

令和6年度
修士学位論文

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

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

1275101 小林 万也花

指導教員 繁榊 博昭

2025年2月28日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要旨

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

小林 万也花

近年、視覚入力がない状況でも体性感覚のみで、3次元空間情報が視覚野において処理されることが報告されている。しかし、これまで3次元の方位や凹凸については検討されてきたが、3次元構造のより詳細な曲率の大きさの違いの処理については未解明である。そこで本研究では、視触覚クロスモーダル学習が3D曲率の感度特性に影響を及ぼすかを心理物理実験により検討し、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をfMRIにより検討した。まず、視覚または触覚による3D曲率の異同弁別トレーニングが視覚における3D曲率の弁別閾に影響するかを実験した。視覚トレーニング/触覚トレーニング/トレーニングなしの3群で比較した結果、視覚だけでなく触覚による曲率トレーニングでも視覚の曲率弁別感度が有意に向上した。さらにfMRIを用いて、触覚による曲率弁別トレーニングによって各視覚野の脳活動に変化が生じるかをMVPAによる3D曲率判別の分類精度を指標として検討した。その結果、触覚の経験によって脳活動パターンが変化したと考えられる視覚野の背側経路(V3d)の領域が同定された。

キーワード 3次元形状認識, 視触覚クロスモーダル学習, fMRI, 背側経路, MVPA, V3d

Abstract

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

Mayaka KOBAYASHI

Recent studies have shown that three-dimensional (3D) spatial information can be processed in the visual cortex through tactile/somatosensory input, even in the absence of visual input. While previous research has examined 3D orientation and surface convexity/concavity, the processing of finer differences in curvature remains unclear. We investigated whether visuo-tactile cross-modal learning affects sensitivity to 3D curvature through psychophysical experiments. Additionally, we used fMRI to identify visual cortical regions involved in cross-modal 3D curvature processing. First, we examined whether training in 3D curvature discrimination using vision or touch influences the visual discrimination threshold. A comparison among visual training, tactile training, and no training groups revealed that visual curvature discrimination sensitivity improved significantly not only in the visual training condition but also in the tactile training condition. Next, using fMRI and MVPA, we assessed changes in neural activity in each area of the visual cortex by measuring classification accuracy in 3D curvature discrimination before and after tactile training. The results identified a dorsal visual region (V3d) where neural activity patterns are altered by tactile training.

key words 3D shape perception, Visuo-Tactile Cross-Modal Learning, fMRI, Dorsal visual stream, MVPA, V3d

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	4
1.3	用語解説	4
1.3.1	機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)	4
1.3.2	MVPA(Multi Voxel Pattern Analysis)	6
第 2 章	実験方法 (全体)	7
2.1	刺激	7
2.1.1	曲率の定義	7
2.1.2	視覚刺激	8
2.1.3	触覚刺激	10
2.2	実験環境	10
2.2.1	暗室環境	10
2.2.2	MRI 環境	13
第 3 章	心理物理実験	14
3.1	実験方法	14
3.1.1	実験概要	14
3.1.2	視覚テスト	15
3.1.3	トレーニング	16
3.2	解析	18
3.2.1	使用ソフトウェア	18
3.2.2	外れ値	18

目次

3.2.3	トレーニング	18
3.2.4	視覚テスト	18
3.3	結果	19
3.3.1	トレーニング	19
3.3.2	視覚テスト	20
3.4	考察	21
第4章	fMRI 実験	23
4.1	実験方法	23
4.1.1	実験概要	23
4.1.2	弁別課題タスク	24
4.1.3	視覚テスト	25
4.1.4	触覚トレーニング	26
4.1.5	fMRI データ取得	27
4.1.6	ROI 実験	27
4.2	解析	29
4.2.1	使用ソフトウェア	29
4.2.2	fMRI 画像の前処理	29
4.2.3	ROI ごとの MVPA	30
4.3	結果	31
4.3.1	[曲率差 大] における ROI ごとの MVPA 結果	31
4.3.2	[曲率差 小] における ROI ごとの MVPA 結果	32
4.3.3	全体での ROI ごとの MVPA 結果	33
4.4	追加解析の結果	34
4.4.1	左半球と右半球による ROI の MVPA 解析	34
	曲率差 大	34

目次

曲率差 小	35
全体	36
4.5 考察	38
4.5.1 脳活動パターンへの影響	38
4.5.2 実験デザインの妥当性	40
第 5 章 まとめ	42
謝辞	43
参考文献	44
付録 A fMRI 実験の行動パフォーマンス	49
A.1 視覚テストの正答率	49
A.2 触覚トレーニング	50
A.2.1 正答率	50
A.2.2 回答時間	50
付録 B 視覚テスト回で分類する MVPA 解析	52
B.1 曲率差 大	52
B.2 曲率差 小	54
B.3 全体	56

目次

1.1	視触覚クロスモーダル学習の模式図	2
1.2	3次元曲面の性質	3
1.3	血流動態応答関数 (HRF)[13]	5
2.1	3次元曲面刺激の模式図	7
2.2	視覚刺激の RDS(左: 左目用呈示刺激, 右: 右目用呈示刺激)	8
2.3	参加者が観察する視覚刺激のイメージ図 (立体表現を陰影で表現)	9
2.4	視覚刺激の奥行きイメージ (左: 上面図, 右: 右面図)	9
2.5	曲率の大きさ 10 mm の触覚刺激	10
2.6	実験環境	11
2.7	ハプロスコープの模式図	11
2.8	触覚刺激呈示環境	12
2.9	触覚刺激の動き (1 → 2 の順に遷移)	12
2.10	実際の実験環境	12
2.11	実際の触覚呈示環境	12
2.12	MRI(MAGNETOM Prisma 3T)[出典: 高知工科大学 脳コミュニケーション研究センター HP(https://braincom-kut.com/)]	13
2.13	ボタンコントローラの模式図	13
3.1	心理物理実験の流れ	15
3.2	心理物理実験での視覚テストの流れ	15
3.3	心理物理実験でのトレーニングの流れ (上: V 条件, 下: T 条件)	17
3.4	V 条件トレーニングの正答率変化	19
3.5	T 条件トレーニングの正答率変化	19

図目次

3.6	弁別閾の平均値	20
3.7	弁別感度の向上率	21
4.1	fMRI 実験の流れ	23
4.2	実験開始から本試行前の流れ	24
4.3	視覚テストの手続き	25
4.4	視覚刺激の曲率	26
4.5	触覚トレーニングの手続き	27
4.6	13 箇所の ROI	28
4.7	ROI の同定に用いた刺激	29
4.8	MVPA に使用した BOLD 信号	30
4.9	[曲率差 大] での MVPA の分類精度	32
4.10	[曲率差 小] での MVPA の分類精度	33
4.11	全体での MVPA の分類精度	34
4.12	左半球での [曲率差 大] の MVPA の分類精度	35
4.13	右半球での [曲率差 大] の MVPA の分類精度	35
4.14	左半球での [曲率差 小] の MVPA の分類精度	36
4.15	右半球での [曲率差 小] の MVPA の分類精度	36
4.16	左半球での MVPA の分類精度	37
4.17	右半球での MVPA の分類精度	37
4.18	両眼立体視の神経機構 (マカクザル)	39
A.1	視覚テストの正答率	49
A.2	触覚トレーニングの正答率	50
A.3	触覚トレーニング回答時間	51
B.1	[曲率差 大] のテストでの MVPA の分類精度	53

図目次

B.2 [曲率差 小] のテストでの MVPA の分類精度	55
B.3 全体のテストでの MVPA の分類精度	57

第 1 章

はじめに

1.1 背景

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。視覚は目の網膜から入力された情報が脳の後頭部にある視覚野で処理され、触覚は皮膚上の機械受容器により入力された情報が頭頂部にある体性感覚野で処理される。古典的な研究では、これらの感覚情報は脳内で別々の処理経路をたどり、頭頂連合野などの高次感覚野で統合され、より複雑な外界の認識を実現していると考えられてきた。

ただ近年の研究で、3 次元形状の触覚情報が視覚野である LOC(後頭葉外側皮質)に関連することが示唆されている [1]。また、視覚障がい者が触覚弁別課題で一次視覚野の活性化が見られたり、触覚識別に長けている麻雀プレイヤーは点字触覚弁別課題時に未経験者に比べて初期視覚野 (V1) での活性化が見られることが明らかになっている [2]。以上の研究は、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。

さらに最近では、視覚情報を遮断した状況でも触覚情報が視覚野で処理されることが報告されている。superformula(パラメトリック形状モデル)による 3 次元形状を触覚のみで知覚した際の脳活動を計測した研究では、触覚課題で LOC の関連が示唆されたほか、視覚での形状知覚経験がある場合にのみ、触覚課題において腹側経路の初期視覚領野への関連が示唆された [3]。一方で、3 次元空間の方位表現においては、視覚情報がない状態で把持動作をした場合、動作に関する方向処理が背側経路の V3d、視覚としての物体方向処理は腹側経路の V3v への関連が示唆されている [4]。このように、触覚情報のみによる視覚処理への関連は明らかになっている。しかし、どのような触覚の形状・状況が、どの視覚処理領野に影響するか

1.1 背景

は明らかになっていない。

また、触覚からの視覚処理への影響を検討する方法として、視触覚クロスモーダル学習を用いた研究が行われてきた。形状刺激としてテクスチャを用いた研究では、視覚テストと視覚条件もしくは触覚条件のトレーニングで質感分類課題を行なった結果、視覚条件と比べて触覚条件では視覚野の内側後頭葉皮質 (MOC) との関連が示唆された [5]。縞の方位を用いた研究では、 54° と 144° の 2 種類の方向で視覚方位弁別テストを行い、方位弁別トレーニングを視覚のみで行なった場合は訓練された向きの方向でのみ方位弁別感度が向上したのが、トレーニングで触覚弁別課題とコントラスト変化での視覚弁別課題を組み合わせた場合は訓練されていない方向においても方位弁別感度の向上が見られた [6]。このことから、視覚と触覚を組み合わせたクロスモーダル学習を用いることで、触覚による視覚処理への影響を明らかにできる可能性がある。そこで、本研究ではクロスモーダル学習により、視覚の 3 次元処理の感度特性や脳活動パターンが、視覚とは異なるモダリティの触覚トレーニングによって影響をされるかを検討した (図 1.1)。

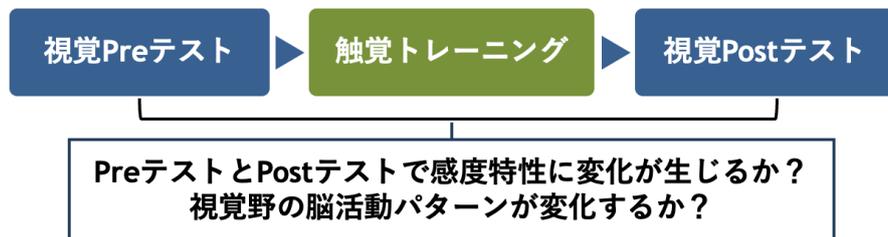


図 1.1 視触覚クロスモーダル学習の模式図

加えて、本研究は視覚・触覚の 3 次元形状処理の対象として、3 次元曲面の 3D 曲率を用いた。これまで、3 次元曲面の形状知覚処置として感覚モダリティ別にさまざまな研究が行われてきた。視覚処理では、両眼立体視による 3 次元曲面の凹凸符号処理が背側経路の V3A への関連を示す研究 [7] や陰影と両眼立体視での凹凸符号処理では V3B/KO への関連が示唆される研究 [8] など、3 次元曲面の凹凸符号が視覚処理の背側経路に関係する可能性が明らかになっている。また、3 次元曲面の 3D 曲率を用いた例として、3 次元知覚の両眼手がかりと単眼手がかりの汎化特性を学習を検討した研究 [9] では、3D 曲率の異同判断タスクで、両

1.1 背景

眼手がかりトレーニングをした場合、単眼手がかりでの曲率判断の正答率が有意に向上した(対照群では変化は見られなかった)。触覚処理では、触覚刺激のみでの 3D 曲率の弁別閾 [10] や弁別課題時の体性感覚野の脳活動計測 [11] が検討されている。

しかし、これらの先行研究で検討されていない点として以下の 2 点が挙げられる。1 つ目は、主に視覚における 3 次元構造の詳細な曲率形状の知覚処理だ。3 次元曲面で、出っ張っているか、凹んでいるかの凹凸符号レベルでの大まかな形状知覚に対しては検討されているが、3D 曲率のカーブ具合など、より精確な形状情報については検討されておらず(図 1.2)、また、3D 曲率を用いた学習について、正答率の感度特性では検討されているが、曲率の弁別閾や脳活動パターンへの影響は検討されていない。2 つ目は、3D 曲率弁別における視覚と触覚の関係性である。触覚のみの 3D 曲率処理については検討されているが、触覚による視覚処理への影響は検討されていない。さらに、今回クロスモーダル学習を用いる上で、凹凸符号では判別の難易度が比較的簡単であり、弁別感度の向上を期待する訓練タスクとしては適さない。

以上を踏まえて、本研究では 3 次元曲面の 3D 曲率において、触覚による 3D 曲率弁別トレーニングが、視覚の 3D 曲率処理の感度特性や脳活動パターンに影響を及ぼすかを検討した。

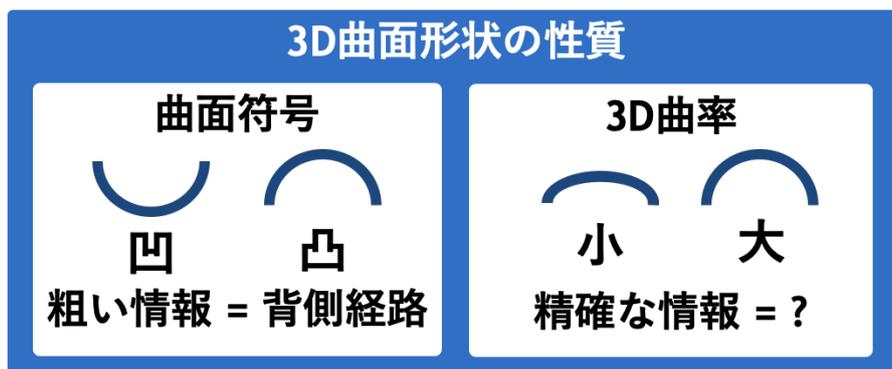


図 1.2 3 次元曲面の性質

1.2 目的

1.2 目的

本研究では、2つの実験を行なった。1つ目は、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検討する心理物理実験である。この実験では、視覚もしくは触覚トレーニングをする条件と何もしない条件でトレーニング前後の視覚テストの結果に違いが生じるかを比較する。仮説としては、視覚や触覚のトレーニングをした場合には、トレーニング前よりトレーニング後の視覚テストの方が3D曲率の弁別閾が低下する、もしくは視覚/触覚トレーニングがある場合は、何もしないよりもテスト間の弁別感度の向上率が高くなる/増加すると推測される。

2つ目は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検討するfMRI実験である。この実験では、視覚テスト時の脳活動をMRIで測定し、訓練なし(対照)条件と触覚トレーニング条件の経過を比較して触覚の3D曲率学習が視覚野の3D曲率処理に影響を及ぼすかを明らかにすることを目的とする。脳画像データはMVPA(Multi Voxel Pattern Analysis)で脳活動パターンを用いて3D曲率弁別の分類精度を算出することで、今回の研究に関連する脳領域を特定する。仮説としては、触覚トレーニングを経験した場合、対照条件の経過では見られなかった脳活動パターンの変化が生じると推測される。

1.3 用語解説

1.3.1 機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)

機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) は、磁気共鳴画像法 (magnetic resonance imaging; MRI) を用いて脳活動を可視化する手法である。MRIは、物体の化学構造を解析できる磁気共鳴の原理を利用し、生体の構造画像を撮像する技術として1970年代に発展した [12]。観察対象である人体に対して強力な静磁場と電磁波を用いた測定を行い、照射された電磁波によって対象の原子核が共鳴し、放出される電磁波を信号として取得することで画像化が可能となる。人体には多くの水素原子が含まれており、その約60%が水で構成されているため、生体測定では水素原子核の共鳴を利用する。この手法

1.3 用語解説

は、非侵襲的であり放射性同位体を用いる必要がないため、医療現場では高精度な内部構造の観察や疾患の診断に広く活用されている。

一方、fMRI は特定の刺激に対する脳活動を計測することを目的とする手法である。人間の脳は刺激を受けると、認識や記憶などの情報処理のために特定の領域で神経活動が活発化する。この神経活動に伴い、エネルギー供給のため局所的な血流量が増加する。血液には酸素を運搬するヘモグロビンが含まれており、動脈血中の酸素と結合したものを酸化ヘモグロビン、静脈血中の二酸化炭素と結合したものを還元ヘモグロビンと呼ぶ。還元ヘモグロビンは常磁性体であり、MRI の測定時に電磁波の信号を乱し、観察対象からの信号強度を低下させる。神経活動が生じると、酸素消費により局所的に還元ヘモグロビンが一時的に増加し信号が減少するが、その後の血流増加により酸化ヘモグロビンの割合が増加し、還元ヘモグロビンが減少することで信号強度が回復し、数秒後に増大する。この血流変化に依存する信号を血中酸素濃度依存信号 (Blood Oxygen Level Dependent Signal; BOLD) と呼び、fMRI ではこの信号を計測・画像化することで脳活動の局在性を検討する。短時間の刺激呈示に対する BOLD 信号は血流動態応答関数 (hemodynamic response function; HRF) に依存しており、刺激呈示の約 2 秒後に基準線を超え、約 5-6 秒後に最大値を示す応答パターンを持つ (図 1.3)。

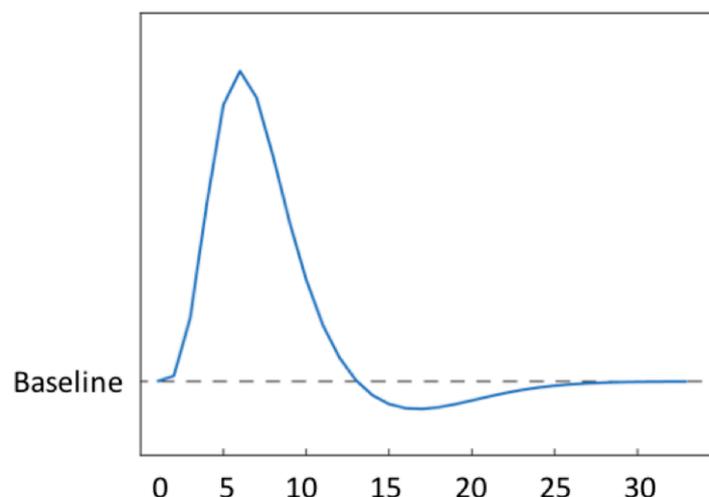


図 1.3 血流動態応答関数 (HRF)[13]

1.3 用語解説

1.3.2 MVPA(Multi Voxel Pattern Analysis)

MVPA (Multi Voxel Pattern Analysis) とは, 刺激を与えた時点の fMRI 脳活動データと刺激との対応をパターン認識によって分類する際に, 複数のボクセル値を用いて多変量解析を行う手法である. 一方, 単一のボクセル値を用いる解析手法は単変量解析と呼ばれる. 単変量解析では, 刺激に対する脳領域の活動の強さを測定できるが, ボクセル値が単一であるため, 脳領域内のボクセルによる信号の空間的パターンを識別することはできない.

