

令和 3 年 6 月 26 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01755

研究課題名(和文) 自然光景下における視線移動と視覚的物体認識ダイナミクスの統合的研究

研究課題名(英文) Integrative study on gaze shift and visual object recognition dynamics in natural scenes

研究代表者

宮脇 陽一 (Miyawaki, Yoichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80373372

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多様な物体からなる自然な光景のもとで、ヒトは何に優先的に視線を向け、何を優先的に認識するのかを、時間的側面から理解することを目指し、以下の成果を得た。(1) 自然光景画像観察時の眼球運動計測と深層畳み込みニューラルネットワークを用いた画像特徴量の解析により、高次画像特徴量に対する時空間的な誘目性を発見した。(2) この誘目性は、画像の意味や文脈等に関わらず、純粹に画像特徴量に対して引き起こされることを発見した。(3) 脳磁場信号を高時空間分解能で計測・解析するための新しい信号源推定手法を開発した。(4) 脳活動パターンに物体の画像情報が表現される時間を推定し、視線移動の潜時と比較した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの視線の解析は、ヒトがどのような対象を優先的に処理し、認識するかという基礎的知見を与えるものであり、またその知見は、ヒトへの効率的な情報提示のあり方を考える上で有用であるとともに、注意喚起のための標識や広告、デザインなどへの応用において価値をもつ。特に本研究では、シーンの意味や文脈から独立した純粹な高次特徴量への誘目性があることを見出しているため、画像操作による視線誘引への応用可能性を提示することにも成功しており、その意義は高いと考えられる。また新しい脳活動信号源解析手法は、本研究の枠組みを超えて、ヒト脳磁場信号解析全般への波及効果が大きい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to understand what humans preferentially look at and recognize in natural scenes consisting of various objects from a temporal perspective, and obtained the following results. (1) We found spatio-temporal prioritization of gaze toward higher-order image features by combining analysis of eye movements during observation of natural scene images and quantification of image features using a deep convolutional neural network. (2) We found that this prioritization is caused solely by image features, regardless of the meaning or context of presented images. (3) We developed a new source estimation method for measuring and analyzing magnetoencephalography signals with high spatiotemporal resolution. (4) We estimated the representation time for object image information in brain activity patterns and compared it with the latency for eye movement.

研究分野：脳神経科学

キーワード：眼球運動 自然画像 脳 物体認識 時間

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

私たちを取りまく実世界環境は、多種多様な物体の集合でできている。こうした自然な光景をヒトがどのように認識し、行動しているのかという根源的な問いに答えるには、自然光景中での物体認識のメカニズムを理解することが重要になる。その際に重要な手がかりとなるのは、眼球運動に伴う視線の移動である。ヒトの視力は視線を向けた注視位置(中心視野)で最も高く、また視線は空間的注意を向ける位置とも強く関連することから、自然光景中での視線移動は情報取得の差別化を行う過程であると捉えられることが多い。しかし、本来この差別化の過程には、自然光景中の何を詳しく見るかという空間的差別化と、何を素早く見るかという時間的差別化の両面があるはずであるにも関わらず、視線計測を行った従来研究のほとんどは視線が向く頻度を空間位置に対して調べているのみであり、視線が向く時間順序(注視順序)を体系的に調べた例はほとんどなかった。こうした視線の解析は、画像がもつ特徴量と関連付けて論じられることが多いが、その場合においても着目されているのは低次画像特徴量からなる saliency がほとんどであり、より複雑な高次画像特徴量との関連を論じた研究はなかった。また、こうして逐次視線が向けられる対象の情報が脳にどのように表現されていくのかを調べた研究例はなく、時空間分解能の高い脳活動計測および解析技術の開発が望まれているという背景があった。

### 2. 研究の目的

こうした背景をもとに、本研究では、多様な物体からなる自然画像を観察した際に、ヒトは何に優先的に視線を向け、何を優先的に認識するのかを、時間的側面から理解することを目的とした。より具体的には、どのような対象が時間的に優先して注視されるのか、またその対象がもつ特有の画像特徴はあるのか、そしてその対象の情報は脳内にいつ表現されるのか、を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

この目的達成のため、自然画像に対する視線計測実験、自然画像の画像特徴量解析、自然画像観察時の脳活動計測実験の3つのアプローチを採用した。各手法の具体的内容を以下で示す。

#### 【課題1】自然画像観察時のヒト眼球運動計測実験

多様な物体を含む自然画像として自然光景画像を用いた実験を行った。これらの画像は、大規模自然光景画像データベースから選定した。画像データベースとしては、画像内の各座標値にどのような物体があるかがラベル付けされているものを用いた。これにより、眼球運動計測によって画像中のどこを見ているかの座標値を得ることさえできれば、どの物体を見ていたかを特定できるようになる。こうした利便性を活かし、実験と解析の効率化を図った。

