

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：63905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330179

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Modeling the representation and transformation of material-related information in the visual cortex

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々の脳は見ただけで容易にももの材質を認識できる。本研究では、脳の優れた材質認識のメカニズムの理解、及びそのメカニズムを模擬する情報処理モデルの構築を目指し、心理計測、脳活動計測、及び画像特徴解析を行った。その結果、(1) サルの腹側高次視覚野がものの材質の視覚的・触覚的特性を表現している (2) その神経表現は、単純な視触覚経験を通して、視覚特徴と手触り等との関係を学習することにより形成される (3) 深層畳み込みニューラルネットワークの情報表現がものの材質特性をよく反映しうる、ことなどが明らかになった。これらの成果は、脳における材質情報の計算過程の理解を大きく進展させるものである。

研究成果の概要(英文)：Our brain can easily recognize the material of an object - what the object is made of - just by seeing it. This study is aimed at understanding the neural processing of the material-related information through the visual stream in the brain and developing a computational model that can mimic the processes. A series of functional brain imaging and psychological experiments revealed that (1) the higher ventral visual areas in monkeys represent visual and non-visual material properties of objects, and (2) the neural representation can be affected by simple visuo-haptic experience on the objects, suggesting that is formed through learning of the crossmodal association. Further analysis with the state-of-the-art computer vision techniques revealed that (3) deep convolutional neural network models can capture the representation of the visual and nonvisual material properties. These new findings greatly advance understanding of material information processing in the brain.

研究分野：認知神経科学

キーワード：視覚 物体認知 質感 テクスチャ 多感覚 fMRI CNN

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物体やシーンの情報を瞬時に抽出し理解している。このとき、金属、石、布など、物体の材質や、それらの手触りや冷たさ、柔らかさなども瞬時に認識する。また、様々な材質は特定の感性的・情動的印象とも結びついている。ふわふわとした柔らかそうな毛を見て心地よさそうに感じたり、木材でできた家具を見て落ち着きを感じたりする人は多いだろう。このような材質感と感性的・情動的印象との関係は産業界においても非常に興味を持たれているテーマである。しかしながら、視覚入力が脳の中でどのような計算過程(アルゴリズム)を経て金属・石・布といった材質カテゴリーの情報に変換されるのか、また、種々の材質が持つ感性的印象が脳においてどのように形成されるのかについては、ほとんど明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究は、脳において視覚入力が高次の材質についての情報へと変換され、豊かな材質感が生み出される過程の解明を目指す。具体的には、画像がどのような統計的特徴を含むときにどのような脳活動が生じ、どのような材質感が生まれ、どのような感性的印象を伴うのかを説明・予測できる視覚情報処理モデルを構築する。このため、多様な材質画像が与える印象を心理実験により計測するとともに、機能的MRI (fMRI) を用いて、同じ画像を観察したときのヒト・サルの脳活動計測を行う。これら心理・脳活動データを多変量解析の手法により分析し、さまざまな脳領域の材質情報の表現構造とそれらの脳領域間での変換過程を明らかにする。さらに、これら心理・脳活動データを画像特徴解析と組み合わせ、脳において画像から材質カテゴリーに関する情報や材質特有の感性的印象が生まれる過程をモデル化する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、脳の階層的情報処理経路において、画像特徴レベルの表現から材質の硬さ・冷たさ・粗さといった物理的性状を反映した表現や感性的・情動的な印象を反映した表現へと変換されているとの考えに基づいて研究を進める。この変換過程を明らかにするため、主に、材質カテゴリー間の類似度に注目した表現類似度解析の手法を用いる。材質カテゴリー間の関係は階層的・多次元な構造になっていると考えられる。材質カテゴリーの心理的な構造はSD法などによる心理計測で得られるデータから多変量解析の手法を用いて求めることができる。また、脳における情報表現の構造は、fMRI で得られる脳の各部位の活動分布パターンから同様に多変量解析の手法を用いて求めることができる(引用文献)。このようにして得られる心理的な材質の表現構造と各脳領域の情報