この問題に対して, 機械学習の手法を応用した MVPA を用いることで, 複数のボクセルが示す空間的パターンの違いを識別可能となり, 類似した刺激に対しても高い精度で分類が実現される [14]. 先行研究においても, 視覚対象の分類において単変量解析では識別できなかったカテゴリが, MVPA によって識別可能であることが示されている [15].

脳活動計測の研究では, 刺激によって影響を受けた脳領域を特定することが求められる. この特定方法として, 事前に関心領域 (Regions of Interest; ROI) を定義する領域ベースの解析と, 脳内の各場所で解析を行う手法 (Searchlight) の 2 種類がある. ROI は, 実験前に特定の脳領域を活動させる刺激を与え, その位置をローカライズすることで取得し, 解析に利用する. 一方, Searchlight 法では, 脳内の各ボクセルを囲む所定の半径の球を領域として定義し, 解析に用いる [16]. MVPA においても, この 2 つの方法のいずれかを用いて領域ごとの解析を行う.

第 2 章

実験方法 (全体)

2.1 刺激

2.1.1 曲率の定義

呈示された 3 次元曲面刺激は、縦横が約 57 mm の縦筒のような 3D 曲面であった (MRI 環境下を除く)。本研究では、カーブ形状を二次関数 (式 2.1) により算出した。

$$f(x) = \frac{hx^2}{28.5^2} - h \quad (2.1)$$

曲面の横端からカーブ頂点の高さ h を曲率の大きさとし、 h が大きければ『曲率が大きい』, h が小さければ『曲率が小さい』と定義した (図 2.1)。

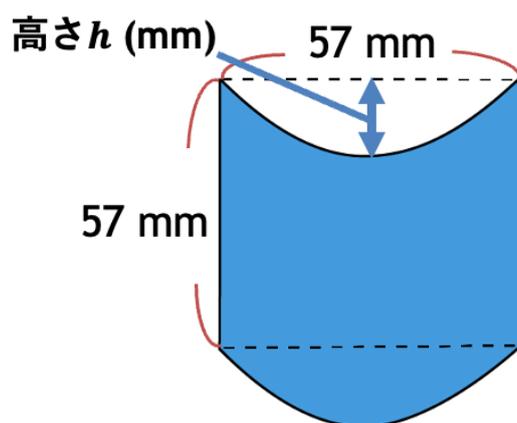


図 2.1 3 次元曲面刺激の模式図

2.1 刺激

2.1.2 視覚刺激

視覚刺激は, 図 2.2 のように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. 3次元曲面は縦筒のような形状であったため, 圧縮視差で呈示された. 中心には注視点 (0.48 deg) があり, 両眼立体視をしやすいように, 左目用刺激には十字の上部のみ, 右目用刺激には下部のみを設定し, 両刺激を両眼で融像すると正しい十字になるように呈示した.

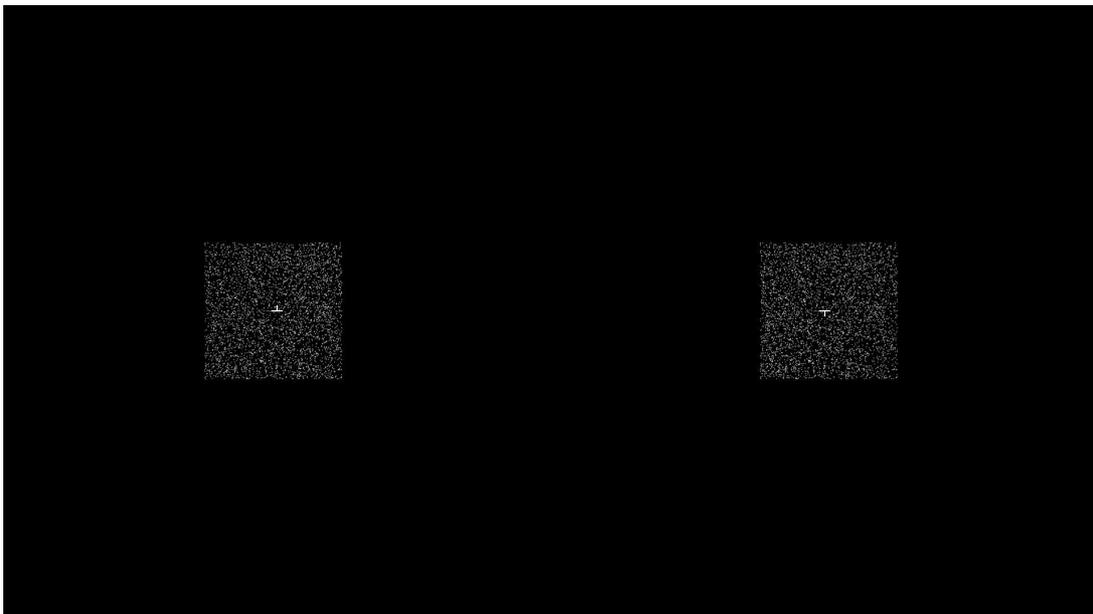


図 2.2 視覚刺激の RDS(左: 左目用呈示刺激, 右: 右目用呈示刺激)

刺激サイズは図 2.3 のように縦幅が 5.45 deg であり, 横幅は端点と中心の奥行きが手がかりにならないように, 5.21~5.68 deg(54.6~59.5 mm) 内で刺激ごとにランダムに変化した(横幅がランダムに変化することによる曲率の変動はない). 視覚刺激のディスプレイ上でのサイズ(縦幅)は, 後述する触覚刺激のサイズ(縦幅)とほぼ同程度である. ドットサイズは 0.036 deg であり, 密度は 134.5 dot/deg² であった.

2.1 刺激

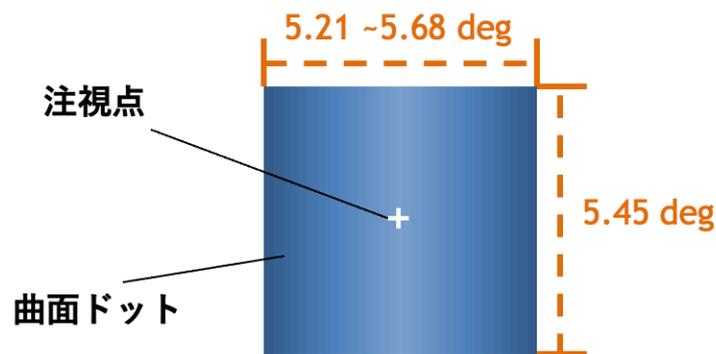


図 2.3 参加者が観察する視覚刺激のイメージ図 (立体表現を陰影で表現)

MRI 環境下では異なるカーブ形状を使用し、は縦・横幅が 76.6 mm の $f(x) = \frac{hx^2}{38.3^2} - h$ で曲率が定義された。縦幅が 6.18 deg(76.6 mm), 横幅が 5.99~6.33 deg(74.34~78.54 mm), 注視点のサイズは 0.65 deg であった。また、ドットサイズは 0.033 deg であり、密度は 104.7 dot/deg² であった。

視覚刺激の奥行きは、図 2.4 のように注視点がディスプレイ上の位置にあり、曲面の端がディスプレイより奥にあるように呈示された。奥行きの距離は、曲率の大きさ (高さ h) が 10 mm のとき 0.95 deg(MRI 環境では 0.81 deg) であり、30 mm のとき 2.86 deg(MRI 環境では 2.42 deg) であった。

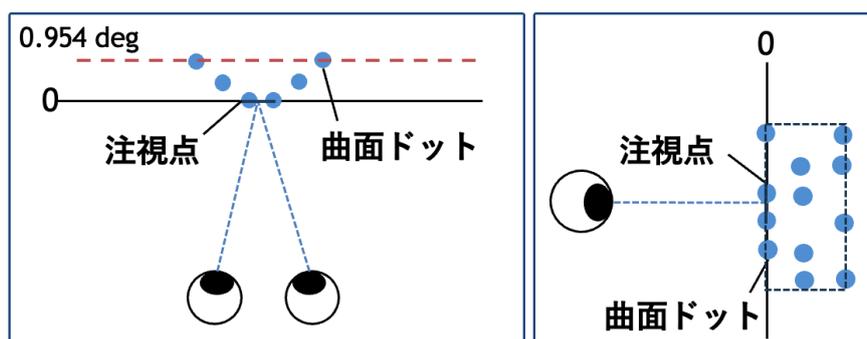


図 2.4 視覚刺激の奥行きイメージ (左: 上面図, 右: 右面図)

2.2 実験環境

2.1.3 触覚刺激

触覚刺激 (図 2.5) は Blender 3.1.2 で 3 次元曲面モデルを作成し, 3D プリンター (Ender-3 S1, Creality 製) で印刷した. 印刷後のオブジェクトは, 積層痕により曲面に段差があったため, 紙やすりで研磨し表面をなめらかに加工した. サイズは縦幅 57 mm, 横幅 82 mm であった. 垂直中心から左右± 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.

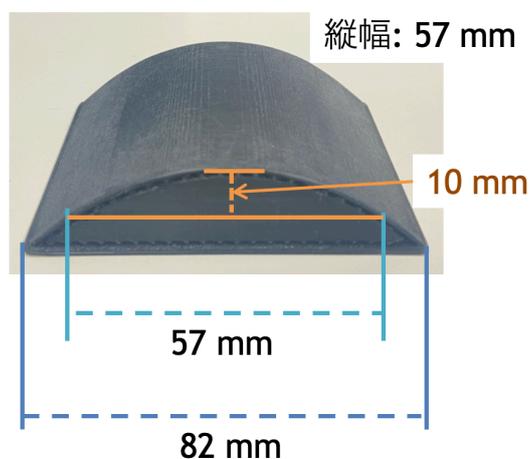


図 2.5 曲率の大きさ 10 mm の触覚刺激

2.2 実験環境

2.2.1 暗室環境

心理物理実験の全過程と fMRI 実験の触覚トレーニングは暗室内で行われた (図 2.10). 参加者は図 2.6 のようにディスプレイから 60 cm の位置に座り, 顎を顎台に乗せてハプロスコープを覗いてディスプレイを観察した. ハプロスコープは 4 枚の鏡で構成され, 左右眼に分離呈示したディスプレイ上の視覚刺激を両眼立体視し, 3D 曲面を知覚した (図 2.7). ディスプレイの解像度はフル HD(1920 × 1080) で, サイズは 22 インチ (477 × 268 mm), リフレッシュレートは 60 Hz であった. 課題の回答は, 利き手とは逆の手を用いてキーボードの矢印キーによって行われた.

2.2 実験環境

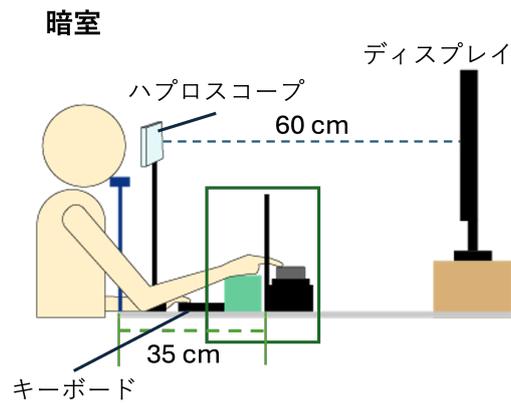


図 2.6 実験環境

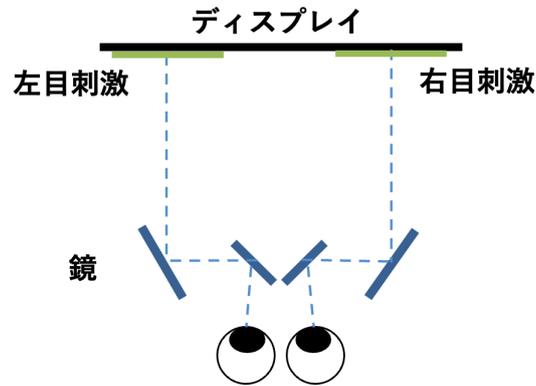


図 2.7 ハプロスコープの模式図

触覚刺激は図 2.8, 2.11 のように呈示された (触覚トレーニング時のみ)。参加者は利き手を手の置き場 (スポンジ) に置き、人差し指で触覚刺激を知覚した。触覚刺激は直動モータに固定され、6 秒間の実行で約 5 cm 幅を図 2.9 のように左右に 1 往復した。触覚刺激が見えないように、直動モータ前に衝立を置き、参加者は衝立に空けられた縦横 2.5 cm 幅の穴に指を差し込み、受動的に知覚した。実験中の触覚刺激の交換は実験者が行なった。

また、実験プログラムは MATLAB R2023a(The MathWorks) と Psychtoolbox 3 で制御し、直動モータは UNO R3(ELEGOO) と Arudino 1.8.18 で制御した。

2.2 実験環境

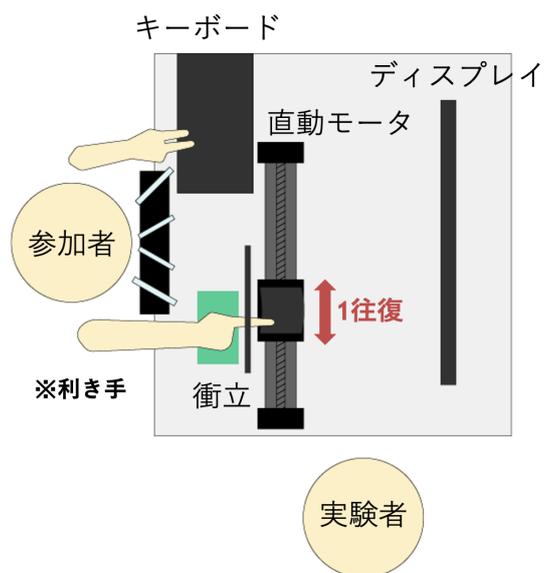


図 2.8 触覚刺激呈示環境

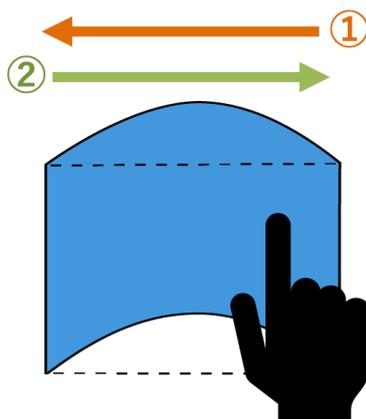


図 2.9 触覚刺激の動き (1 → 2 の順に遷移)



図 2.10 実際の実験環境



図 2.11 実際の触覚呈示環境

2.2 実験環境

2.2.2 MRI 環境

fMRI 実験の視覚テストは MRI 室で行われた。実験中の脳活動は、高知工科大学脳コミュニケーション研究センターに設置されている MRI 装置 MAGNETOM Prisma 3T (SIEMENS) で計測した (図 2.12)。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。参加者はボア内に仰向けになり、頭部の動きを小さくするために、頭部を MRI 対応フォームパッドで固定された状態で、プロジェクターから投影されたスクリーン画面を鏡で反射させて、実験刺激を観察した。この時のスクリーン画面と参加者間の観察距離は 71 cm であった。課題の回答は、右手に持った図 2.13 のような上下左右に 4 つのボタンがついたコントローラを使用した。また、実験プログラムは MATLAB R2023a(The MathWorks) と Psychtoolbox 3 で制御した。



図 2.12 MRI(MAGNETOM Prisma 3T)[出典: 高知工科大学脳コミュニケーション研究センター HP(<https://braincom-kut.com/>)]



図 2.13 ボタンコントローラの模式図

第 3 章

心理物理実験

3.1 実験方法

3.1.1 実験概要

心理物理実験は、視覚もしくは触覚トレーニング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 4 日間で、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 テストの流れで行われた (図 3.1)。

