

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23650225

研究課題名(和文) 社会的相互作用を実現する脳間神経相互作用の解明

研究課題名(英文) Inter-brain neural interaction in social communication

研究代表者

柳川 透 (YANAGAWA, TORU)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・研究員

研究者番号：80568858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、社会的相互作用と相関する2頭のサルの脳間ネットワークを抽出することを目的としていた。そのため本研究では、2頭のサルからElectrocorticogramを同時計測するシステム、脳内ネットワークの抽出手法、社会的相互作用と相関する脳内表象の抽出手法、という3つ要素手法の確立に成功した。今後これらの要素技術を統合し、社会的相互作用と相関する2頭のサルの脳間ネットワークを抽出行う。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study was to develop a method to extract inter-brain network between two monkeys when they have social interaction. To achieve the goal, we developed three element techniques: 1) A system to record electrocorticogram (ECoG) from two monkeys simultaneously. 2) A method to extract intra-brain network. To make a task simple, we recorded ECoG during conscious and unconscious conditions. We found 4 frequency-specific large-scale networks with unique interaction patterns which related to conscious and unconscious states. 3) A method to extract neural representation of social suppression behavior when two monkeys performed a social food-grab task. We found the spatiotemporal pattern of the information of social hierarchy on the multi cortical regions which reflects a social context-generation process to produce social suppression behavior. In the future work, I will integrate those element techniques and develop the method to extract inter-brain network between two monkeys.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経科学、融合社会脳科学

キーワード：Electrocorticogram ネットワーク 社会性

1. 研究開始当初の背景

近年、社会的相互作用の神経メカニズムを捉えるために会話や動作の模倣などの社会的相互作用を行っている2人からの脳活動の同時計測が fMRI (Stephans et al. 2010, Schippers et al. 201) や Electroencephalogram (EEG) (Dumas et al. 2010) で行われている。これらの研究から社会的相互作用中の2つの脳の神経活動の間には、同期や因果的な相互作用が存在することが明らかになってきた。しかし計測手法の時空間分解能の制限によりその詳細はまだよくわかってない。本研究は Electrocorticogram (ECoG) を計測することにより fMRI や EEG とは異なる時空間分解能のレベルで神経活動の相互作用を捉える。また先行研究では計測手法の制限により行動が制限されており不自然な環境下での社会的相互作用をみていた。本研究は、それらの問題を克服し、自然な状況で相互作用する2頭のサルから行動、環境、神経活動を同時計測する枠組みと、社会的相互作用中に2頭のサルの間でおきている脳間神経相互作用を1試行の精度で捉える手法を提案する。

2. 研究の目的

本研究は、当初、社会的相互作用と関連する二頭のサルの脳間ネットワークを抽出することを目的としていた。そのために本研究では以下の3つの要素技術の確立することを目的とした。

2頭のサルから ECoG を同時計測するシステム

脳内ネットワークの抽出手法

2頭のサル間の脳間ネットワークを計算する前段階として、一頭のサルの脳内ネットワークを抽出する手法の開発を行った。

社会的相互作用と関連する脳内表象の抽出手法

より自然に近い状態の社会的相互作用の脳状態を見るためには、サルに与える行動制限は可能な限り少なくすることが重要であると考えられる。しかし、サルが比較的自由に動ける複雑な環境下におけるデータ解析の手法はまだ十分に確立されていない。そこでその手法の開発を行った。

3. 研究の方法

2頭のサルから ECoG を同時計測するシステム :

2頭のニホンザルの脳の硬膜下にインプラント手術により ECoG 電極 (Unique Medical, Tokyo, Japan) を入れた。電極は、128チャンネルあり、片半球の前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉の皮質表面、及び内壁の視覚野、帯状回、及び前頭前野の一部を覆っている。2台の Cerebus (Blackrock Microsystems, USA) を同期させることによ

り、2頭のサルから ECoG を同時計測するシステムを構築した。

脳内ネットワークの抽出手法 :

実験課題を簡単にするために、覚醒下及び無意識下におけるサルの脳から ECoG を記録し、覚醒下及び無意識下の脳内ネットワークの抽出を行った。無意識状態として2種類の麻酔状態 (Katamine + Medetomidine, Propofol) 及び睡眠状態の3条件を用意した。電極間の相互作用を spectral Granger causality によって推定した。

社会的相互作用と関連する脳内表象の抽出手法 :

2頭のニホンザルに社会的衝突を伴うエサとり課題を行わせた。2頭のサルの距離を近づけて互いの共有空間にエサを置くと、サルは相手ザルが社会的に高位のときはエサ取りを抑制し、下位のときはエサを取るという行動が観察された。デコーディング手法を用い、ECoG データ内のどの電極・時間帯・周波数帯域に社会的抑制行動と関連する情報が含まれていたかを調べた。

