

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330174

研究課題名(和文) 物体の外観の能動的探索による物体認知促進メカニズムの解明

研究課題名(英文) Investigation of the brain mechanism for facilitation of object recognition by active exploration of 3-D object views

研究代表者

笹岡 貴史 (SASAOKA, TAKAFUMI)

広島大学・社会産学連携室・准教授

研究者番号：60367456

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物体の外観を能動的に探索することで生じる物体認知の促進効果が、イメージ生成能力を運動系からの信号が補償することで生じているという仮説を、心理実験とfMRIによる脳機能計測によって検証した。心理実験ではイメージ生成能力が低いほど能動的探索の効果が大きいことが示された。実験前の安静時脳活動ではイメージ生成能力が低いほど運動野などで低周波変動の振幅が強まったが、実験後にそれが見られなくなることから、能動的探索によってイメージ生成能力に関わる脳ネットワークの個人差が減少したと考えられる。以上の結果は、仮説を支持するものであり、物体認知の促進効果に関わる脳内メカニズムの一端が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this study, it was hypothesized that the facilitation of object recognition by active exploration of 3-D object views resulted from a compensation for a lack of imagery ability based on the signals from the motor cortices. To verify this hypothesis, a series of psychological and fMRI experiments was conducted. The results of the psychological experiments showed that the facilitative effect of active exploration was evident in the low imagers. In the resting-state fMRI before the experiment, a significant fractional amplitude of low frequency fluctuations (fALFF) was observed in the motor cortex in the low imagers. However, no region showing a significant fALFF was observed after the experiment, suggesting that the individual differences in the brain network involved in imagery generation were diminished by active exploration. These findings support the hypothesis and clarified a part of the brain mechanism for the facilitative effect of active exploration.

研究分野：認知神経科学

キーワード：物体認知 身体化 心的回転 心的イメージ

1. 研究開始当初の背景

我々の身体は外界の情報を取り込むインターフェイスであり、外界の対象の理解に重要な役割を担っているということが示唆されている(「身体化による認知」). 近年、視覚情報処理においても身体が重要な役割を担っていることが示唆されている. 従来、視覚情報は後頭葉から側頭葉への腹側経路と後頭葉から頭頂葉への背側経路の二つの経路で処理され、それぞれ視覚対象の認知、視覚対象に対する行為のための空間情報処理を担っているとされてきた (Goodale & Milner, 1992). しかし、例えば、Wexler et al. (1998)は実験協力者に2次元図形を心の中で回転させる心的回転課題と同時にジョイスティックを手で回転させる二重課題を行わせ、心的回転の方向とジョイスティックの回転方向が一致したときに心的回転が促進されることを報告している. すなわち、この知見は腹側経路と背側経路の間に相互作用が存在し、視覚対象の回転変換および比較照合に身体運動情報が影響を及ぼすことを示唆している.

また、物体の外観を能動的に探索することで物体の認知が促進される現象が報告されている (Harman et al., 1999; James et al., 2001, 2002; Liu et al., 2007; Meijer & van den Broek, 2010; Sasaoka et al., 2010; Meijer & van der Lubbe, 2011; Lee & Wallraven, 2013). 例えば、Sasaoka et al. (2010)はCGで作成した新奇な3次元物体を用い、次のような実験を行った. 実験協力者は経時的に提示される2つの物体の外観の比較照合課題を行った. 2つの物体が同一の場合は互いに異なる角度からの外観が提示された. 実験協力者は、課題が1セッション終了した後、トラックボールを右手で操作することで物体を回転させ、その外観の変化を能動的に観察した. その結果、その後の比較照合課題において物体の単一の外観から同じ物体と認識できる角度差の範囲が有意に拡大した. この現象は、物体の認知が身体運動情報によって促進されることを示唆している.