条件は、視覚トレーニング (V)、触覚トレーニング (T)、トレーニングなし (N) の 3 条件であった。Pre テストと Post テストでの弁別閾と弁別感度の向上率をトレーニング条件間で比較し、3D 曲率弁別トレーニングが視覚の 3D 曲率弁別に影響するかを検討した。

参加者は、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) であり、各トレーニング条件で 9 名ずつにランダムで割り当てた。また、参加者は本実験が遂行可能か確認するために、実験前に視覚テストの本試行と同じタスクで、本試行より大きい曲率、長い呈示時間などの設定をした簡単な練習セット (10 試行) を行った。その中で、正答率が 8 割に満たなかったものは、ハプロスコープの再調整等をした後、もう一度練習セットをした。練習セットを 3 回ほど繰り返しても、正答率が 8 割に満たなかったものは、実験を中止した。

参加者のうち、触覚トレーニング条件のうち 1 名は体調不良により 5 日間の日程 (pre テスト→休み→V トレーニング→V トレーニング→post テスト) となり、トレーニングなし条件のうち 1 名は台風により、pre/post テスト間を 48 時間空けた 3 日間の日程で実験に参

3.1 実験方法

加した。また、心理物理実験の T 条件の参加者は全員右利きであった。

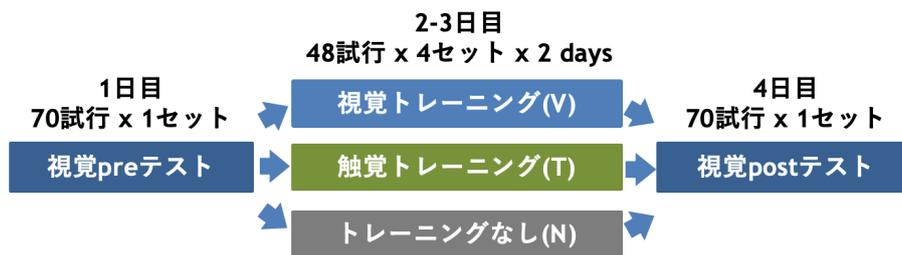


図 3.1 心理物理実験の流れ

3.1.2 視覚テスト

視覚テストは pre と post で、1 セット (70 試行, 約 30 分) ずつ行われた。各セットの最初に両眼視差融合のため、注視点 (6 s) とブランク (3 s) のフェーズを経てから本試行を開始した。試行は注視点 (0.5 s)、1 つ目の曲面刺激 (2 s)、注視点 (0.5 s)、2 つ目の曲面刺激 (2 s)、弁別、ブランク (合わせて 3 s) の順で遷移した (図 3.2)。参加者は弁別課題にて、試行内でテンポラルに呈示された 2 つの曲面刺激のうち、1 つ目の曲面刺激と 2 つ目の曲面刺激でどちらの 3D 曲率が大きいかを選択し、左右の矢印キーで回答した。

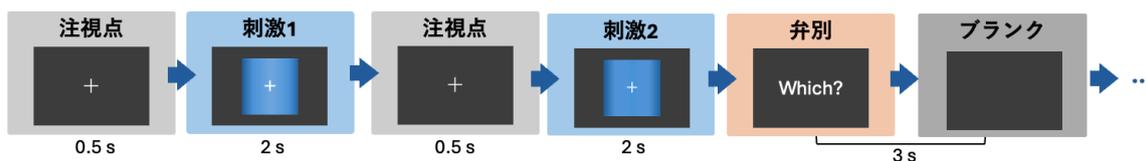


図 3.2 心理物理実験での視覚テストの流れ

2 つの曲面刺激の曲率は、[10 mm] と [10+推定値 mm] であった。予備実験で両眼立体視の不慣れにより初期試行で推定閾値にブレが生じた参加者がいたため、最初の 4 試行は練習試行とし、1 試行目の推定値 (初期値) は 30 mm とした。練習試行では、推定値を $10 \text{ mm} \leq \text{推定値} \leq 40 \text{ mm}$ の範囲で、正答した場合は -10 mm、誤答の場合は +10 mm し、5 試行目以降は 4 試行目での最終推定値を初期推定値として、適応的測定法の QUEST で曲率の増閾分の推定値を各試行で設定し、最終的に正答率 82% で弁別閾を算出した [17]。

3.1 実験方法

また、参加者が正しく回答できているかを確認できるようにすることと、弁別閾付近の課題の難易度が高いことで参加者の集中力が切れるのを防ぐことを目的として、2つの曲面の曲率が [10 mm] と [40 mm] のフィルター試行 (12 試行中にランダムに 1 回, 計 6 試行) を設けた。結果として、練習試行とフィルター試行を除いた 60 試行が弁別閾測定に用いられた。

3.1.3 トレーニング

V 条件もしくは T 条件の場合、トレーニングは 2 日間で、1 セットが 48 試行の各日 4 セット (V 条件: 1 時間, T 条件: 2 時間) であり、N 条件の場合はトレーニングがないため実験はなかった。試行は、注視点 (V: 1.5 s, T: 3 s), 1 つ目の曲面刺激 (V: 3 s, T: 6 s), 注視点 (V: 1.5 s, T: 3 s), 2 つ目の曲面刺激 (V: 3 s, T: 6 s), 弁別, フィードバック (合わせて 3 s) の順で遷移した (図 3.3)。視覚テストとほぼ同様の手続きであったが、トレーニングでは参加者の回答フィードバック (正解/不正解) が表示された。視覚による知覚学習の研究で、フィードバックは知覚学習には必須ではないことを示されている [18],[19] が、フィードバックの有無を検討する目的はないことと、曲率弁別差が弁別閾付近のためタスクの難易度が高いことから、本研究ではトレーニングによる学習の効果を期待するためフィードバックを設けた。

また、T 条件では注視点と刺激シーンで呈示秒数を V 条件の 2 倍に設定している。これは、本実験とは触覚刺激の呈示方法が異なるが、過去の視触覚クロスモーダル知覚の研究において能動的な触覚探索には視覚探索の 2 倍の時間が必要である [20],[21] のが示唆されていることと、また、T 条件では実験者が触覚刺激を交換するために十分な時間が必要であったことが、シーン時間を 2 倍にした理由である。

V 条件では刺激時に視覚刺激がディスプレイに表示された。T 条件では刺激時、ディスプレイに「Touch」が表示され、参加者が人差し指を触覚刺激に置き、直動モータが動作した。参加者には直動モータが停止した後に指を触覚刺激から離すように指示した。

3.1 実験方法

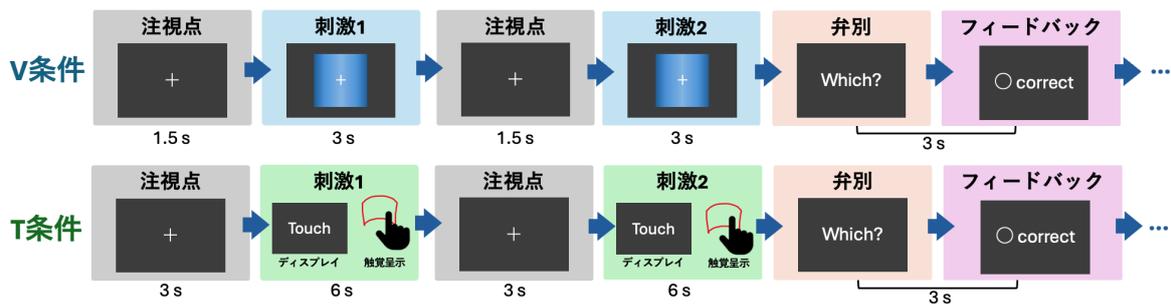


図 3.3 心理物理実験でのトレーニングの流れ (上: V 条件, 下: T 条件)

曲面刺激の曲率は [10 mm] と [固定値] の 2 種類を用い、参加者の弁別課題は 1 つ目の曲面刺激と 2 つ目の曲面刺激の曲率が同 [10・10 mm] か、異 [10・固定値 mm] かの異同弁別であった。曲率の大きさを固定値とした理由は、参加者ごとに視覚/触覚の 3D 曲率の感度 (弁別閾) が異なるため、最初は弁別不可能であってもトレーニングすれば弁別可能となる程度の難易度に調整する必要があったからである。固定値は pre テスト後に、その参加者が対象となる条件で、トレーニングタスクと同様の固定値測定タスクで決定した。固定値測定タスクは 3 セットで構成され、1 セット目が練習 5 試行を含む 15 試行、2・3 セット目が各 10 試行であり、セットごとに異なる曲率で異同弁別課題を行なった。固定値測定タスクの曲率は 12.5, 13.5, 15, 17, (V 条件のみ)20 mm の 5 水準で、固定値測定タスクの正答率が 80% に到達しなかった曲率の水準をトレーニングの固定値とした (最小の 12.5 mm で正答率が 80%以上であった場合は、固定値として 12.5 mm を使用した)。V 条件では、参加者の pre テストの弁別閾を参考に固定値測定タスクの曲率を決定し、その結果、V 条件トレーニングでは 12.5, 13.5, 17, 20 mm を用いた。T 条件では、1 セット目は 15 mm、2 セット目は 1 セット目の正答率が高ければ 13.5 mm、低ければ 17 mm にする予定であったが、T 条件の参加者全員が 1 セット目 (15 mm) で正答率が 80%以上であったため、2 セット目は 13.5 mm、3 セット目は 12.5 mm で固定値測定タスクを行なった。結果として、T 条件トレーニングでは 12.5, 13.5 mm の固定値を用いた。

また、視覚テストと同様にフィラー試行 (7 試行中にランダムに 1 回, 計 8 試行) を設け、実際のトレーニング試行は 40 試行であった。さらに、各日の 2 セット目と 3 セット目の間に 5

3.2 解析

～10分の休憩をとった。

3.2 解析

3.2.1 使用ソフトウェア

心理物理実験のデータは実験プログラム上で csv に格納され、集計には Microsoft Excel 16.93 と R 4.4.1 を使用し、統計解析は R 上で anovakun 4.8.9[22] を使用した。

3.2.2 外れ値

弁別閾は個人差が大きかったため、pre/post テストの閾値で、各条件内での平均+標準偏差×2 を超える値を外れ値とした。その結果、各条件で外れ値となる参加者が1名ずつだったため、V 条件 8 名、T 条件 8 名、N 条件 8 名のデータで解析をした。

3.2.3 トレーニング

トレーニングでは、参加者ごとの各セットの正答率を算出し、トレーニング日別での正答率平均値から向上率を求め、この向上率にトレーニング条件間 (V, T) で差があるか対応なし t 検定を行なった。1 日目と 2 日目の平均値を比較した理由としては、各日 3～4 回目は疲労の影響が大きくなる傾向が見られたため、初期回 (1～2 回目) と終期回 (7～8 回目) のような比較すると、疲労の影響が強くなる懸念があったためである。

3.2.4 視覚テスト

視覚テストの弁別閾は、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、参加者間のトレーニング要因 (V, T, N) と、参加者内の時系列要因 (pre, post) で混合計画の 2 要因分散分析を行なった。

3.3 結果

弁別感度の向上率は弁別閾の変化率を以下の式 (3.1) で算出した.

$$\frac{\text{弁別閾}_{pre} - \text{弁別閾}_{post}}{\text{弁別閾}_{pre}} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

この向上率を用いて, トレーニング条件 (V, T, N) 間で 1 要因分散分析を行なった. また, この向上率が 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.

3.3 結果

3.3.1 トレーニング

V, T 条件のトレーニング時の正答率変化を図 3.4, 3.5 に示す. 縦軸が参加者の曲率異同判断タスクの正答率, 横軸が何回目のトレーニングかを示し, オレンジの点線が近似直線を表している.

近似直線の傾きは V 条件が -0.0018 , T 条件が 0.0090 であった. また, トレーニングの日別による向上率は V 条件が 0.055% , T 条件が 6.35% であり, 条件間に有意な差は見られなかった ($t(14)=1.6664, p=0.11$)

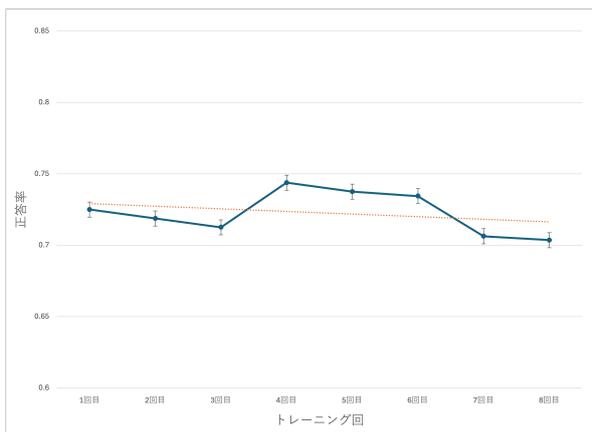


図 3.4 V 条件トレーニングの正答率変化

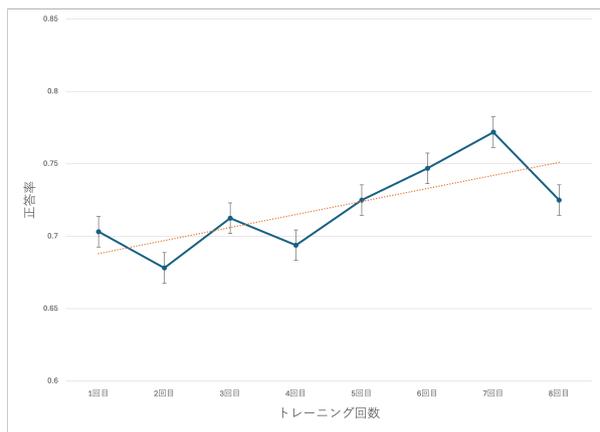


図 3.5 T 条件トレーニングの正答率変化

3.3 結果

3.3.2 視覚テスト

視覚テストでの弁別閾の平均値グラフを図 3.6 に示す。縦軸が QUEST で最終的に推定された弁別閾 (mm) であり、横軸が各トレーニング条件、棒グラフのオレンジ色が pre テスト、水色が post テストでのデータを表す。また図の誤差線は標準誤差であり、散布図データは各参加者の実データを表す。

弁別閾 (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 ($F(1, 21)=8.57, p=.008, \eta^2=.11$), トレーニング要因や交互作用は有意ではなかった (トレーニング要因: $F(2, 21)=3.03, p=.069, \eta^2=.13$, 交互作用: $F(2, 21)=0.39, p=.678, \eta^2=.01$).

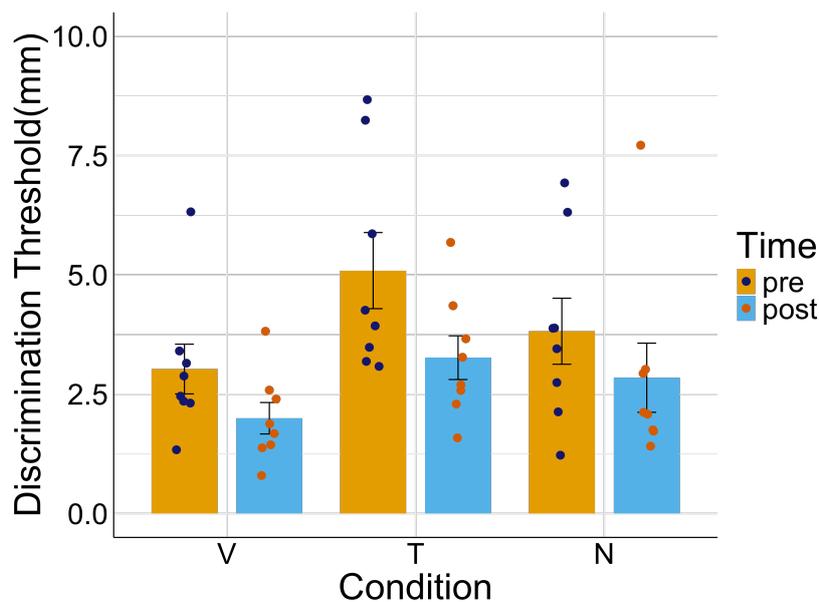


図 3.6 弁別閾の平均値

弁別感度の向上率の平均値グラフを図 3.7) に示す。縦軸は pre/post の弁別閾から算出した向上率 (%) で、横軸は各トレーニング条件を表す。図の誤差線は標準誤差であり、散布図データは各参加者の向上率データを表す。

弁別感度の向上率に対する一要因分散分析では、どのトレーニング条件間でも有意な差は認められなかった ($F(2, 21)=0.52, p=.596, \eta^2=.04$). 0%との比較の 1 標本 t 検定では、V

3.4 考察

条件および T 条件において有意な差が認められた (V 条件: $t(7)=2.86$, $p=.048$, $d=1.01$, T 条件: $t(7)=3.47$, $p=.030$, $d=1.22$). 一方で, N 条件では有意な差は見られなかった ($t(7)=0.49$, $p=.636$ $d=0.17$).

