

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：94301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05920

研究課題名（和文）脳・画像・テキストデータマイニングによる質感情報表現の解明

研究課題名（英文）Data-mining of shitsukan representation using brain, image, and text data

研究代表者

神谷 之康（Kamitani, Yukiyasu）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長

研究者番号：50418513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 44,500,000円

研究成果の概要（和文）：大規模脳・画像データを用いたデータマイニング的手法により、人間の脳の質感情報表現を発見・利用するアプローチを創出した。画像を見ているときの脳活動パターンからその画像の深層ニューラルネットワーク（DNN）特徴を予測（脳からDNNへの信号変換）する方法を開発し、脳とDNNの間の階層的相同性を見出すとともにその定量化法を確立した。また、脳活動から予測したDNN特徴量を利用して、見ている画像を再構成する方法を開発し、テクスチャや材質に関する画像をそれを見たときの脳活動だけから再構成することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本プロジェクトの成果は、質感を含む知覚内容を今までにない精度で脳活動から解読できることを実証するとともに、脳-DNN間の信号変換技術にもとづくブレイン・デコーディングのポテンシャルを示している。同様のアプローチは、画像だけでなく、動画や音声、テキストなど、さまざまな刺激に対する脳活動からの情報解読に応用可能で、ブレイン・マシン・インターフェースの技術の開発にも貢献することが期待される。また、脳との階層的相同性を定量化するBHスコアは、今後の脳型AI開発の指針となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We established a data-mining-based approach to discover and utilize the representation of shitsukan information in the human brain. We developed a method to predict deep neural network (DNN) features of an image from the induced brain activity pattern (brain-to-DNN signal translation), and found hierarchical homology between the brain and DNN. We also developed methods for reconstructing the viewed image using DNN features predicted from brain activity, and succeeded in re-creating texture and material images only from the brain activity measured while they were viewed.

研究分野：認知神経科学

キーワード：ブレイン・デコーディング 視覚 ブレイン・マシン・インターフェース fMRI 深層ニューラルネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者のグループは世界に先駆けて非侵襲脳計測を利用した「脳情報デコーディング (ブレイン・デコーディング)」アプローチを提唱し、脳内情報表現を解読する数々の新手法を開発してきた。脳情報デコーディングとは、脳活動パターンから刺激や心理状態を解読 (デコード、復号化) するアプローチである。fMRI 信号を機械学習アルゴリズムを用いて解析することにより、脳画像の画素より微細な脳構造 (コラム構造) に表現されていると考えられる視覚的特徴を単一試行の脳画像信号から解読することに成功した (Kamitani & Tong, *Nature Neuroscience* 2005)。研究代表者のグループでは本研究開始前から、コンピュータビジョンで用いられている画像特徴や深層ニューラルネットワーク (DNN) を用いて、脳活動パターンから任意の物体カテゴリーを予測する方法 (「一般物体デコーディング」) の開発を進めていた。一般物体デコーディングにおいては、視野位置特異的な画像基底の代わりに、位置や回転に対して不変性を持つ高次画像特徴を用い、その組み合わせとして画像や物体のカテゴリーを表現する。次に、これらの特徴量を脳活動パターンから予測する機械学習モデルを構築する。画像を見た時の脳活動パターンからデコードされる特徴量ベクトルと、大規模画像データベースの解析から得られる物体カテゴリー特異的な特徴ベクトルをマッチングすることにより、モデルの学習に用いていない物体を含む一般的な物体のデコーダを構成することができることが予備研究の段階で明らかになっていた。これらのモデル、とくに、深層ニューラルネットワークの中間層に脳内の質感表現に対応する特徴が含まれるという着想のもと本研究を開始した。

