

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2013

課題番号：22500377

研究課題名(和文) 前頭前野における情報量計算の神経機構

研究課題名(英文) Neural mechanism of prefrontal cortex for computation of information value

研究代表者

中村 清彦 (Nakamura, Kiyohiko)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・教授

研究者番号：10172397

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトはより多くのことを知りたいという欲求、すなわちより多くの情報を求める欲求をもっている。本研究は、情報の量を計算する脳内神経機構に焦点を絞り、下記の解析を行った。まず、情報量の定義として Shannon 情報量、正解確率増加分、認識確率変化量を取り上げ、これらのうちのどの定義がサルの前頭前野から記録した神経活動と整合性をもつかを調べた。その結果、Shannon 情報量と正解確率増加分に対して整合する活動を示す細胞が存在することを示した。また、1次視覚野における単純細胞と複雑細胞の活動が示す各種の特性を Shannon 情報量最大化の原理に基づいて説明できることを数理モデルの解析によって示した。

研究成果の概要(英文)：Humans seek information, that is, want to know more and more. This study focuses its efforts on analysis on neuronal mechanisms that calculate amounts of information. Preceding studies have proposed different definitions of the information value, which include Shannon information, probability gain in correct response, and change in belief represented by probability distribution. We examined which definition is consistent with neural activities of monkeys performing information-seeking behavior. The obtained result is that in the prefrontal cortex many neurons exhibited activities consistent with Shannon information and some neurons with probability gain. Also, we showed that different properties of simple cells and complex cells could be reproduced by a computational model of the primary visual cortex under the Shannon information maximization.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：脳神経科学・融合社会脳科学

キーワード：認知科学 神経科学 情報工学

1. 研究開始当初の背景

ヒトはより多くのことを知りたいという欲求、すなわち情報を求める欲求をもっている。この欲求は多くの高次思考過程を駆動する原動力の一つとなっている。したがって、この欲求を生じる脳内神経機構が解明できれば、それを突破口として高次思考過程の解明への新たな道を開くことができる。

これまで心理学や情報理論の分野で情報量の研究がなされてきた。Baronらは情報量を「正解を言い当てられる確率の増加分」と定義し、Wellsらは「外界の認識を表す確率分布の変化量」と定義した。そして彼らはそれぞれの定義を裏付けるヒトの行動データを示している。また、Shannonは情報量を「不確実性の指標であるエントロピーの減少量」と定義し、これを基に通信の理論を構築した。近年、functional MRIを用いた研究によってヒトの前頭前野にShannon情報量と相関のある脳活動が見出された。このように情報量について多様な研究がなされてきたが、脳内の情報量計算の神経機構を具体的に明らかにした研究はまだない。

2. 研究の目的

本研究は上記の情報量計算の神経機構の解明を目的とする。

研究(1)

サルに情報量の計算を伴う行動課題を行わせて単一神経活動を記録し、情報量計算の神経機構の解明を試みた。研究代表者は先行研究でニホンザルに、より多くの情報を求めて行動する能力があることを示した。本研究では、特に上記の3つの情報量の定義(正解確率増加分、認識確率変化量、Shannon情報量)のうちのどれが脳内神経活動と整合性をもつかを識別できるように行動課題を設計し、脳内での情報量の計算機構の解明を試みた。

研究(2)

脳内の神経回路は成長に伴って徐々に各領野の機能が形成されていく。本研究では、1次視覚野の神経回路が形成されていくメカニズムを明らかにするために、1次視覚野における単純細胞と複雑細胞の活動が示す各種の特性を情報量最大化の学習原理に基づいて説明できるかを数理モデルの解析によって調べた。

3. 研究の方法

研究(1)

ニホンザルを計算機モニタの前に座らせて視覚刺激を呈示し4つの課題を行わせた。Task Aでは、サルが計算機モニタの中央の注視点を固視すると、周りに6個の点が現れる。さらに中央点を2秒間固視し続けると中央点が消える。ここでサルは6点からひとつを自由に選び、それへサッケード眼球運動をする。6点のうち1点が報酬をもらえる点(報酬点)となっている。その点が報酬点でなけ

れば、その点が黒に変わって中央点が再点灯する。サルが再び中央点を1秒間固視すると中央点が消えてサルは2度目の選択を行う。これを繰り返してサルが報酬点を選択するとその点が灰色になり水が与えられる。以上が本課題の基本的探索行動であるが、6個の点は報酬点以外に情報点と呼ぶ点を1個含んでいる。この情報点へサッケードすると報酬点だけが白点で残って他はすべて黒になる。すなわち報酬点の位置が知らされる。言い換えれば、多くの情報が与えられる。報酬点の位置は毎試行ランダムに変更されるが、この情報点は常に同じ位置に固定されている。したがって、サルはこの情報点を選べば変更された報酬点の位置を必ず知ることができる。

Task Bは次の事項を除いてTask Aと同じである。その相違は、情報点を選んだときに報酬点以外にもう1個白点が残ることである。このためサルは残った2個の白点のどちらが報酬点であるかをサッケードで調べる必要がある。その分得られる情報はTask Aより少ない。

Task Cでは報酬点が情報点と同じ位置に固定されている。したがってサルは報酬点の位置をあらかじめ知っていることになる。各Taskは複数回連続したブロックとして与えられる。

上記の神経細胞活動が3基準のどれを表現しているかを識別するために、さらにTask Dを導入する。このTaskでは報酬点が6点のどれかではなく特定の2点(図では右上か右下)のいずれかになっている。このTask Dで最初に右下の情報点を選んだ場合の得られる情報量は、Shannon情報量で計算すると $A > B > D > C$ であり、正解確率増加分では $A > D > B > C$ であり、認識確率変化量では $D > A > B > C$ となる。したがって上記の神経細胞活動がこれらの不等式のいずれと相関をもつかを調べれば、情報量が脳内でどの基準で表現されているかを推定することができる。

