

視触覚クロスモーダル学習が 3 次元曲率弁別に及ぼす影響 ：心理物理及び fMRI 実験による検討

1275101 小林万也花 【知覚認知脳情報研究室】

Effects of Visuo-Tactile Cross-Modal Learning on 3D Curvature Discrimination: Psychophysical and fMRI Study

1275101 Mayaka KOBAYASHI 【Perceptual and Cognitive Brain Information Processing Lab.】

1 はじめに

人間は現実世界の物体を認識する際、視覚と触覚の 2 つの感覚を主に利用して 3 次元を知覚する。近年、視覚情報がない状況でも、3 次元形状の触覚情報が視覚野で処理されることが報告され [1]、これらの研究は、触覚の形状情報が視覚的な 3 次元処理に影響を与える可能性を示唆している。本研究ではクロスモーダル学習により、3 次元視の感度特性や脳活動パターンが、異なるモダリティの触覚訓練によって影響をされるかを検討した。

また、これまで 3 次元曲面の凹凸符号の視覚処理については検討されてきたが [2]、3 次元構造の詳細な曲率や、その弁別における視覚と触覚の関係については未解明である。そのため、本研究は形状情報として 3 次元曲面の 3D 曲率を用いて、視触覚の学習が視覚の 3D 曲率の弁別閾に与える影響を心理物理実験で検討し、さらに 3D 曲率がモダリティを超えて処理される視覚野の領域についても、fMRI 実験で検討した。

2 方法

2.1 刺激および実験環境

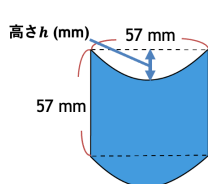


図 1 3 次元曲面刺激の模式図

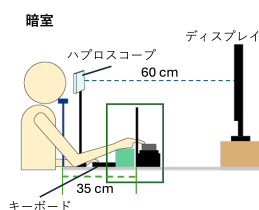


図 2 実験環境

呈示刺激は、縦横約 57 mm の平面に二次関数のカーブ形状をつけた縦筒の 3D 曲面であり、曲面の横端からカーブ頂点の高さを曲率の大きさとした (図 1)。

視覚刺激は、両眼立体視でのみ立体知覚できるランダムドットステレオグラム (RDS) で呈示された。中心には注視点があり、縦幅は 5.45 deg、横幅は 5.21~5.68 deg 内で刺激ごとにランダムに変化した。触覚刺激は縦幅 57 mm、横幅 82 mm のオブジェクトで、中心から左右±28.5 mm の曲面の左右端点の高さを 0 とし、10、12.5、

13.5、15、17 mm の 5 水準の高さを用意した。刺激は直動モータに固定され、1 回の実行 (約 6 s) で約 5 cm 幅を横に 1 往復した。参加者は利き手の人差し指で、受動的に触れて刺激を知覚した。

実験は暗室内で行われた (fMRI 実験のテストを除く)。参加者はディスプレイから 60 cm の位置に顎を顎台に乗せ、ハプロスコープにより左右眼に分離呈示した視覚刺激を両眼立体視し、3D 曲面を知覚した (図 2)。実験プログラムは MATLAB+Psychtoolbox で制御した。

2.2 心理物理実験

心理物理実験は、視触覚訓練前後での視覚テスト時における 3D 曲率弁別閾の変化を検討した。実験は、1 日目に視覚 pre テスト、2-3 日目に各条件の訓練、4 日目に視覚 post テストの 4 日間で、視覚訓練 (V)、触覚訓練 (T)、訓練なし (N) の 3 条件があった。参加者は実験前に練習試行で課題が遂行可能か確認し、正常な視力/両眼立体視力を有する 27 名 (20.7 ± 1.9 歳、M:13 名、F:14 名) を、各訓練条件で 9 名ずつ無作為に割り当てた。

視覚テストは 70 試行であり、試行は注視点、1 つ目の曲面刺激、注視点、2 つ目の曲面刺激、弁別、ブランクの順で遷移した。弁別課題は試行中の 2 つの曲面刺激のうち、どちらの曲率が大きいかを選択した。2 つの曲面刺激の曲率は、[10 mm] と [10+推定値 mm] であった。推定値は曲率の増分を適応的測定法の QUEST 法で設定し、最終的に正答率 82% で弁別閾を算出した。

訓練は各日 48 試行×4 セットで、テストと同様の手続きであったが、ブランク時に正解/不正解の結果が表示された。曲面刺激の曲率は [10 mm] と [固定値 (参加者ごとの感度に応じた値)] の 2 種類を用い、弁別課題は 2 つの曲率が同 [10・10 mm] か、異 [10・固定値 mm] かの異同判断であった。

解析は、テストの弁別閾を実測値の弁別閾および弁別感度の向上率の 2 種類で解析した。弁別閾は、訓練条件要因 (V, T, N) と時系列要因 (pre, post) で二要因分散分析を行なった。弁別感度の向上率は弁別閾の変化率を $\frac{\text{弁別閾}_{\text{post}} - \text{弁別閾}_{\text{pre}}}{\text{弁別閾}_{\text{pre}}} \times 100(\%)$ で算出し、訓練条件 (V, T, N) 間で一要因分散分析を行なった。また、向上率が 0%

と有意に異なるかを1標本 t 検定により検定し、 p 値をHolm法で多重比較補正した。平均+標準偏差 $\times 2$ を超える値を外れ値とし、各条件8名のデータを解析した。

