2版

様　式　C－19、F－19－1、Z－19　(共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　５ 年　５ 月 23 日現在

機関番号：６３９０５

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：１７Ｈ０１７５６

研究課題名（和文）ヒト脳及び人工脳ネットワークにおける多感覚的な物体属性情報の表現

研究課題名（英文）Representation of visual and non-visual object attributes in the brain and artificial neural networks

研究代表者

郷田　直一（Goda, Naokazu）

生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教

研究者番号：３０３７３１９５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　13,600,000円

研究成果の概要（和文）：我々の脳は、物体や環境の非視覚的な性質を見るだけで容易に認識できる。この興味深い神経処理を理解するため、本研究では物体の非視覚的属性の心理的・神経的表現と深層畳込みニューラルネットワーク（DNN）から得られる画像特徴との対応関係を解析した。その結果、非視覚的属性の認識に有用ないくつかのDNN特徴を見出し、また、それらの特徴を利用して非視覚的印象を操作できる画像合成技術の開発を進めた。さらに、視覚的・非視覚的特徴を制御できる仮想現実環境を構築し、その環境下で新たな視覚・体性感覚間相互作用を明らかにした。これらの技術は、脳の多感覚性を理解するための重要な貢献となるものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義
本研究は、未だ解明されていない脳の情報処理を理解するために、現在成功を収めている深層畳込みニューラルネットワーク(DNN)を利用する試みである。脳神経科学研究だけでなくDNNの研究開発においても、複数の感覚（視覚や触覚など）情報を統合的に扱うアプローチはまだこれからのテーマであり、本研究で得られた知見や技術は、これら両分野の研究の進展に貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：Our brain effortlessly recognizes not only visual but also non-visual attributes of objects and environments just by looking at them. To delve into this intriguing neural processing, we analyzed the relationship between the psychological/neural representations of non-visual attributes of objects and the image features derived from deep convolutional neural networks (DNN). We discovered DNN features valuable for recognizing non-visual attributes and developed prototype image synthesis techniques that manipulate non-visual impressions using those features. Additionally, we created a virtual reality environment capable of manipulating visual and non-visual features, revealing new visual-somatosensory interactions within the environment. These techniques contribute to advancing our understanding of the brain's multisensory nature.

研究分野：神経科学

キーワード：視覚　多感覚　質感　深層学習

※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、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

我々は日常的に複雑な視覚入力から様々な情報を瞬時に読み取っている。その情報は本来視覚からは得られない「非」視覚的な情報を含む。例えば、果物を見て、新鮮か、どのような味かを判断し、食器をみて、何でできているか、どのような機能があり、どのように掴むのかを理解する。このような物体の物理的性質や状態（以降、物体属性と呼ぶ）の認識に介在する神経基盤は十分に理解されていない。

我々は、これまで特に物体の「材質」に関する情報に焦点を絞り、材質の属性情報の脳内表現を明らかにする一連の研究に取り組み、その中で、視覚物体認識の中枢であるヒト及びサルの腹側高次視覚野の一部領域が、材質に関わる視覚的情報（光沢など）に加え、非視覚的属性情報（硬さ・重さ・冷たさなど）も抽出・表現していることを示した(Hiramatsu, Goda et al., NeuroImage 2011; Goda et al., J Neurosci 2014) 。さらに、馴染みのない物体を繰り返し見て触れるといった視触覚経験によって、腹側高次視覚野の情報表現がより触覚的な属性を表現するものに変化することを明らかにした（Goda et al., Curr Biol 2016）。これらの成果は、視覚情報の処理に専門化していると長く考えられてきた腹側高次視覚野内において、視覚由来ではない情報が一部表現されていることを示す新しい知見である。しかしながら、そのような腹側高次視覚野の情報表現についてはいまだ明らかでない。

２．研究の目的

脳が、視覚入力から非視覚的な物体属性（物体表面・内部の性質や状態）や環境属性についての情報へとどのように変換し、認識に利用しているのかを明らかにすることを目的とする。特に、「腹側高次視覚野は、「見て触れる」、「見て味わう」といった多感覚の経験を通して視覚特徴と非視覚属性（聴覚・触覚・嗅覚・味覚的性質）との統計的相関を学習し、非視覚的属性と相関する視覚特徴を抽出・表現している」との仮説に基づき、視覚特徴と非視覚的属性との間にある相関関係を実験心理学的解析、脳機能イメージングによる脳情報表現解読、人工深層ニューラルネットワーク、画像工学を用いた多角的解析により明らかにする。

