

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：学術変革領域研究(B)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H05712

研究課題名（和文）クオリア構造と対応する情報構造の脳活動からの抽出

研究課題名（英文）Extraction of information structure from brain activity corresponding to qualia structure

研究代表者

大泉 匡史 (Masafumi, Oizumi)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：30715371

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,800,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、異なる個人の主観的体験（クオリア）を、個人間のクオリアの対応関係を予め与えずに比較する手法を開発した。これは個々の感覚（例えば赤を見た時の「赤」のクオリア）が同一であると仮定せず、クオリアの関係性（クオリア構造）のみから比較するものである。この方法を色の類似度データや物体の類似度判断のデータに適用し、異なる被験者間でクオリア構造が対応することを示した。一方、定型と非定型色覚の被験者間ではクオリア構造は一致しないことも示した。さらに、この手法を用いて脳活動の構造とクオリア構造との対応関係を調べることで、どのような脳活動がクオリアと対応するかという問題に取り組むことが可能となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

個人の主観の質（クオリア）は定量化することが不可能なものと考えられてきた。我々はクオリア同士の関係性（クオリア構造）に着目し、個人間でクオリア構造同士が対応するかどうかを、定量的に比較する新しい数学的な方法論を提案した。この方法論は従来法とは異なり、予め自分の「赤」の主観が他人の「赤」の主観と対応することを仮定しないで、関係性の観点から自分の「赤」が他人の「赤」と対応するかどうかを調べる。このような主観的な構造の比較を通して、従来不可能と考えられてきた自分と他者のクオリアの類似性を定量的に評価することが可能となった。この枠組みで主観と脳活動との対応関係を調べることも可能となる。

研究成果の概要（英文）：We have developed a method to compare the subjective experiences (qualia) of different individuals without pre-defining the correspondence between qualia across individuals. This method does not assume that individual subjective experiences (e.g., the 'red' qualia when seeing red) are identical, but compares based solely on the relationships between qualia (qualia structure). By applying this method to color similarity data and object similarity judgment data, we demonstrated that the qualia structures correspond between different subjects. On the other hand, we also showed that the qualia structures do not align between subjects with typical and atypical color vision. Furthermore, by using this method to investigate the correspondence between the structure of brain activity and the qualia structure, it becomes possible to tackle the question of what kind of brain activity corresponds to qualia.

研究分野：理論神経科学

キーワード：意識 クオリア クオリア構造 教師なしアラインメント 最適輸送 Gromov-Wasserstein距離

1. 研究開始当初の背景

我々が物を見た時、音を聞いた時などに感じる、主観的な体験の質（クオリア）は、言語化できない、定量化できないものとされてきた。しかしながら、ある体験に対するクオリアを単体で特徴付けようとするのではなく、他のクオリアとの間の関係性から特徴付けることは可能である。関係性とは例えば、似ている、似ていないという関係性のことを指す。具体的には、「赤」は「ピンク」には似ているが、「青」には似ていないといった関係性である。このような関係性を多く集めれば集めるほど、「赤」そのものを定量化していることに実質的に近くなると考えられる。この考えに基づけば、定量化不可能であると考えられたクオリアは、様々なクオリア同士の関係性が織り成す構造、「クオリア構造」によって、定量化できる。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は次の3つある。(1) クオリア構造が異なる個人間でどれくらい対応するかを調べること。(2) クオリア構造と脳活動の構造との間にある数理的な関係性を明らかにすること。目的(1)(2)を達成するために必要な共通の方法として、(3)クオリア構造同士の対応関係を定量化する新しい数学的手法を開発することも目的となる。

3. 研究の方法

上記の研究目的(1)に関して、クオリア構造パラダイムを提案した(図1; Kawakita et al., 2023, PsyArXiv)。このパラダイムの最初のステップは、刺激間の関係性判断を通じて主観的な報告を収集し、主観体験の関係性の構造、すなわちクオリア構造の推定を行うものである(図1(a))。刺激間の関係性判断とは例えば類似度を評価させるなどである(図1(b))。2つ目のステップは、異なる個人のクオリア構造を教師なしでアラインさせ、クオリア構造の類似度を定量化する。

教師なしのアラインメントによってクオリア構造を比較するとは、例えば、ある被験者が感じる「赤」と別の被験者が感じる「赤」が同じものであると仮定せずに、構造同士を関係性のみの情報だけから比較することに対応する(図1(e))。この方法論によってはじめて、関係性の意味から自分の「赤」のクオリアと他人の「赤」のクオリアとが同じと言えるのかといった問題や、自分の「赤」のクオリアが他人の「青」のクオリアと対応している可能性がないのかといった問題(逆転クオリア)に関係性の意味から定量的に取り組むことが可能となる。