しかし、このような促進に関わる詳細な脳内メカニズムについては未だに明らかになっていない. これを明らかにするためには、能動的探索による促進効果の特性を心理実験によって詳細に検討するとともに、脳機能計測を用いた認知神経科学的手法による検討を行う必要がある. この能動的探索による物体認知促進メカニズムの解明の手掛かりとして、促進効果の大きさと視覚イメージの生成やすさ、および空間認知能力との間に相反する関係があるという知見が挙げられる. 例えば、Sasaoka et al. (2010)の実験では物体の記憶表現に近い外観を認識する際には能動的探索の促進効果が小さく、記憶表現と離れたイメージしづらい外観の認知において促進効果が大きくなることを示し

た. また、空間認知能力テスト (MRT-A テスト; Vandenberg & Kuse, 1978) の成績が低い群の方が能動的探索による促進効果が大きいという報告がある (Meijer & van den Broek, 2010). さらに、手の心的回転課題において、成人より子どもの方が、提示された刺激の手の姿勢を実際に再現しやすいかどうかという生体力学的制約の影響が大きいという報告もある (Funk et al., 2005). このことはイメージ生成能力の未発達な子どもにおいて、より運動イメージが利用されやすいことを示唆している. 一方、Sasaoka, Mizuhara, & Inui (2014)は、fMRI と脳波の同時計測により頭頂葉と運動前野が同じタイミングで活動することで心的回転が実現されていることを示した. このことから物体の未知の外観をイメージする際に、運動前野からの運動指令が頭頂葉で表現された視覚イメージの変換に利用されていると考えられ、この頭頂-運動前野ネットワークが能動的探索による促進効果に関わっている可能性が高い.

2. 研究の目的

以上のような背景を踏まえると、能動的探索による物体認知の促進効果は頭頂葉におけるイメージ生成能力を運動系からの信号が補償することで生じていると考えられる.

そこで本研究では、上記の仮説の検証を心理実験および fMRI による脳機能計測によって行うことを目的とする. その上で、以下の二つの問題について解明を目指す.

(1) 能動的探索による物体認知の促進に関わる脳部位の同定

Sasaoka et al. (2014)の結果から、頭頂-運動前野ネットワークが能動的探索による促進効果に関わっている可能性が示唆される. それが正しいとすれば、頭頂-運動前野ネットワークが物体認知に関わる腹側経路の脳部位の活動に影響を与えることが予想される. そこで、fMRI を用いて上記の仮説を検証することにより、能動的探索による物体認知の促進に関わる脳内メカニズムを明らかにする.

(2) 能動的探索による物体認知の促進効果におけるイメージ生成能力の役割

Meijer & van den Broek (2010)は空間認知能力テストの高成績群と低成績群で能動的探索後の物体認知課題の成績を比較し、低成績群の方が能動的探索の効果が大きかったことを報告している. この結果について、彼らは能動的探索によって物体認知が個別の特徴を分析的に処理するプロセスから特徴を全体的に処理するプロセスに変化したと説明している. しかし、彼らの説明では能動的探索における手の運動の効果がどのように物体認知プロセスに影響を与えたのかについては不明である. 空間認知能力の差異によって能動的探索の効果が異なるという

知見は、能動的探索による物体認知の促進メカニズム、さらには背側経路と腹側経路の相互作用のメカニズムを解明する上で重要なものであり、詳細に検討を行う必要がある。そこで、本研究では、このメカニズムとして、イメージ生成能力が低い個人ほど運動系からの信号によってイメージ生成能力が補償されることで能動的探索の効果が生じるといふ仮説を立て、以下の三つの点の検討を行うことで仮説の検証を行った。

(a) イメージ生成能力が影響を与えるプロセスについての検討

Sasaoka et al. (2010) の実験パラダイムを用い、イメージ生成能力の低成績群における能動的探索による物体認知の促進が記銘プロセスで起こったのか、物体を比較照合するプロセスで起こったのかについて検討する。

(b) 実物体を用いた実験による検討

従来の研究では、CG で作成した刺激物体が用いられていたが、実物体を用いた検討は行われていない。そこで、本研究では 3D プリンターで刺激物体を作成し、実物体を能動的探索した場合の促進効果について検討する。

(c) 安静時脳活動による検討

心理実験前後に安静時脳活動を測定し、能動的探索 / 受動的観察による物体認知成績の変化と実験前後の安静時脳活動の違いの関連を調べることにより、促進効果に関わる神経基盤を検討する。また、イメージ生成能力の個人差に関わる神経基盤についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 能動的探索による物体認知の促進に関わる脳部位の同定

