

修士学位論文要約（令和4年3月）

マウス視覚野の光学イメージングとデコーディングに関する研究

岡 賢太郎

指導教員：中尾 光之

A Study on Optical Imaging and Decoding of the Mouse Visual Cortex

Kentaro OKA

Supervisor: Mitsuyuki NAKAO

Brain decoding research provides deep insight into the mechanism of representation and processing of information in the brain. Brain decoding have been often addressing the visual decoding problem of estimating visual stimuli from human fMRI data during visual stimuli; however, the previous studies have been performed without using the physiological and anatomical findings of the visual system sufficiently. In this study, we proposed a novel visual decoding method based on the findings of the visual system from the retina to the visual cortex. First, we formulated a forward model based on the retina-visual cortex system model introduced in the model-based retinal map estimation method, which was developed in our laboratory. The decoding was performed by solving the inverse problem using the elastic net applying to the forward model. To examine the validity of the proposed method, we applied the method to data of the response of the mouse visual cortex to visual stimuli measured by the intrinsic optical signal imaging (IOS) method. It was found that the proposed method approximately reconstructed the retinal image from the cortical responses for training data. However, the retinal images that were not used for model parameter estimation were not able to recover. Therefore, the method needs to be improved in generalization performance.

1. はじめに

脳信号から脳内の情報表現や心の状態を予測したり感覚情報を推定したりする脳デコーディングの研究は脳の情報表現や処理機構の解明に有用である。これまで脳デコーディング研究はヒトの視覚刺激に対する fMRI 応答から視覚刺激を推定する視覚デコーディング問題が良く取り上げられてきた。しかし、先行研究では視覚系の生理・解剖学的知見をあまり利用していなかった。

本研究では視覚系の生理・解剖学的知見に基づいた視覚デコーディング法を提案した。まず、我々の研究室で開発したモデルベース網膜地図推定法¹⁾で導入した網膜-視覚野系モデルに基づいて順モデルを定式化した。これに Elastic net を適用して逆問題を解くことにより視覚デコーディングを行った。

提案法の妥当性を検討するため、視覚刺激に対するマウス視覚野応答を大脳皮質内因性光信号イメージング (IOS) 法²⁾により計測したデータに適用した。

2. 網膜-視覚野系モデルに基づいた順モデル

本研究では、網膜-視覚野系を、網膜像を皮質応答に変換する線形フィルタでモデル化する。網膜像をサンプリングして 1 行に並べてベクトル化したものを (R 次元) 網膜像ベクトル \mathbf{x} 、同様に視覚野応答をサンプリングしてベクトル化したものを (C 次元) 皮質応答ベクトル \mathbf{y} とおくと、網膜像 \mathbf{x} と皮質応答 \mathbf{y} の関係は次式(1)で表すことができる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{x} \quad (1)$$

\mathbf{G} は視覚インパルス応答行列であり、網膜-視覚系の実験データに基づいて構成されるものとする。視覚デコーディングは、皮質応答 \mathbf{y} から網膜像 \mathbf{x} を推定する問題である。この網膜像 \mathbf{x} を推定するために Elastic Net³⁾を利用した。

3. 実験方法

本研究は東北大学動物実験専門委員会の承認のもとで行われた。実験には C57BL6/N マウス(オス, 8-14 週齢, 日本クレア)を用いた。頭皮および骨膜を切除して頭蓋骨を露出させ、イメージング領域にカバーガラスを透明デンタルセメントで接着した。手術から 3 日以上経過し、十分回復したマウスを実験に用いた。

視覚刺激には訓練刺激(図 1(a))と試験刺激(図 1(b))を用いた。訓練刺激は、ディスプレイを 6 領域に分割し、そのうち 1 領域をランダムに選び視覚刺激することを計 96 回行った。試験刺激は、3 種類の背景模様と 3 種類の形状の組み合わせで計 9 種類の視覚刺激をランダムに提示することを計 90 回行った。これらの刺激をマウスの左視野に提示し、視覚刺激中のマウス大脳皮質応答を、内因性光信号イメージング法により計測した。計測した大脳皮質応答から視覚インパルス応答行列を作成し、式(1)の逆問題を解くことで網膜像を推定した。