表現との関係を明らかにする。特に、本研究代表者が有するサルのfMRIの技術を活用し(引用文献)、ヒトだけでなくサルを対象として実験・解析を行う。

(2) 上記方法(1)で得られた心理・脳活動データを用いて、材質情報処理モデルを構築する。脳の各領域での情報表現は並列的・階層的に構成された材質情報処理モデルの各モジュールの中間出力と対応すると考えられる。このような観点から、材質情報処理モデルの構築、検証、改良を進める。具体的には、輝度・色ヒストグラム特徴量、サブバンド特徴量(PS統計量)、およびコンピュータビジョン分野で提案されている様々な画像特徴量を材質情報の候補特徴とし、それらと心理・脳活動データとの対応を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 第一に、サルを対象として、さまざまな視覚野(図1)において材質情報がどのように表現されているかを方法(1)により調べた。その結果、サルの高次の視覚野の一部(V4/PITと呼ばれる脳領域)は、ものの材質の視覚的特性(外観)および一部の触覚的特性(手触りなど)を表現していることを世界で初めて明らかにした(雑誌論文、学会発表)。本実験・解析は2010-2012年度基盤研究C「ヒト・サル視覚系における表面材質情報の表現と変換過程」に引き続き行ったものである。

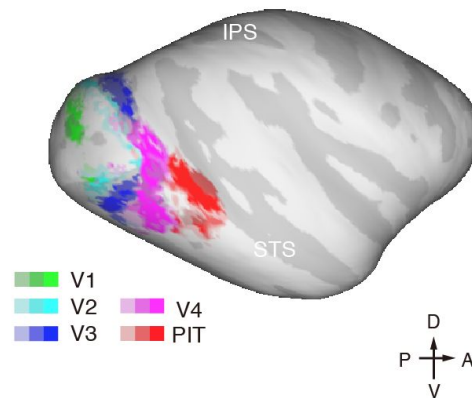


図1 詳細な解析を行ったサルの視覚野(右半球)。それぞれの領域内において材質画像を見たときによく反応する部位のみを示している。これら5つの領域のうち、V4とPITが材質情報を表現していることが明らかになった。

(2) 上記成果(1)の実験・解析を進める過程において、ヒトの視覚野(引用文献)とサルの視覚野の情報表現に一部違いがあることも明らかになった。その違いが生じた理由の一つとして、さまざまな材質の物体を見たり

触れたりしてきた経験（視触覚経験）の違いがあげられる。成果(1)の研究ではセラミックや布などの人工物を多く含んでいたが、サルはそれらを触れた経験がなく、どのような手触りかなどを知らなかった可能性がある。経験の影響を理解することは、本研究課題の目的である脳の材質情報処理の理解とモデル構築のために非常に重要であると考えられる。そこで、サルがそれまで馴染みのない材質のものを触れる経験をするることによって、成果(1)で見出した視覚野の情報表現がどのように変化するのかを明らかにするための実験を行った。新たに、サルが触ることが可能な様々な材質の実物体刺激とその画像刺激のデータベースを作成し（図2上）、それら物体を見て触れる長期的経験の前後において、材質画像観察時の脳活動を計測した（図2下）。得られた視触覚経験前後の脳活動を方法(1)により詳細に調べ、これまでに以下のことを明らかにし、論文または学会にて発表した。

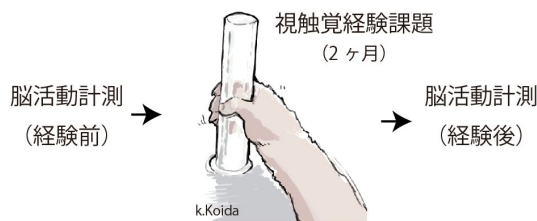


図2(上) 実物体刺激の例。9カテゴリーの材質の物体からなる(各カテゴリー4サンプル)。サルにとって馴染みのないものを多く含む。
(下) 実験の流れ。視触覚経験課題では、サルは目の前に提示された実物体を掴むと報酬(ジュース)が得られる。物体の材質を様々に変え、2ヶ月間にわたり経験課題を行った。

物体を繰り返し見て触れる経験は、これまで考えられてきた以上に大きな影響を脳の視覚野に与えることが明らかになった(雑誌論文, 学会発表)。視触覚経験後には、高次の視覚野の活動は、似通った手触り(滑らかさ、硬さ、冷たさなど)の材質に対しては似た反応のパターンを示す。すなわち、高次視覚野における情報表現は視触覚経験後に手触りなどの材質特性をよりよく反映する(図3)。このような変化はPITにおいて顕著であり、また、実際に触れる経験をしたものに対して限定的であった。本結果は、サルの高次視覚野の情報表現は視覚入力のみでなく、過去の触覚経験の影響を受けていることを示す世界で初めての知見であり、複数のWEBメディアにて報道された(2016/3/18サイエンスポータル、マイナビニュース、日経電子版、3/30 財経新聞等)。