20~26 歳の右利き男性 37 名が実験に参加した。体動等の理由から 5 名のデータを脳活動解析から除外した。

刺激には CG で作成した新奇物体（ペーパークリップ物体；Bülthoff & Edelman, 1992）を用いた。実験は 2 セッションの比較照合課題（図 1）とセッション間に行われる観察課題からなる。比較照合課題では 1 個の物体の外観（ターゲット刺激）が 2 秒間提示され、実験協力者はその物体の形状を記憶した。2 秒後再び 1 個の物体の外観（テスト刺激）が 2 秒間提示され、その間実験協力者はその外観がターゲット物体のものかどうか反応を行わずに比較照合した。2 秒後に回答の合図の画像が提示され、画像内に示されたターゲット物体（Yes）/ 違う物体（No）に対応す

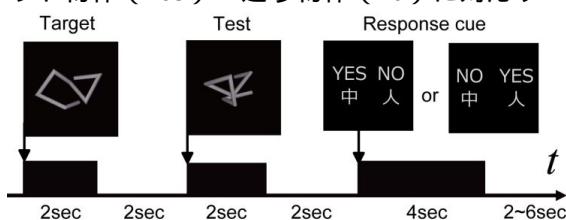


図 1. 比較照合課題の手続き

る指のキーを左手の人差し指または中指で押して反応を行った。これにより、テスト刺激提示時の脳活動からキー押しに関連する活動を除外することができると考えられる。テスト刺激がターゲット物体の場合は、ターゲットの外観に対し、 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 45^\circ$ 垂直回転された物体の外観のいずれかが提示された。1 セッションの比較照合課題（80 試行）を行った後、実験協力者は 2 群（能動群、受動群）に分けられ、観察課題を行った。能動群の実験協力者はペーパークリップ物体の垂直回転 $\pm 45^\circ$ の範囲の外観を、トラックボールを縦方向に操作し、物体を回転させることによって自由に観察した。受動群の実験協力者は能動群の実験協力者が能動的探索を行ったリプレイを観察した。いずれの群も 1 個の物体について 20 秒間、5 種類の物体の観察を行った。観察課題で用いた物体は全て、比較照合課題では用いられないペーパークリップ物体であった。観察課題後、2 セッション目の比較照合課題を行った。実験協力者は MRI 装置中で脳活動計測を行いながら 2 セッションの比較照合課題を行い、観察課題は MRI 装置外で行った。

脳活動計測には京都大学こころの未来研究センター連携 MRI 研究施設の 3.0T MRI 装置（Siemens Verio）を用いた。テスト刺激提示中 2 秒間の脳活動を分析対象とした。

(2) 能動的探索による物体認知の促進効果におけるイメージ生成能力の役割

右利きの大学生・大学院生 59 名が実験に参加した。刺激には CG で作成したペーパークリップ物体を用いた。

実験は 2 セッション（Pre, Post）の比較照合課題とセッション間に行われる観察課題からなる。比較照合課題では、1 個の物体（ターゲット）のある外観を 1.5 秒提示した（第 1 刺激）。2 秒後にターゲットかターゲットと異なる物体の外観を提示し（第 2 刺激）、実験協力者はターゲットかどうかキー入力によって判断し、続けて確信度を 2 段階で入力した。第 2 刺激がターゲットの場合は、第 1 刺激を基準に、物体を水平または垂直軸周りに 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 90^\circ$ 回転した外観であった（各セッション 252 試行）。

Pre セッション後、実験協力者を能動 / 受動群に分け、観察課題を行った。能動群は Sasaoka et al. (2010) で観察課題に用いられた物体を 3D プリンターで出力したものを一個ずつ右手で自由に回転させ能動的観察を行った（各 30 秒）。初期の外観は実験協力者の視点で Sasaoka et al. (2010) の課題での初期の外観と同じになるようにし、持ち方は可能な限り一定になるよう統制した。能動群はカメラ付きのゴーグル（Tobii Pro Glasses 2）を装着し、能動的観察時の物体と手の映像を収録した。受動群は能動群で収録された映像を受動的に観察した。両群とも、

