

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19500290

研究課題名（和文） 視覚障害者の視覚野における四肢運動感覚情報処理

研究課題名（英文） Kinesthetic processing in the visual cortices of blind person

研究代表者

内藤 栄一（NAITO EIICHI）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報研究所・主任研究員

研究者番号：10283293

研究成果の概要：

近年のヒト脳機能イメージング研究から、自分の身体筋骨格系に由来する感覚情報処理には体性感覚野のみならず頭頂葉ひいては身体視覚領野が関与することが明らかになりつつある。研究代表者のチームは、人間の手の動き知覚における視覚情報と運動感覚情報との統合に関する頭頂葉機能を明らかにし、視覚障害者の視覚野が純粋な運動感覚情報の処理に関与していることを明らかにし、人間の脳における自己身体像表現の可塑性を浮き彫りにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：神経科学

科研費の分科・細目：神経科学・神経科学一般

キーワード：視覚野、体性感覚野、運動感覚、身体像、核磁気共鳴装置、運動関連領野、前頂葉

1. 研究開始当初の背景

近年のヒト脳機能イメージング研究から、自分の身体筋骨格系に由来する感覚情報処理には体性感覚野のみならず頭頂葉ひいては身体視覚領野が関与することが明らかになりつつある。しかしながら、頭頂葉および身体視覚領野の身体運動感覚情報処理には不明な点が多い。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、人間の手の動き知覚における視覚情報と運動感覚情報との統合に関する機能を正常脳において明らかにする。

この結果を踏まえて、視覚情報を利用できない視覚障害者の視覚野が身体運動感覚情報処理にどのように関与するのかについて検討することを目的とする。

3. 研究の方法

手首の伸展筋を刺激することによって惹起できる手首屈曲運動錯覚を応用して、健常被験者および視覚障害者の脳活動を機能的核磁気共鳴装置で計測することにより、脳活動を計測する方法を採用した。第 1 実験では、健常者が手首の屈曲運動錯覚を経験中に、動

いていない手を直接見る状況を設定し、この視覚情報が運動錯覚に与える心理物理学的影响を評価し、この影響に関係する脳活動を測定した。第2実験では、同じく健常者が手首の屈曲運動錯覚を経験中に、前もって記録された自分の手首運動を観察し、視覚情報が運動錯覚に与える心理物理学的影响と評価しながら、これに関与する脳活動を測定した。第3実験では、視覚障害者の左右手首および足首に屈曲運動錯覚を惹起し、この純粋な運動感覚経験中の視覚障害者の脳活動を評価した。

4. 研究成果

第1実験

運動錯覚の最中には、実際には四肢が動いていないため、動いていない四肢を見ることで運動錯覚経験は有意に減弱した。運動錯覚そのものは刺激を受けない反対側の手を見ても若干減弱するが、刺激を受けている同側の手を見ると、錯覚の減弱の割合は有意に大きかった(図1)。これは、体性感覚に対する視覚の優位性を示すと考えられるが、この優位性は、同一の手に関して視覚と体性感覚情報が相互作用を起こす場合のほうが顕著であることが明らかとなった。

運動錯覚強度

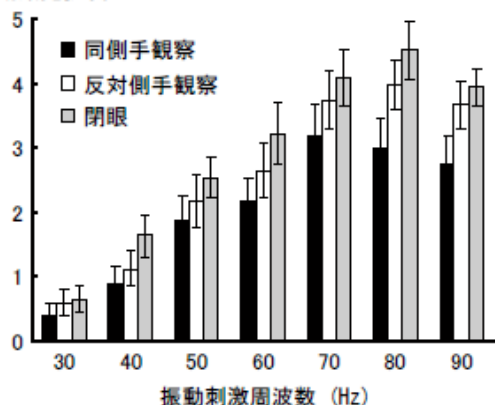


図1 静止手の視覚情報による手首運動錯覚の減弱

そこで、この視覚の優位性が脳のどの部位で計算されているのかについて、機能的核磁気共鳴装置を用いた実験を行った。手の伸展筋の腱を刺激し、健常被験者がその手の屈曲運動錯覚を体験している最中に、被験者に視覚映像を提示した。この視覚映像は、ライブ情報であり、刺激をしている手の映像と刺激を受けない反対側の手の映像が用意され、それぞれ右手および左手に関してこの実験を行った。