本結果は、高次の視覚野で、外観(視覚特徴)と様々な触覚的特性との間にみられる統計的相関(例えば、赤いものは暖かい、金属様表面のものは重い、などの傾向)を学習している可能性を示しており、脳において視覚入力が材質の情報へと変換される過程を理解する上で重要な知見である。

上記成果に加えて、視触覚経験課題の過程で、サルが毛などの特定の材質の物体を進んで触ろうとしない傾向があることが明らかになった(学会発表)。この結果は当初全く想定していなかったものであるが、特定の材質についての好みや価値が行動としてあらわれた極めて興味深い発見であると考えている。本行動の理解は材質に対する感情的、情動的反応を計測し、モデル化するためにも有用であると考えられる。現在、さらに解析を進めている(論文投稿準備中)。

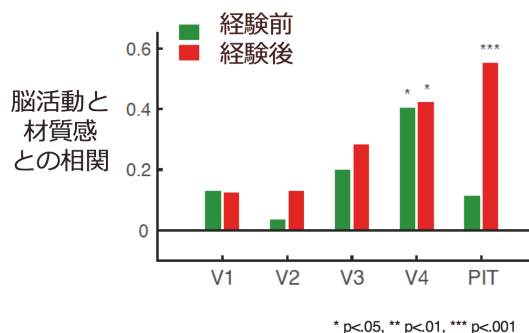


図3 視触覚経験による脳の情報表現の変化。縦軸は、サル脳の活動から求めた材質間の類似度と、ヒトの心理実験により求めた材質感の心理的な類似度との相関係数を表す。高い相関は、その部位の脳活動が材質感をよく反映していることを意味する。PITの活動は視触覚経験後にのみ高い相関を示した。

(3) 研究開始当初においては、方法(2)に挙げたいくつかの画像特徴を材質の候補特徴として想定していた。一方、本研究課題の期間中に、コンピュータビジョンの分野で深層畳み込みニューラルネットワーク(CNN)技術が急速に発展、普及し、物体カテゴリーや材質の分類・予測などがこれまで以上の精度で実現できるようになってきた。CNNは脳の視覚系をある程度模擬した階層的構造になっており、単純な畳み込みとプーリング処理を積み上げた構造となっている(図4上)。その低次・高次層が表現している特徴は、それぞれ脳の低次・高次視覚野の特徴と一定の対応があるとの報告もある(引用文献)。以上を踏まえCNN技術を用いた材質情報処理モデルの構築を試みた。これまで用いてきた材質画像を使用し、CNNの様々な層の特徴やその統計量が、これまでの実験で計測済みの材質特性の印象(心理データ)ならびにヒト・サルの脳活動データと対応するかを網羅的に調べた。CNNには、物体カテゴリー分類、材質分類、シーン分類などを学習済みの様々なものを用いた。その結果、一般にCNNモデルの高次畳み込み層・プーリング層の情報表現が材質特性の印象を非常によく反映することが明らかになった(図4下、学会発表)。これらの層は材質感と関係する特徴を含んでいると考えられる。

現在、各CNN層内のどのような特徴が材質感の形成に重要な役割を果たしているのか、また、これらCNN層の情報表現はヒト・サルの脳活動データとどのように対応するかについて引き続き詳細な解析を進めている。本研究期間内に実現することはできなかったが、CNNを基にした本モデルを脳活動データと対応させて最適化・改良を進めていくことにより、当初の目的であった脳の材質情報処理モデルの構築が実現可能であると考えられる。

<引用文献>

Hiramatsu C, Goda N, Komatsu H. Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. *NeuroImage*, 57(2), 482-494, 2011

Okazawa G, Goda N, Komatsu H. Selective responses to specular surfaces in the macaque visual cortex revealed by fMRI. *NeuroImage*, 63(3), 1321-1333, 2012

Kriegeskorte N. Deep neural networks: a new framework for modeling biological vision and brain information processing. *Annu. Rev. Vis. Sci.*, 1, 417-446, 2015