物体の形状を記憶する必要はないが、回転によってどのように外観が変化するかに注目して観察するよう教示された。実験に先立ち実験協力者はイメージ生成能力に関する質問紙 (vividness of visual imagery questionnaire; VVIQ, Marks, 1973) に回答した。

実験の前後に開眼安静状態の脳活動計測を 10 分間行った。脳活動計測は広島大学感性イノベーション拠点の 3.0T MRI 装置 (Siemens Verio) を用いた。

4. 研究成果

(1) 能動的探索による物体認知の促進に関わる脳部位の同定

テスト刺激に対する AUC (area under the ROC curve) を算出し、ターゲットと非ターゲットの判別精度の指標とした。AUC についてセッション数、実験協力者群、テスト刺激のターゲット刺激からの回転角度を要因とする 3 要因混合計画分散分析を行った。その結果、回転角度の主効果 ($F(4, 120) = 102.22, p < .001$) およびセッション数と回転角度の交互作用 ($F(4, 120) = 3.329; p < .05$) が有意であった。単純主効果の検定により、テスト刺激が $\pm 45^\circ$ のとき第 1 から第 2 セッションでの AUC の増加が有意であった ($ps < .01$)。

第 2 セッションにおけるテスト刺激が $\pm 15^\circ, \pm 45^\circ$ の時の脳活動と 0° の時の脳活動の差分について、実験協力者群間で 2 sample t-test を行った結果、右前島皮質に能動群において有意な活動が見られた (図 2; uncorrected $p < .001, k > 10$)。さらに、テスト刺激が $\pm 15^\circ$ の時の能動群の脳活動をセッション間で比較すると、同じ右前島皮質に活動が見られた (uncorrected $p < .005, k > 20$)。

前島皮質は自己主体感と関連して活動することが知られており (Farrer & Frith, 2002)、能動群で自己運動イメージを利用した外観の比較照合が行われていたことが示唆される。ただ、本研究では先行研究と異なり、能動群、受動群の間に促進効果の差が見られなかった。しかし、 $\pm 45^\circ$ の外観に対して第 2 セッションで AUC が増加した実験協力者のみで解析を行った場合でも能動群で前島皮質の活動が見られており、前島皮質の活動と促進効果の関連、および両群で物体認知の促進に関わる神経基盤が異なることが示唆される。一方、本研究の仮説から、運動関

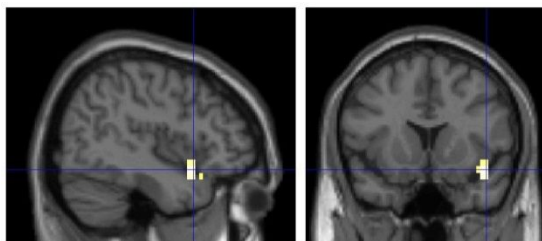


図 2. 能動群で見られた右前島皮質の活動

連領野の関与が予測されたが、能動群と受動群の比較では運動関連領野の活動は見られなかった。これについては、領域間の機能的結合の解析のような検討を行うことで、能動的観察による促進効果の脳内基盤の詳細を明らかにできると考えられる。

また、実験協力者には事前に MRT-A テストを行い、その得点と脳活動の相関について検討を行ったが、有意な相関は見られなかった。よって、本研究では物体の外観の比較照合に必要なイメージ生成能力を直接測定可能な VVIQ のような質問紙によって個人差を検討することが適切と考えられる。

(2) 能動的探索による物体認知の促進効果におけるイメージ生成能力の役割

第 2 刺激がターゲットの際の各回転角度について、AUC を求め、各群で AUC について回転角度とセッションを要因とし、VVIQ 得点を共変量とした共分散分析を行った結果、能動群で回転角度とセッションの交互作用 (垂直回転: $F(5.86, 153.28) = 2.03, p = .07$; 水平回転: $F(6.17, 166.49) = 2.22, p < .05$; 図 3) が見られ、受動群では回転角度とセッション、VVIQ の交互作用が見られた (垂直回転: $F(7.06, 197.7) = 1.84, p = .08$)。第 2 刺激の各回転角度における AUC の Post から Pre の差分を促進効果と定義し、VVIQ 得点と