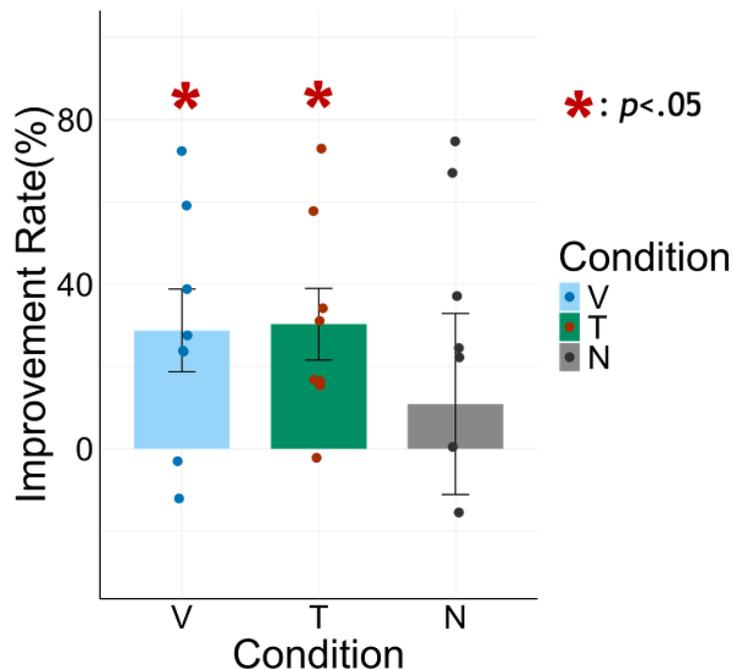


図 3.7 弁別感度の向上率

3.4 考察

各条件のトレーニングの結果では, トレーニングの条件による差や大きな成績の向上は見られず, どちらも 7~7.5 割程度の正答率を得られた. このことから, トレーニングの難易度は条件間であまり大きな違いはなかったと考えられる. ただ, 視覚条件では閾値付近の曲率でトレーニングした一方で, 触覚条件では閾値を計測していないため, 全参加者が閾値付近の曲率というわけではなかった. そのため, 触覚トレーニングの方が比較的簡単だった可能性があり, トレーニングの難易度を完全に統制できていない. 今後は, 参加者全員が触覚の曲率も閾値付近にする, もしくは視覚の曲率の難易度を簡単にした場合も検討すべきである.

視覚テストの結果では, 触覚のトレーニングを行なった場合, 視覚のトレーニングと同様に向上率が 0%より有意に高くなった. 一方で, トレーニングなしの場合は, 向上率 0%との

3.4 考察

有意な差は見られず、視覚テスト反復による影響はなかったことが示唆された。よって、異なるモダリティであっても触覚の3D曲率のトレーニングを行うことで、視覚の弁別感度が向上することが示唆された。

ただし、弁別閾自体の値や向上率において、トレーニング条件間では有意な差が認められなかった。これは、結果の参加者データ(図3.4, 3.5の散布図)を見ると、データに個人差があり、ばらつきが大きいことが理由として考えられる。本実験では、心理測定関数としてQUEST[17]を使用している。この手法は、閾値を試行ごとに適応的に変化させるため短時間での測定が可能であり、本実験でも1セット(60試行)で弁別閾を推定した。本研究でQUEST[17]を用いた理由としては、正確な弁別閾の測定が目的ではなくトレーニングの影響による弁別閾変化について検討することが目的であったためである。しかし、3D曲率に用いたRDSは、両眼立体視の能力や慣れ、輻輳開散運動の疲労などで個人差が大きくなり、また計測が1セットのみで決定してしまうため、交絡要因を統制できなかった可能性が考えられる。今後は、恒常法による弁別閾の計測も検討する必要がある。

また、トレーニング条件間で有意な差が認められなかった理由として、行動実験での触覚トレーニングのみの場合、クロスモーダル学習による弁別感度の変化が見られないことが挙げられる。これは、テクスチャの視触覚クロスモーダル学習の先行研究[5]においても、行動実験の正答率においてトレーニング条件間での主効果や交互作用には有意な差は認められなかった。また、縞方位の学習の先行研究[6]においても、触覚トレーニングのみでは影響が確認されず、(テストとは異なる)視覚トレーニングを組み合わせることで、弁別感度の向上が見られた。本研究においても、視覚と触覚を同時に呈示するようなトレーニングであれば、異なる結果となる可能性があるため、今後検討していく必要がある。

第 4 章

fMRI 実験

4.1 実験方法

4.1.1 実験概要

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 5 日間であり、1 日目に 1 回目視覚テスト、2 日目にトレーニングなし、3 日目に 2 回目視覚テストと触覚トレーニング、4 日目に触覚トレーニング、5 日目に 3 回目視覚テストの流れで行われた (図 4.1)。1 回目、2 回目 (トレーニングなし条件後)、3 回目 (触覚トレーニング条件後) の視覚テスト時の脳活動を計測した。トレーニングなし条件フェーズでは心理物理実験と同様に実験を行わず、触覚トレーニング条件フェーズは後述する触覚トレーニングを行なった参加者は事前に暗室内で赤青 3D メガネを用いて、3 次元曲面刺激が視覚で知覚できるかを検査した、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) であった。参加者 8 名のうち、右利きは 7 名、左利きは 1 名であった。参加者は、あらかじめ MRI 装置の安全性についての説明を受け、同意した上で実験に参加した。また、各視覚テスト開始前に脳活動計測なしで本番と同様の練習試行 (1 回目: 10 試行, 2-3 回目: 6 試行) を行なった。



図 4.1 fMRI 実験の流れ

4.1 実験方法

また、実験デザインは参加者全員が同じ手続きの実験を受けた参加者内計画であった。これは、心理物理実験時に参加者間で両眼立体視の能力や 3D 曲率の弁別閾のばらつきが大きかったため、トレーニング条件間での個人差をなくすために、参加者内の手続きで実験を行った。

加えて、トレーニングの順番について、参加者全員がトレーニングなし条件を経ってから触覚トレーニング条件に統一した理由としては、触覚トレーニングを先にすると、その影響をトレーニングなし条件後にも与えてしまう可能性が高いと考えたためである。この点において、本実験では条件の順序効果を統制できておらず、3 回目のテストは、前 2 回のテストによって影響を受ける可能性があることに注意したい。

4.1.2 弁別課題タスク

弁別課題は、心理物理実験とは異なり、試行中に 1 度表示される曲面刺激の曲率が、大きい か小さいかを回答する形式であった。そのため、参加者は本試行前に呈示される曲率の大きさを認識する必要がある。参加者は、本試行前に図 4.2 のようなフェーズを経て、基準となる曲率の大小と対応するボタン位置 (矢印キー) を覚えて、本試行の弁別課題タスクに回答した。

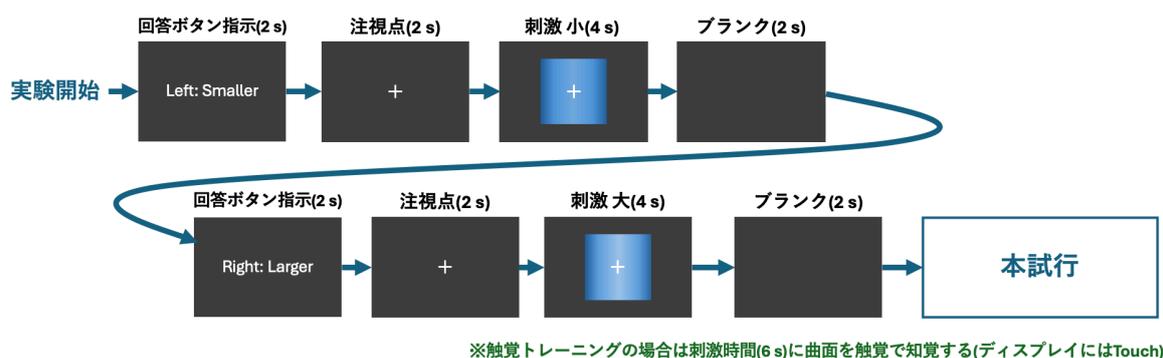


図 4.2 実験開始から本試行前の流れ

4.1 実験方法

4.1.3 視覚テスト

視覚テストは3回行われ、各回6 Runs(計18 Runs)であった。1 Runは20 試行だった。試行は、図4.3のようにRest, 注視点, 曲面刺激(2 s), Rest(2 s), 弁別(2 s), Rest(3 or 5 s)の順に遷移した。刺激間隔をランダムにするために、試行最初のRestはを0~0.5 sでランダムな間隔とし、Restと注視点の呈示時間を合わせて1 sとすることで、試行ごとに注視点の表示時間をランダムに設定し、また弁別後のRestも、3 sもしくは5 sで可変する呈示時間であった。

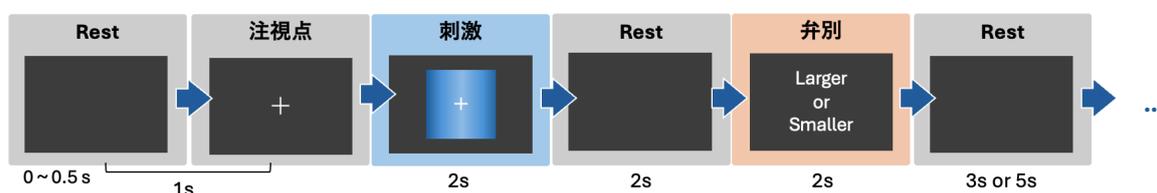


図 4.3 視覚テストの手続き

視覚テストのRunごとに、曲面刺激の曲率は、小さい曲率が10 mm/大きい曲率が20 mmの[曲率差小]と、小さい曲率が10 mm/大きい曲率が30 mmの[曲率差大]の2パターンを用いた(図4.4)。この曲率基準は、fMRIで計測できるレベルの脳活動が生じるような曲率弁別の程度について先行研究で検討されていなかったため、2種類のパターンを用意した。心理物理実験から3D曲率の弁別閾が2~5 mm程度であったため、どの参加者でも弁別可能な難易度として、詳細な形状の違いを知覚する[曲率差小]の難しい課題と、一見して違いが明らかな[曲率差大]の易しい課題を用意した。参加者は2パターンの曲率差の条件は3 Runずつであり、Runごとに交互に実施された。例としては、視覚テストの1, 3, 5 Run目は[曲率差小]、2, 4, 6 Run目は[曲率差大]の曲率が呈示されるという流れである。この[曲率差小]と[曲率差大]の順番は参加者間でカウンターバランスをとった。

4.1 実験方法

視覚テスト 呈示刺激	参加者の弁別の基準	
	小さい曲率	大きい曲率
[曲率差 小]	10 mm  同じ	20 mm 
[曲率差 大]	10 mm 	30 mm 

図 4.4 視覚刺激の曲率

また弁別課題時のボタンを押す位置による脳活動への影響を考慮するために、ボタンコントローラ (図 2.13) で押すボタンの位置は、左右もしくは上下の 2 種類を用意し、Run ごとに交互に変更した。例としては、参加者は曲率が小さい場合に左、大きい場合に右を選択する Run と、曲率が小さい場合に上、大きい場合に下を選択する Run の 2 種類の回答方法で答える必要があり、左右か上下かは交互に設定した。このボタン位置の呈示順番についても、参加者間でカウンターバランスをとった。

さらに、Run 終了後に弁別課題の正答率が 70%未満であった場合は、その Run データを破棄し、同じ条件で 1 Run の追加実験を行なった。この手続きにより、視覚テストは通常 6 Run であるところを、3 名の参加者が最大 7 Run 実施した。

4.1.4 触覚トレーニング

触覚トレーニングは 2 回行われ、各回 8 セット (計 16 セット) であった。1 セットは 20 試行だった。触覚トレーニングの試行では図 4.4 のように、注視点 (1 s)、曲面刺激 (6 s)、弁別、フィードバック (合わせて 2 s)、Rest(1 s) の順に遷移した。刺激時間の触覚刺激の呈示方法は心理物理実験と同様の手続きであった。触覚刺激で使用した曲率は、小さい曲率が 10 mm、大きい曲率が 13.5 mm のみであった。この曲率は、心理物理実験の触覚トレーニング時に 13.5 mm を使用した参加者は、12.5 mm の参加者よりもトレーニング後に弁別の正答率が初期よりも向上した傾向が見られ、かつ 15 mm の場合は最初に触った時点の高さで弁

4.1 実験方法

別が可能な易しい難易度であったため、13.5 mm に決定した。

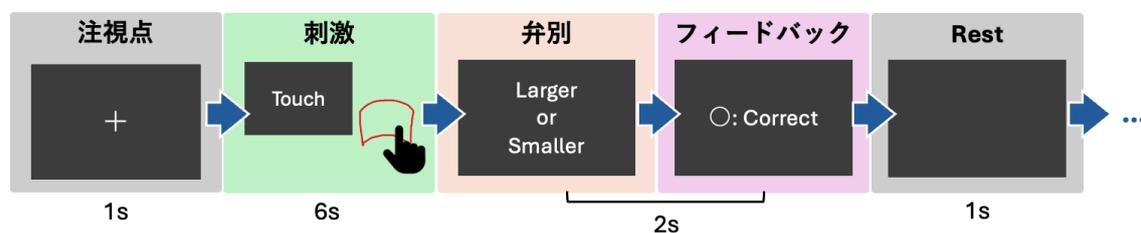


図 4.5 触覚トレーニングの手続き

4.1.5 fMRI データ取得

各参加者の脳皮質表面を構築するため、参加者は 1 回目のテスト後に高解像度の T1 強調解剖画像 (1 mm^3) を撮像した。視覚テスト中の EPI データは次のパラメータで取得された: TE 30 ms; TR 2000 ms; 121 Volumes/Run; スライス厚さ 3 mm; スライス取得順 インターリーブ。1 Volume は、視覚皮質、後頭頂葉皮質、後側頭葉皮質をカバーするような 34 slices であった。さらに、各回の EPI データを取得する前に、2.5 分間の実行で各参加者の T2 強調構造画像を取得した。

4.1.6 ROI 実験

1 回目と 3 回目の視覚テスト後に、各参加者の ROI(関心領域, Regions of Interest) を計測した。ROI は、Retinotopy と Localizer により 13 箇所 (V1, V2d, V2v, V3d, V3v, V3A, V4v, MT, KO, LO, VIPS, POIPS, DIPS) の視覚野を定義した (図 4.6)。

4.1 実験方法

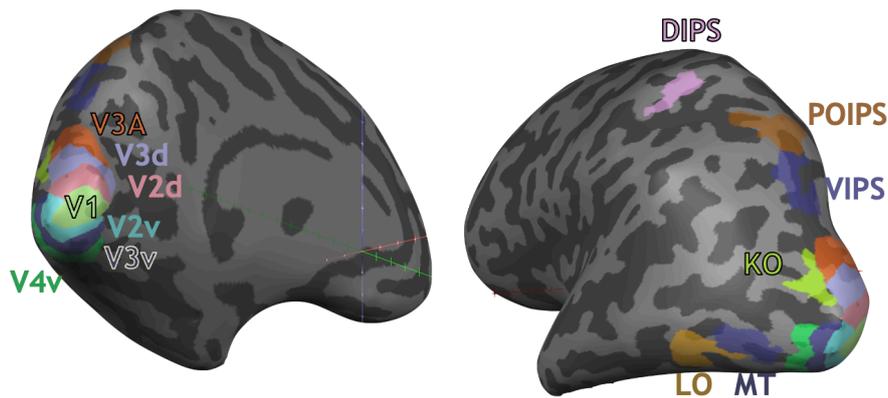


図 4.6 13 箇所の ROI

V1, V2d, V2v, V3d, V3v, V3A, V4v は V 字型のチェッカーパターンを回転させる刺激と、同心円を拡大させる刺激を呈示することで同定した [23][24][25]. MT は停止している静的なドットと、外側に集団的に動くドットを呈示して、静的なドットに対して動的なドットで強い活性化を示した外側側頭皮質の領域とした [26]. KO は黒と白のドットが明白な動きをする刺激と不規則な形状の輪郭に沿った動きをする刺激を呈示して、明白な動きに対して輪郭に沿った動きで強い活性化を示した領域とした [27]. LO はオブジェクトのノーマル画像とそれをスクランブル化した画像を呈示して、スクランブル化の刺激に対してノーマルの刺激で強い活性化を示した外側後頭皮質の領域とした [28][29]. IPS 領域 (POIPS 頭頂-後頭頂間溝: The parieto-occipital intraparietal sulcus, VIPS 腹側頭頂間溝: The ventral intraparietal sulcus, DIPS 背側 (前方/内側) 頭頂間溝: The (anterior/medial) dorsal intraparietal sulcus) はランダムな 9 本の線を深さ方向に回転させることで知覚できる 3 次元形状の刺激と平行面に沿って移動させることで知覚できる 2 次元形状の刺激を呈示し、2 次元形状の刺激に対して 3 次元形状の刺激で強い活性化を示した後頭頭頂部の領域とした [30][31]. 各実験で用いた刺激は図 4.7 に示す.

4.2 解析

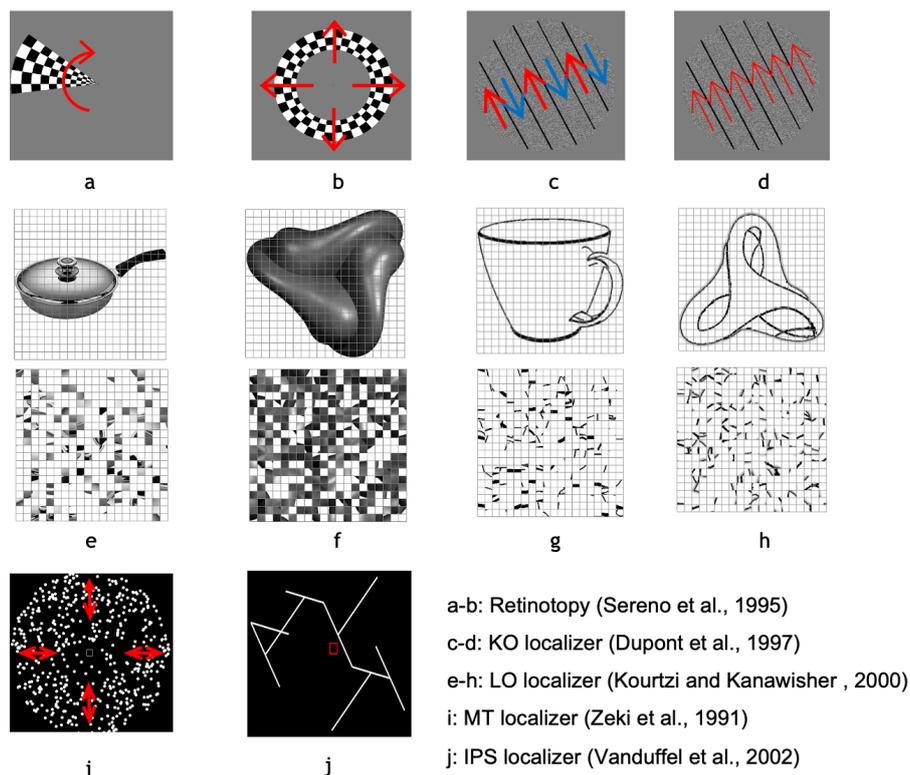


図 4.7 ROI の同定に用いた刺激

4.2 解析

4.2.1 使用ソフトウェア

脳画像処理と MVPA には, BrainVoyager QX(2.8.4.2645, 64bit) を用いた. また, MVPA 結果の解析には MATLAB を用い, 心理物理実験と同様に集計には Excel, 統計解析には R を使用した.

