

超高磁場 7 テスラ MRI 環境対応の全自動触覚機械刺激提示システムの開発

Development of MRI-Compatible Automated Mechanical Tactile Stimulation System for 7T MRI

正 楊 家家 (岡山大)

Jiajia Yang

Cognitive Neuroscience Lab, Graduate School of Interdisciplinary Science and Engineering in Health Systems, Okayama University

3-1-1 Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan.

Key Words : Tactile Stimulation System, 7T MRI, Neuroimaging

1 背景

脳は、膨大な数の神経細胞が多段階の階層構造をもつ複雑な生体情報処理システムである。脳の機能素子である神経細胞が可塑的なシナプス結合を介して神経連絡を形成している。さらに大脳皮質層（レイヤー）内・間の特徴的な神経連絡の繰り返しによってより複雑な神経回路が構築され、高度な情報処理を可能にしている⁽¹⁾⁽²⁾。近年、認知や学習などの高次脳機能や神経疾患の特定の症状が、大脳皮質における階層的領野間相互作用を中心とする予測符号化理論によって説明されつつある。具体的に、大脳皮質の各領域内の6層構造の各層が特定の情報処理を行い、その計算結果に基づく多領域間のフィードフォワード・フィードバックの情報伝達が高次脳機能を実現し、その破綻が神経疾患を引き起こすと考えられる。

コモンマーモセットはヒトと同じ霊長類に属し、遺伝的・神経解剖学的にヒトに比較的近縁な動物である。その一方で、脳サイズが小さく、脳構造が比較的平滑であるため、高解像度な神経計測や全脳ネットワーク解析に適している。近年は、

遺伝子改変技術やレイヤーfMRIなどの先端手法を組み合わせた研究が急速に進展し、ヒト脳機能の理解や神経疾患モデルとしての重要性が高まっている。筆者は、ヒトとマーモセットの両方を対象とするレイヤー脳機能イメージング研究を進めており、fMRI信号から領域内と領域間の入出力情報を解読する超階層解読モデルを確立し、脳機能ダイナミクスを超階層的に計測する手法の開発を目指している。一方で、MRI装置は常に高磁場を発生しており、電子機器や金属製品などが持ち込めないため、MRI対応の刺激提示システムの開発が遅れている。筆者は、長年に渡って複数のMRI対応の多感覚刺激提示システムの開発に成功しており、ここではマーモセットなどの子型動物用の超高磁場7テスラMRI環境対応の全自動触覚機械刺激提示システムを紹介する。

2 システムの構成

本システムは、大きく刺激部と駆動部に分けることができる(図1A)。刺激部はMRIボア(直径110mm)内に設置し、ボアから約1000mm離れた場所に駆動部を設置した。図1Bに示すように、マーモセットの手と前腕の2箇所を刺激でき

