える情報として運動感覚情報が主たる役割を担うが、多くの場合、視覚情報もその位置伝達に寄与する。両情報がそれぞれ伝える位置情報間には誤差が存在し得るはずであるが、我々が自己の手を見るとき、両情報は同じ状態を伝達していると直感的に知覚することができる。では、この知覚の生成過程には、どのような脳の働きが介在しているのだろうか？ 本学位申請論文では、手から生じる多感覚情報を統合する際の行動特性、およびその脳内機構を調査することで、身体図式の整合性が保たれるメカニズムについて考察した。

本論文は、3つの実験を中心に6章から構成されており、第1章、第2章では、本研究の背景となる事項、研究の目的、研究の意義を説明した。

第3章では、「どのような特徴を持つ視覚刺激をヒトは手の情報を伝えるものとしてとらえ、運動感覚と統合するのか」という、視覚—運動感覚統合の前提となる事項を明らかにするために行った行動学実験について記述した。被験者は、手首が屈曲するような経路（運動錯覚）を引き起こす振動刺激を受けながら、静止している自分の手（HAND）のオンラインの映像（LIVE）もしくはその写真（STATIC）、および手首の角度に依存して動くことを被験者が知っている円（OBJECT）の静止しているオンライン映像（LIVE）もしくはその写真（STATIC）を観察した。運動錯覚は自分の実際には動いていない手を見ると、減弱することが知られている。よって、各視覚条件における運動錯覚の減弱を観察することで、「被験者が持っている視覚刺激を自分で動かせるという事前知識（LIVE, STATIC）」、そして、「視覚刺激の視覚的特徴（HAND, OBJECT）」のそれぞれの要因が、手の位置を伝える情報として視覚刺激を利用するうえでどのような影響を持つのかを調査することができる。結果、手のLive映像（HAND-LIVE）、手の写真（HAND-STATIC）、そして円のLive映像（OBJECT-LIVE）の各視覚条件では、運動錯覚が有意に減弱するが、円の写真（OBJECT-STATIC）の条件では、そのような減弱は見られなかった。さらなる解析によって、この減弱を規定する要因として、i) 被験者がその視覚刺激について持っている操作性の事前知識、ii) 「手」であるという視覚的特徴、の2つがあることが明らかになった。

第4章では、第3章で記述した「静止している手の視覚情報をみると、運動錯覚が減弱する」という現象の背後にある脳内機序について行った行動学実験と機能的核磁気共鳴画像法（fMRI）による脳活動測定実験の結果を記した。この実験によって、脳が運動感覚と視覚によってそれぞれ伝えられる位置間に存在する誤差を解消することに役割を持つ脳領域を調査

することができる。行動学実験では、被験者は、手首が屈曲するような経験を引き起こす振動刺激を受けながら、同時に、静止している自分の運動錯覚を経験している手（IPSI）、もしくはそれとは反対側の手（CONTRA）をビデオカメラを通して観察した。その結果、IPSI条件だけで運動錯覚量の減弱が観察され、運動感覚と視覚映像の効果器の整合性がこの減弱にとって重要であることが示唆された。さらにfMRIによってIPSI条件に特異的に活動する領域を調査したところ、後部頭頂皮質がそのような活動を示すことが分かり、さらにこの領域の活動は各被験者のIPSI条件における錯覚の減弱量と有意に相関することが分かった。よって、この領域が運動感覚から推定された手の位置と視覚による推定値の誤差を補正する機能に関与することが示唆された。

第4章の実験では、手が静止している状態を扱った。しかし、実際に手が動いているのを見ている場合、視覚と運動感覚の両情報が手の動きの状態を伝えるため、両情報の伝える手の位置を経時的に合わせ、脳内の手の位置を更新するプロセスが必要となる。第5章では「視覚と運動感覚の両情報が動きの情報を伝えるとき、どのような脳領域がその処理に関与するのか」という問いについて、行動学実験とfMRIを用いて調査した。行動学実験では、被験者は、手首が屈曲するような運動錯覚を経験しながら、3種類の異なる速度で動く、自身の手が屈曲、もしくは伸展していくような視覚映像を観察した。屈曲映像を見ている時は、運動感覚情報と視覚情報の伝える手の運動方向は一致しているが（方向一致条件）、伸展映像では方向は逆となる（方向不一致条件）。結果、被験者の評価した運動錯覚量は、方向一致条件でのみ、視覚映像の速度に依存することが分かった。これは、方向一致条件では、視覚の運動情報が運動感覚情報に取り込まれ利用されたが、方向不一致条件ではそのような処理は行われなかったことを示す。次にfMRIを用いて、方向一致条件で特異的に活動する領域を調べたところ、左小脳のみが、有意な活動を示すことが分かった。この左小脳の活動は、被験者の方向一致条件での運動錯覚経験量を反映し、さらに、身体状態処理に関与することが長らく言われている右の下頭頂小葉と活動を連関させることが分かった。よって、左小脳が、右頭頂皮質と活動を連関することで、視覚情報と運動感覚情報を逐次的に合わせ、手の位置の更新に役立っていることが示された。

第6章では、第3章、第4章、第5章の結果に、さらに補足的データを提示することで、視覚-運動感覚統合の必要な脳内処理過程をまとめた。さらに、運動制御、および感覚統合のメカニズムとして提唱されている計算理論の枠組みから、全体の結果を解釈し、明らかになった各脳領域で実行されている詳細な処理過程について考察した。

