

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870860

研究課題名（和文）様々な意識状態に共通して適用可能な意識メーターの開発

研究課題名（英文）Building a consciousness meter commonly applicable for various conscious states

研究代表者

大泉 匡史（Masafumi, Oizumi）

国立研究開発法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・客員研究員

研究者番号：30715371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：神経ネットワークにおける情報の統合を測る指標である、「統合情報量」を情報理論、情報幾何学の枠組みから新たに導出した。これまで提案されてきた統合情報量の指標は、いくつかの数学的な問題点を抱えていたが、本研究において導出した新しい指標はそれらの問題点を解決したことになる。また、神経ネットワークの解析などで良く使われる、移動エントロピーやGranger因果性などの因果性を測る指標と統合情報量との関係性が明らかになり、統合情報量の直観的な理解が進んだ。提案した新しい指標をヒトのfMRIデータに適用し、意味のない刺激を見ている時は、意味のない刺激を見ている時に比べて統合情報量が低くなることを示した。

研究成果の概要（英文）：We derived novel measures of integrated information from information theory and information geometry, which quantifies integration of information in neural networks. Our measures overcome several mathematical problems that previous measures have. Moreover, it is elucidated how integrated information is related to transfer entropy and Granger causality, which have been widely used in analysis of neural networks. This advances intuitive understanding of integrated information. We applied the proposed measure to human fMRI data and showed that integrated information decreased when people see meaningful visual stimuli compared with that when people see meaningless visual stimuli.

研究分野：理論神経科学

キーワード：意識 意識レベル 情報理論 統合情報理論 情報幾何学

1. 研究開始当初の背景

睡眠や全身麻酔などの意識の消失状態でなぜ意識がなくなってしまうのかは、単純に脳の活動がなくなってしまうからという理由では説明できないことが知られている。例えば、睡眠時の脳は、起きて平静にしている時と同程度の活動量がある (Steriade et al., 2001)。同様に、麻酔や植物状態でも脳活動は残っていることが知られており、てんかんではむしろ通常時よりも活動量が多い。

本研究が意識消失に共通するメカニズムとして着目しているのは「意識がなくなる時、脳は情報を統合する能力を失ってしまう」ということである。これは Tononi によって意識の統合情報理論 (Integrated Information Theory of Consciousness, 以降 IIT と略す) において提唱された仮説である (Tononi, 2004, 2008)。IIT は情報理論の枠組みにおいて、情報が脳内でどれだけ統合されているかを測る統合情報量を定義して、統合情報量が意識レベルと相関するという仮説を提唱している。IIT によると意識とは有るか無いかの二値的なものではなく、連続的に変化し得る量であると考えられている。深い睡眠時などには、局所的な脳活動はあっても、脳全体としての情報の統合が覚醒の状態に比べて急激に下がることによって、意識があたかもなくなってしまうように感じられる、というのが IIT による意識消失の説明である。

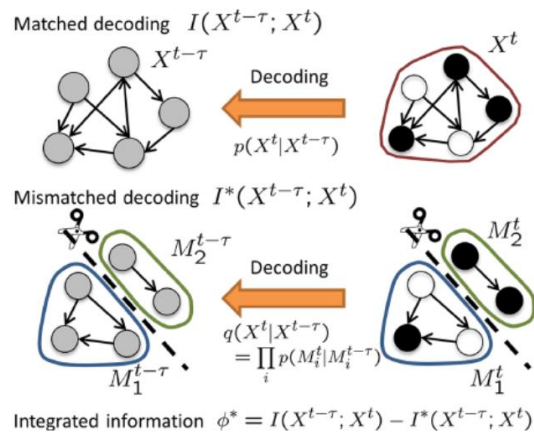
実際、様々な意識消失状態において脳領野間の情報の統合が失われていることを示唆する実験事実は数多く報告されている。特に重要な研究として、睡眠時、麻酔下、植物状態などで意識が失われている時に脳に磁気刺激を行うと、磁気刺激によって誘発された脳活動が全体に伝播しないことを示した研究がある (Massimini et al., 2005; Ferrarelli et al., 2010; Rosanova et al., 2012)。しかしながら、統合情報量は計測が困難であるため、実際に統合情報量を計測し、情報の統合が失われていることを直接示した研究は存在していなかった。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、統合情報量を実際の神経活動のデータから計算する手法の確立をまず行う。そして、その手法を基にして様々な意識の消失状態において統合情報量が意識レベルと相関するかどうかを確かめることを研究の目的とした。