2.3 fMRI 実験

fMRI 実験では、触覚訓練前後の視覚テストでの視覚野における脳活動変化を検討した。実験は、1日目に1回目視覚テスト、2日目に訓練なし、3日目に2回目視覚テストと触覚訓練、4日目に触覚訓練、5日目に3回目視覚テストの5日間実施し、1回目、2回目(訓練なし後)、3回目(訓練後)の視覚テスト時の脳活動を計測した。参加者は矯正を含む正常な視力を有する8名(19~31歳、M:7名、F:1名)で、参加者内計画で行なった。

試行は、視覚テスト時では、注視点、曲面刺激、Rest、弁別、Restの順に遷移し、触覚訓練時では、注視点、曲面刺激、弁別、回答正誤表示、Restの順に遷移した。弁別課題は、曲面刺激の曲率が大きい小さいかを回答した。視覚テストはMRI室で行い、MAGNETOM Prisma 3T (SIEMENS)で計測した。3次元視覚刺激はPROPixx (VPixx Technologies)と偏光フィルターの3Dメガネで呈示した。視覚テストの曲率は、[曲率差小(10 vs 20 mm)]と[曲率差大(10 vs 30 mm)]の2パターンを用いた。触覚訓練は暗室内で実施し、曲率は10 vs 13.5 mmを弁別した。

解析は、RetinotopyとLocalizerにより視覚野の13領域をROIとして定義し、MVPAで視覚刺激呈示時のボクセルパターンから曲率が大きい小さいかの分類精度をLeave-one-run-out交差検証した。この分類精度が各ROIにおいてチャンスレベル(50%)を上回るかを1標本 t 検定により検定し、BH法で多重比較補正した。

3 結果・考察

3.1 心理物理実験

視覚テストでの実測値に対する二要因分散分析の結果、時系列要因の主効果は有意であったが($F(1, 21)=8.57$, $p=.008$, $\eta^2=.11$)、訓練要因や交互作用は有意ではなかった($p>.05$)。

弁別感度の向上率(図3)に対する一要因分散分析では、どの訓練条件間でも有意な差は認められなかった($p>.05$)。0%との比較の1標本 t 検定では、視覚訓練および触覚訓練において有意な差が認められた(V条件: $t(7)=2.86$, $p=.048$, T条件: $t(7)=3.47$, $p=.030$)。

視覚および触覚の訓練を行なった場合でも、視覚の訓練と同様に向上率が0%より有意に高かったことから、異なるモダリティであっても3D曲率の訓練を行うことで、弁別感度が向上することが示唆された。

3.2 fMRI 実験

[曲率差小]条件では、いずれのテストおよびROIにおいても、チャンスレベルより有意に高い分類精度は見られなかった。一方、[曲率差大]条件(図4)では、3回目テスト時にV3dのみ、チャンスレベルを上回る有意

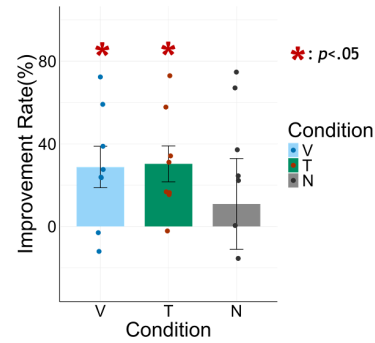


図3 弁別感度の向上率

な分類精度が認められた($t(7)=5.92$, $p=.007$, $d=2.09$)。

訓練なしの1・2回目では分類精度に有意な差が見られず、3回目で触覚訓練の経験によってV3dで分類精度が有意に高くなったことから、異なるモダリティ(触覚)の曲率情報が視覚野における脳活動パターンを変化させ、背側経路の領域に影響した可能性が示唆された。これは、触覚知覚が背側経路に関与すること[3]から、触覚を伴う体性感覚情報が学習効果としてV3dに影響した可能性が考えられる。

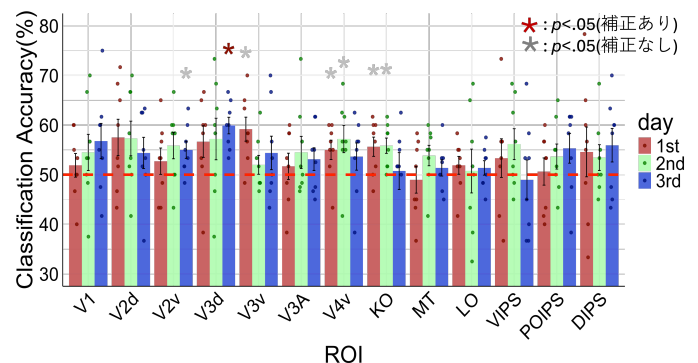


図4 [曲率差大]でのMVPAの分類精度

4 結論

本研究では、モダリティを超えた立体形状処理の影響を検討するため、3D曲率における視覚の知覚反応や脳活動パターンが、触覚のトレーニングによって影響するかを心理物理実験とfMRI実験により検討した。その結果、触覚の3D曲率学習がモダリティを超えて、視覚の弁別能力の向上や視覚野の背側経路に影響を与える可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Masson et al., "Visual and Haptic Shape Processing in the Human Brain: Unisensory Processing, Multisensory Convergence, and Top-Down Influences", *Cerebral Cortex*, Volume 26, Issue 8, p.3402-3412, Aug 2016.
- [2] Li & Shigemasa, "Generalized Representation of Stereoscopic Surface Shape and Orientation in the Human Visual Cortex", *Frontiers in Human Neuroscience*, Volume 13, 2019.
- [3] Qin & Yu., "Neural pathways conveying novisual information to the visual cortex." *Neural Plast.* 2013:864920, Jun 2013.