機能的核磁気共鳴装置実験においても、刺激と反対側の手の映像をみているときに比べて、刺激を受けている同側の手の映像が有意に運動錯覚を減弱した(図2a)。この減弱割合は視覚の優位性を直接反映すると考えられるが、この減弱割合に対応して、両側の後頭頂葉の活動が変化した(図2b)。つまり、運動錯覚の減弱割合が高いほど、後頭頂の活動が高く、これは右手でも左手でも共通に起こる現象であった(図2c, d)。

反対に、運動錯覚が減弱するほど、活動が低下する脳領域を同定すると、刺激された手とは反対側の中心前回(運動前野、一次運動野)であることがわかった。これらの領域は閉眼健常被験者が運動錯覚を経験する場合に関与する領域である。つまり、この結果は反対側運動前野、一次運動野がやはり運動錯覚体験の強度に関係した主領域であることを示しており、後頭頂で計算された視覚優位性の処理を受けて活動が修飾されたものと推測できた。

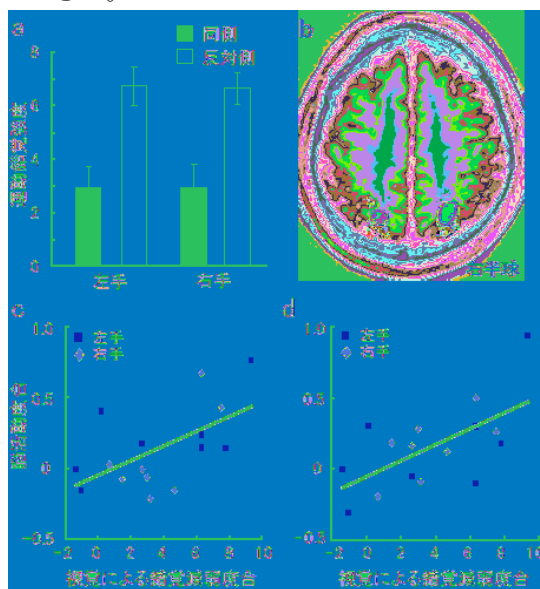


図2 機能的核磁気共鳴装置実験結果

第2実験

第1実験では、視覚情報として静的な手の情報を用いた。しかし、現実の手運動の場面では、我々は動いている手を目にする。つまり、脳は通常動いている手に関して視覚と体性感覚情報とを統合する必要がある。そこで、実験に先立って被験者の手首運動の映像を撮影し、動的な手運動映像が手首の運動錯覚に与える影響について調査を行った。この実験では、主に右手について視覚と体性感覚情報との統合を調査した。屈曲運動錯覚を利用して、この錯覚速度とは異なる3つの手首運動の映像を、それぞれ屈曲および伸展運動に関して用意した。前述の研究より、視覚映像が運動錯覚に影響を及ぼすことが予測され

たが、錯覚と同方向（屈曲）の映像は、速度依存的に運動錯覚量を修飾したが、反対方向の映像は速度とは無関係に一樣に運動錯覚量を減弱させた（図3）。つまり、脳は錯覚と同方向（屈曲）の視覚情報は運動感覚情報と統合するが、反対方向の視覚情報は分離して処理する戦略をとったことになる。

