

# 研究報告書

## 「BMIを介した観察者間の知覚共有技術の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成21年10月～平成25年3月

研究者: 林 隆介

### 1. 研究のねらい

他者とコミュニケーションをとるためには、言語による説明やジェスチャなど、何らかの形で身体部位を動かす必要がある。こうした意思伝達行動は健常者に容易であっても、ALSの発症や脳・神経損傷などにより運動麻痺や発話障害を負った患者には著しく困難である。運動機能障害者にとって、Brain-Machine-Interface (BMI)技術を通じて、神経情報から復号化した視覚情報を他者と共有することができれば、コミュニケーションの機能回復が支援され、生活の質が大幅に向上すると期待される。また、健常者にとっても、脳内でイメージされる視覚情報を通信し、視覚表象を共有することができれば、コミュニケーションがより緊密となり、高度で的確な協調作業が可能となろう。

本研究ではヒトに近い脳と視覚機能をもつマカクザルを動物モデルにして、個体間でBMIを介して視覚情報を共有するための技術開発を行った。すなわち、物体認識を担う下側頭葉の多数のニューロンから活動電位を同時記録し、脳内の視覚表象をどの程度正確に復号化できるか検証をおこなった。また、側頭葉の異なる領域から神経活動を広範囲に記録することにより、脳内の物体情報処理(とくに顔画像処理)メカニズムを解明する研究にもあわせて取り組んだ。

復号化した視覚情報を共有する手法としては、視覚情報をディスプレイに表示することがまず考えられるが、視覚共有インタフェースとしてディスプレイの介在は理想的とはいえない。我々の意識的な視覚認識は、脳・神経活動によって生起することから、適切に神経活動を誘発することができれば、視覚を生成することも理論的には可能である。実際、サル(Afraz et al, 2006)やヒト(Parvizi et al, 2012)の皮質電気刺激により、画像カテゴリの判断を誘導したり、顔の知覚が変容しうることが報告されている。そこで、皮質電気刺激による脳情報の制御技術に取り組むとともに、脳情報の解読技術と組み合わせることにより、脳から脳へ直接視覚情報を通信する知覚共有システムの実現を研究の最終目標とした。

### 2. 研究成果

#### (1)概要

本研究では、同一の視覚イメージや物体認知判断の伝達・共有を支援するインターフェース開発を目指して、動物モデルを用いた実験を行った。実験では、視覚物体認識を担う下側頭葉にマイクロ電極アレイを3つ(電極総数224本)埋め込み、さまざまな物体画像の観察中に誘発される神経活動電位を多チャンネル同時記録した。この結果、下側頭葉では物体画像がカテゴリごとにクラスタ化した形で表現されていることが確認され、特に顔情報が下側頭葉の広範囲なネットワークを介して時間発展することが明らかになった(Hayashi, 2012)。さらに、記録保存したデータを100ms毎に読み出して得られる神経活動パターンを線形判別分析す

ることで、120種類の画像のうち、どの画像が各時点で提示されていたのか、80-90%の精度で判別することに成功した。また、神経活動パターンと観察画像の特徴量との間の回帰分析を行うことで、神経活動から観察画像の大まかな形状を復元することに成功した。

この他、観察画像の高精度判別が可能になったことを利用して、ロボットハンドなどのアクチュエータ制御に同技術が利用であることを示す実証実験にも取り組んだ。

つぎに、解読した脳情報を他者へ伝達する手段として、マルチチャンネル皮質電気刺激法にも取り組んだ。計測に用いたマイクロ電極アレイへの電気刺激をとおして、どのような知覚変化が生じるか検証することを目指した。動物モデルを用いた皮質電気刺激実験には、感覚情報が適切に提供できたか客観的に判定する行動指標が必要となる。そこで、phase-shift motion を利用した両眼視野闘争刺激を開発し、新たな実験手法を考案した。同刺激は、物体画像の位置を変えぬまま、運動視刺激を提示できる特徴があり、反射的に生じる眼球運動を観察することにより、左右の眼に別々に提示された画像のうち、どちらの画像を意識的に知覚しているか客観的に判定できることを明らかにした(Hayashi & Tanifuji, 2012)。