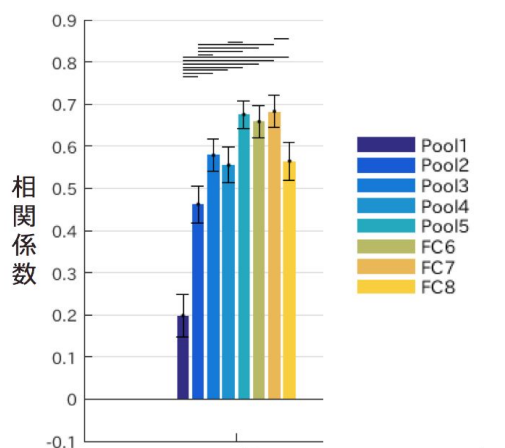
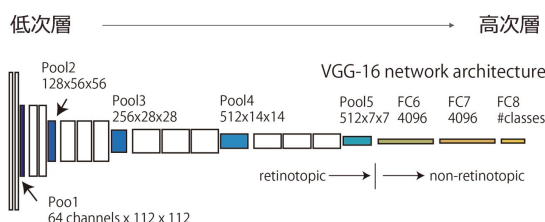


図4(上)本研究で用いたCNNモデルの構造(例:VGG-16)。大きく8つの層からなる。一般に、入力層に近い低次層は画像の局所についての比較的単純な情報を表現し、高次層になるほど大域的で複雑な情報を表現する。

(下)CNNモデル(例:VGG-19)の様々な層の情報表現と材質感との対応(相関係数)。高い相関は、各層の特徴から計算した材質画像間の類似度が材質感の類似度によく対応していることを意味する。高次プーリング層(Pool15)やそれに続く全結合層(FC6, FC7)が材質感と非常に良い対応を示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Goda N, Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Komatsu H. Crossmodal association of visual and haptic material properties of objects in the monkey ventral visual cortex.

Current Biology, 26(7), 928-934, 2016
査読有

DOI:10.1016/j.cub.2016.02.003

Goda N, Tachibana A, Okazawa G, Komatsu H. Representation of the material properties of objects in the visual cortex of non-human primates.

The Journal of Neuroscience, 34(7), 2660-2673, 2014
査読有

DOI:10.1523/JNEUROSCI.2593-13.2014

〔学会発表〕(計 19 件)

郷田直一 小松英彦. 物体の材質を表現する視覚特徴: CNN を用いた解析.
第 40 回日本神経科学大会, 2017 年 7 月 21 日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)(予定)

Goda N. Representation of visual and nonvisual material properties of objects in the visual cortex. (招待講演)
NICT-NSF Collaborative Workshop on Computational Neuroscience, 2017 年 1 月 18 日, 脳情報通信融合研究センター (大阪府吹田市)

郷田直一. 視覚野における多感覚的な情報の表現. (招待講演)
第 8 回多感覚研究会, 2016 年 11 月 20 日 早稲田大学(東京都新宿区)

郷田直一. 材質を知る: 質感認知の脳内機構. (招待講演)
第 20 回視覚科学フォーラム, 2016 年 8 月 25 日, 脳情報通信融合研究センター(大阪府吹田市)

Goda N. Neural representation of material properties of objects in visual cortex: Impact of visuo-tactile experiences. (招待講演)
第 38 回日本神経科学大会, 2015 年 7 月 29 日, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

Goda N. Representation of material properties of objects in visual cortex investigated with multivoxel pattern analysis. (招待講演)
第 14 回日中韓合同ワークショップ Neurobiology and Neuroinformatics (NBNI2014), 2014 年 12 月 20 日, 岡崎コnfアレンスセンター(愛知県岡崎市)

郷田直一 横井功 橘篤導 南本敬史 小松英彦. サル視覚野における物体素材表現に視触覚経験が及ぼす効果: fMRI 研究.
第 37 回日本神経科学大会, 2014 年 9 月 13 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

横井功 橘篤導 南本敬史 郷田直一 小松英彦. 実物把持課題における素材カテゴリーに依存したサルの行動.
第 37 回日本神経科学大会, 2014 年 9 月 11 日, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)

Goda N. Neural representation of materials of objects in human and monkey visual cortex. (招待講演)
The 10th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV2014), 2014 年 7 月 20 日, かがわ国際会議場(香川県高松市)

郷田直一 橘篤導 岡澤剛起 小松英彦. サル視覚野における素材情報処理過程: fMRI 研究.
第 36 回日本神経科学大会, 2013 年 6 月 20 日, 国立京都国際会館(京都府京都市)

〔図書〕(計 1 件)

小松英彦 郷田直一. 質感は脳でどのように処理されているのか?
触り心地の制御、評価技術と新材料・新製品開発への応用第 1 章第 1 節, 技術情報協会, 2017 年, 7 ページ

〔その他〕

ホームページ等

「見て触れる」経験が「見る」仕組みを変える-脳の「視覚野」が手触りの経験によって変化することを発見-
http://www.nips.ac.jp/release/2016/03/post_317.html

6. 研究組織

(1) 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