我々は、クオリア構造同士を教師なしでアラインさせる方法として、Gromov-Wasserstein 最適輸送と呼ばれる方法を用いることを提案した(Kawakita et al., 2023)。

本研究では開発した教師なしアラインメントの手法を、A01 土谷班が大規模心理物理実験によって抽出した、93色の色の類似度データ及びTHINGSと呼ばれる公開データセットで、1854種類の物体に対する類似度判断のデータに対して適用した。

上記の研究目的(2)に関しては、B01 山田班が記録した、9色の色を見ている最中のfMRIデータを用いて、心理物理実験から得られる色のクオリア構造との対応関係を解析した。

4. 研究成果

上述の目的(3)に対して、クオリア構造同士を教師なしでアラインさせる方法として、Gromov-Wasserstein 最適輸送法を使う方法論を確立させた(Kawakita et al., 2023)。この方法は、現在pythonのtoolboxとして公開する準備を進めている。

上記の目的(1)に関しては、A01 土谷班が大規模心理物理実験によって抽出した、色のクオリア構造のデータに適用して、異なる被験者間でクオリア構造の対応が取れることを示した(図2)。具体的には全被験者を5グループの被験者群に分け、クオリア構造が色の類似度関係という情報のみからアラインできるかどうかを調べた。結果、定型色覚を持つ被験者群では、異なる被験者群の間で色の類似度構造が、色のラベル情報なしで正確にアラインできることを示した(Kawakita et al., 2023)。この結果は異なる被験者間で、色の類似度構造が本質的に同じものであるということを示唆する。一方、定型色覚を持つ被験者群の色の類似度構造と、非定型色覚を持つ被験者群の色の類似度構造は、教師なしでアラインすることはできなかった。

この手法の汎用性を確かめるために、我々は色のクオリア構造だけでなく、一般の物体のクオリア構造にも適用した。用いたデータはTHINGSと呼ばれる公開データセットで(<https://things-initiative.org/>)、大規模な心理物理実験によって1854種類の物体に対する類似度判断のデー