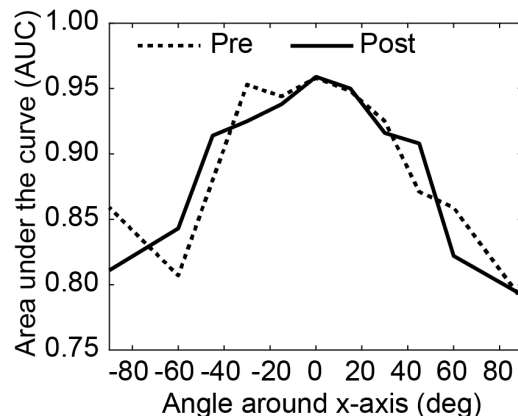


図 3 各回転角度に対する Pre / Post セッションにおける AUC (能動群、垂直回転)

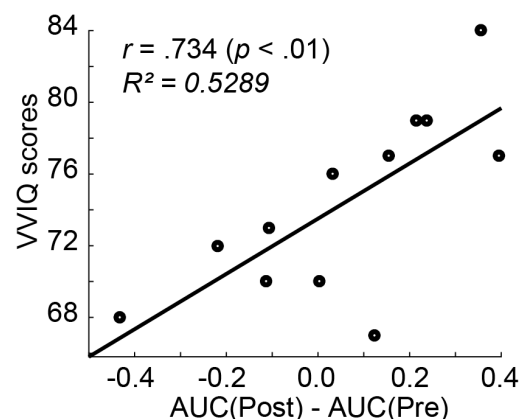


図 4 能動群の高イメージ群における促進効果と VVIQ 得点 (垂直回転-60°)

の相関を調べると、垂直回転 60° において有意な負の相関 ($r = -0.48, p < .05$) が見られ、WVIQ 得点が低い (イメージ生成能力が高い) ほど促進効果が大きかった。能動群でも、全実験協力者の WVIQ 得点の中央値を基準に、イメージ低 / 高群に分けて共分散分析を行うと、イメージ高群で回転角度、セッション、WVIQ の交互作用が見られ ($F(6.37, 63.73) = 2.88, p < .05$)、垂直回転-60° において WVIQ 得点と促進効果の有意な正の相関 ($r = 0.73, p < .01$; 図 4) が見られた。また、イメージ低群でも同様な正の相関 (垂直回転 $\pm 90^\circ$: いずれも $r = .42, p = .09$) が見られた。

能動群で回転角度とセッションの有意な交互作用が見られたことから、先行研究と同様、能動的観察の効果が確認された。しかし、促進効果と WVIQ の相関から、イメージ生成能力が低いほど促進が大きいことが分かった。この結果は本研究の仮説を支持している。受動群ではイメージ生成能力が高いほど受動的観察でも促進効果が見られ、空間認識能力が高いほど受動的観察でも促進効果が起こるという先行研究と一致している (Meijer & van den Broek, 2010)。

心理実験前後の安静時脳活動について、低周波変動の振幅 (fractional amplitude of low frequency fluctuations; fALFF; Zou et al., 2008) と WVIQ 得点との相関を調べた。その結果、心理実験前においてイメージ生成能力が低いほど両側の運動野、視覚野において (図 5)、イメージ生成能力が高いほど右中前頭回、右後部頭頂葉において (図 6) fALFF が高まった。この結果から、明瞭なイメージ生成ができる個人は前頭-頭頂の注意ネットワークが、明瞭なイメージ生成ができない個人は運動シミュレーションがイメージ生成に用いられることが示唆された。また、実験後にこのような相関が見られなくなることから、このような視覚イメージの明瞭さに関わる神経ネットワークの個人差が、能動的探索 / 受動的観察を行うことで減少することが示唆された。