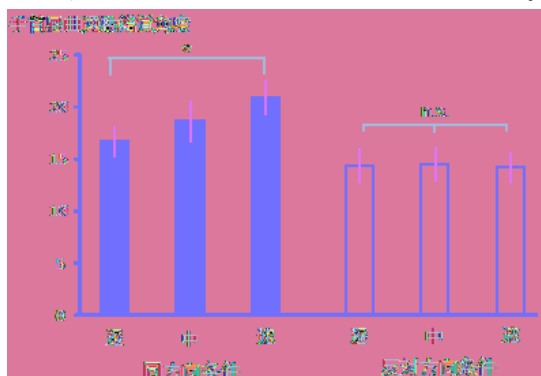


図3 手運動映像による手首運動錯覚への影響

そこで、この統合が脳のどの部位で処理されるか、機能的核磁気共鳴装置を用いた実験を行った。すると、左半球の小脳外側部が関与している事実を突き止めた（図4a オレンジ部）。

この領域は、被験者が目を閉じて運動錯覚を体験している際にはまったく関与しない。また、反対方向の映像を見ながら運動錯覚を体験している場合にも活動を示さない。つまり、この領域は屈曲運動錯覚を体験している時に屈曲視覚映像が入力される場合にのみ活動することがわかった。しかも、この部位の活動は、屈曲視覚映像の速度に応じて屈曲運動錯覚の速度が速くなるのに対応して高くなった（図4a 赤部およびb）。このような動的な手の視覚映像に対応した手の運動錯覚の変化には、脳による身体像のオンライン更新が必須である。もしこの見方が正しいならば、身体像のオンライン更新に関与すると仮説される前述の右半球前頭-頭頂葉がこの統合に関与しているはずである。実際、最新の霊長類解剖学的研究から、小脳外側部とその反対半球の前頭-頭頂葉との機能的結合が示唆されている。そこで、より詳細な脳活動解析を行ってみると、左小脳外側部と右前頭-頭頂葉活動との間に機能的結合があることがわかり、しかもこの結合は、屈曲視覚情報が運動錯覚を修飾したときに強くなることが明らかとなった（図4a 水色部）。

以上をまとめると、体性感覚情報のみに基づいた身体像形成過程では、四肢に特有の運動領野や体性感覚領野の関与が認められる。視覚と体性感覚情報との統合過程では、これに加えて頭頂連合野やこれと機能的結合をもつ小脳の計算が重要であることがわかった。

特に、大脳右半球前頭-頭頂葉と左小脳との機能的結合は、身体像のオンライン更新に関与する可能性が強く示唆された。右利き被験者が右手で運動する場合にも、右半球前頭-頭頂葉の活動が極めて頻繁に観察される。これは、運動中に脳が身体像のオンライン更新を行うためと推測でき、特にオンライン更新を必須とするような運動課題では、この活動が有意に増加している可能性を指摘できるだろう。

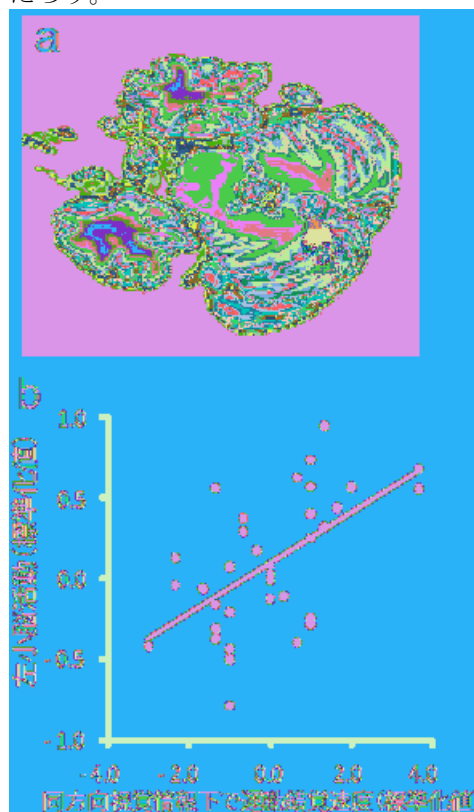


図4 手運動映像が手首運動錯覚に影響を与える場合の脳活動(a)とその速度依存性変化(b)