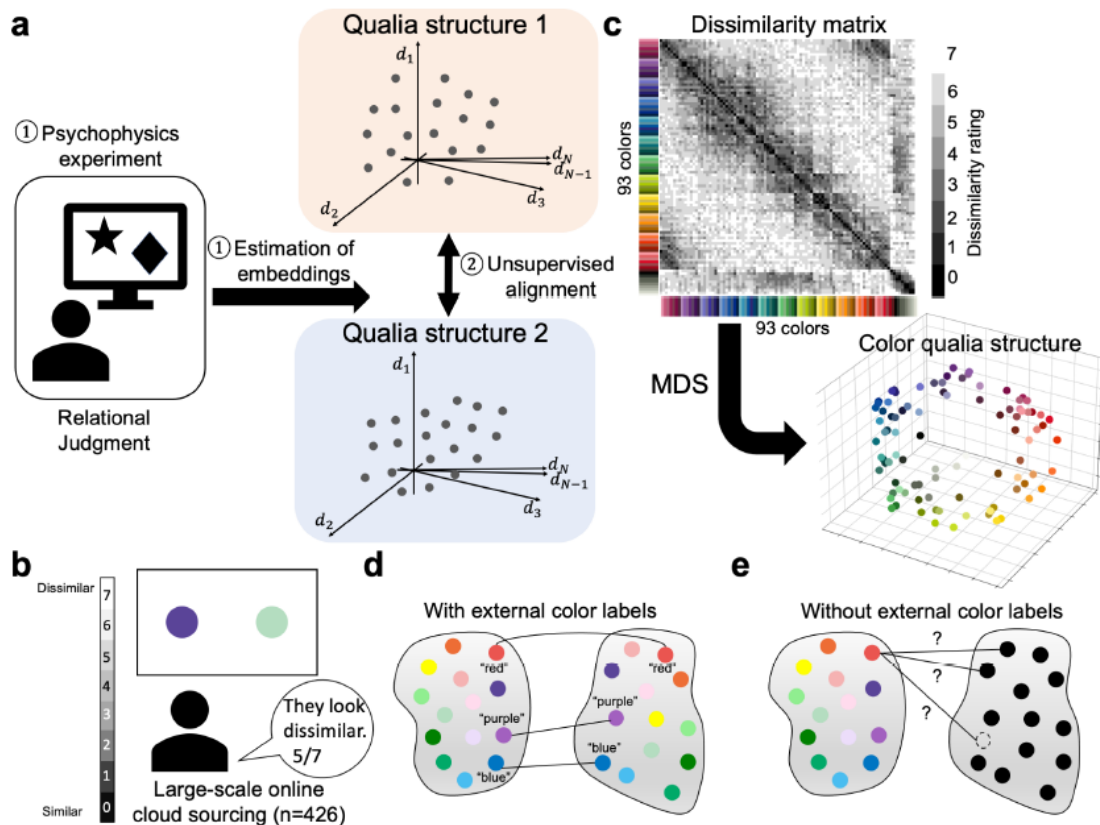


図1: クオリア構造パラダイムの概念図。(a) クオリア構造パラダイムの二つのステップ。最初のステップは、刺激間の関係性判断の主観報告を通じて、主観の関係性の構造、すなわちクオリア構造の推定を行う。二つ目のステップは、異なる個人のクオリア構造を教師なしでアラインし、クオリア構造の類似度、対応関係を定量化するものである。(b) 色の類似度判断タスク。一組の色間の類似度評価が収集される。(c) 色の類似度行列とその埋め込み。類似度行列の要素は、参加者によって報告された一組の色間の平均的な類似度評価を表している。類似度行列から、多次元尺度法 (MDS) を使用して色の埋め込みが推定される。(d) クオリア構造の教師ありアラインメント。これは異なる個人間で同じ外部刺激によって誘発されるクオリア間の対応を仮定している。(e) クオリア構造の教師なしアラインメント。これは異なる個人間でのクオリア間の対応を仮定していない。ある個人の特定の色に対するクオリアは、他の個人の同じ色のクオリアに対応しない可能性も考慮されている。

タを記録したものである。色の類似度行列の解析と同様に、我々はまずすべての被験者を4グループの被験者群に分け、それぞれの被験者群で、心理物理実験の主観報告から埋め込みを推定した。次に、推定した埋め込みから、それぞれの被験者群の185種類の物体の類似度行列を作成した。それらの類似度行列が対応するかを教師なしアラインメントの手法を使って調べた。

結果、この THINGS のデータにおいても、異なる被験者間で物体の類似度構造同士が教師なしで、極めて高い精度でアラインできることを示した (Kawakita et al., 2023)。これは、物体の類似度構造が異なる被験者間で本質的に同じ関係性を持つことを示唆する。

上述の目的(2)に関しては、同じ数理的な手法を用いて、B01 山田班が記録した fMRI データから得る脳活動の構造とクオリア構造との対応関係を調べた。クオリア構造との対応関係が強い脳領域の探索などの解析を現在進めている。