4.2.2 fMRI 画像の前処理

BrainVoyager QX で T1 強調解剖画像を不均一質性の補正 (Inhomogeneity Correction) を行い, Talairach 座標に変換し, 灰白質 (GM) と白質 (WM) を抽出して皮質表面を生成した. その後, 皮質表面を膨張/平坦化して MVPA の ROI を定義した. EPI データは, T2 強調構造画像を用いて頭部 3D モーション補正された. EPI データの空間平滑化は行わなかつ

4.2 解析

た. また T2 強調構造画像は, T1 強調解剖画像と EPI データでの co-registration の参照データとして用い, すべてのデータが Talairach 座標に変換された.

前処理の 3D モーション補正時に, 各 Run の最初のスキャン頭部位置から 3 mm/3° を超える頭の動き・回転が連続 10 スキャン以上続いたような, 異常な頭の動きが確認された場合は, その Run データを除去した. その結果, 視覚テストの各回は少なくとも 5 Runs 以上のデータで解析を行なった.

4.2.3 ROI ごとの MVPA

各 ROI に対し, 視覚テストの EPI データの視覚刺激呈示時のボクセルパターンから, 呈示された曲面刺激の曲率が大きい小さいかを機械学習で判別できるか検討するために MVPA を行なった. MVPA の分類器は, 線形サポートベクターマシン (SVM) を採用した. 分類手法は, SVM のトレーニングとテストに同じ条件 (1 回目, 2 回目, 3 回目) のデータセットを使用して, 3D 曲率に関連する賦活パターンを調査した. SVM には, 曲率の大小の脳活動パターンデータが入力され, 各 ROI での 3D 曲率判別の分類精度が算出された.

BrainVoyager 上で, 刺激呈示の BOLD 信号として血流動態遅延を考慮した刺激呈示から 2 volumes 後の 2 volumes の BOLD 信号 (4~8 s) と, 刺激呈示時間前の 1 volume の BOLD 信号を試行ごとのベースライン値として, この刺激呈示 BOLD 信号とベースラインの差を z スコアに変換した (図 4.8). このデータを脳活動パターンとして, ROI ごとにトレーニングデータを作成し, MATLAB 上で SVM に使用した.

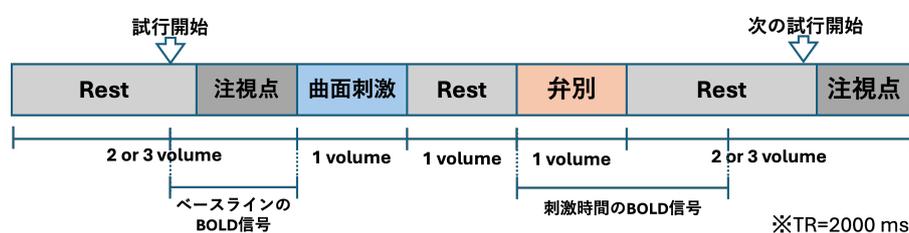


図 4.8 MVPA に使用した BOLD 信号

また, ROI は両半球から選択され, 刺激とベースラインの対比の t 統計量が高い上位 250

4.3 結果

個のボクセルを各 ROI の領域として使用した。ROI に含まれるボクセルが 250 個未満の場合は、すべてのボクセルを使用した。

MVPA の分類の学習・評価方法は、Leave-one-run-out 交差検証を使用した。これは 1 Run 分のデータをテストとし、それ以外のデータはトレーニングとして使用し、これを ROI ごとに、同条件の全ての Run で繰り返して各反復の分類精度を平均し、参加者の各 ROI での分類精度とした。その後、ROI ごとの全参加者の分類精度データを平均し、この平均分類精度データがチャンスレベル (50%) を上回るかを 1 標本 t 検定により検定し、13 箇所の ROI による多重比較を補正するため、BH 法 (FDR) を適用し p 値を調整した。また、各条件ごとに差があるか検討するために、テスト回要因と ROI 要因で二要因分散分析を行なった。

MVPA は視覚テストの曲率基準である [曲率差 大] と [曲率差 小] はそれぞれ別のデータとしての解析とそれらを合算した全体のデータを用いた解析を行なった。また、追加の解析として ROI を左半球と右半球で別々の MVPA(チャンスレベルとの比較のみ) と、視覚テスト回で分類精度を算出した MVPA を行なった。

視覚テスト回で分類精度の MVPA では、視覚テスト曲面刺激呈示時の 1 回目と 2 回目の脳活動パターンを判別した分類精度と、2 回目と 3 回目の脳活動パターンを判別した分類精度を比較した。この解析では、MATLAB で ROI ごとに脳活動パターンによるトレーニング・テストデータを作成し、SVM でテスト回の分類をした。トレーニング条件間で有意な差が生じるかを二要因分散分析を行なった。要因は、テスト回要因 (1 回目 vs 2 回目, 2 回目 vs 3 回目) と ROI 要因だった。また、チャンスレベル (50%) との 1 標本 t 検定も行なった。この結果は付録 B に記載する。

4.3 結果

4.3.1 [曲率差 大] における ROI ごとの MVPA 結果

[曲率差 大] での MVPA 分類精度の平均を図 4.9 に示す。縦軸は分類精度、横軸は各 ROI であり、棒グラフは参加者全体の分類精度の平均値で、誤差線は標準誤差、散布図は参加者の

4.3 結果

実データである。赤が1回目、緑が2回目、青が3回目のデータを表す。赤の横点線はチャンスレベル (50%) で、赤*が p 値補正後でチャンスレベルより有意に高かったことを示す (灰色*は補正なし)。以降のグラフは同様の形式である。

[曲率差 大] 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な分類精度が認められた ($t(7)=5.92, p=.007, d=2.09$)。多重比較では、球面性検定が有意であったため Greenhouse-Geisser の ϵ による調整を行なった上で、各要因の主効果も交互作用も有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(1.25, 8.75)=0.17, p=.73, \eta^2=.02$; ROI 要因: $F(12, 84)=1.38, p=.19, \eta^2=.16$; 交互作用: $F(24, 168)=0.67, p=.87, \eta^2=.08$)。

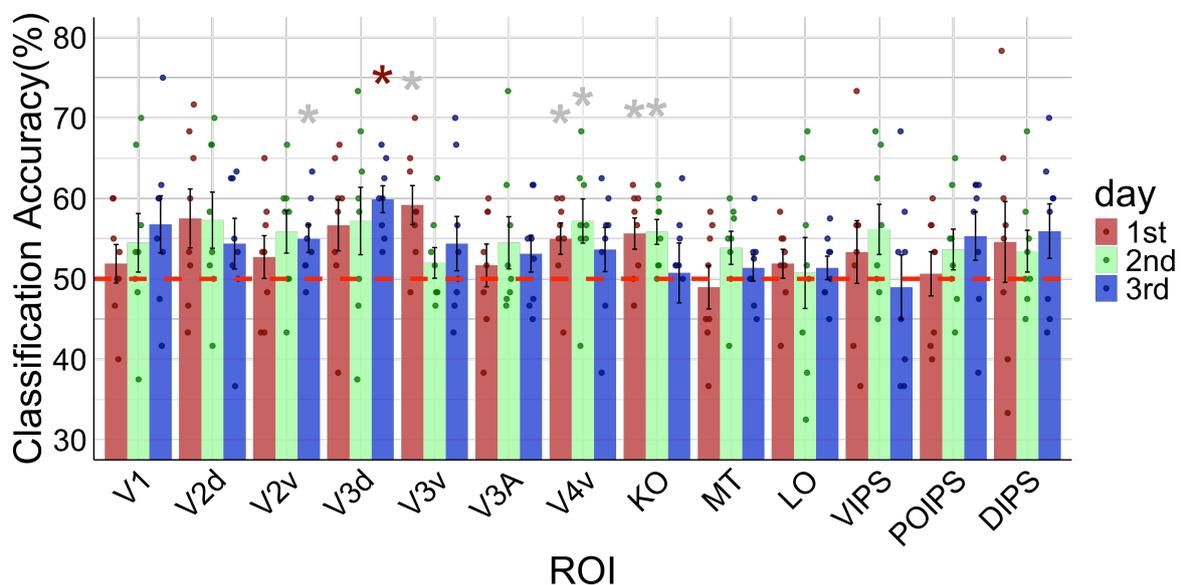


図 4.9 [曲率差 大] での MVPA の分類精度

4.3.2 [曲率差 小] における ROI ごとの MVPA 結果

[曲率差 小] の MVPA 結果は図 4.10 である。[曲率差 小] 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。多重比較では、各要因の主効果も交互作用も有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(2, 14)=1.41, p=.27, \eta^2=.16$; ROI 要因: $F(12, 84)=0.80, p=.64, \eta^2=.10$; 交互作用: $F(24, 168)=0.76, p=.77, \eta^2=.09$)。

4.3 結果

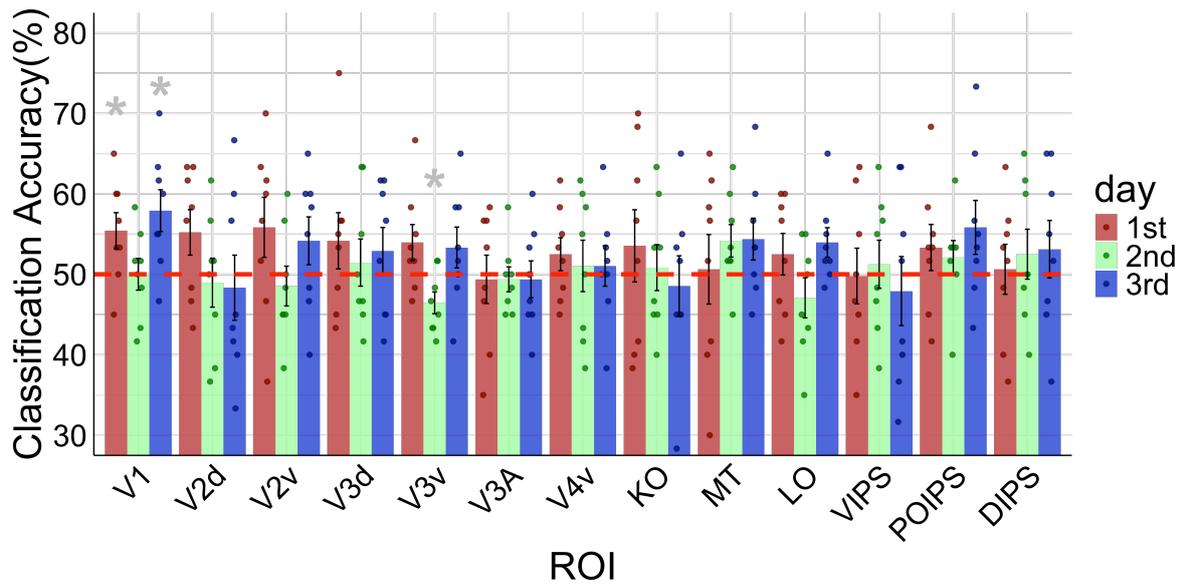


図 4.10 [曲率差 小] での MVPA の分類精度

4.3.3 全体での ROI ごとの MVPA 結果

全体の MVPA 結果を図 4.11 に示す。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。多重比較では ROI 要因の主効果が見られ (ROI 要因: $F(12, 84)=1.87$, $p=.049$, $\eta^2=.21$), Holm 法による多重比較を行なった結果, V2v において VIPS よりも有意に高い分類精度が認められた ($t(7)=6.05$, $p=.04$)。テスト回要因の主効果と交互作用には有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(2, 14)=0.37$, $p=.69$, $\eta^2=.05$; 交互作用: $F(24, 168)=1.35$, $p=.13$, $\eta^2=.16$)。

4.4 追加解析の結果

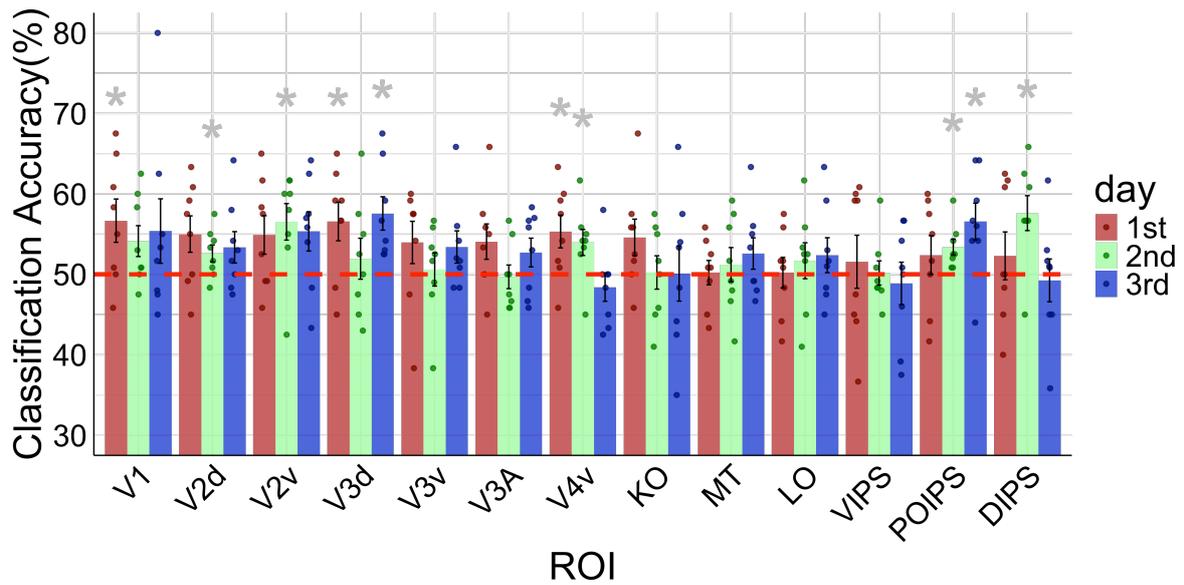


図 4.11 全体での MVPA の分類精度

4.4 追加解析の結果

4.4.1 左半球と右半球による ROI の MVPA 解析

曲率差 大

左半球と右半球の MVPA 結果を図 4.12, 4.13 に示す. 左半球で 3 回目テスト時に V2d, V3d, DIPS においてチャンスレベルより有意な差が認められた (V2d: $t(7)=3.71$, $p=.03$, $d=1.31$; V3d: $t(7)=5.14$, $p=.01$, $d=1.81$; DIPS: $t(7)=4.72$, $p=.01$, $d=1.67$). 右半球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.