サルに上記の4つの行動課題を行わせて前頭前野から単一神経活動を記録し、情報量を計算している神経細胞活動が上記の3つの不等式のいずれと整合性をもつかを調べた。

研究(2)

また、1次視覚野の神経回路を入力層と単純細胞層と出力細胞層の3層数理神経回路でモデル化した。各モデル細胞の入出力関係はランプ関数で与えた。各層間の神経結合の重みを情報量最大化原理に基づいて学習させて出力層のモデル神経細胞の示す特性を調べた。

4. 研究成果

研究(1)

サルはほとんどの試行で情報点を最初に選択した(全試行の98%以上の試行)。この

ことはサルも情報量に基づいて行動選択ができることを示している。

前頭前野から 1,843 個の神経細胞の活動を記録した。情報量に関連する活動を見つけるために中央点を最初に固視している時間の活動を Task A, B, C について調べた。この時間の活動が 3 つの課題間で有意に異なる細胞が 146 個あった。そのうち、活動の強さが $A > B > C$ となった細胞が 25 個あり $A < B < C$ となった細胞が 46 個あった。すなわち、これらの 71 個の細胞の活動は情報量の大きさを表現していることが示唆された。

これらの細胞の活動が 3 つの情報量の定義のいずれと整合性を調べた結果、36 個が Shannon 情報量と、27 個が正解確率増加分と整合した。8 個はいずれの定義とも整合しなかった。認識確率変化量と整合する細胞活動は見つからなかった。

これらの結果から、サルが情報量に基づいて行動を選択するとき、Shannon 情報量と正解確率増加分が計算されて、それらのどちらかまたは両方を用いて行動選択している可能性が示唆された。

研究 (2)

1 次視覚野の 3 層神経回路モデルにおいて情報量最大化原理に基づく結合重みの学習によって、出力層のモデル細胞が 1 次視覚野の複雑細胞と同様の特性 (phase invariance, iso-orientation suppression, cross-orientation facilitation, end stoppin) をもつようになることを示した。

これらのことから、1 次視覚野の神経回路の結合関係が情報量最大化原理に近いメカニズムによって形成されていることが示唆された。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

Misako Komatsu, Jun Namikawa, Zenas C. Chao, Yasuo Nagasaka, Naotaka Fujii, Kiyohiko Nakamura, Jun Tani (2014) An artificial network model for estimating the network structure underlying partially observed neuronal signals. Neuroscience Research, 査読有、in print.

Takuma Tanaka and Kiyohiko Nakamura (2013) Information maximization explains the emergence of complex cell-like neurons. Frontiers in Computational Neuroscience, 査読有、Vol.7, Article 165:1-14, Nov. 2013, doi: 10.3389/fncom.2013.00165

毬山利貞, 伊藤秀昭, 中村清彦 (2010)

数理モデルを用いたタマリンの道具使用行動の解析、霊長類研究、査読有、26:13-33

[学会発表] (計 10 件)

藤原謙三郎, 田中琢真, 中村清彦 (2013) 情報量最大化原理による V2 の選択性の説明、第 36 回日本神経科学大会プログラム, p.256, 2013 年 6 月 21 日, 京都.

田中琢真, 中村清彦 (2013) 上丘・聴覚皮質神経細胞の刺激選択性の情報量最大化モデルによる再現、第 36 回日本神経科学大会プログラム, p.183, 2013 年 6 月 20 日, 京都.

田中琢真, 中村清彦 (2013) 脳幹・皮質の聴覚関連細胞の刺激選択性、日本物理学会講演概要集第 68 巻第 1 号第 2 分冊, p.408、第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 29 日, 広島

井浦陽一郎, 田中琢真, 中村清彦 (2013) 内発的動機づけに及ぼす目標設定および言語的フィードバックの影響、電子情報通信学会技術研究報告, 112(480): 37-42, 2013 年 3 月 13 日, 町田.

Kenzaburo Fujiwara and Kiyohiko Nakamura (2012) Detailed model of mammalian circadian rhythm with cytosolic Ca²⁺ dynamics. Society for Neuroscience Abstracts, 2012.10.15, New Orleans, USA, <http://am2012.sfn.org/am2012/>.

Misako Komatsu, Jun Namikawa, Jun Tani, Zenas C. Chao, Yasuo Nagasaka, Naotaka Fujii and Kiyohiko Nakamura (2012) Estimation of functional brain connectivity from electrocorticograms using an artificial network model. Proceedings of the 2012 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1-8, 2012.6.10-15, Brisbane, Australia.

田中琢真, 中村清彦 (2012) 時系列刺激を弁別する回路に出現する単純で疎な発火パターン, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日, 西宮.

藤原謙三郎, 中村清彦 (2012) 細胞内 Ca²⁺ 変動を導入した概日リズムの詳細モデリング、電子情報通信学会技術研究報告, 111(483): 311-316, 2012 年 3 月 16 日, 町田.

緒方惟高, 田中琢真, 中村清彦 (2012) スパースな非対称結合をもつリカレントニューラルネットワークにおける確率的状態遷移の解析、電子情報通信学会技術研究報告, 111(483): 165-169, 2012 年 3 月 15 日, 町田.

Takuma Tanaka, Kiyohiko

Nakamura, "Efficient coding of sparse temporal sequences in neuronal networks", The Proceedings of the 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 54-55 (2011), 2011年12月16日, 沖縄.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 清彦 (NAKAMURA Kiyohiko)

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・

教授

研究者番号：10172397

(2) 研究分担者

無し ()

(3) 連携研究者

無し ()