## 2. 研究の目的

質感は複雑な情報構造をもち、少数の物理パラメータを用いて包括的に特徴づけることは困難である。本課題では、特定の物理パラメータに注目する従来の手法を補完し、データから新たな質感脳情報表現を発見するため、大規模脳・画像データのデータマイニングにもとづくアプローチを提案した。画像・テキストデータから抽出した質感特徴と、fMRI 信号を用いた脳情報デコーディング (brain decoding) を組み合わせ、脳に表現される質感特徴をデータ駆動的に発見・利用する方法を開発することを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究課題では、一般物体デコーディングのフレームワークにもとづき、質感に関連すると考えられる DNN 中間層の階層的特徴表現にフォーカスした解析を行った。まず、物体や質感に関連する単語やフレーズでタグ付けされた大規模画像データで DNN を訓練することで、階層的画像特徴を抽出した。次に、これらの画像特徴を脳活動パターンから予測するデコーディング解析を行い、脳活動パターンが質感特徴や概念をどのように表現しているかを解明した。さらに、デコード (予測) された特徴ベクトルから、画像を再構成する方法を開発し、脳に表現される質感要素特徴がどのようにしてトータルな質感認知を生み出すかを調べた。この方法は、特定の物理パラメータを操作して質感認知のメカニズムを探る従来の手法と異なり、データ駆動的に質感特徴を抽出して脳情報表現と対応づける点でこれまでにないユニークなアプローチであり、脳情報デコーディングやディープラーニングの近年の進歩によって初めて可能になったものである。

## 4. 研究成果

### (1) 脳-DNN 間の階層的情報表現の相同性

本プロジェクトの第一段階では、脳から DNN への信号変換法を検証するための研究を進めた (Horikawa & Kamitani, *Nature Communications* 2017)。コンピュータ・ビジョンの分野で用いられる「物体概念を画像特徴のパターンによって表現する」という考え方を採用し、DNN 特徴量のパターンによって物体画像を表現した。そして、ブレイン・デコーディングを応用して、被験者が物体画像を見ているときの脳活動パターンから DNN 信号を予測 (脳から DNN への変換) するデコーダを構築した。訓練済みのデコーダで予測された特徴パターンを大規模画像データベースとマッチングすることで、画像を見たり想像したりしているときの脳活動から、任意の物体カテゴリーを解読 (検索) する方法を評価した。

脳の視覚野の異なる部位の活動を使ってデコーダの訓練を行ったところ、低次視覚野の活動を使って訓練したデコーダは、DNN 低次層の特徴量をよく予測でき、高次視覚野の活動を使って訓練したデコーダは、DNN 高次層の特徴量をよく予測できることがわかった。この結果から、脳と DNN との間に階層的相同性 (ホモロジー) が存在することが明らかになった。デコーダ

を、物体を想像中の脳活動に対して適用すると、DNN 高次層の特徴量を予測した成績のピークのタイミングが、低次層の予測成績のピークのタイミングに先行するという結果が得られた。これは、脳が高次から低次の順にトップダウン的に階層的特徴表現を活用していることを示している。

この研究により、脳の視覚野と DNN の階層的相同性が示されるとともに、物体を想像しているときには、階層的情報表現が高次から低次に向けて段階的に活用されていることが明らかになった。人工ニューラルネットワークは脳の構造にヒントを得て作られた数理モデルですが、脳のモデルとしてよりも汎用的な機械学習手法として利用されてきた。この成果によって、人工ニューラルネットワークが再び実際の脳と対応づけられることとなった。ブレイン・デコーディングへの応用だけでなく、脳型人工知能の開発にも貢献することが期待される。