4.4 追加解析の結果

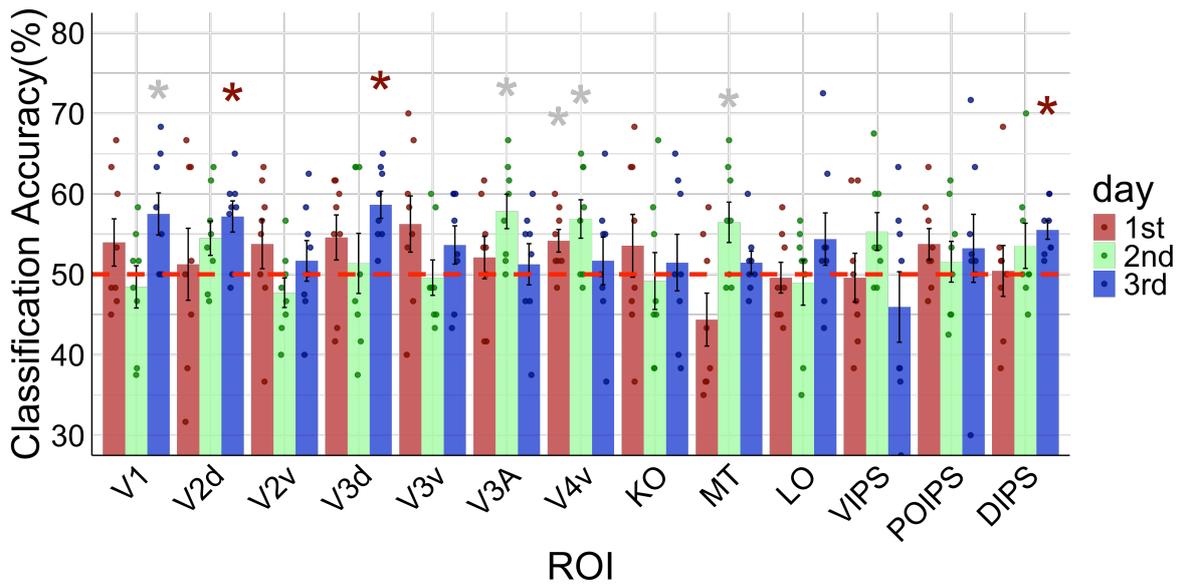


図 4.12 左半球での [曲率差 大] の MVPA の分類精度

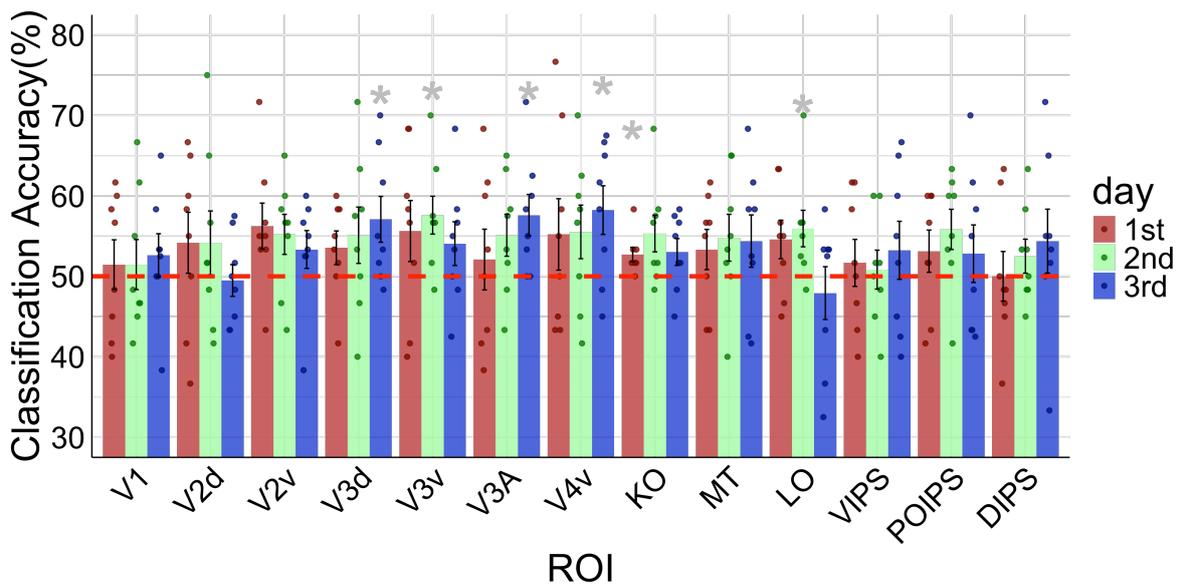


図 4.13 右半球での [曲率差 大] の MVPA の分類精度

曲率差 小

左半球でも右半球でも、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 (図 4.14, 4.15).

4.4 追加解析の結果

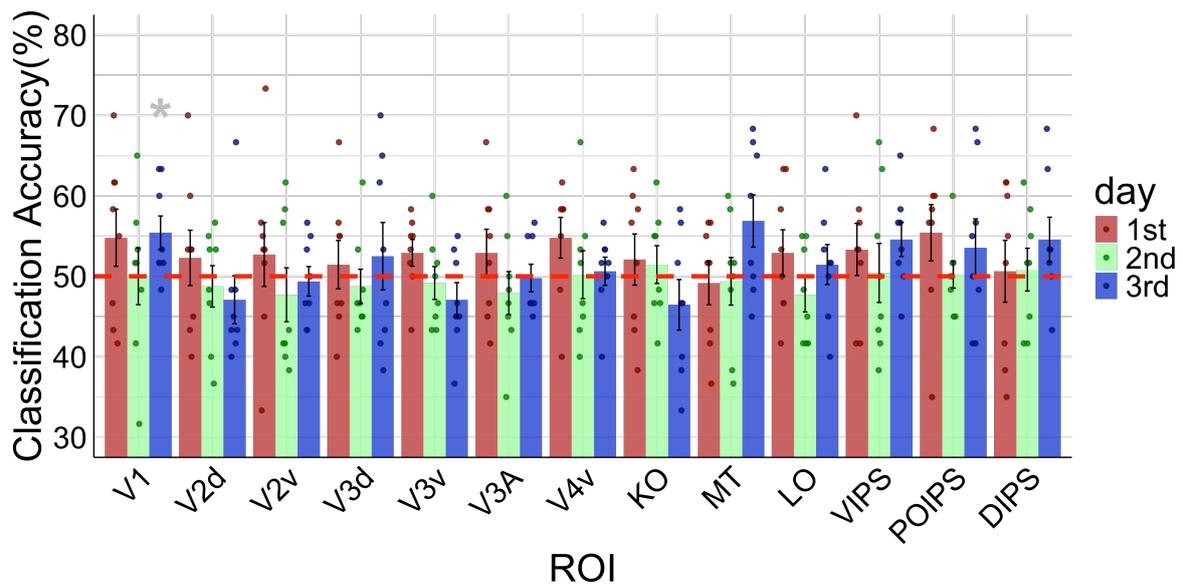


図 4.14 左半球での [曲率差 小] の MVPA の分類精度

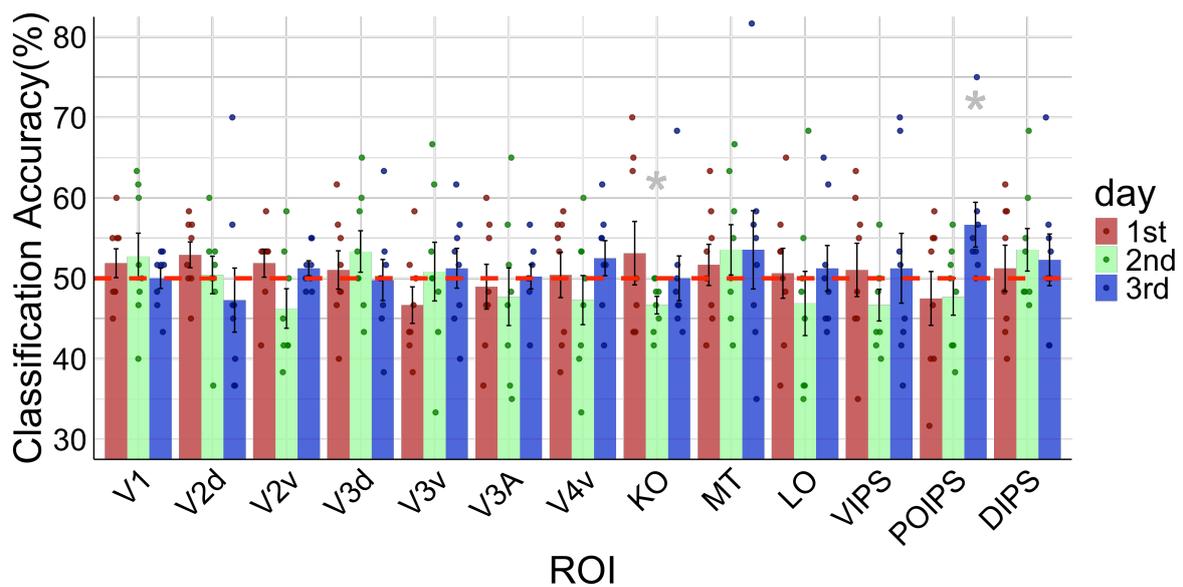


図 4.15 右半球での [曲率差 小] の MVPA の分類精度

全体

左半球では、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 (図 4.16). 右半球 (図 4.16) では 1 回目テスト時に V2d, 3 回目テ

4.4 追加解析の結果

スト時に V3d においてチャンスレベルより有意な差が認められた (1 回目 V2d: $t(7)=4.36$, $p=.04$, $d=1.54$; 3 回目 V3d: $t(7)=5.44$, $p=.01$, $d=1.92$).

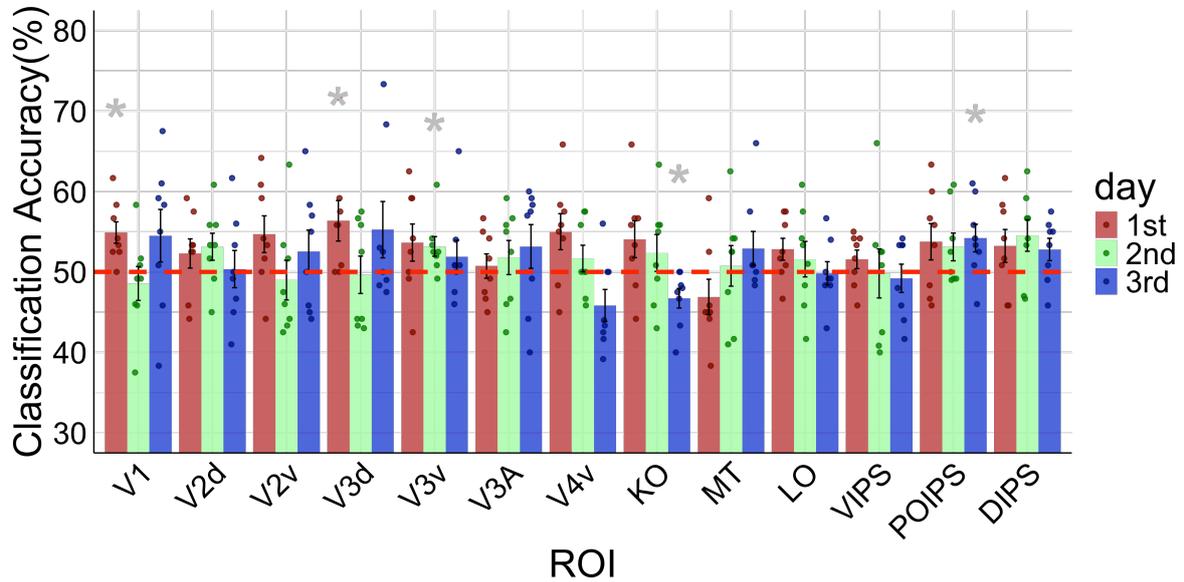


図 4.16 左半球での MVPA の分類精度

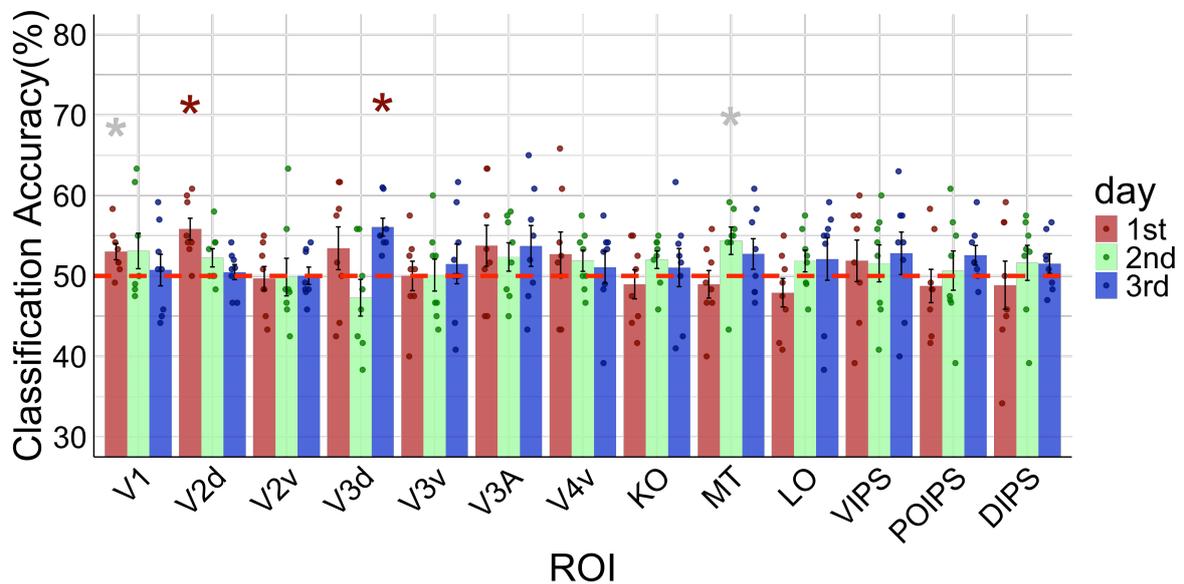


図 4.17 右半球での MVPA の分類精度

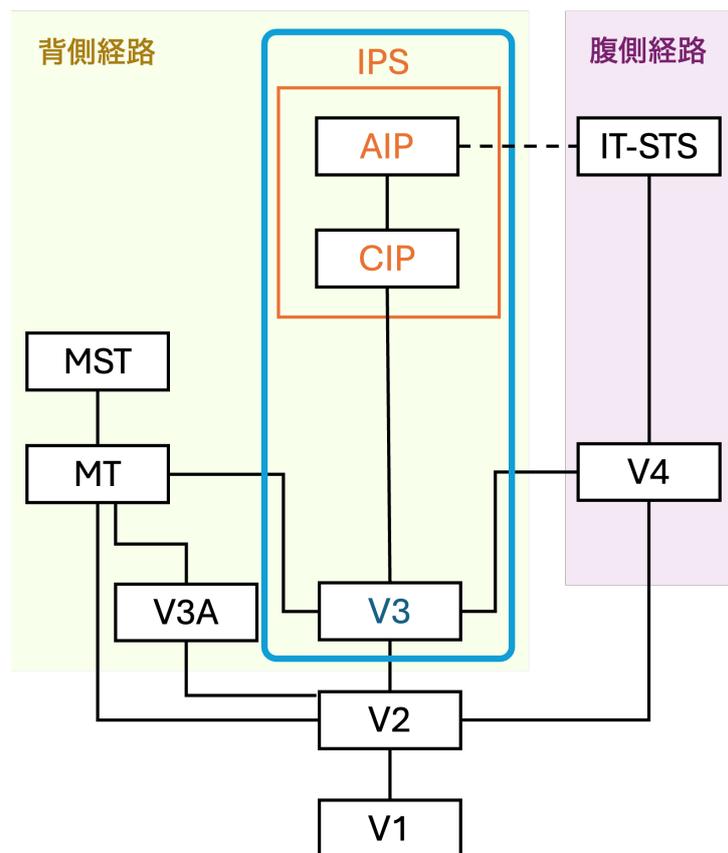
4.5 考察

4.5.1 脳活動パターンへの影響

トレーニングなしの1・2回目では分類精度に有意な差が見られず、3回目で触覚トレーニングの経験によってV3dで分類精度がチャンスレベルより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(V3d)の領野に影響した可能性が示唆された。また、追加解析の半球別の解析から、[曲率差大]の3回目の視覚テストでV2d, V3d, DIPSにおいて分類精度がチャンスレベルより有意に高くなったことから、左半球の背側経路における変化が今回の結果に影響したと考えられる。

先行研究では、3D曲面の形状知覚はV3AやV3B/KOの関連[7][8]が、触覚の3次元形状知覚にはLOCの関連が示唆されている[1]が、本実験ではこれらの領域との関連性は示唆されなかった。この結果は、3D曲率弁別の視触覚クロスモーダル学習において、両眼立体視による3D曲面と触覚による形状弁別課題の2つの性質が影響をもたらした可能性がある。先行研究から両眼視差による立体形状知覚はV3や頭頂間溝(IPS)で処理が行われることが示唆されており[32][33]、本実験でも両眼立体視による3D曲面がV3dやDIPSの脳活動パターンを変化させたと推測される。また、視覚と触覚の各形状知覚はIPSへの関連が示唆されており[34]、本実験での触覚による形状弁別トレーニングがDIPSに影響を及ぼした可能性が考えられる。これらの理由から、今回は3D曲率弁別の視触覚クロスモーダル学習が以下の図4.18の水色枠部分のように、主にV3からIPSへの背側経路の処理機構に影響した可能性がある。さらに、マカクザルの前頭頂間野(AIP:anterior intraparietal area)は、曲面に反応する細胞が存在し[35]、AIPは今回の結果におけるDIPSに対応することが示唆されている[36]ため、DIPSが3D曲面知覚に関連することが推測される。

4.5 考察



※藤田一郎 両眼立体視 脳科学辞典
<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/両眼立体視> (2023)を元に作成

図 4.18 両眼立体視の神経機構 (マカクザル)

[曲率差 大] でより有意な脳活動パターンの変化が生じた理由は、両眼視差による凹凸符号や粗い奥行き情報は背側経路に関与すること [7][8] から、本実験において [曲率差 大] で視差が大きかったことが影響したと考えられる。V3 の中でも背側経路の V3d で変化が生じた理由は、身体の視覚的な情報は下視野で活性化され背側経路 (V3d) 領域にリンクすることが示唆されている [37] ことから、本実験の触覚トレーニングで手の動きの視覚的な下視野のイメージが視覚背側経路に影響した可能性が考えられる。

今回、左半球でのチャンスレベルとの有意な差が見られた理由として、利き手の半球優位性が挙げられる。本実験では触覚トレーニングで利き手を使用し、8名のうち7名が右利きであった。利き手は後部頭頂皮質の半球優位性に関わることが明らかになっている [38] ため、今回の右手での触覚トレーニングが、左半球で視覚の 3D 曲面の形状処理に何らかの影響

4.5 考察

響を及ぼしたことが推測される。一方で、右半球の全体の解析においても、3回目テスト時にV3dにおいてチャンスレベルより有意な差が見られた点は、この推測とは反している。これは視空間認知が右半球に深く関与する [39] ことから、今回の3D曲面形状の空間イメージ知覚に何らかの影響をもたらした可能性がある。本実験における半球優位性については、触覚時の手を入れ替える工夫や3Dでない形状知覚では違いが生じるかなど、より検討する必要があるが、本実験の結果においては左半球においても右半球においてもV3dの関与が見られたため、3D曲率弁別においてはどちらの半球においてもV3dが関連すると考えられる。