眼球運動計測は、赤外線による眼球の画像計測を用いる方法によって実施した。実験で用いた全画像に対して計測した眼球運動のデータを統合し、空間的にどの位置がよく見られるかを表す注視頻度とともに、時間的な注視順序傾向を定量化した。これらの傾向が類似した物体カテゴリがあるかどうかを階層クラスタリングにより解析した。

#### 【課題2】自然画像特徴量解析

課題1で用いた自然画像の特徴量解析を行い、画像中のある空間位置における特徴量を定量化した。従来研究で典型的に用いられている saliency (顕著性)に加え、深層畳込みニューラルネットワーク(DCNN)の各層の反応強度をもとにして、ある画像位置に存在する低次特徴量から高次特徴量までを網羅的に定量化することを目指した。この手法に基づき、自然画像中での特徴量の空間分布を可視化する手法を開発した。DCNNとしては、最も普及している AlexNet (Krizhevsky et al., 2012) を主として用いた。この結果を用いて、課題1の視線計測結果を再解析することにより、時空間的な視線誘引性を画像特徴量の観点から定量化した。

さらに、DCNNを用いて、画像がもつ意味や文脈を排除し、ある特定の特徴量をもつ画像刺激を人工的に合成する手法も開発した。課題1での眼球運動計測では自然光景画像を用いたので、その光景自体がもつ意味や画像の文脈などに眼球運動が影響を受けているかもしれない。そこでこうした可能性を排除するため、DCNNの特定の層が選択的に強く活動する特徴量からなる画像を合成し、眼球運動計測実験に用いた。こうした刺激を用いることで、課題1で確認された眼球運動の特性が、純粋に画像特徴量によるものかどうかを検証できるようにした。

#### 【課題3】自然画像観察時のヒト脳活動計測実験

自然画像観察時のヒト脳活動を脳磁場(MEG)計測により高時間分解能で計測した。脳部位ごとの観察画像の情報表現を解析するためには、大脳皮質上での脳活動パターンを高精度に求めるMEG信号源推定を行う必要がある。これを実現するため、同様の画像刺激を観察している際の機能的磁気共鳴画像(fMRI)を計測することで脳活動部位を高空間分解能で求めておき、これをMEG信号の計測データとベイズ統計の手法(Sato et al., 2004)で組み合わせることにより、高時空間分解能で大脳皮質上の脳活動パターンを求める手法を用いた。求めた脳活動パターン

を入力とし、ヒトが観察した画像を予測するデコーダを学習することにより、画像刺激提示からどれだけの潜時で脳活動パターンに画像情報が表現されるのかを同定した。

研究の進展により、こうした方法では本来は関係のない脳部位においても画像情報が表現されているかのような偽陽性的結果が得られることが確認された。これを抑制するため、ヒト脳の機能領野の区分情報を積極的に取り込んだ新しい MEG 信号源推定手法の開発も行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高次画像特徴量に対する時空間的誘目性

課題 1 および課題 2 を通して実施した自然画像特徴量解析および眼球運動計測により、高次画像特徴量が空間的にも時間的にも高い視線誘引性をもつことが明らかになった。従来研究においては saliency が高い場所が高い視線誘引性を持つことが知られていたが、高次特徴量を多く含む画像位置のほうが saliency よりも有意に視線を誘引し、かつ画像提示後の早い潜時帯においてより強く視線を誘引することが明らかになった。またこうした視線誘引性は、視線が向けられる物体カテゴリの差としてよりも、画像特徴量の差としてよく説明できることも分かった。

また DCNN のある特定の層の活動度を選択的に高める特徴量を含むように人工的に合成した画像を用いた場合でも、高次層に対応する画像特徴量を含む場合により強く視線が誘引されることが明らかになった。こうした画像がどのような物体に見えるかを回答させた時、ほとんどの場合で確信度の低い回答しか得られないという実験結果を合わせて考えれば、これらの画像は自然光景画像がもつ意味や文脈などの情報を失っており、純粹に特定の画像特徴量のみを含むものであったといえる。以上の結果より、高次画像特徴量は従来定説とされてきた saliency よりも強い視線誘引性を持つことが示唆された。

##### (2) ベイズ統計に基づく MEG 信号源推定とその改良法の提案および検証

課題 3 において自然画像観察時のヒト脳活動を高時空間分解能で計測し解析するため、ベイズ統計に基づく MEG 信号源推定を行い、高精度で大脳皮質上での脳活動パターンを推定することに成功した。脳活動部位の位置推定精度は良好であり、視覚野を中心として妥当な脳活動が推定できた。