## (2) 階層的情報表現のトップダウン変調

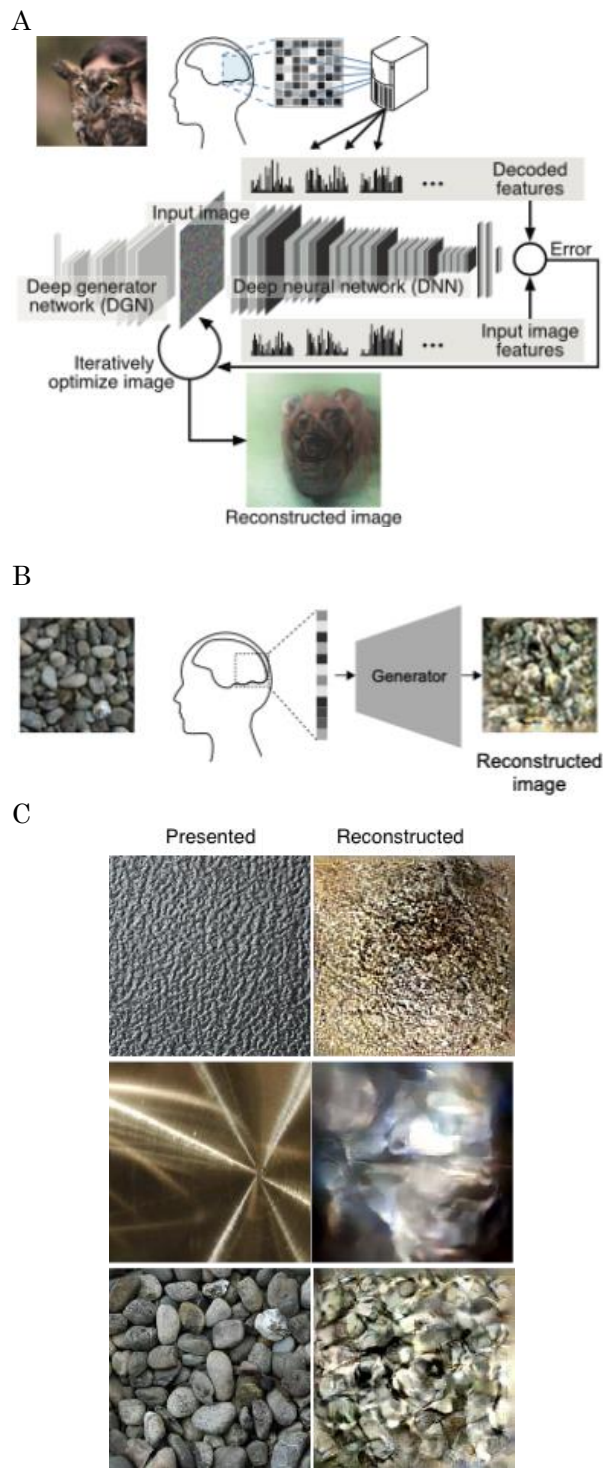
Horikawa & Kamitani (2017)の成果をもとに、われわれは、トップダウンの視覚情報処理が脳内の階層的特徴表現に与える影響について調べた

(Abdelhack & Kamitani, *eNeuro* 2018)。この研究では、低周波フィルタによりぼかした画像（ブラー画像）を刺激として脳活動を計測し、そこから、上記と同じアルゴリズムで DNN 特徴量をデコードした。デコードされた DNN 特徴量を、ブラー画像自体の DNN 特徴量とブラー処理する前の元画像の DNN 特徴量それぞれと比較した。

その結果、脳からデコードされた DNN 特徴量は、刺激画像と比較して元画像の DNN 特徴量により近くなることを見出された。これは、脳がブラー処理で失われた特徴を補完して表現していることを示している。ぼかした画像を知覚する際には、トップダウン処理により補完された質感が意識に上っている可能性が示唆された。この研究では、ブラー処理によりぼかした画像を刺激として用いたが、一般に視覚入力においては、物理的な遮蔽や光学的制約により、多くの情報が失われている。ベイズ推論の考え方を利用してトップダウン処理を説明する理論がこれまで提案されてきたが、実際の脳活動データと対応づけられた具体的な情報表現を調べることは困難であった。脳活動パターンから DNN 特徴量をデコードすることにより、トップダウン処理による具体的な情報表現の変調を捉えることが初めて可能となった。

## (3) DNN 特徴予測精度の被験者間相関

Horikawa & Kamitani (2017) では、訓練済み DNN の各ユニットに表現される画像の特徴量を脳活動パターンから予測（デコード）できることを示したが、そのデコード精度にはユニット間で大きなばらつきがあった。最近の研究でわれわれは、ユニット間のデコード精度のばらつきには被験者間で共通のパターンがあることを見出した (Horikawa, Aoki, Tsukamoto, & Kamitani,