さらに、右半球の全体の解析において1回目テスト時にV2dでチャンスレベルより有意な差がみられた。この結果はV2dとV3dの領野が隣接していることから、3D曲面形状知覚にV2dも関連している可能性が考えられる。

4.5.2 実験デザインの妥当性

本実験の判断課題は両眼立体視が可能であれば、どの参加者でも弁別できるような刺激を用いた。視覚テストの結果として付録A.1の図A.1において、多くの参加者が8割以上正答し、視覚曲面刺激を正しく認識できていたと考えられる。また、触覚トレーニングの結果も付録A.2の図A.2, A.3において、トレーニング回数を重ねるごとに、正答率の上昇する傾向や回答時間の減少する傾向が見られた。このことから、参加者はトレーニングを重ねるごとに学習効果が得られ、最終的には触覚曲率弁別が可能であったと推測できる。つまり、今回の実験に用いた視覚刺激や触覚刺激は視触覚クロスモーダル学習の影響を検討する上で妥当であり、また触覚トレーニングによる学習の効果は十分であったと考えられる。一方で、曲率刺激の弁別難易度を変更すれば、より強いトレーニングやテスト時の脳活動へ影響した可能性があり、今後検討しなければならない。

さらに、本実験では条件の順序効果を統制できていないため、今後は今回の結果と比較するために1回目と2回目の間に触覚トレーニング、2回目と3回目の間にトレーニングなしの実験や参加者間での実験などを通して、より深く検討する必要がある。また、心理物理実験での視覚トレーニングにおける脳処理への影響は本実験では検討できていない。もし視覚ト

4.5 考察

レーニングにおいても同じような結果が得られた場合、視覚テストの繰り返し効果が影響している可能性があるため今後検討する必要がある。

第5章

まとめ

人間は物体を認識する際、視覚と触覚を用いて3次元の空間や形状を知覚している。近年の研究では、視覚入力がない状況でも触覚・体性感覚のみで、3次元の形状や方位の情報が視覚野において処理されることが報告されている。これまで3次元の方位や凹凸については検討されてきたが、3次元構造のより詳細な曲率の大きさの違いの処理については未だに検討されていない。

そこで本研究では、視触覚クロスモーダル学習が3D曲率の弁別閾に影響を及ぼすかを心理物理実験により検討し、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をfMRIにより検討した。まず、視覚または触覚による3D曲率の異同弁別トレーニングが、視覚における曲率弁別感度を向上させ弁別閾が低下するかを実験した。視覚トレーニング/触覚トレーニング/トレーニングなしの3群で比較した結果、視覚だけでなく触覚による3D曲率トレーニングでも視覚の曲率弁別感度が有意に向上した。

さらにfMRIを用いて、触覚による曲率弁別トレーニングによって視覚野の各領域において脳活動に変化が生じるかを、MVPAによる3D曲率判別の分類精度を指標としてトレーニング前とトレーニング後で変化するかを検討した。その結果、触覚の経験によって脳活動パターンが変化したと考えられる視覚野の背側経路(V3d)の領域が同定された。また、半球別の解析からも背側経路(V2d, V3d, DIPS)の関連性が示唆され、これらの結果から、3D曲率弁別の視触覚クロスモーダル学習がV3からIPSの処理機構に関連すると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、ご指導くださった繁榎博昭先生に心より感謝申し上げます。ご多忙であるにも関わらず、各参加者3日間というfMRI実験の日程を合わせて、尚且つMRI機器の操作をサポートしていただき、誠にありがたく存じます。また、実験計画や脳画像解析等でアドバイスをいただいたShenzhen MSU-BIT UniversityのLi Zhen先生、fMRI実験の手伝いをしてくださった研究室助教のHarin Hapuarachchi先生にも深く感謝いたします。

そして、副査を務めていただいた中原潔先生、門田宏先生に感謝申し上げます。

最後に、本研究にご協力いただいた心理物理実験27名、fMRI実験8名の参加者の皆様にも感謝いたします。また、予備実験に参加してくれた後輩たちや、協力のご意向をいただいたにも関わらず視力の関係等で参加できなかった十数名の皆様にも感謝しております。

参考文献

- [1] Amedi, A., Malach, R., Hendler, T. et al. Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nat Neurosci* 4, 324–330. 2001.
- [2] Saito, D.N., Okada, T., Honda, M. et al. Practice makes perfect: the neural substrates of tactile discrimination by Mah-Jong experts include the primary visual cortex. *BMC Neurosci.* 7, 79. 2006.
- [3] Haemy Lee Masson, Jessica Bulthé, Hans P. Op de Beeck, Christian Wallraven, Visual and Haptic Shape Processing in the Human Brain: Unisensory Processing, Multisensory Convergence, and Top-Down Influences. *Cerebral Cortex*. Volume 26, Issue 8. Pages 3402–3412. 2016.
- [4] Threethiphikoon T, Li Z, Shigemasu H. Orientation representation in human visual cortices: contributions of non-visual information and action-related process. *Front Psychol.* 2023;14:1231109. 2023.
- [5] O’ Callaghan Georgia , O’ Dowd Alan , Simões-Franklin Cristina, Stapleton John, Newell Fiona N. Tactile-to-Visual Cross-Modal Transfer of Texture Categorisation Following Training: An fMRI Study. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. Volume 12. 2018.
- [6] Li Zhen, Shigemasu Hiroaki. Generalized Representation of Stereoscopic Surface Shape and Orientation in the Human Visual Cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*. Volume 13. 2019.
- [7] Dicle Dövençioğlu, Hiroshi Ban, Andrew J. Schofield, Andrew E. Welchman; Perceptual Integration for Qualitatively Different 3-D Cues in the Human Brain. *J Cogn Neurosci.* 25 (9): 1527–1541. 2013.
- [8] Volodymyr Ivanchenko, Robert A. Jacobs. Visual learning by cue-dependent and

参考文献

- cue-invariant mechanisms. *Vision Research*. Volume 47, Issue 2. Pages 145-156. 2007.
- [9] Gordon, I.E., Morison, V. The haptic perception of curvature. *Perception & Psychophysics* 31, 446-450, 1982.
- [10] Pont, S.C., Kappers, A.M.L. & Koenderink, J.J. Similar mechanisms underlie curvature comparison by static and dynamic touch. *Perception & Psychophysics* 61, 874–894. 1999.
- [11] Anna Bodegård, Anders Ledberg, Stefan Geyer, Eiichi Naito, Karl Zilles, and Per E. Roland. Object Shape Differences Reflected by Somatosensory Cortical Activation in Human. *The Journal of Neuroscience*. Vol. 20 RC51 1of5. 2000.
- [12] 村上郁也編. イラストレクチャー認知神経科学- 3.7 章機能的磁気共鳴画像法 (fMRI). オーム社. 平成 23 年.
- [13] 林拓也, 麻生俊彦, 藤本晃司, 花川隆. 機能的磁気共鳴画像法. 脳科学辞典. <https://bsd.neuroinf.jp/wiki/機能的磁気共鳴画像法>. 2020.
- [14] 岩淵俊樹. fMRI による脳機能計測: 基礎と展望. 埼玉放射線. Vol.61, No.3, pp.235-243. 2016.
- [15] J. V. Haxby, M. I. Gobbini, M. L. Furey, A. Ishai, J. L. Schouten, P. Pietrini. Distributed and Overlapping Representations of Faces and Objects in Ventral Temporal Cortex. *Science*. 293(5539), 2425-2430. 2001.
- [16] M. E. Weaverdyck, M. D. Lieberman, C. Parkinson, Tools of the Trade Multivoxel pattern analysis in fMRI: a practical introduction for social and affective neuroscientists, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 15(4), 487-509. 2020.
- [17] Watson, A.B., Pelli, D.G. Quest: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics* 33, 113–120. 1983.
- [18] Poggio T, Fahle M, Edelman S. Fast perceptual learning in visual hyperacuity. *Science*. 256(5059):1018-1021. 1992.

参考文献

- [19] M. Fahle, S. Edelman, T. Poggio. Fast perceptual learning in hyperacuity. *Vision Research*. Volume 35, Issue 21. Pages 3003-3013. 1995.
- [20] Norman, J.F., Norman, H.F., Clayton, A.M. et al. The visual and haptic perception of natural object shape. *Perception & Psychophysics* 66, 342–351. 2004.
- [21] Gaissert, N., Wallraven, C. Categorizing natural objects: a comparison of the visual and the haptic modalities. *Exp Brain Res* 216, 123–134. 2012.
- [22] Iseki R. Anovakun version 4.8.9. 2023, URL <https://riseki.cloudfree.jp/?ANOVA>
君, 最終閲覧日 2025 年 1 月 31 日.
- [23] Sereno MI, Dale AM, Reppas JB, et al. Borders of multiple visual areas in humans revealed by functional magnetic resonance imaging. *Science*. 268(5212):889-893. 1995.
- [24] DeYoe EA, Carman GJ, Bandettini P, et al. Mapping striate and extrastriate visual areas in human cerebral cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 93(6):2382-2386. 1996.
- [25] Warnking J, Dojat M, Guérin-Dugué A, et al. fMRI retinotopic mapping—step by step. *Neuroimage*. 17(4):1665-1683. 2002.
- [26] P Dupont, B De Bruyn, R Vandenberghe, A M Rosier, J Michiels, G Marchal, L Mortelmans, G A Orban. The kinetic occipital region in human visual cortex., *Cerebral Cortex*. Volume 7, Issue 3, Pages 283–292. 1997.
- [27] Zeki S, Watson JD, Lueck CJ, Friston KJ, Kennard C, Frackowiak RS. A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *J Neurosci*. 11(3):641-649. 1991.
- [28] Kourtzi, Z., and Kanwisher, N. Cortical regions involved in perceiving object shape. *J. Neurosci*. 20, 3310–3318. 2000.
- [29] Kourtzi, Z., and Kanwisher, N. Representation of perceived object shape by the human lateral occipital complex. *Science* 293, 1506–1509. 2001
- [30] Guy A Orban, Stefan Sunaert, James T Todd, Paul Van Hecke, Guy Marchal. Hu-

参考文献

- man Cortical Regions Involved in Extracting Depth from Motion. *Neuron*. Volume 24, Issue 4, p929-940. 1999.
- [31] W. Vanduffel et al. ,Extracting 3D from Motion: Differences in Human and Monkey Intraparietal Cortex.*Science* 298,413-415. 2002.
- [32] Chandramouli Chandrasekaran, Victor Canon, Johannes C. Dahmen, Zoe Kourtzi, Andrew E. Welchman. Neural Correlates of Disparity-Defined Shape Discrimination in the Human Brain. *Journal of Neurophysiology*. 97:2, 1553-1565. 2007.
- [33] Svetlana Georgieva, Ronald Peeters, Hauke Kolster, James T. Todd, Guy A. Orban. The Processing of Three-Dimensional Shape from Disparity in the Human Brain. *Journal of Neuroscience*, 29 (3) 727-742. 2009.
- [34] Stilla R, Sathian K. Selective visuo-haptic processing of shape and texture. *Hum Brain Mapp*. 29(10):1123-1138. 2008.
- [35] Tom Theys, Siddharth Srivastava, Johannes van Loon, Jan Goffin, and Peter Janssen. Selectivity for three-dimensional contours and surfaces in the anterior intraparietal area. *Journal of Neurophysiology*. 107:3, 995-1008. 2012.
- [36] Mantini, D., Hasson, U., Betti, V., Perrucci, M. G., Romani, G. L., Corbetta, M., Orban, G. A., & Vanduffel, W. Interspecies activity correlations reveal functional correspondence between monkey and human brain areas. *Nature methods*. 9(3), 277–282. 2012.
- [37] Previc, F. H. Functional specialization in the lower and upper visual fields in humans: its ecological origins and neurophysiological implications. *Behav. Brain Sci*. 13, 519–542. 1990.
- [38] F.T.P. Oliveira, J. Diedrichsen, T. Verstynen, J. Duque, & R.B. Ivry, Transcranial magnetic stimulation of posterior parietal cortex affects decisions of hand choice, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107 (41) 17751-17756. 2010.
- [39] Alexander T. Sack, Julia M. Sperling, David Prvulovic, Elia Formisano, Rainer

参考文献

Goebel, Francesco Di Salle, Thomas Dierks, David E.J. Linden. Tracking the Mind's Image in the Brain II: Transcranial Magnetic Stimulation Reveals Parietal Asymmetry in Visuospatial Imagery. *Neuron*. Volume 35, Issue 1, Pages 195-204, ISSN 0896-6273. 2002.

付録 A

fMRI 実験の行動パフォーマンス

A.1 視覚テストの正答率

fMRI 実験での視覚テストの課題判別タスクの正答率を図 A.1 に示す。縦軸が正答率 (%), 横軸がテスト回目を表し, 点線は各参加者の 6Run の平均データ, 実線は全体の平均値を表す (誤差線は標準誤差)。

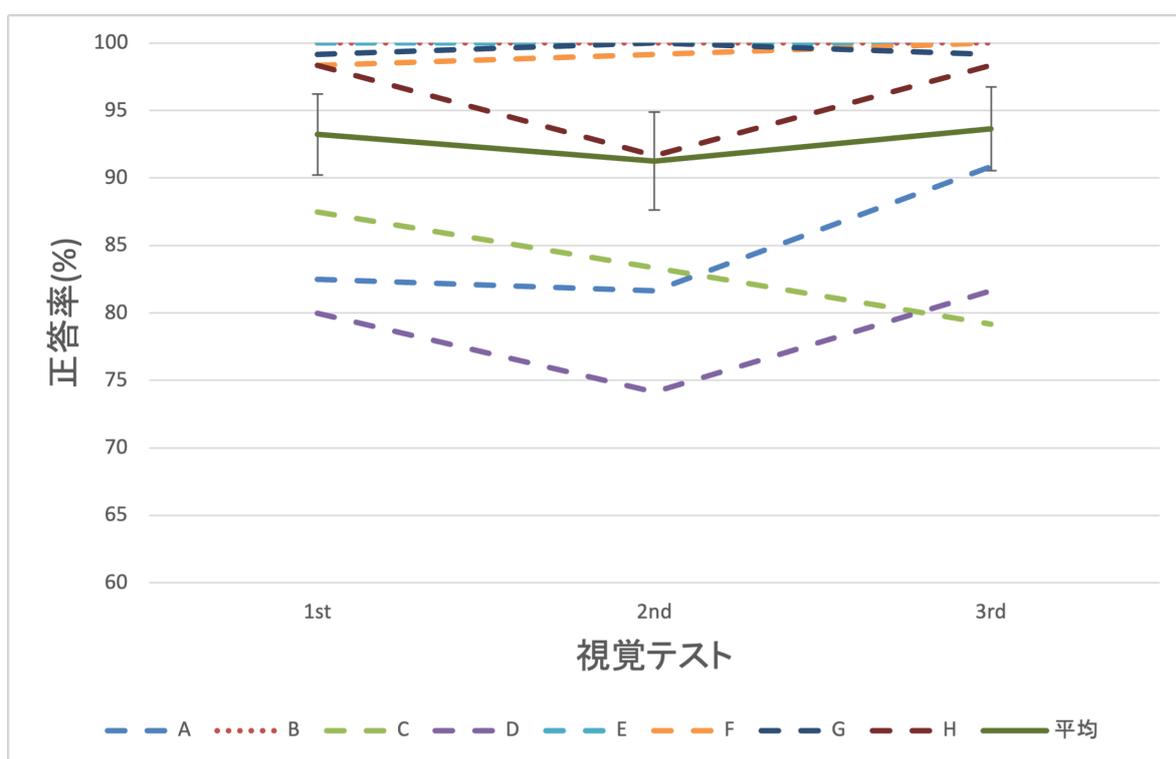


図 A.1 視覚テストの正答率

A.2 触覚トレーニング

A.2.1 正答率

fMRI 実験での触覚トレーニングの課題判別タスクの正答率を図 A.2 に示す。縦軸が正答率 (%), 横軸がトレーニング回目を表し, 点線は各参加者のデータ, 赤の実線は全体の平均値を表す (誤差線は標準誤差)。