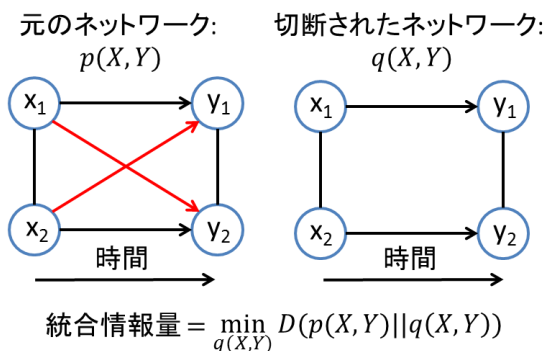
3. 研究の方法

統合情報量の指標を導出するためには情報理論、情報幾何学を用いる。統合情報量と意識レベルとの関係の検証には、fMRI (機能的核磁気共鳴画像法) データ、EEG (脳波)、ECoG (皮質内脳波) のデータを用いる。



4. 研究成果

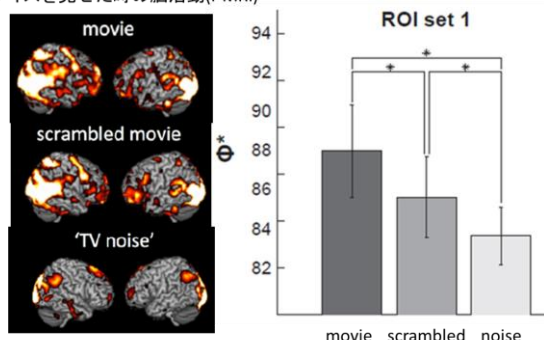
神経ネットワークにおける情報の統合を測る指標である、「統合情報量」を情報理論におけるミスマッチな復号化という概念を用いて導出した (Oizumi et al., 2016, PLoS Comp Biol) (上図)。提案した指標を計算する MATLAB のコードを web 上で公開し、自由に利用可能にした。
https://figshare.com/articles/phi_toolbox_zip/3203326



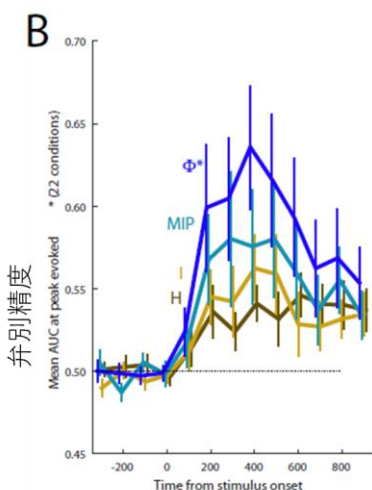
また、統合情報量を情報幾何学を用いて、解釈し直し、情報幾何学の観点から様々な因果性の指標を統一的に理解する枠組みを提案した (Oizumi et al., 2016, PNAS)。この枠組みにおいて、統合情報量は元のネットワークのダイナミクスを記述する確率分布を $p(X, Y)$ 、ネットワークの要素間の因果的な相互作用を遮断した確率分布を $q(X, Y)$ とした時、 p と q との間の距離 (Kullback-Leibler 距離) として定義される (上図)。情報幾何学の観点からは、点 p から q によって作られる部分多様体へ正射影した時の最小距離が統合情報量となる。提案した枠組みによって、神経ネットワークの解析などで良く使われる、移動エントロピーなどの因果性を測る指標と統合情報量との関係性が明らかになり、統合情報量の直観的な理解が進んだ。また、本研究において導出した新しい指標は、これまで提案されてきた統合情報量の指標のいくつかの数学的な問題点を解決したものに

なっている。

映画、ランダムに入れ替えられた映画
ノイズを見せた時の脳活動(f-MRI)



提案指標は、fMRI データに適用し、意味のない刺激を見ている時は、意味のない刺激を見ている時に比べて統合情報量が低くなることを示した (Boly et al., 2015, PLoS ONE) (上図)。具体的には、通常の映画(movie)、時系列をシャッフルした映画(scrambled)、テレビの砂嵐(noise)を見ている時の統合情報量を計算すると、統合情報量の大小関係は movie>scrambled>noise のようになることを示した。