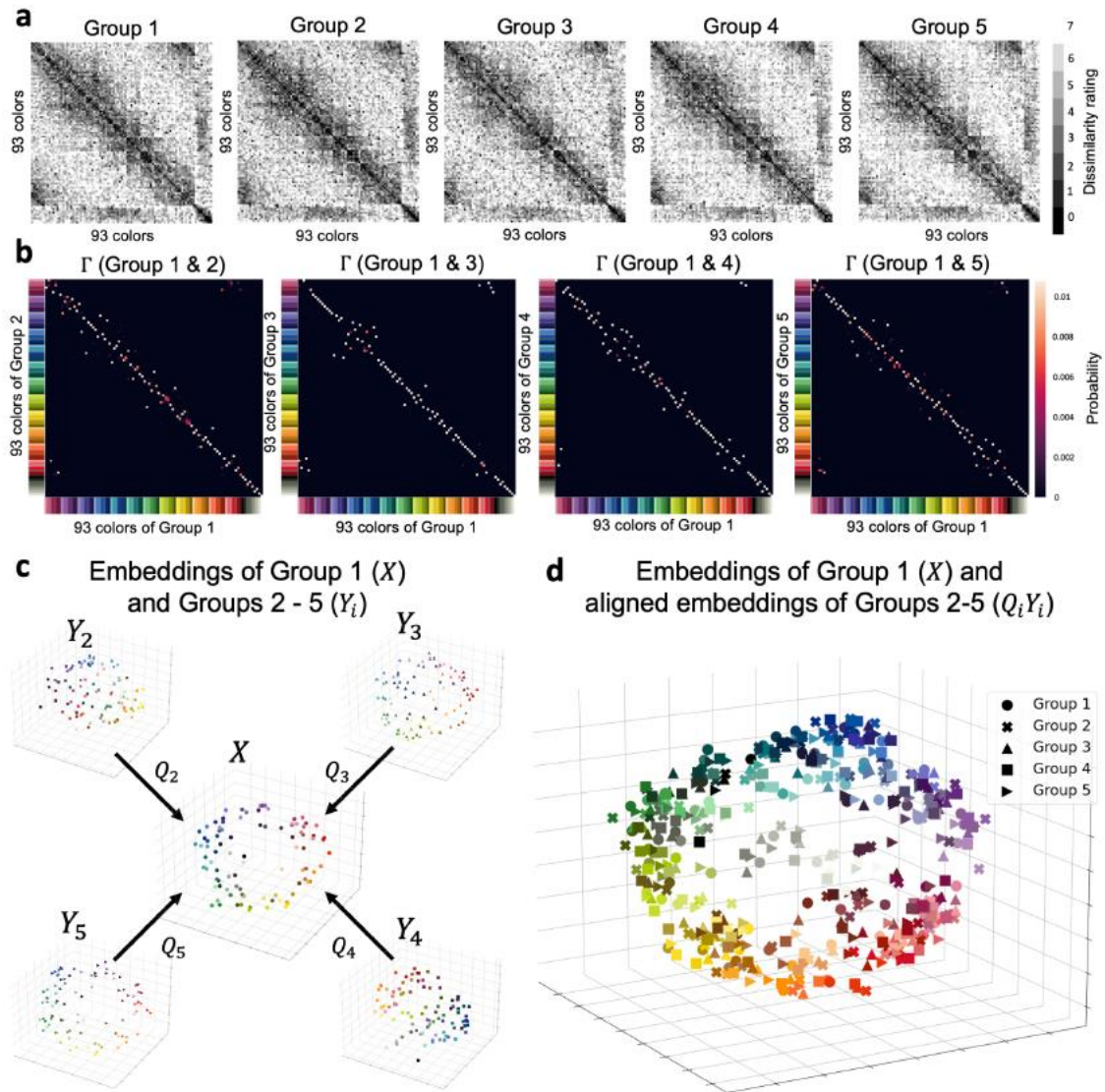


図2: 教師なレクオリア構造のアライメント (a) 93色の類似度行列を5つの被験者群に分けて作成した。(b) 最適化された輸送行列。グループ1の類似度行列とグループ2~5の類似度行列の間で最適化された輸送行列 Γ 。(c) 中央のグループ1 (X) と4隅のグループ2~5 (Y_2, Y_3, Y_4, Y_5) の埋め込みを各グループの埋め込みにプロットし、各グループの埋め込み空間にプロットしたもの。色は外部色刺激のラベルを表し、アライメントには全く使用していない。(d) グループ2~5の埋め込み ($Q_i Y_i$) とグループ1の埋め込み (X) をグループ1の埋め込み空間にプロットしてアラインさせたもの。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Ishizu Kotaro, Shiramatsu Tomoyo I., Hitsuyu Rie, Oizumi Masafumi, Tsuchiya Naotsugu, Takahashi Hirokazu	4. 巻 11
2. 論文標題 Information flow in the rat thalamo-cortical system: spontaneous vs. stimulus-evoked activities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-98660-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ota Keisuke et al.	4. 巻 109
2. 論文標題 Fast, cell-resolution, contiguous-wide two-photon imaging to reveal functional network architectures across multi-modal cortical areas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neuron	6. 最初と最後の頁 1810 ~ 1824.e9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neuron.2021.03.032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kawakita Genji, Kamiya Shunsuke, Sasai Shuntaro, Kitazono Jun, Oizumi Masafumi	4. 巻 6
2. 論文標題 Quantifying brain state transition cost via Schrödinger Bridge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Network Neuroscience	6. 最初と最後の頁 118 ~ 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/netn_a_00213	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Jun Kitazono, Yuma Aoki, Masafumi Oizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Bidirectionally connected cores in a mouse connectome: Towards extracting the brain subnetworks essential for consciousness	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 大泉 匡史	4. 巻 73
2. 論文標題 特集 意識 .理論的アプローチ 意識の数理的な理論はどのように実験的に検証されるべきか?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生体の科学	6. 最初と最後の頁 59 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11477/mf.2425201466	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 大泉匡史
2. 発表標題 クオリア構造の定量化と発達研究への応用
3. 学会等名 日本赤ちゃん学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masafumi Oizumi
2. 発表標題 Towards elucidating the mathematical relationship between qualia and brain activity
3. 学会等名 日本神経科学学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大泉匡史
2. 発表標題 クオリア構造の定量化に基づく意識の理論の検証
3. 学会等名 CBI学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大泉匡史
2. 発表標題 意識の質(クオリア)と脳活動をつなぐ数理の探求
3. 学会等名 日本視覚学会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Genji Kawakita, Masafumi Oizumi
2. 発表標題 Neural manifold alignment for the foundation of brain-to-brain communication
3. 学会等名 日本神経回路学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 片岡 麻輝, 大泉 匡史
2. 発表標題 色のカテゴリカルな神経表現の獲得
3. 学会等名 日本神経回路学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	モナシュ大学			