こうした要素技術を組み合わせ、一方の個体の知覚状態を読みだしたのち、電気信号に再コーディングし、他方の個体の脳に入力することで、二個体が brain to brain interface を介して同じ知覚状態を共有するシステムの実現を最終目標とした。

## (2) 詳細

### (脳情報の復号化)

物体認識に関わる視覚情報は、腹側経路とよばれる下側頭葉に至る各脳領野を経由する過程で、階層的に情報処理される。下側頭葉のニューロンは中程度に複雑な図形特徴に対し選択性を持つことが知られており、物体像はそうした多数のニューロン活動の集合によって分散的に表現されている。特定の画像によって誘発されるN個のニューロンの応答パターンは、N次元のベクトル空間内の部分空間に限定されることから、各画像が構成する部分空間を分離する超平面を同定できれば、逆に神経活動パターンから現在、知覚している画像を復号することが可能となる(図1左)。

実験では、剣山型マイクロ電極アレイを3つ(電極総数224本)を動物モデルの下側頭葉に埋め込み、顔、身体、たべもの、人工物といったさまざまな物体カテゴリを含む120種類の画像を提示した際に誘発される神経活動を記録した。各画像に対応する神経活動パターンを多次元尺度構成法に基づきプロットすると、下側頭葉のニューロンはピクセルレベルでの画像類似度ではなく、物体カテゴリの類似度をより表現していることが確認できた(図1右)。そして、100ms 毎に読み出した神経活動データに対し、観察画像を教師ラベルとした線形判別分析を行うと、120種類の画像のうち、どの画像を提示したか80-90%の精度で正確に判別できることを明らかにした。

さらに、神経活動パターンと観察画像の低次元特徴量表現との間の写像関係を回帰分析することにより、観察画像の大まかな形状を神経活動だけから復元することに成功した。わずか100ms の神経活動だけから観察画像の判別と復元が可能であることは、本研究が採用した計測手法がリアルタイムでの視覚情報通信に適した手法であることを示している。

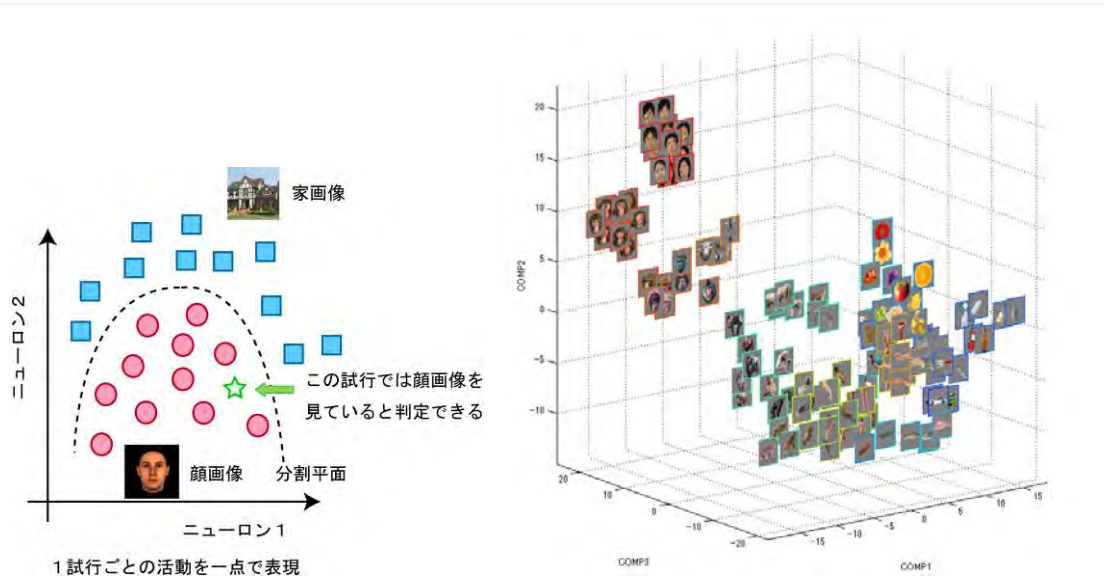


図1: 左 神経活動パターンの判別、右 多次元尺度構成法に基づく下側頭葉の画像表現

観察画像の高精度判別が可能になることを利用して、ロボットハンドなどのアクチュエータ制御にも同技術が利用できることを示す実証実験にも取り組んだ。具体的には、グー、チョキ、パーの異なる手の形を撮影した画像を神経情報から判別し、その結果に基づきロボットハンドの手の形状を制御することができた。このことは、ロボットハンドを観察しながら、ビジュアルフィードバックによって、BMI 制御できる可能性を示唆している。