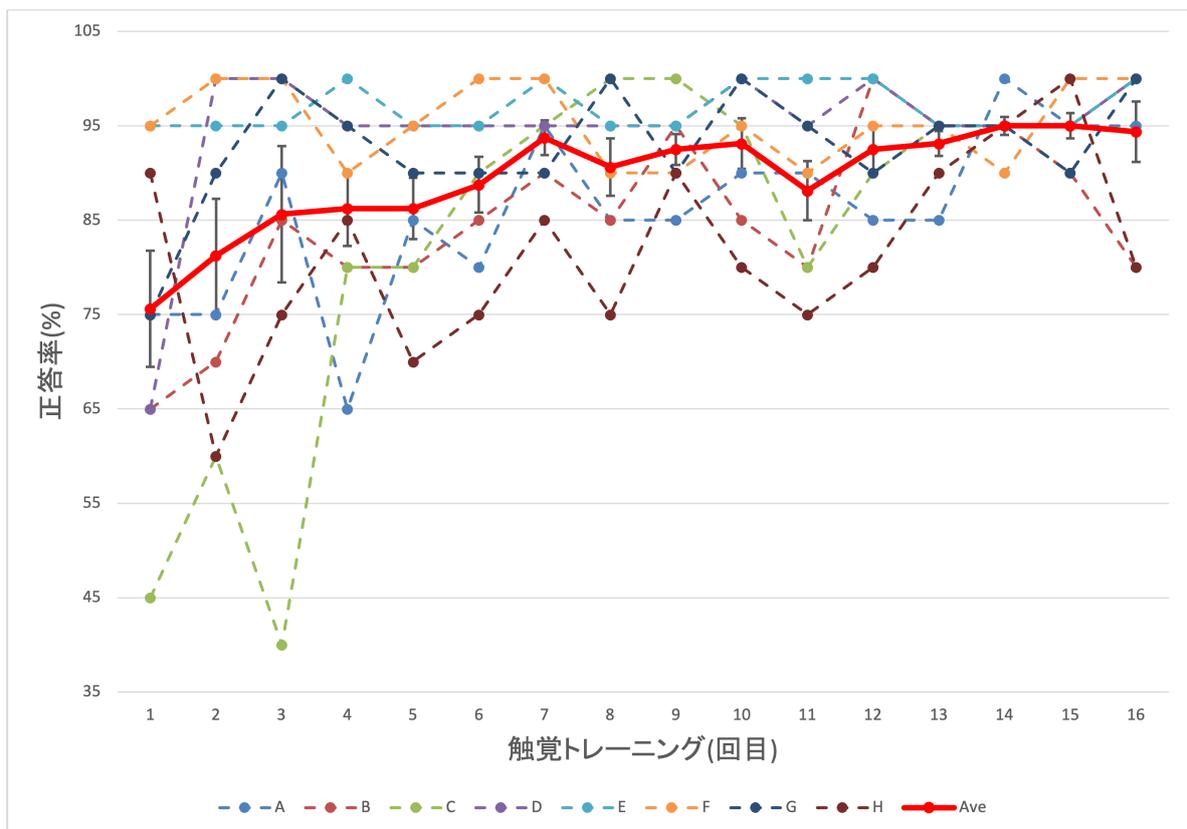


図 A.2 触覚トレーニングの正答率

A.2.2 回答時間

fMRI 実験での触覚トレーニングの課題判別タスクの回答時間を図 A.3 に示す。縦軸が回答時間 (s), 横軸がトレーニング回目を表し, 点線は各参加者のデータ, 赤の実線は全体の平均値を表す (誤差線は標準誤差)。回答がなかった場合のデータは含めていない。

A.2 触覚トレーニング

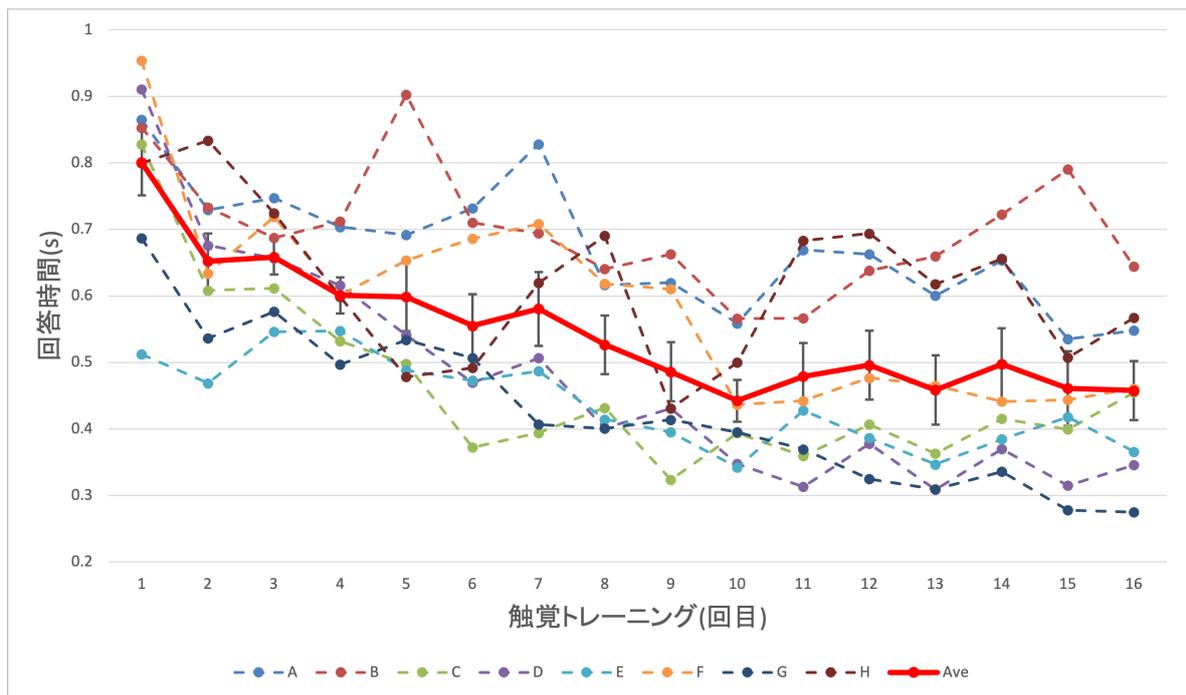


図 A.3 触覚トレーニング回答時間

付録 B

視覚テスト回で分類する MVPA 解析

B.1 曲率差 大

図 B.1 は [曲率差 大] 視覚テスト回で分類した MVPA 解析の結果を表す。棒グラフの None(オレンジ色) が 1 回目と 2 回目の判別の分類精度, Tactile(水色) が 2 回目と 3 回目の判別の分類精度を示している (以下同じ)。他の解析と同様に, 赤*が p 値補正後でチャンスレベル (50%) より有意に高かったことを示す (灰色*は補正なし)。二要因分散分析の結果, ROI 要因での主効果に有意であった ($F(12, 84)=12.08, p<.0001, \eta^2=.63$) が, テスト回要因や交互作用に有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(1, 7)=0.17, p=.68, \eta^2=.02$; 交互作用: $F(12, 84)=0.46, p=.93, \eta^2=.06$)。ROI 要因を多重比較した結果は表 B.1 に示す。また, 1 標本 t 検定の結果は表 B.2 に示す。

B.1 曲率差 大

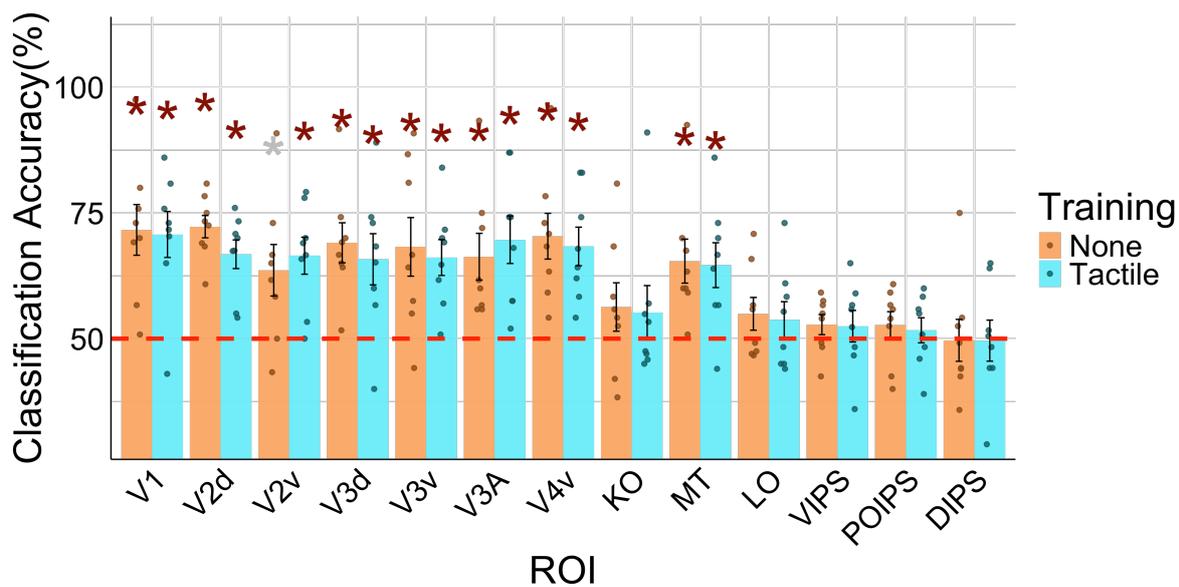


図 B.1 [曲率差 大] のテストでの MVPA の分類精度

表 B.1 ROI 要因の多重比較

比較対象	t 値	adj.p
V2d>POIPS	10.97	<.001
MT>DIPS	9.92	.002
V2d>VIPS	9.55	.002
V1>POIPS	9.23	.003
V1>DIPS	7.89	.007
V1>VIPS	7.05	.015
V4v>DIPS	6.47	.025
V2d>DIPS	6.45	.025
V4v>LO	6.36	.028
V3A>DIPS	6.21	.030
V4v>VIPS	5.91	.041

B.2 曲率差 小

表 B.2 チャンスレベルとの 1 標本 t 検定

	None		Tactile	
	t 値	adj.p	t 値	adj.p
V1	4.29	.012	4.53	.007
V2d	10.04	.0002	5.89	.007
V2v	2.66	.053	4.48	.007
V3d	4.79	.012	3.10	.028
V3v	3.13	.031	4.52	.007
V3A	3.50	.022	4.16	.009
V4v	4.47	.012	4.78	.007
KO	1.30	.275	0.97	.474
MT	3.52	.022	3.28	.025
LO	1.51	.251	1.04	.473
VIPS	1.40	.67	0.79	.539
POIPS	1.00	.377	0.67	.568
DIPS	-0.07	.939	-0.10	.925

B.2 曲率差 小

図 B.2 は [曲率差 小] 視覚テスト回で分類した MVPA 解析の結果を表す。二要因分散分析の結果, [曲率差 大] と同じく, ROI 要因での主効果に有意であった ($F(12, 84)=8.32$, $p<.0001$, $\eta^2=.54$) が, テスト回要因や交互作用に有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(1, 7)=0.27$, $p=.61$, $\eta^2=.03$; 交互作用: $F(12, 84)=1.01$, $p=.44$, $\eta^2=.12$). ROI 要因を多重比較した結果は表 B.3 に示す。また, 1 標本 t 検定の結果は表 B.4 に示す。

B.2 曲率差小

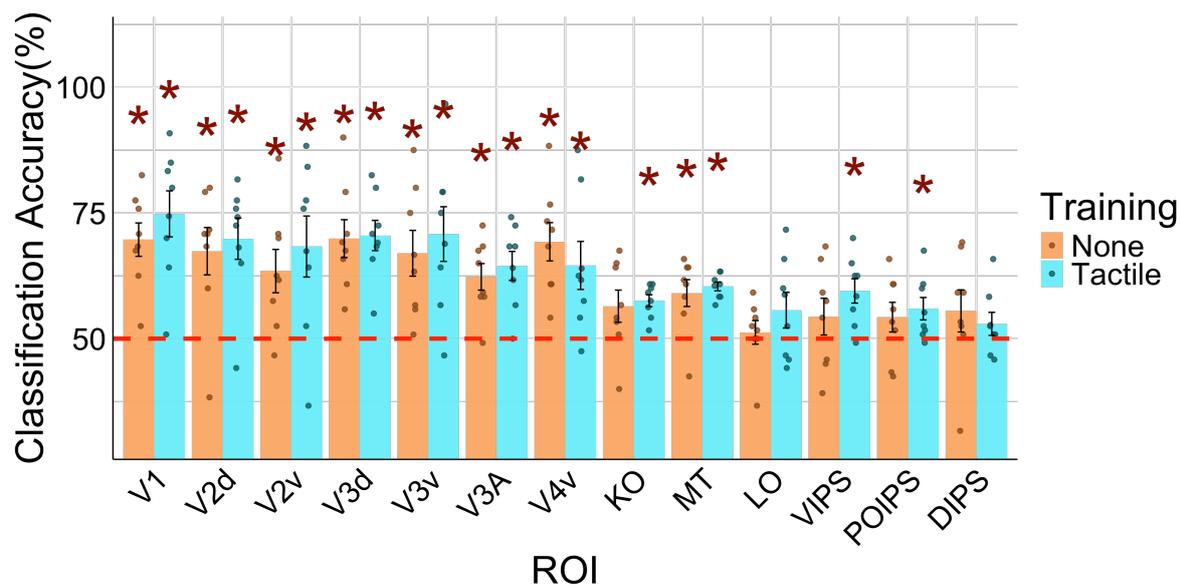


図 B.2 [曲率差小] のテストでの MVPA の分類精度

表 B.3 ROI 要因の多重比較

比較対象	t 値	adj.p
V3d>KO	6.00	.042

B.3 全体

表 B.4 チャンスレベルとの 1 標本 t 検定

ROI	None		Tactile	
	t 値	adj.p	t 値	adj.p
V1	5.93	.006	5.43	.006
V2d	3.70	.017	4.83	.016
V2v	3.12	.027	3.02	.027
V3d	5.28	.006	6.81	.006
V3v	3.73	.016	3.82	.016
V3A	4.66	.007	5.01	.007
V4v	5.06	.006	3.04	.006
KO	2.02	.120	6.40	.112
MT	3.94	.021	12.05	.021
LO	0.53	.611	1.60	.611
VIPS	1.19	.293	3.92	.294
POIPS	1.44	.249	2.68	.249
DIPS	1.31	.270	1.28	.270

B.3 全体

図 B.2 は [曲率差 小] 視覚テスト回で分類した MVPA 解析の結果を表す。二要因分散分析の結果, 同様に ROI 要因での主効果に有意であった ($F(12, 84)=16.25, p<.0001, \eta^2=.69$) が, テスト回要因や交互作用に有意な差は見られなかった (テスト回要因: $F(1, 7)=0.29, p=.60, \eta^2=.04$; 交互作用: $F(12, 84)=0.40, p=.95, \eta^2=.05$) ROI 要因を多重比較した結果は表 B.5 に示す。また, 1 標本 t 検定の結果は全ての条件でチャンスレベルよりも有意な差が認められた。詳しい数値は表 B.6 に示す。

B.3 全体

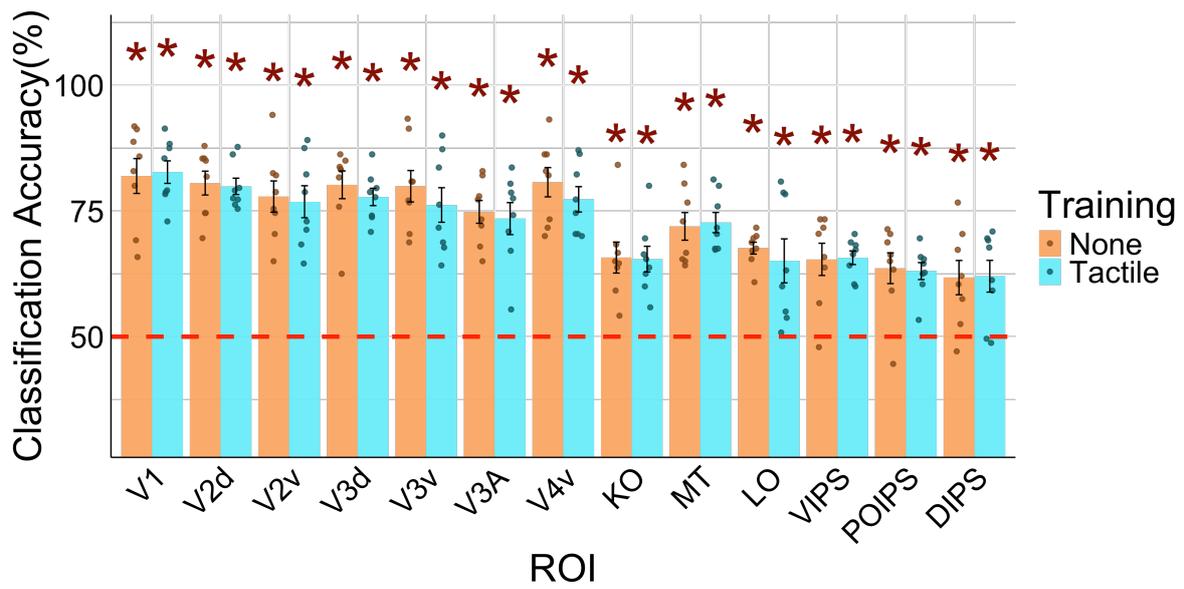


図 B.3 全体のテストでの MVPA の分類精度

B.3 全体

表 B.5 ROI 要因の多重比較

比較対象	t 値	adj.p
V3d>VIPS	11.18	<.001
V1>POIPS	9.26	.003
V2d>VIPS	8.89	.004
V1>VIPS	7.58	.010
V3d>POIPS	7.20	.013
V2d>LO	7.19	.013
V1>DIPS	7.12	.014
V2d>POIPS	7.05	.014
V1>KO	6.44	.025
V4v>KO	6.40	.025
V4v>LO	6.26	.029
V4v>DIPS	6.21	.030
V2d>DIPS	6.21	.030
V2d>KO	6.18	.030
MT>DIPS	6.00	.035
V4v>VIPS	5.93	.038

B.3 全体

表 B.6 チャンスレベルとの 1 標本 t 検定

ROI	None		Tactile	
	t 値	adj.p	t 値	adj.p
V1	9.21	<.0001	14.61	<.00001
V2d	12.88	<.0001	18.36	<.00001
V2v	8.96	<.0001	8.43	<.001
V3d	10.95	<.0001	16.13	.00001
V3v	9.58	<.0001	7.62	<.001
V3A	10.95	<.0001	7.36	<.001
V4v	10.55	<.0001	10.80	<.0001
KO	5.11	.002	6.06	<.001
MT	7.97	<.001	11.28	<.0001
LO	14.88	<.0001	3.45	.010
VIPS	4.79	.002	11.55	<.0001
POIPS	4.45	.003	7.73	<.001
DIPS	3.45	.011	3.80	.007