また、提案した指標を用いて、ヒトの ECoG (皮質内脳波) データを解析し、電極間の情報の統合の構造と被験者の意識の内容が相関することを示した (Haun, Oizumi et al., 2016, preprint available on bioRxiv: submitted) (上図)。他の指標、相互情報量、エントロピーなどの指標より、統合情報量を使った時の方が意識の内容を弁別でき示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Masafumi Oizumi, Naotsugu Tsuchiya,

Shun-ichi Amari

Unified Framework for Information Integration Based on Information Geometry
Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(51), 14817-14822, 2016.

doi:10.1073/pnas.1603583113

【査読有】

2. Masafumi Oizumi, Shun-ichi Amari, Toru Yanagawa, Naotaka Fujii, Naotsugu Tsuchiya

Measuring Integrated Information from the Decoding Perspective

PLoS Comput Biol, 12(1), e1004654, 2016.

https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004654

【査読有】

3. Melanie Boly, Shuntaro Sasai, Olivia Gosseries, Masafumi Oizumi, Adenauer Casali, Marcello Massimini, Giulio Tononi
Stimulus Set Meaningfulness and Neurophysiological Differentiation: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125337

PLoS ONE, 10(5): e0125337, 2015. 【査読有】

4. 大泉匡史 意識の統合情報理論, Clinical Neuroscience, 32(8), 905-912, 2014.

【査読無】

5. Masafumi Oizumi, Larissa Albantakis, Giulio Tononi

From the Phenomenology to the Mechanisms of Consciousness: Integrated Information Theory 3.0.

PLoS Computational Biology, 10, e1003588, 2014.

https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003588

【査読有】

[学会発表] (計 8 件)

1. Masafumi Oizumi: “How can we assess “Machine Consciousness”? - From the perspective of Integrated Information Theory”, 13th Japanese-German Frontiers of Science Symposium, Potsdam, German. October 9th. (2016)

2. Masafumi Oizumi: “Measures of Consciousness From the Viewpoint of Information Geometry”, FQXi’s 5th International Conference, Banff, Canada. August 21th. (2016)

3. Masafumi Oizumi: “A unified framework for quantifying information integration based on information geometry.” , The 39th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society Satellite Symposium: The Origin of Consciousness, Tokyo, Japan. July 25th. (2016)

4. Masafumi Oizumi, Naotsugu Tsuchiya, Shun-ichi Amari: “A unified framework for quantifying information integration based on information geometry” , The 39th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society Satellite Symposium, Yokohama, Japan, July 20th. (2016)

5. Masafumi Oizumi: “A unified framework for quantifying information integration based on information geometry” . CNS*2016 (Computational Neuroscience) Workhop on Methods of Information Theory in Computational Neuroscience, Jeju, Korea. July 6th. (2016)

6. Masafumi Oizumi: “A unified framework for information integration based on information geometry” , 2nd Monash Brain Function Workshop, Melbourne, Australia, Dec 14th. (2015)

7. Masafumi Oizumi: “The integrated information theory of consciousness - theory and practice” , 6th Brain Research Institute Symposium in Niigata University on Neural mechanisms of brain functions that require awareness, Niigata, Japan, July 26th. (2015)

8. Giulio Tononi, Christof Koch, Naotsugu Tsuchiya, Masafumi Oizumi, Larissa Albantakis: “ Integrated Information Theory of Consciousness. ” 18th ASSC (Association for the Scientific Study of Consciousness), Brisbane, Australia, July 16th. (2014) (チュートリアル講演)

[図書] (計 1 件)

1. Naotsugu Tsuchiya, Andrew Haun, Dror Cohen, Masafumi Oizumi (2017) “Empirical tests of integrated information theory of consciousness” . Return of Consciousness, edited by Anders Haag, Axon Foundation. (in press)

[その他]

ホームページ

<https://sites.google.com/site/masafumioizumi/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大泉匡史 (OIZUMI, Masafumi)

国立研究開発法人理化学研究所・脳科学総合
研究センター・客員研究員

研究者番号 : 30715371