この他、さまざまなヒトの顔をさまざまな角度から撮影した画像を使い、下側頭葉の3つの異なる領域で、顔情報処理がどのように異なるか検証した。この結果、下側頭葉の後部では、顔の個人情報の違いに関わらず、顔の方位だけを選択的に表現しているのに対し、下側頭葉の前部や中央部では、顔の方位情報だけでなく、個人情報も含めた情報表現を行っていることを明らかにした。特に、前部領域では、顔の一方位ではなく、鏡対称な方位を表現していることが明らかになった。

#### (脳情報の制御法)

神経記録に利用したマイクロ電極アレイのうち、電極が酸化イリジウムでできたタイプは、その低いインピーダンス特性から、神経活動の記録とともに、電気刺激を行うプローブとしても利用できる。本研究では、64本の電極を独立に電気刺激できる実験系を構築し、一個体から神経活動記録を行いながら、神経活動をトリガーとして他方の個体を皮質電気刺激することを可能にした。これまでの研究では、単一電極による電気刺激しか行われてこなかったが、本研究では、多電極による同時電気刺激が視覚物体認識にどのような影響を与えるのか検証する実験に取り組んだ。

動物モデルを用いた皮質電気刺激実験の困難な点として、適切な視覚情報提示が行われたか否かを口頭報告によって検証できないことがあげられる。また、ボタン押し等の応答を用いる場合でも、単なるオペラント条件付け(動物がジュースなどの報酬欲しさに、電気刺激パターンとボタン押し応答との間の連合を学習してしまうこと)に陥らぬよう、これを原理的に回

避する客観的な行動指標に基づく実験パラダイムを構築する必要がある。ここで注目したのが、両眼視野闘争とよばれる知覚交代現象である(Blake & Logothetis, 2002)。両眼視野闘争とは、左眼と右眼に全く異なる画像が提示されるとき、どちらか一方の画像だけが交互に意識的に知覚される知覚体験をさす。