4. 研究成果

2頭のサルから ECoG を同時計測するシステム :

社会的相互作用を行っているときの2頭のサルから、ECoG を同時計測するシステムを確立に成功した。

しかし、2頭のサルの脳間ネットワークを計算する前段階として、1頭の脳内ネットワークの計算手法、及び、社会的相互作用という複雑な課題下におけるサルの脳内表象を抽出する手法を確立する必要があることに気づき、以下2つの研究を行った。

脳内ネットワークの抽出手法 :

覚醒状態、無意識状態 (麻酔状態および睡眠状態) それぞれの状態における電極間のネットワークを spectral Granger causality (SGC) を用いて推定した (Re-reference 後の電極数 : 62、電極ペア数 : $62 \times 61 = 3782$ 、周波数 : 6-100 Hz)。電極は、8つの脳領域にグループ分けした。覚醒状態と無意識状態における脳内ネットワークの変化を明らかにするために、全周波数および脳領域間ごとの SGC を使い、覚醒状態と麻酔状態を弁別する識別器 (サポートベクターマシン) をつくったところ、全領域間においてほぼ 100% の精度で覚醒状態と麻酔状態を弁別できることがわかった。これは、覚醒状態と無意識状態の脳内ネットワークが、領域間レベルで大きく変化していることを意味する。

識別器の重みを調べたところ、覚醒状態の弁別に貢献している周波数はアルファバンド (8-12 Hz) 及びベータバンド (12-30 Hz) に集中し、無意識状態の弁別に貢献している周波数帯はシータバンド (6-8 Hz) 及びガン

マバンド (30-100 Hz) に集中していた。また、SGC は領域間の双方向の相互作用を推定できるのだが、重みには2つの方向の間に大きな差が見られた。

大量の変数の中から意味のある構造を発見するために Parallel factor analysis (PARAFAC) を用いた。PARAFAC は、主成分分析のようなデータ圧縮の手法で、多次元データに対してデータ圧縮を行うことができる。全電極ペア及び全周波数の SGC に付与された識別器の重みが構成する脳内ネットワークに、PARAFAC を適用したところ、脳内ネットワークのコンポーネントを4つ抽出することに成功した (図1)。覚醒状態と相関するネットワークがアルファバンド (Network 2) およびベータバンド (Network 3)、無意識状態と相関するネットワークがシータバンド (Network 1) およびガンマバンド (Network 4) に見つかった。各ネットワーク・コンポーネントはユニークな情報の流れをもっており、Network 2 は、視覚野から前頭葉に情報が流れている。Network 3 は、体性感覚野及び運動野から、他の領野、とくに前頭前野に情報が流れている。これらの結果から、意識のネットワークは、低次の領野 (感覚野および運動野) から高次野 (前頭前野) に向かう情報流によって特徴づけられると解釈できる。一方 Network 1 は、前頭前野から低次領野に情報が流れていた。Network 4 には目立った構造は見つからなかった。この結果は、無意識状態は、遅い周波数 (シータバンド) が作る前頭前野から低次野への情報流と、速い周波数 (ガンマバンド) が作る無方向のネットワークによって特徴付けられると解釈できる。

従来の研究では、意識があるときと意識がないときで、脳内ネットワークが周波数領域で、どのように変化しているのかがよく分かっていなかった。本研究の新奇性は、意識状態および無意識状態それぞれに対して、周波数帯および情報流において固有な特徴をもつ脳内ネットワークが存在することを明らかにしたことにある。

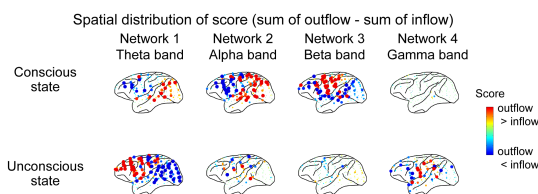


図1 意識状態及び無意識状態と相関する4つのネットワーク・コンポーネント

社会的相互作用と相関する脳内表象の抽出手法:

社会的衝突を伴うエサとり課題には、3つのパラメータがある。一つ目のパラメータは、サル同士の距離で、2頭のサルが隣同士に座

っていて距離が近いときが衝突あり条件で、向かい合って座っていて距離が離れているときが衝突なし条件となる (図2)。衝突あり条件では、2頭の共有する空間 (図2、緑色の領域) にエサを置くと、競合が起きる。2つ目のパラメータとして、ペアとなるサルを2頭用意し、ターゲットのサル (ECoG を記録しているサル) がペアのサルよりも弱いときが Submissive 条件、ターゲットのサルがペアのサルよりも強いときが Dominant 条件となる。また、3つ目のパラメータとして、ターゲットのサルのペアのサルに対する左右の位置があり、片半球に入っている ECoG 電極に対して、相手サルが同側にいるとき (同側条件) と反対側にいるとき (反対側条件) がある。