３．研究の方法

（１）物体属性に関する感覚モダリティ間相関の解析：物体の視覚特徴と、非視覚的物体属性との関係を解析する。この解析により、視覚特徴から非視覚的な属性を予測するモデルが得られる。視覚特徴の抽出には代表者のこれまでの研究成果（2013-2016 年度基盤研究 C）に基づき、物体カテゴリ等の認識のために学習済みの深層畳込みニューラルネットワーク(DNN)の様々な層の画像特徴を利用する。

（２）深層学習画像合成技術を用いた非視覚属性の操作：（１）で得た DNN 特徴モデルが正しいものであれば、特定の視覚特徴を操作することで、その画像が与える非視覚的印象を変化させることができるであろう。このような考えに基づき、DNN 特徴をモデルに基づいて操作した画像を深層学習技術により合成する。これにより、DNN 特徴モデルの有用性を検証する。

（３）多感覚的な物体属性の脳情報表現の解析：（１）で得た DNN 特徴モデルを画像観察時のさまざまな脳部位の活動と対応させ、各部位の情報表現及びその変換過程を明らかにすることを目指す。

（４）環境認識における感覚モダリティ間相互作用の解析：これまでは「物体」の非視覚属性の認識に着目してきたが、本研究の仮説は「環境」の認識にも当てはまる可能性がある。このことに注目し、「環境」の多感覚的認識についても実験心理学的検討を行う。第一段階として、視覚・非視覚属性の実験的制御が容易なバーチャルリアリティ(VR)環境下での実験環境を構築し、特に視覚と触覚の相互作用について明らかにすることを目指す。

４．研究成果

（１）現有の画像データベース及び視覚・非視覚属性の心理評価データを使用し、様々な DNN 画像特徴と非視覚属性（触覚など）との関係について網羅的な解析を行った。DNN には、大規模画像データベースを用いて物体カテゴリ、風景カテゴリ、素材カテゴリ等の分類を学習済みのものを用いた。その結果、各種 DNN の中間層の特徴集団の反応といくつかの非視覚属性の間によい相関関係があることなどが確認できた（図１左）。また、個々の DNN 特徴に注目して解析を進め、種々の属性ごとに重要と考えられる DNN 特徴を絞り込むことができた（図１右）。本結果から、物体、風景、素材認識等のために学習された DNN の中間層は非視覚属性と相関しそれらの表現に有用な特徴を含むことが示唆される。本解析は 2013-2016 年度基盤研究 C「表面材質情報の表現と変換に関する視覚情報処理モデル」に引き続き行ったものである。本成果の一部は国内学会及び解説論文（郷田, 日本画像学会誌 2018）にて発表した。

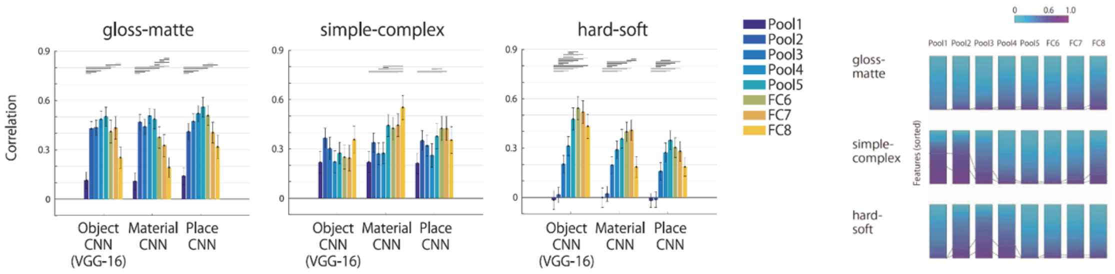

図１（左）各種 DNN 特徴集団表現と視覚・非視覚属性（光沢感、複雑さ、硬軟感）との相関。非視覚属性である硬軟感は低次層ではなく高次層(Pool5-FC7)の表現と良く対応する。
（右）個別特徴と視覚・非視覚属性（光沢間、複雑さ、硬軟感）との相関。暗色の部分が多いほど、相関する特徴が多いことを示す。硬軟感に相関する個別特徴は Pool３-4 層に多い。