A. 深層画像再構成モデル, B. End-to-end 型深層画像再構成モデル, C. 質感画像の再構成 (左: 呈示画像、右: 脳活動からの再構成画像)

Scientific Data 2019)。DNN の各階層で、各ユニットの脳活動からのデコード精度を被験者間で比較すると相関係数 0.7 程度の比較的高い相関があることがわかった。これは、DNN に含まれる多数のユニットのうち、少なくとも一部は、被験者によらず、脳と強い関連があることを示唆している。われわれは、主要な訓練済み DNN について、各ユニットのデコード精度を計算した結果をデータベースとして公開した。このデータベースは、脳と類似した視覚情報処理をもつ人工視覚をデザインする上でも有用であると考えられる。

#### (4) 深層イメージ再構成

脳活動から予測した DNN 特徴量を利用して、見ている画像を再構成する方法を開発した (Shen, Horikawa, Majima, & Kamitani, *Plos Computational Biology* 2019; 図 A)。Horikawa & Kamitani (2017)の方法を用いることで、物体画像や風景画像など自然な画像を見ているときの脳の視覚野の活動パターンを DNN の信号パターンに変換 (翻訳) することができる。本研究では、さらに、脳から変換した DNN 信号パターンと、入力画像から計算される DNN 信号パターンとの誤差が小さくなるよう画像を徐々に最適化していくことで、脳活動から被験者が見ている画像を再構成できることを示した。

この研究では、再構成画像の見た目の自然さを向上させるため、深層生成ネットワーク (deep generator network, DGN) と呼ばれるもう一つの DNN を導入した。このモデルは、敵対的生成ネットワーク (generative adversarial network, GAN) と呼ばれる技術を利用して構築されたもので、写真のようにリアルな画像を生成するために有用であることが知られている。脳計測実験の被験者とは別の被験者グループを対象に行った評価実験で、DGN を導入したときの方が、DGN を導入しないときよりも、実際に見ていた画像と再構成画像の見た目の類似性が向上することが確かめられた。また、画像の再構成に使用する DNN の階層の数を変化させた時に、複数の DNN 階層を使用することで、より再構成画像の精度が向上することも明らかになった。この結果は、低次の視覚特徴だけでなく複数の階層的視覚情報を利用することが、再構成精度の向上に有効であることを示している。

さらにわれわれは、脳活動パターンから直接画像を生成する end-to-end 型の深層イメージ再構成モデルを構築した (Shen, Dwivedi, Majima, Horikawa, & Kamitani, *Frontiers in Computational Neuroscience*; 図 B)。再構成精度では、DNN 特徴の予測を介した前記のモデル (Shen, Horikawa, Majima, & Kamitani, *Plos Computational Biology* 2019) に劣るものの、訓練データが増えることによって、精度のさらなる向上が期待できることがわかった。また、この方法を用いると、テクスチャや材質に関する画像を比較的高い精度で再構成することができた (図 C)。

#### (5) 脳と類似した階層的情報表現をもつ DNN の探索

コンピュータビジョンの分野では、物体認識精度の向上を目的としてさまざまな構造を持つ DNN が活発に開発されてきた。そこでわれわれは、DNN と脳との階層的情報表現の類似性を定量化する brain hierarchy score (BH スコア) を考案し、29 種類の異なる構造を持つ DNN と脳との類似性を比較した。