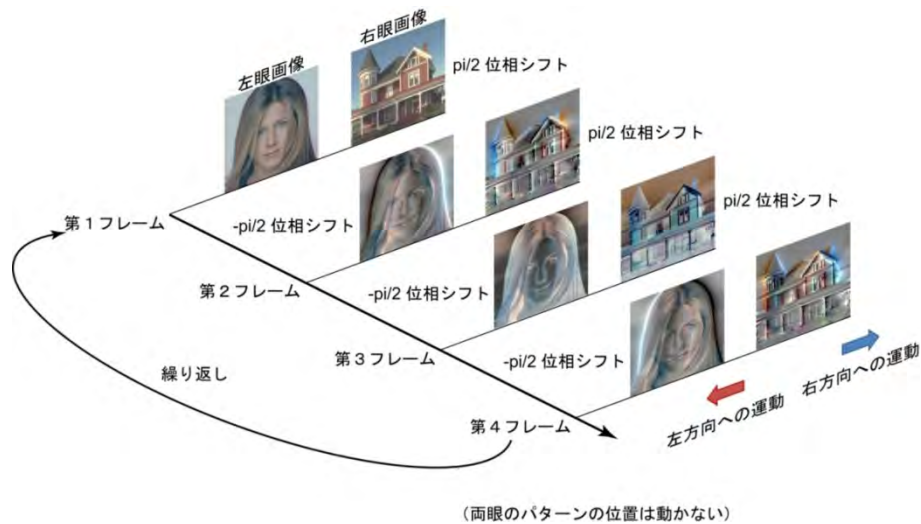


図2: phase-shift motion を利用した両眼視野闘争刺激の開発

本研究ではこの両眼視野闘争中の動物モデルの知覚状態を、自発応答に頼ることなく、判定できる新しい実験手法を開発した。開発したのは、phase-shift motion を利用した両眼視野闘争刺激である。同刺激は、物体画像の位置を変えぬまま、運動視刺激を提示できる特徴があり、一方の眼の画像は左向きに、他方の眼の画像は右向きに動くように構成された。この刺激を観察すると画像の動きにつられて視運動性眼振と呼ばれる反射的な眼球運動応答が生じるが、この眼球運動の振動パターンは両眼視野闘争する画像のうち、今見えている画像の運動方向に依存して変化することを、ヒトを使った心理実験によって明らかにした。この刺激を使えば、サルの眼球運動パターンを比較することで、どちらの眼の画像が意識的に知覚しているか判定できるので、皮質電気刺激による知覚の変化を客観的に評価することが可能となる。

各個体において、視覚情報の復号化法と皮質電気刺激による制御手法を確立したのち、最終的には、2頭の個体間で、一方の視覚情報を復号化したのち、同じ視覚体験が生起するよう、他方の個体へ電気刺激を行い、物体認識を共有できるシステム構築を目指している。

### 3. 今後の展開

神経活動から復元する観察画像の復元精度向上のため、埋め込むマイクロ電極アレイの数を5つに増やし、記録データの大規模化(480次元)を図るとともに、実験に利用する画像を従来の100-200枚規模から、数百万—数千万枚規模への拡張を図る。そして、大規模・多層ニューラル・ネットワークによって実装される最先端のコンピュータ・ビジョン・アルゴリズム(deep learning)を利用することで、下側頭葉のニューロンが符号化する視覚情報に則した画像復元アルゴリズム

ムの開発を目指す。また、現在進行中の皮質電気刺激実験を完遂し、電気刺激による視覚の変化を検証するとともに、復号化した視覚情報を伝送する脳情報通信システムの実装をすすめる。

#### 4. 自己評価

動物モデルの下側頭葉皮質表面から神経活動を大規模かつ高密度に記録するために、実験装置の多チャンネル化、小型化をおこなった。この結果、慢性埋め込み電極を利用した神経活動電位記録の実験系としては、世界でも最多クラスの記録を達成することができた。こうした技術的課題の克服により、これまで手に入らなかった大規模データを使った情報復号化を行い、BMI技術の有用性、ならびに従来のディスプレイを介した視覚情報共有システムの実証を行うことができた。一方で、慢性埋め込み電極を使った皮質電気刺激実験の手法は、世界的にもほとんど確立しておらず、実験の実施に想定以上の時間がかかってしまった。今後も知覚共有技術開発を継続し、本研究の最終目標である個体間の脳情報直接通信の達成を目指したい。

#### 5. 研究総括の見解

課題目標はほぼ達成された。脳・神経活動から感覚情報を解読するデコーダ部分については十分な成果を収め、皮質電気刺激による感覚情報共有についても枠組みを構築したが、両要素の組み合わせが今後の課題である。しかし、枠組みが与えられたため、この部分についても、課題の達成は時間の問題であると考えられる。

本研究は他者と脳情報を共有する技術の開発を目標とし、感覚情報のデコーダ開発の基礎データ収集、複数の皮質刺激電極を通じて脳情報を再現するための技術開発を行った。いわば脳から脳への通信であるが、このような BMI を介した直接的な意思伝達手段は、ALS などの神経難病、脳・神経損傷などによる運動麻痺や発話障害の患者さんの機能回復支援として、生活の質を大幅に向上させると期待される。