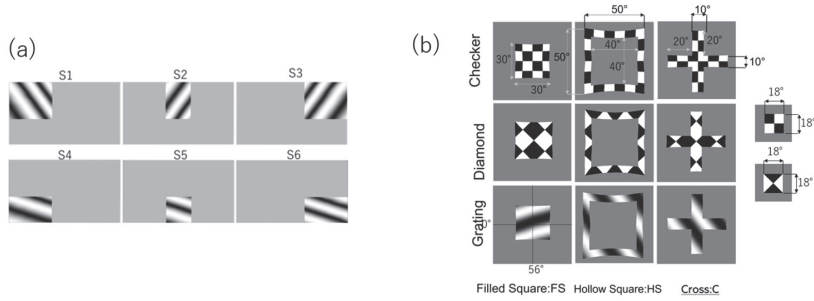


図 1 視覚刺激. (a) 訓練データ視覚刺激. (b) 試験データ視覚刺激.

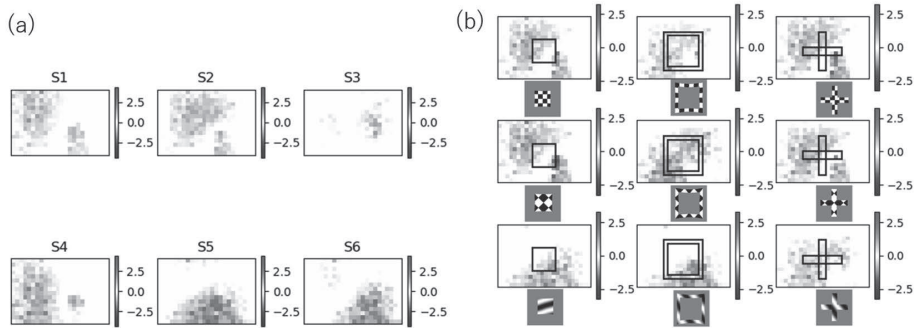


図 2 推定網膜像. (a) 訓練データの推定網膜像. (b) 試験データの推定網膜像

4. 結果

図2に推定された網膜像を示す. 図中の赤色の領域が, 提示画像によって刺激されたと推定された網膜領域を表す. 図2(a)より, 訓練データ(画面6分割画像)については, 推定網膜像と実際の視覚刺激の間におおまかな対応関係がみられた. 一方, 試験データ(図2(b))については, 推定網膜像は実際の刺激画像と大きく異なっていた.

5. 考察

訓練データの視覚刺激は概ね推定できた. しかし, 試験データについては推定像が刺激像と大幅に異なっていたため, 汎化性能に問題があると考えられる. その原因の一つとして訓練データへの過剰適合が考えられる. また, 本実験で用いた訓練データで得られる空間解像度が低く, 試験データの網膜像を推定するのに必要な情報が得られなかった可能性がある. より細かく画面を分割した訓練データを用いることなどにより, 視覚デコーディングの性能が高くなる可能性がある.

6. まとめ

本研究では視覚系の生理・解剖学的知見に基づいた新規視覚デコーディング法を開発した. この手法を, 視覚刺激に対するマウスの視覚野の内因性光信号イメーシングデータに適用することにより, その性能や問題について検討した. その結

果, 訓練データの網膜像は概ね推定できたものの, 試験データについては実際の刺激パターンと大きく異なっていたことから, 汎化性能に問題があることが分かった. 今後は, 訓練データの再検討が必要である. また, 本研究では視覚刺激中の眼位変動を補正できなかったため, 対応する必要があるだろう.

文献

- 1) R. Togawa, M. Nakao, and N. Katayama, "Estimation of Retinotopic Map of Awake Mouse Brain Based upon Retino-Cortical Response Model," in *2021 43rd Ann. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Bio. Soc (EMBC)*, Nov. 2021, pp. 4092–4094. doi: 10.1109/EMBC46164.2021.9630950.
- 2) Yoshida, Y., Nakao, M., & Katayama, N. (2018). Resting-state functional connectivity analysis of the mouse brain using intrinsic optical signal imaging of cerebral blood volume dynamics. *Physiol. Meas.*, 39(054003), 2018., doi: 10.1088/1361-6579/aac033
- 3) H. Zou and T. Hastie, "Regularization and variable selection via the elastic net," *J R Statist Soc B* 67 (2), pp.301-320. 2005, doi: 10.1111/j.1467-9868.2005.00527.x