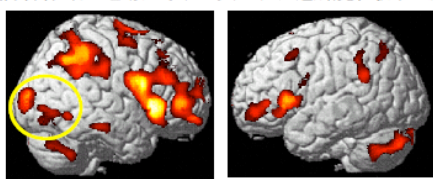
第3 実験

健常者を用いた前述の研究において、被験者が単純に自分の手の動きを見ている際の脳活動をみると、視覚有線外野外側部が賦活することがわかった。これは先行研究(Downing et al. 2001)で示された、身体に関する視覚情報処理に特化した領域(=身体視覚領野)と対応していた。現在までの神経科学の知見は、脳が複数の感覚情報を同時に処理する場合、体性感覚情報処理は視覚野の情報処理過程に影響を与え、視覚情報処理も体性感覚野の情報処理過程に影響を与えるという相互作用があることがわかってきている。つまり、体性感覚による身体像形成過程でも視覚野が何らかの関与をしていることが予想される。実際、閉眼健常被験者で行った運動錯覚実験で個人ごとに脳活動変化

を調査すると、19名中約25%の被験者で運動錯覚体験時に身体視覚領野が賦活していることがわかった。健常被験者の脳でさえ体性感覚情報に基づいた身体像形成過程で視覚野が関与しているのだから、視覚機能を失った視覚障害者の身体視覚領野は、運動感覚情報に基づいた身体像形成過程でも大きく寄与しているに違いない。これは視覚障害者の視覚野が手指からの皮膚情報処理に関与する(Burton et al. 2004)という事実からも容易に推測できる。そこで、右利き視覚障害者1名(54歳男性)の協力を得て、機能的核磁気共鳴装置を用いた実験を行った。右手、左手、右足のそれぞれの伸展筋の腱を80Hzで刺激することで運動錯覚を惹起した。統制条件としては、腱をはずした骨皮膚上への80Hz刺激を加えた。この刺激は単純に皮膚振動感覚を惹起するだけで、特に錯覚を引き起こすことはない。

この視覚障害者が運動錯覚を経験すると、右半球視覚有線外野外側部[活動ピーク座標(52, -72, -7)および(47, -77, -3)](図5上段左黄色○)が四肢の相違に無関係に賦活した。しかも錯覚を生じない皮膚への単純な刺激ではこの領域は賦活しなかった。この領域は閉眼健常被験者の多くでは賦活しない(図5下段)。視覚障害者でも運動錯覚を経験すると、健常被験者と同様に、四肢に対応した運動関連領野の体部位再現部位の活動と、四肢に共通の右半球前頭-頭頂葉の賦活(図5上下段左参照)が認められた。さらに、興味深いことに、第2実験で確認された、視覚-運動感覚統合領域である、小脳外側部(-30, -75, -35)の活動も合わせて観察できることがわかった(図6)。

視覚障害者1名の運動(右手、左手、右足共通)錯覚経験中の脳活動



閉眼健常被験者群の運動錯覚経験中の四肢共通の脳活動

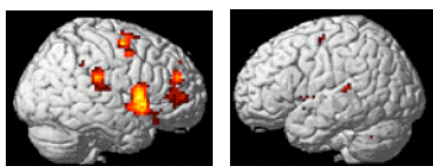


図5 視覚障害者の右手、左手、右足の運動錯覚で共通に賦活する身体視覚領野(黄色○)

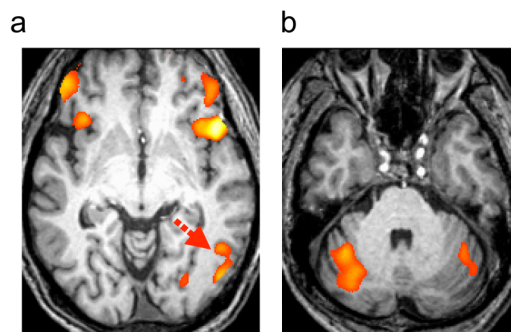


図6 視覚障害者の右手、左手、右足の運動錯覚で共通に賦活する身体視覚領野(a)と小脳外側部(b)