論文審査の結果の要旨

ヒトは様々な感覚器官を有する。そこから得られる情報を脳内で統合することによって、外界の状況、および自己身体の状況を認識することができる。特に自己身体から得られる情報を統合して、脳内にある身体表象（身体図式）が形成/更新される脳内過程の研究は、長らく認知神経科学における中心的なテーマの一つであった。身体の空間位置を主に伝える情報は運動感覚情報であるが、視覚情報もその位置伝達に寄与することができる。本学位申請論文は、身体図式がこの両情報から形成される点に注目し、どのような脳内メカニズムによって両感覚間に潜在する誤差が解消され、空間的に統一された身体が維持/更新されるのかについて研究したものである。

申請者はこの統合過程を、1) 様々な情報が混在する視覚情報の中から、運動感覚情報にとって適切な視覚情報を選択する過程（研究1）、2) 空間解像度の高い視覚情報に対して、解像度の低い運動感覚情報を補正する課程（研究2）、3) 補正を連続的に行いながら、身体位置を更新する過程（研究3）、の三つの過程に分け、そのそれぞれを明らかにする実験を考案し、実施した。

研究1では、ヒトが自己の手ととらえ運動感覚情報と統合する視覚情報の特徴が調査された。被験者は、4種類の視覚映像「静止している自分の手（HAND）がオンラインで提示される場合（LIVE）と写真で提示される場合（STATIC）、および手首の角度に依存して動くことを被験者が知っている円（OBJECT）が静止している状態でオンラインで提示される場合（LIVE）と、写真（STATIC）で提示される場合」を観察しながら、同時に手首が屈曲するような経験（運動錯覚）を引き起こす振動刺激を受けた。運動錯覚経験中に、実際には動いていない自分の手を観察すると、その経験量は減弱することが知られている。よって、この実験デザインでは、各視覚条件の静止画像がどの程度運動錯覚を減弱させるのかを調査することで、「視覚刺激を自分で動かせるという事前知識（LIVE, STATIC）」、そして、「視覚刺激の視覚的特徴（HAND,

OBJECT)」の2つの要因が、視覚刺激を自己の手の情報としてとらえる上での役割を知ることができる。実験の結果、手のLive映像（HAND-LIVE）、手の写真（HAND-STATIC）、そして円のLive映像（OBJECT-LIVE）の各視覚条件では、運動錯覚の有意な減弱が観察されたが、円の写真（OBJECT-STATIC）の条件では、そのような減弱は観察されなかった。よって、ある視覚情報を自己の手としてとらえ、運動感覚情報と統合するためには、i) 視覚情報の操作性に対する事前知識、ii) 自己の手と類似した視覚的特徴、の2つの要因が重要であることが示された。

研究2では、申請者は、前項で記述した「静止している手の視覚情報をみると、運動錯覚が減弱する」という現象の背後にある脳内機序について調査した。この減弱現象は、脳が空間解像度の高い視覚情報を優先して運動感覚情報を補正する脳の持つ多感覚統合の方略の一つとして身体位置知覚における視覚の優位性を体現した状況であり、この実験によって多感覚間の誤差の解消に役割を持つ脳領域を調査することができる。行動学実験では、被験者は、手首が屈曲するような経験を引き起こす振動刺激を受けながら、同時に、静止している自分の運動錯覚を経験している手（IPSI）、もしくはそれとは反対側の手（CONTRA）をビデオカメラを通して観察した。その結果、IPSI条件だけで運動錯覚量の減弱が観察され、運動感覚と視覚映像の効果器の整合性がこの減弱にとって重要であることが示唆された。さらにfMRIによってIPSI条件に特異的に活動する領域を調査したところ、後部頭頂皮質がそのような活動を示すことが分かった。よって、この領域が運動感覚から推定された手の位置と視覚による推定値の誤差を補正する機能に関与することが示唆された。

前項で記述した内容は、手が静止している状態についてである。しかし、実際に手が動いているのを見ている場合、視覚と運動感覚の両情報が手の動きの状態を伝えるため、両情報の伝える手の位置を経時的に合わせ、脳内の手の位置を更新するプロセスが必要となる。研究3では「視覚と運動感覚の両情報が動きの情報を伝える時、どのような脳領域がその処理に関与するのか」という問いについて、調査を行った。行動学実験では、被験者は、手首が屈曲するような運動錯覚を経験しながら、3種類の異なる速度で動く、自身の手が屈曲、もしくは伸展していくような視覚映像を観察した。屈曲映像を見ている時は、運動感覚情報と視覚情報の伝える手の運動方向は一致しているが（方向一致条件）、伸展映像では方向は逆となる（方向不一致条件）。結果、被験者の評価した運動錯覚量は、方向一致条件でのみ、視覚映像の速度に依存することが分かった。これは、方向一致条件では、視覚の運動情報が運動感覚情報に取り込まれ利用されたが、方向不一致条件ではそのような処理は行われなかったことを示す。次にfMRIを用いて、方向一致条件で特異的に活動する領域を調べたところ、左小脳のみが、有意な活動を示すことが分かった。この左小脳の活動は、被験者の方向一致条件での運動錯覚経験量を反映し、さらに、身体状態処理に関与することが長らく言われている右の下頭頂小葉と活動を連関させることが分かった。よって、左小脳が、右頭頂皮質と活動を連関することで、視覚情報と運動感覚情報を逐次的に合わせ、手の位置の更新に役立てていることが示された。

以上、本学位申請論文では、視覚と運動感覚を統合して身体位置を算出する脳内過程を調査することで、ヒトが多感覚から身体情報が得られる状況においても、統一された身体を維持することができるメカニズムについて明らかにしたといえる。本学位申請論文によって述べられた結果は、認知神経科学の重要なテーマの一つである身体図式の脳内機構について重要な知見を提供したのみならず、我々が常に統一した自己像（自己意識）を保つことができるメカニズムについても示唆を与えるものである。

よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、平成20年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。