また、社会的衝突を伴うエサとり課題には、Waiting (待っている時間帯)、Food preparation (実験者がエサを用意している時間帯)、Food show (実験者がエサをサルに見せている時間帯)、Movement (サルがエサに手を伸ばしている時間帯)、Reward (サルがエサを食べている時間帯) の5つのイベントがある (図2)。本実験では、サルが運動をしていない最初の3つのイベントを解析した。

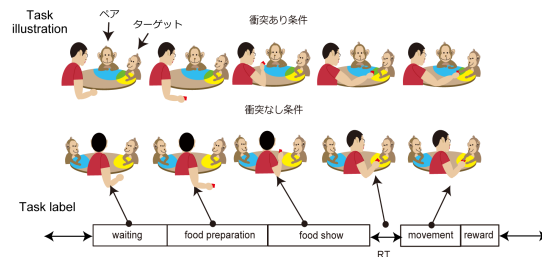


図2 社会的衝突を伴うエサとり課題

記録した ECoG から短時間パワースペクトラム (短時間窓: 200 msec、シフト時間: 150 msec、周波数: 4-160 Hz) を計算し、さらに、それら短時間窓を 1000 msec ずつまとめて長時間窓を用意した (シフト時間: 150 msec)。電極を7つの脳領野にグループ分けし、時間 (長時間窓ごと) × 周波数 (4-160 Hz) × 空間 (脳領野ごと) のパワースペクトラムをまとめて特徴量ベクトルとして、Submissive 条件と Dominant 条件を弁別する弁別器 (サポートベクターマシン) を、衝突あり・同側条件、衝突あり・反対側条件、衝突なし条件それぞれに対してつくった。

その結果、衝突あり・反対側条件のみ、顕著に Submissive 条件と Dominant 条件を弁別する識別器をつくることができた。すなわち ECoG は、Submissive 条件と Dominant 条件という社会的文脈の情報を持っていた。このとき情報量の時間変化をみると、情報量 (= 弁別器の弁別率) は、Waiting イベントから Food show イベントに近づくにつれて上昇し、社会的衝突による緊張の上昇と

関連していた。また、脳領域ごとの情報量を見ても、エサがまだ現れていない Waiting イベント及び Food preparation イベントでは、Parietal 及び Somatosensory-motor cortex が有意に社会的文脈の情報量をもっていた。そして、Food show イベントの開始とともに、有意な情報量をもつ脳領域は視覚野及び前頭前野に広がっていくというパターンが見られた(図3)。

社会的抑制行動を実現するためには、脳内に社会的文脈を生成し、適切な行動に結びつける必要があり、本研究は、社会的抑制行動と相関する脳内表象を、複数脳領域にまたがる時空間パターンの変化として抽出することに成功した。

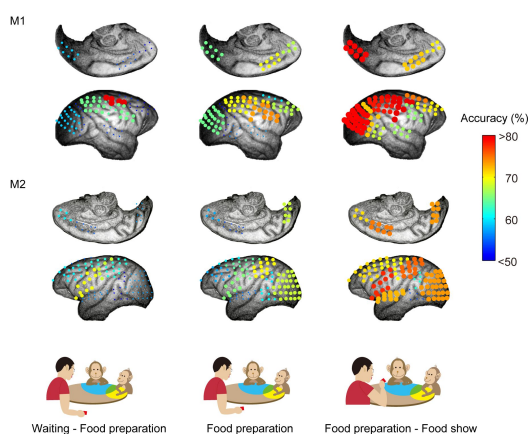


図3 衝突あり・反対側条件における Submissive vs Dominant 条件の弁別率の時間的变化。M1、M2 は2頭のターゲット・サルの結果を意味している。

今後はこれら ~ の要素手法を統合し、社会的相互作用と相関する2頭のサルの脳間ネットワークを抽出する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Yanagawa T, Chao ZC, Hasegawa N, Fujii N (2013). "Large-scale information flow in conscious and unconscious states : an ECoG study in monkeys." PloS One, 8, e80845.

〔学会発表〕(計3件)

Yanagawa T, Hasegawa N, Fujii N. "Embodied global network of consciousness." 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, New Orleans, LA, USA, October 2012.

Oosugi N, Yanagawa T, Fujii N. "Neural mechanism of adaptive social behavior in Macaques." 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, New Orleans, LA,

USA, October 2012.

Osugi N, Yanagawa T, Fujii N. "Decoding cortical representations of social contexts in Japanese macaque", 新学術領域・国際シンポジウム, Tokyo, Japan, 2013

〔その他〕

ホームページ:

<http://neurotycho.org/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳川 透 (YANAGAWA TORU)

独立行政法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・研究員

研究者番号: 80568858