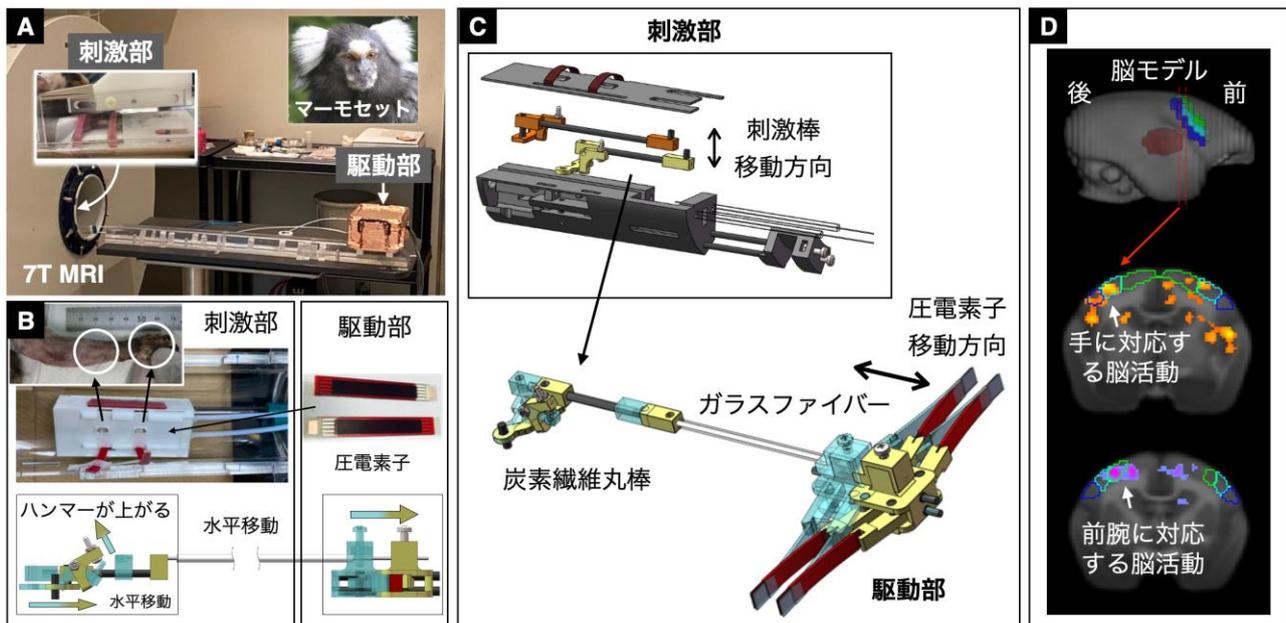


図1 全自動触覚機械刺激提示システムとマーモセットの実測脳活動データ

るユニットを作成したが、最大6箇所への拡張は可能である。それぞれの刺激ユニットの駆動は、セラミック圧電素子4枚によって実現した。図1Cに示すように、圧電素子の水平移動をガラスファイバーと炭素繊維丸棒の組み合わせにより、刺激棒を持ち上げる移動へ変換され、マーマセットの体部位に触覚機械刺激の提示を実現した。さらに、このシステムを用いた脳活動の計測を実施し、図1Dに示すようにマーマセットの手と前腕に対する脳活動領域の同定に成功した。

3 本システムの特徴

従来のMRI対応の触覚刺激提示システムは、MRI操作室のコンプレッサーから圧縮された空気をゴムチューブを経由して、MRI装置中心部に空気を噴射される形式となっている。空気式刺激は、1) 空気の広がりによる刺激部位が不正確、2) 刺激する2箇所の距離が長い、3) 刺激の提示時間制御が困難、の3つの課題があげられる。本システムでは、MRI装置近傍で使えるセラミック圧電素子を駆動源として、炭素繊維丸棒を用いた伝達機構と3Dプリンタを用いてマーマセットの体に合わせて刺激部を製作し、前述の3つの課題を克服した。本システムは、複数箇所において直径1mmの刺激棒を配置することにより、刺激部位の正確性が担保され、最短距離が2mmの2箇所刺激を実現した。また、圧電素子はミリ秒オーダーの制御が可能であり、高時間精度の刺激提示を可能にし、多種多様な小動物対象のMRI研究への応用

が期待でき、同様な設計仕組みでヒト対象のMRI研究への展開も可能である⁽³⁾。

謝辞

本システムは、梅田達也教授(山梨大学)、今井宏彦特任准教授(岐阜大学)、山本洋紀助教(京都大学)、福永雅喜特任教授(生理学研究所)、于英花特任准教授(岡山大学)、王晨宇研究員(岡山大学)との共同研究の成果であり、ここに深く感謝の意を表す。また、本研究は、筆者が代表者を務めるJST創発的研究支援事業およびAMED脳神経科学統合プログラム(脳統合)の支援を受けて実施された。

文献

- (1) 楊家家, 于英花 (2019) 超高磁場・高精細レイヤーfMRI技術によるヒト大脳皮質層活動の可視化。Medical Science Digest 45(7), 418-421.
- (2) Yang J, Huber L, Yu Y, Bandettini PA (2021) Linking cortical circuit models to human cognition with laminar fMRI. Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 128, 467-478.
- (3) Wang C, Imai H, Fukunaga M, Yamamoto H, Yu Y, Seki K, Hanakawa T, Umeda T, Yang J (2025) Ultrahigh-Field MR-Compatible Mechanical Tactile Stimulator for Investigating Somatosensory Processing in Small-Bodied Animals. NMR in Biomedicine. 38:e70105.