（２）（１）の解析において、局所 DNN 特徴の空間平均といった単純な統計量が非視覚属性と良い対応を示したことに注目し、DNN 特徴の空間平均および分散を操作することで物体画像の非視覚属性の印象を変化させる画像合成手法を開発した（図２左)。本手法は、テクスチャ合成や絵画スタイル変換の手法として知られる Gram 行列特徴量を用いる従来手法と比べ、単純ながら同等の精度があり、神経科学的に解釈しやすいものである。
さらに、本合成手法と（１）で得た DNN 特徴モデルを組み合わせ、画像特徴を選択的に操作して物体の視覚・非視覚属性の印象を変化させる画像合成手法の開発も進めた（図２右)。しかしながら本手法には不安定な側面もあり、任意の画像に適用するには限界があった。このため、引き続き開発、改良を進めていく必要があると考えている。

図２（左）DNN 特徴を用いた画像合成例（中段：従来手法，下段：提案手法)。（右）DNN 特徴モデルを用いた視覚的・非視覚的印象の操作例。

（３）DNN 特徴と心理評価データとの間に良い対応が見られた一方、現有脳活動データを用いた解析では、DNN 特徴と腹側高次視覚野の活動との間に良い相関は見出されなかった。
本解析と並行して、物体の視覚・非視覚属性の認識に関するヒト脳機能イメージング研究のメタ解析を行ったところ、腹側高次視覚野においても関わる脳部位は幅広く分布し、属性による違いも見られること等が示唆された（図３左)。本結果は総説論文において報告した（Komatsu & Goda, Neuroscience 2018)。近年、ヒト高次視覚野の詳細な機能地図が明らかになりつつあり、これらのことを考慮すると、腹側高次視覚野を適切に機能区分した上で情報表現の解析を行う必要があると思われる。以上の考えから、7 テスラ超高磁場機能的 MRI (fMRI)を用いたヒト視覚野の視野地図及び機能地図の高分解能マッピングを進めた（図３右)。本研究期間内に完了できなかったものの、区分された各小領域の活動を詳細に解析することで DNN 特徴モデルとの対応も明らかになる可能性があると考えている。

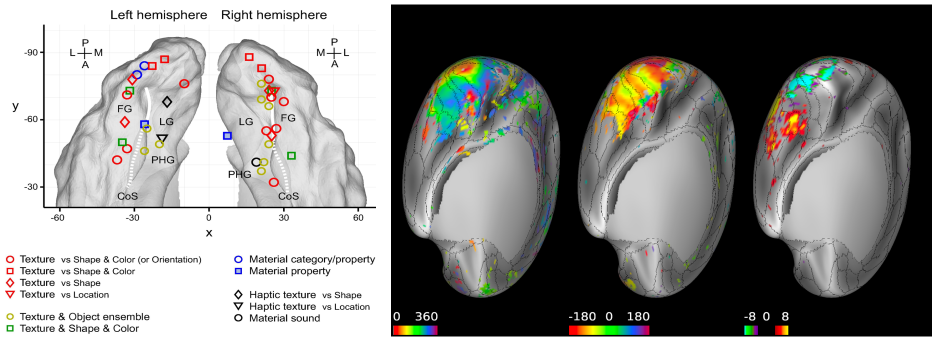

図３（左）ヒト腹側高次視覚野における物体の表面属性や非視覚属性に感度をもつ脳部位(Komatsu & Goda, Neuroscience, 2018)。（右）7 テスラ fMRI によるヒト視覚野の視野地図及び機能地図の計測例（左半球，左: eccentricity，中: polar angle，右: 物体選択性)。

（４）VR 環境下において、体性感覚的な風の強さの知覚が視覚情報によって影響を受けることを見出し、論文として報告した（図４；西牧，郷田，蒲池，日本 VR 学会誌 2021）。本現象は、我々の研究グループが見出した、視覚と体性感覚（風覚）との間の多感覚相互作用を示す新しい現象である。また、過去の経験が関係することを示唆する性質もみられており、この点において本研究の仮説とも整合するものである。その他にも、水中環境を VR 再現し、仮想的なスキューバダイビング時の自己移動感覚や液面知覚に関する検討などを進め、学会発表を行った。以上の成果は、VR 環境下で、視覚・非視覚属性の相関を人工的に操作してその影響を調べる研究に繋がるものと期待される。