本研究で得られた知見は、能動的探索 / 受動的観察による物体認知の促進効果には、イメージ生成能力の個人差が強く関与していることを示している。また、実験前後の安静時脳活動計測から、能動的探索 / 受動的観察によってイメージ生成能力の個人差に関わる脳内ネットワークに変化が起こることも示唆された。以上の知見はこれまで多くの研究で示唆されてきた能動的探索 / 受動的観察による物体認知の促進効果の脳内メカニズムの一端を明らかにしたという点で、これまでの研究と一線を画するものと言える。一方で、比較照合課題中には能動的探索を行った群で右前島皮質に活動が見られたが、実験前後の安静時脳活動と前島皮質の活動がどのような関係にあるかを明らかにすることは今後の課題と言えよう。これらの知見を統

合することができれば、全く新しい物体認知の脳内メカニズムに関する理論モデルの構築が可能になると考えられる。

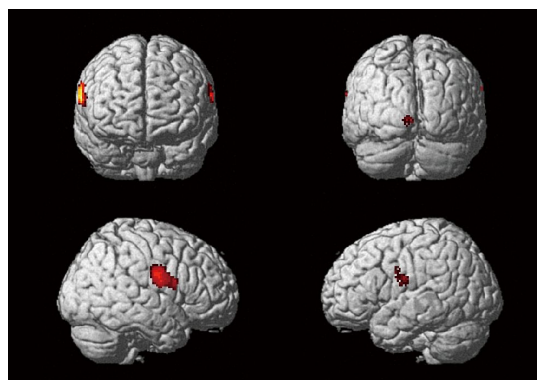


図 5. 実験前の安静時脳活動測定で fALFF とイメージ生成能力との間に負の相関がみられた脳領域

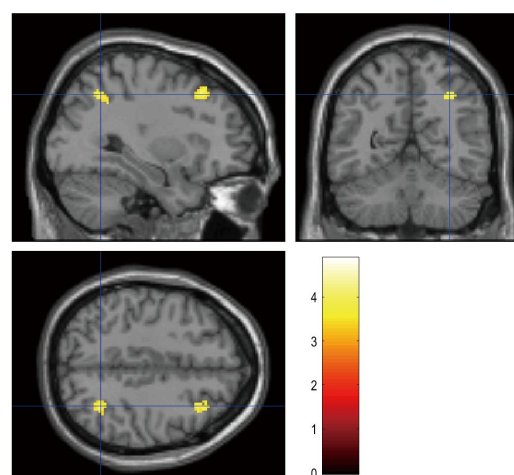


図 6. 実験前の安静時脳活動測定で fALFF とイメージ生成能力との間に正の相関がみられた脳領域

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)

〔学会発表〕(計 7 件)

1. 笹岡貴史: 視覚イメージ生成能力が物体の外観の能動的 / 受動的観察による物体認知促進効果に及ぼす影響, 日本心理学会第 81 回大会, 2017 年 9 月 21 日。
2. Sasaoka, T., Machizawa, M., & Yamawaki, S.: Neural and behavioral benefits driven by facilitative effect of active exploration/passive observation of real 3-D novel objects depend on individual differences in vividness of imagery, European Conference of Visual Perception 2017, Berlin, Germany, 2017 年 8 月 29 日。
3. 笹岡貴史: 三次元物体景観の能動的観察が脳活動に与える影響: fMRI 研究, 日本心理学会第 79 回大会, 名古屋国際会議場, 2015 年 9 月 23 日。

4. 笹岡貴史：視覚物体認知における身体性の役割，モーターコントロール研究会シンポジウム「未知の克服と環境認知のための身体性情報処理」(招待講演)，京都大学，2015年6月26日。
5. 笹岡貴史：感性の脳内メカニズム解明に向けて～感性 COI 拠点での取組みの紹介，日本人間工学会中国・四国支部(招待講演)，広島大学，2015年3月20日。
6. 笹岡貴史：身体化に基づくシミュレーションと直観的理解，日本心理学会第78回大会，同志社大学，2014年9月10日。
7. 笹岡貴史，乾敏郎：視覚・運動系のインタラクションに基づくイメージ生成・変換メカニズム，感性脳工学研究会，岡崎コンファレンスセンター，2014年9月5日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹岡 貴史 (SASAOKA, TAKAFUMI)

広島大学・社会産学連携室・准教授

研究者番号：60367456