これらは、(1)視覚障害者が健常被験者とある程度同様の運動感覚(求心性Ia線維)情報処理を行っていること、(2)視覚障害者では健常者の脳領域に加えて、右半球視覚野や小脳外側部などをさらに動員して付加的な情報処理を行っていることを示唆している。この結果は(1名のパイロット実験ではあるが)、失明以前には身体視覚情報処理に特化していたと推測される視覚有線外野外側部が、失明(約30年前)とともにその機能を果たす必要がなくなったため、おそらく本来身体像形成のために相補的關係をもっていた四肢運動感覚情報処理に関与するようになったことを示すものである。さらに、この右利き被験者の右手運動錯覚は左手および右足のそれに比べると有意に強くこの視覚領野を賦活した。これは利き手の運動感覚情報処理の特異性を示唆しており、使用頻度や器用さなどに規定される体部位に応じた視覚領野の情報処理様式の違いを反映するものと推測可能である。

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)

①1st. Nobuhiro Hagura, 7th. Eiichi Naito (2-6省略)

Visuokinesthetic perception of hand movement is mediated by cerebro-cerebellar interaction between the left cerebellum and right parietal cortex

Cerebral Cortex 査読有,
2008年、Vol. 19, No. 1, pp. 176-186

②1st. Eiichi Naito, 7th. H. Henrik Ehrsson (2-6省略)

Human superior parietal lobule is involved in somatic perception of bimanual interaction with an external object

Journal of Neurophysiology
査読有、2008年、Vol. 99, pp. 695-703

③1st. Nobuhiro Hagura, 7th. Eiichi Naito (2-6
省略)

Activity in the posterior parietal cortex
mediates visual dominance over
kinesthesia

Journal of neuroscience 査読有,
2007年、Vol. 27, No. 26, pp. 7047-7053

[学会発表] (計 6件)

①内藤 栄一, 招待講演「運動前の感覚情報
操作でヒトの運動技能を向上させる」, スポ
ーツと脳2009, 2009年3月14日, 早稲田
大学(東京都)

②内藤 栄一, 招待講演「脳活動からわかる
ヒトの主観的運動体験」, 日本スポーツ心理
学会第35回記念大会, 2008年11月15日,
中京大学名古屋キャンパス(愛知県)

③内藤 栄一,
特別講演「ヒトの身体図式の脳内再現」, 身
体情報学研究会 電子通信学会分科会,
2008年10月23日, 東北大学(宮城県)

④内藤 栄一,
講演「動くからだの知覚」, 生理学若手サマ
ースクール2008, 2008年8月2日, 国立
オリンピック記念青少年総合センター(東京
都)

⑤ Eiichi Naito, Neural correlates of
perception of hand movements
Neuroscience2008 (第31回日本神経科学大
会), 2008年7月9日, 東京国際フォーラム
(東京都)

⑥内藤 栄一,
招待講演「未来型リハビリテーション法の
開発-人の脳機能マッピングの知見はリハビ
リに役立つのか?-」, 中枢神経障害勉強会
2008,
2008年3月9日, 日本ガイシフォーラム
(愛知県)

[図書] (計 2件)

①内藤 栄一, 真興交易(株)医書出版部、身
体トレーニング、section1 トレーニングと
中枢神経「運動制御」、2009年、p. 18-p. 24

②内藤 栄一, 三輪書店、理学療法 M00K16
脳科学と理学療法、身体像の生成と運動学習
の脳内機構、2009年、p. 81-p. 98

6. 研究組織

(1) 研究代表者

内藤 栄一 (NAITO EIICHI)

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情

報研究所・主任研究員

研究者番号: 10283293

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者