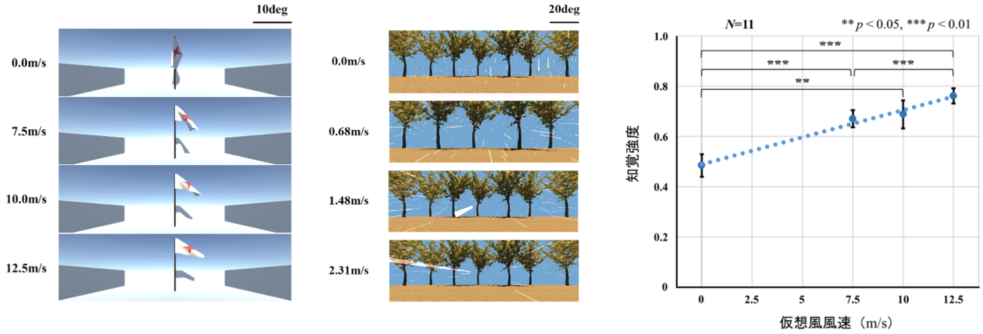

図４ (左) 風により旗がはためく VR 映像例。（中）落葉が風で舞う VR 映像例。（右）実際に身体に受ける風の強さの体性感覚強度（縦軸）は映像中の視覚的仮想風の風速（横軸）に影響される（旗の例）（西牧，郷田，蒲池，日本 VR 学会誌 2021）

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　0件／うちオープンアクセス　2件）

１．著者名 西牧 侑哉、郷田 直一、蒲池 みゆき	４．巻 26
２．論文標題 VR環境下での風の強さ知覚における視触覚統合	５．発行年 2021年
３．雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	６．最初と最後の頁 14～21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18974/tvrsj.26.1_14	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 Komatsu Hidehiko、Nishio Akiko、Ichinohe Noritaka、Goda Naokazu	４．巻 226
２．論文標題 Structure and function of neural circuit related to gloss perception in the macaque inferior temporal cortex: a case report	５．発行年 2021年
３．雑誌名 Brain Structure and Function	６．最初と最後の頁 3023～3030
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00429-021-02324-6	査読の有無 有
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 －

１．著者名 Yokoi Isao、Tachibana Atsumichi、Minamimoto Takafumi、Goda Naokazu、Komatsu Hidehiko	４．巻 120
２．論文標題 Dependence of behavioral performance on material category in an object-grasping task with monkeys	５．発行年 2018年
３．雑誌名 Journal of Neurophysiology	６．最初と最後の頁 553～563
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1152/jn.00748.2017	査読の有無 有
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 －

１．著者名 Komatsu Hidehiko、Goda Naokazu	４．巻 392
２．論文標題 Neural Mechanisms of Material Perception: Quest on Shitsukan	５．発行年 2018年
３．雑誌名 Neuroscience	６．最初と最後の頁 329～347
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neuroscience.2018.09.001	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 郷田 直一	4．巻 57
2．論文標題 質感認知の神経基盤を探る	5．発行年 2018年
3．雑誌名 日本画像学会誌	6．最初と最後の頁 197～206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11370/isj.57.197	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　2件／うち国際学会　2件）

1．発表者名 川俣 昂平，蒲池みゆき
2．発表標題 水中での移動感覚再現に向けたロコモーションインタフェースの検討
3．学会等名 第27回バーチャルリアリティ学会大会
4．発表年 2022年

1．発表者名 Kawamata Kohei, Kamachi G Miyuki
2．発表標題 Effects of Skin and Water Conditions on Water Surface Perception
3．学会等名 The 20th International Symposium on Advanced Technology（国際学会）
4．発表年 2021年

1．発表者名 Nishimaki Yuya, Goda Naokazu, Kamachi G Miyuki
2．発表標題 Visual and Tactile Perception of the Wind in the Virtual Reality environment
3．学会等名 The 15th Asia-Pacific Conference on Vision（国際学会）
4．発表年 2019年

１．発表者名 郷田 直一
２．発表標題 脳が作り出す「ものの質感」のイメージング
３．学会等名 第71回日本画像学会イメージングカフェ（招待講演）
４．発表年 2018年

１．発表者名 郷田 直一, 小松 英彦
２．発表標題 物体の材質を表現する視覚特徴: CNNを用いた解析
３．学会等名 第40回日本神経科学大会
４．発表年 2017年

１．発表者名 郷田 直一
２．発表標題 光沢や艶, 質感を感じる脳のメカニズムについて
３．学会等名 技術情報協会セミナー No.707203（招待講演）
４．発表年 2017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
研究分担者	蒲池 みゆき (Kamachi Miyuki) (70395101)	工学院大学・情報学部（情報工学部）・教授 (32613)	

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