マカクザルに、多数の記録用・刺激用電極を装着し、個体間でBMIを介して視覚情報を共有するための技術開発を行った。視覚物体認識を担う下側頭葉に微小電極アレイ(電極総数224本)を埋め込み、さまざまな物体画像の観察中に誘発される神経活動電位を多チャンネルで、かつ同時に記録し、物体画像がカテゴリごとにクラスタ化した形で表現されていることを確認した。特に顔情報が下側頭葉の広範囲なネットワークを介して時間発展することが明らかになった。さらに、記録保存したデータを 100ms 毎に読み出して得られる神経活動パターンを線形判別分析することで、120 種類の画像のうち、どの画像が各時点で提示されていたのか、80-90%の精度で判別することに成功した。また、神経活動パターンと観察画像の特徴量との間の回帰分析を行うことで、神経活動から観察画像の大まかな形状を復元することに成功した。次に、マルチチャンネル皮質電気刺激法に取り組み、皮質刺激により、適切に情報が提供できたか否かを客観的に判定する行動指標として、特殊な両眼視野闘争刺激を新たに開発した。この方法は、物体画像の位置を変えぬまま、運動視刺激を提示できる。反射的に生じる眼球運動観察により、左右眼に別々に提示された画像のうち、どちらの画像を意識的に知覚したか客観的に判定できる。

こうした要素技術を組み合わせ、一方の個体の知覚状態を読みだしたのち、電気信号に再コーディングし、他方の個体の脳に入力することで、二個体が同じ知覚状態を共有するシステムを実現するが、3 月末までに皮質刺激系の実験の進展が見込まれる。

## 6. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |  |
|--|
| 1. <u>R. Hayashi</u> , Y. Sugita, S. Nishida, K. Kawano, “How motion signals are integrated across frequencies: Study on motion perception and ocular following responses using multiple-slit stimuli”, <i>Journal of Neurophysiology</i> , 2010, vol.103, no.1, pp.230–243. |
| 2. <u>R. Hayashi</u> , M. Tanifuji, “Which image is in awareness during binocular rivalry? Reading perceptual status from eye movements”, <i>Journal of Vision</i> , 2012, vol.12, no.3, article 5, pp.1–11.   |
|  |
|  |
|  |

### (2) 特許出願

研究期間累積件数: 1件

1.

発 明 者: 林 隆 介

発明の名称: 画像生成装置、画像生成法、及びプログラム

出 願 人: 独立行政法人 産業技術総合研究所

出 願 日: 2010/12/21

出 願 番 号: 2010-284437

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

#### 学会発表

- R. Hayashi, “Hierarchical processing of face across the surface of macaque inferior temporal cortex: multi-electrode array recording study”, Neuroscience 2012 (the 42<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroscience), New Orleans, USA, Oct 2012.
- R. Hayashi, “The effect of phase-shift motion on object-selective responses in the inferior temporal cortex: a case study of multi-electrode recording from an awake monkey”, Neuroscience 2011 (the 41<sup>st</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroscience), Washington DC, USA, Nov 2011.
- R. Hayashi, M. Tanifuji, “A new binocular rivalry stimulus for reading out perceptual alternation of object image from reflexive eye movement”, Neuroscience 2010 (the 40<sup>th</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroscience), San Diego, USA, Nov 2010.
- 林 隆介,「サル下側頭葉における顔情報表現: 多電極アレイを使った慢性記録の事例」, 第 35 回 日本神経科学大会, 名古屋, 2012 年 9 月.
- 林 隆介,「位相シフト運動視刺激によって誘発されたサル下側頭葉のオブジェクト選択的応答: 多電極アレイを使った慢性記録の事例」, 第 34 回 日本神経科学大会, 横浜, 2011 年 9 月.
- 林 隆介, 谷藤 学,「両眼視野闘争下で知覚的優位な物体画像を判別する新しい心理物理

手法」, 第 33 回 日本神経科学大会 (Neuro2010), 神戸, 2010 年 9 月.

#### 招待講演

- 林 隆介, 「網羅的神経活動記録による脳情報の解読とコミュニケーション利用の可能性について」, 第 2 回社会神経科学研究会, 生理学研究所, 2013 年 1 月.
- 林 隆介, 「サルTE野における脳情報の復号化およびその応用」, コンピュータサイエンス専攻コロキウム, 筑波大学, 2012 年 11 月.
- 林 隆介, 「脳接続型人工視覚技術の可能性について」, つくば半導体コンソーシアム, 産業技術総合研究所 臨海副都心センター, 2010 年 12 月.

#### 原稿監修

- 林 隆介, 「知能と心の科学」, Newton別冊, 2012 年 12 月発行, pp.58-61, 2012.
- 林 隆介, 「脳と意識」, Newton, 5 月号, pp.36-39, 2012.