同時に、こうして一見妥当そうな脳活動が推定されていたとしても、広い範囲の脳部位から観察した画像の情報が読み取れてしまうという不合理な結果が得られることを、シミュレーションによって発見した。この成果は、同様の手法を用いて得られた結果から脳内での情報表現部位を解釈することの危険性を示す重要な知見であるといえる。

さらに、こうした偽陽性的結果を抑制するため、ヒト脳の機能領野の区分情報を積極的に取り込んだ新しい MEG 信号源推定手法を開発した。シミュレーションにおいて良好な結果を得ることに成功しており、従来手法より有意に高い成績が達成可能であることを示した。しかしながら、実データ解析における精度が不十分である点が現時点での課題として残されている。

##### (3) 自然画像観察時の MEG 信号からの画像情報抽出および脳内情報表現時間の同定

課題 3 において計測されたヒト MEG 信号をもとに大脳皮質上での脳活動パターンを画像提示後の各時刻で推定し、その推定された脳活動パターンからヒトが観察した画像情報を予測することで、脳活動パターンに画像情報がいつ表現されたかを推定することもできた。こうして得られた画像情報の脳内表現時刻と、視線移動の時刻を比較対照することも可能になった。

しかしながら、研究成果(2)で述べたように、大脳皮質上での脳活動部位の位置推定精度は高いものの、画像情報の表現部位については偽陽性的な結果が混在している可能性があり、慎重な解釈が必要である。こうした偽陽性的推定結果を抑制することを目的とした新しい MEG 信号源推定手法を前述の通り開発しているが、その有効性はシミュレーションで実証できた段階であり、実データでの有効性は明らかになっておらず、適用においてはやはり慎重さが必要な段階である。

こうした問題を解決すべく、MEG 信号源推定手法をさらに改良し、関連する脳活動部位の先見知識を導入可能にする試みに現在取り組んでいる。同時に、fMRI 信号計測を高速化する研究にも着手し、現在のところ良好な結果が得られつつある。このように、MEG 信号計測と fMRI 信号計測の両側面において時空間分解能を高める新たな研究を実施する必要が生じたため、本研究課題の終了年度前年度において新たな科研費課題を提案し、採択され、研究を展開している。

以上のように、本研究課題の実施を通して、(1) 従来の定説を覆し、ヒトの視線は高次画像特徴量に対して時空間的に誘引されやすいことを発見し、さらに(2) 自然画像観察時のヒト大脳皮質上脳活動パターンに画像情報がいつ表現されるかを推定した。一方、(3) そうした画像情報が脳内表現領域のどこで表現されているかを高精度に局限して求めることは難しいことを明らかにしたうえで、(4) 情報表現領域の局限精度を高める新しい MEG 信号源推定手法の開発を行った。またこうした成果から発展し、(5) MEG と fMRI を組み合わせた新しい研究手法の開発へと展開することに成功した。これらの成果をさらに応用することにより、画像情報の脳内表現ダイナミクスと視線移動の動的関係性をさらに明らかにしていく予定である。

Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, Geoffrey E. Hinton, Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Advances in neural information processing systems*, vol. 25, pp. 1097-1105 (2012).  
Masa-aki Sato, Taku Yoshioka, Shigeki Kajihara, Keisuke Toyama, Naokazu Goda, Kenji Doya, Mitsuo Kawato, Hierarchical Bayesian estimation for MEG inverse problem, *Neuroimage*, vol. 23, pp. 806-826 (2004).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Masashi Sato, Okito Yamashita, Masa-aki Sato, Yoichi Miyawaki	4. 巻 13
2. 論文標題 Information spreading by a combination of MEG source estimation and multivariate pattern classification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLoS ONE	6. 最初と最後の頁 e0198806
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0198806	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23件（うち招待講演 7件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 宮脇陽一, 佐藤匡
2. 発表標題 脳磁場信号源推定における情報拡散現象
3. 学会等名 最新のEEG/MEG研究と電流源推定法の現在地
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋直樹, 赤松和昌, 葦澤駿, 宮脇陽一
2. 発表標題 脳磁場信号源推定への構造化スパースモデリングの適用および評価
3. 学会等名 最新のEEG/MEG研究と電流源推定法の現在地
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋直樹, 赤松和昌, 宮脇陽一
2. 発表標題 脳磁場解析における構造化スパースモデリングの適用および評価
3. 学会等名 第22回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS 2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋直樹, 赤松和昌, 宮脇陽一
2. 発表標題 構造化スパースモデリングを用いた脳磁場信号源推定の評価
3. 学会等名 第3回ヒト脳イメージング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoichi Miyawaki, Daniel Handwerker, Javier Gonzalez-Castillo, Laurentius Huber, Arman Khojandi, Yuhui Chai, Peter Bandettini
2. 発表標題 Time-resolved fast neural decoding independent of variation in hemodynamic response latency
3. 学会等名 Organization for Human Brain Mapping (OHBM) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Ishibashi, Kazuaki Akamatsu, Shun Nirasawa, Yoichi Miyawaki
2. 発表標題 Reduction of Information Spreading in MEG Source Estimation Using a Structured Model
3. 学会等名 Organization for Human Brain Mapping (OHBM) 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoichi Miyawaki, Daniel A Handwerker, Javier Gonzalez-Castillo, Laurentius Huber, Arman Khojandi, Yuhui Chai, and Peter A Bandettini
2. 発表標題 超高磁場fMRI信号の超高速計測による血流動態反応の遅延から独立した神経情報表現のデコーディング
3. 学会等名 第43回日本神経科学大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoichi Miyawaki, Daniel Handwerker, Javier Gonzalez-Castillo, Laurentius Huber, Arman Khojandi, Yuhui Chai, and Peter A Bandettini
2. 発表標題 Event-related decoding of visual stimulus information using short-TR BOLD fMRI at 7T
3. 学会等名 2020 ISMRM & SMRT VIRTUAL CONFERENCE & EXHIBITION (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎海, 葺澤駿, 赤松和昌, 宮脇陽一
2. 発表標題 構造化スパースモデルを用いた脳磁場信号源推定における信号源ノイズの影響の評価
3. 学会等名 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 超高磁場fMRI信号の超高速計測による血行動態と神経情報表現の時間的分離
3. 学会等名 第4回ヒト脳イメージング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 深層ニューラルネットワークモデル・脳磁場計測・超高磁場MRI計測の融合による認識行動ダイナミクスの高時空間分解能解析の試み
3. 学会等名 生理研研究会「人工知能技術と科学の協調と展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 ヒト脳活動の非侵襲的計測と神経情報表現の解析
3. 学会等名 静岡大学川人研究室セミナー（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊莉菜、西野智博、赤松和昌、宮脇陽一
2. 発表標題 深層畳み込みニューラルネットワークを用いて生成した高次画像特徴への視線の誘引
3. 学会等名 日本視覚学会2019年冬季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 衛藤祥太、中谷裕教、宮脇陽一
2. 発表標題 実物体の触力覚形状認識時における脳内情報表現部位の遷移
3. 学会等名 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rina Watanabe, Tomohiro Nishino, Kazuaki Akamatsu, Yoichi Miyawaki
2. 発表標題 Gaze attraction toward higher-order image features generated by deep convolutional neural network
3. 学会等名 Vision Sciences Society 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuaki Akamatsu, Yoichi Miyawaki
2. 発表標題 Temporal priority of gaze during natural scene viewing
3. 学会等名 Vision Sciences Society 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 非侵襲的脳活動計測を用いた神経情報表現の研究
3. 学会等名 日本学術振興会先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会平成30年度第1回研究会「生体情報計測：ウェアラブル・脳計測技術の最近の展開」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 機械学習を用いた脳機能画像解析と細胞形態解析への応用
3. 学会等名 Neurovascular Unit研究会2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoichi Miyawaki
2. 発表標題 Toward high spatio-temporal resolution analysis of neural information representation using multivariate patterns of human brain activity
3. 学会等名 National Institute of Mental Health, National Institutes of Health (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 機械学習を用いた脳活動解析とヒトの感覚知覚メカニズムの解明
3. 学会等名 電気通信大学技術士会総会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮脇陽一
2. 発表標題 神経情報の復号化を用いたヒト脳内における視知覚表象の解明
3. 学会等名 第5回MEET Young Cardiologists（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石橋直樹，伊藤紀基，佐藤匡，樺島祥介，宮脇陽一
2. 発表標題 L0ノルム最適化に基づくスパース判別アルゴリズムを用いた特徴量選択精度の評価
3. 学会等名 ニューロコンピューティング研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤松和昌，宮脇陽一
2. 発表標題 自然画像観察時における注視の時間的優先性
3. 学会等名 日本視覚学会2018年冬季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

MIYAWAKI LAB.  
<http://www.cns.mi.uec.ac.jp/>

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	柳澤 琢史  (Yanagisawa Takufumi)  (90533802)	大阪大学・高等共創研究院・教授    (14401)	

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			
米国	NIMH, NIH			
オランダ	Maastricht University			