その結果、各 DNN の BH スコアと物体認識精度は負に相関するという意外な結果が得られた。このことは、高い物体認識精度を実現するような DNN の構造上の工夫が、脳との階層的な類似性に必ずしもつながっていないことを示している。ネットワークの構造を比較すると、全結合層を持つ DNN ほど高い BH スコアを持ち、全結合層の活動値は高次の視覚野からよく予測されることがわかった。これらの結果から、近年の DNN は、全体的な形状の認識ではなく、物体カテゴリー内で共通する局所的な特徴 (テクスチャ等) を抽出することに特化することで、高いパフォーマンスを達成している可能性が示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Emi Satake, Kei Majima, Shuntaro C. Aoki, Yukiyasu Kamitani	4. 巻 12
2. 論文標題 Sparse Ordinal Logistic Regression and Its Application to Brain Decoding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroinformatics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fninf.2018.00051	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 Mohamed Abdelhack, Yukiyasu Kamitani	4. 巻 5
2. 論文標題 Sharpening of Hierarchical Visual Feature Representations of Blurred Images	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 eneuro	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/ENEURO.0443-17.2018	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 Guohua Shen, Tomoyasu Horikawa, Kei Majima, Yukiyasu Kamitani	4. 巻 15
2. 論文標題 Deep image reconstruction from human brain activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS Computational Biology	6. 最初と最後の頁 e1006633
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pcbi.1006633	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 Tomoyasu Horikawa, Shuntaro C. Aoki, Mitsuaki Tsukamoto, Yukiyasu Kamitani	4. 巻 6
2. 論文標題 Characterization of deep neural network features by decodability from human brain activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Data	6. 最初と最後の頁 190012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/sdata.2019.12	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 Guohua Shen, Kshitiji Dwivedi, Kei Majima, Tomoyasu Horikawa, Yukiyasu Kamitani	4. 巻 13
2. 論文標題 End-to-End Deep Image Reconstruction From Human Brain Activity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2019.00021	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 Horikawa Tomoyasu, Kamitani Yukiyasu	4. 巻 8
2. 論文標題 Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual features	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nature communications	6. 最初と最後の頁 15037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/ncomms15037	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 Horikawa T, Kamitani Y	4. 巻 11: 4.
2. 論文標題 Hierarchical neural representations of dreamed objects revealed by brain decoding with deep neural network features	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Frontiers in Computational Neuroscience	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fncom.2017.00004	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 Takemiya M, Majima K, Tsukamoto M and Kamitani Y	4. 巻 10
2. 論文標題 BrainLiner: A Neuroinformatics Platform for Sharing Time-Aligned Brain-Behavior Data	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroinformatics	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fninf.2016.00003	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 -

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Deep image reconstruction from the human brain
3. 学会等名 2018 Annual Meeting of Korean Society for Cognitive Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神谷之康
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークと脳の相同性とその応用
3. 学会等名 第2回ヒト脳イメージング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Brain-DNN homology and its applications
3. 学会等名 第28回日本神経回路学会全国大会 (JNNS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Deep image reconstruction from the human brain
3. 学会等名 The 5th CiNet Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mohamed Abdelhack, Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Top-down modulation in human visual cortex revealed by brain decoding with deep neural network representation
3. 学会等名 The 5th CiNet Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Guohua Shen, Tomoyasu Horikawa, Kei Majima, Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Deep image reconstruction from human brain activity
3. 学会等名 Annual Conference on Cognitive Computational Neuroscience(CCN) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mohamed Abdelhack, Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Top-down neural processing that supplements missing image features revealed by brain decoding with deep neural network representation
3. 学会等名 Vision Sciences Society 17th Annual Meeting(VSS2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Horikawa Tomoyasu, Yukiyasu Kamitani
2. 発表標題 Generic decoding of seen and imagined objects using features of deep neural networks
3. 学会等名 Vision Science Society 16th Annual Meeting(VSS2016) (国際学会)
4. 発表年 2016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
研究協力者	塚本 光昭 (Tsukamoto Mitsuaki)		
研究協力者	沈 国華 (Shen Guohua)		
研究協力者	青木 俊太郎 (Aoki Shuntaro)		
研究協力者	ディアスロハス フランソワーズ (Diaz Rojas Francoise)		
研究協力者	アブデルハック モハメッド (Abdelhack Mohamed)		
研究協力者	ヘリング サイモン (Helling Simon)		
研究協力者	ヴァファイ シリン (Vafaei Shirin)		

## 6. 研究組織 (つづき)

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	朴 鍾閔  (Park Jongyun)		
研究協力者	程 帆  (Cheng Fan)		
連携研究者	堀川 友慈  (Horikawa Tomoyasu)  (60721876)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員   (94301)	
連携研究者	間島 慶  (Majima Kei)  (80735770)	京都大学・情報学研究科・助教   (14301)	