

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00351

研究課題名(和文)非対称構造を持つニューラルネットのベクトル場による認知、記憶の計算論的研究

研究課題名(英文)Computational Study on the Cognition and Memory Based on the Nonlinear Analysis for the Asymmetric Neural Networks

研究代表者

石井 直宏 (ISHII, Naohiro)

愛知工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50004619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では網膜、視覚系大脳皮質V1野、MT野などに見られる共通の基本構造と見なされる非対称性でかつ非線形性の回路構造がV1野での動きに対するベクトルの生成、MT野でのより強いベクトルの生成を考慮したベクトル間の関係、そして、MT野に続くMST野でのベクトル場の生成と特徴空間の生成を、計算論的に構築することである。入力刺激の強度変化の検出および動きのある刺激の方向性の検出が生物系の網膜の非対称構造のネットワークの高い能力によって、検出できることを明らかにした。Gabor フィルターをもつ非対称性構造では、新しい特徴空間の生成に有効に作用することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To make clear the mechanism of the visual movement is important in the visual system. The prominent feature is the nonlinear characteristics as the squaring and rectification functions, which are observed in the retinal and visual cortex networks. Conventional model for motion processing in cortex, is the use of symmetric quadrature functions with Gabor filters. This paper proposes a new motion detection model in the asymmetric networks. To make clear the behavior of the asymmetric nonlinear network, white noise analysis and Wiener kernels are applied. It is shown that the biological asymmetric network with nonlinearities is effective and general for generating the directional movement from the network computations. The qualitative analysis is performed between the asymmetrical network and the conventional quadrature model. The analyses of the asymmetric neural networks are applied to the V1 and MT neural networks model in the cortex.

研究分野：情報科学、データ工学

キーワード：非対称構造回路 非線形性 非対称ニューラルネット ベクトル生成 ウィーナー核 非線型解析

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は視覚系の網膜、大脳皮質の V1 野、MT 野、小脳などに見られる神経系ネットワークの非対称性の構造に注目し、視覚情報の生成がいかになされるか、生成された情報がどのように保存されるか、そして視覚系の上位レベルでどのように再構築されるかを明らかにすることである。ここでの非対称構造が New York 大学の故 Prof.Naka との共同研究により、Catfish の網膜回路の中に見出し、解析を進めた。この非対称構造の回路が Prof.Heeger の大脳皮質の V1 野、MT 野の回路機能の基本構造となることを解析により見出し、MST 野を含めた、新たな認知、記憶のためのベクトル場の生成を計算論的に明らかにする目的とした。

### 2. 研究の目的

生物系神経回路として、catfish の網膜のバイポーラセル、アマクリンセル、ガングリオンセル間の非対称構造のネットワークがある。この非対称構造を持つ神経系ネットワークが、動きの刺激入力に対して、その方向性と動きの速さに対して、敏感であることを計算論から導き出してきた。本研究では網膜、さらに、米国の Prof.Heeger らの提唱する視覚系大脳皮質の V1 野、MT 野などに見られるマイクロなネットワークが非対称構造をもつネットワークであることを、解析的に示して、これら各々の部位の共通の基本構造と見なされる非対称性でかつ非線形性の回路構造となることを明らかにしてきた。この非対称構造のネットワークの V1 野での動きに対するベクトルの生成、MT 野での冗長性を有した、より強いベクトルの生成と近傍を考慮したベクトルの生成、そして、MT 野に続く MST 野でのベクトル場の生成を、これらの構造と新たに展開する方法論から導き出される機能を計算論的に明らかにすることである。すでにわれわれは、入力刺激の強度変化の検出および動きのある刺激の方向性の検出が生物系の網膜に見られる非対称構造のネットワークの高い能力によって、検出されることを明らかにして来た。さらに、従来の大脳皮質の動きのモデルである対称性の回路構造の Energy Model ネットワークの機能を、本研究で提案する非対称構造のネットワークの機能を比較することである。Quadrature Energy Model では、視覚系のネットワークの細胞のインパルス応答関数として、Gabor Filter を考えており、本研究でも同じ Filter で考える。

### 3. 研究の方法

本研究では、いままで、われわれが導き出したニューラルネットの非対称構造の機能を基礎として、並列、非対称構造を持ち、その非線形性として Half-squaring Rectification を有する大脳皮質 V1 野及び V1 野に続く、同様な非対称構造の MT 野の機能を計

算論的に導き出すことが出来る。2004 年の英国(University of Stirling)での Int. Conf. on Brain Inspired Cog. Systems(BICS2004 国際会議)以来、われわれは V1 野と MT 野の非対称構造回路の高い機能を計算論的に導き出さる事を発表し、BICS での新しい解析アプローチとして、注目された。すでに V1 野の回路が MT 野の回路に接続する 2 層状モデルが New York 大学の Prof.Heeger and Prof.Simoncelli によって発表されており、われわれの非対称回路構造の手法を適用することにより、冗長性のある、しかもこの 2 層状回路により、刺激の変化を完全に抽出できる十分性を備えていることを、2008 年 SNPD などで発表してきた。近年、米国ソーク研究所の Prof.Sejnowski らにより、視覚系の Slow Feature Analysis(SFA)、すなわち、視覚系にある対象物のフレームを少しずつ移動することによりフレーム間から対象物の認知の特徴的な不変的な方向性の検出等が分かってきた。本研究は、層構造ネットワークとしての V1 野および MT 野がマイクロな非対称構造の回路で生成されるベクトルの生成の機能と近傍の回路構造と機能上どのような関係を変量を有するか計算論とシミュレーションにより、明らかにすることである。さらに、本研究では、従来の動きの検出の大脳皮質の Quadrature Energy Model との機能の比較をすることである。

### 4. 研究成果

研究代表者、石井は New York 大学の故中教授との共同研究により、catfish の網膜回路の非対称構造に注目し、刺激の変化に、きわめて敏感であり、この非対称構造が動きの刺激に、ベクトル生成の機能を有することをウイ - ナ解析から明らかにした。本研究は非対称構造を内包する V1 野と MT 野の層状ネットワークが動きの刺激に、層状に働き、冗長性と効率性を有したベクトル生成機能となることを計算論的に明らかにする。次に、MT 野の近傍回路 (Heeger と Simoncelli の提案する Normalization 回路) が相対ベクトルを生成することを明らかにする。その結果、MT 野に続く MST 野で、絶対ベクトルと相対ベクトルによるベクトル場の生成が可能となり、ベクトル場でのベクトルの発散、収斂および回転の計算論的なベクトル機能を明らかにする。このベクトル機能は視覚回路、運動回路の非対称構造の基本回路となり、新しい処理展開を示すものである。

石井が New York 大学の故中 研一教授との共同研究により、図 1 の catfish の網膜の二つの経路が存在し、左側の B1 細胞が微分作用の応答を示し、その作用が時間的に依存し、N 細胞までの線形性経路となることを明らかにした。これらの結果を電子情報通信学会論文誌(D-II)および英文論文誌(A)に掲載して来た。これを基礎に図 1 の B2 細胞、C 細胞の 2 乗特性を明らかにし、N 細胞までを非

線形経路とすることが明らかとなった。図1の非対称構造の回路は空間的刺激変化にきわめて敏感な回路となることを計算論的に明らかにした

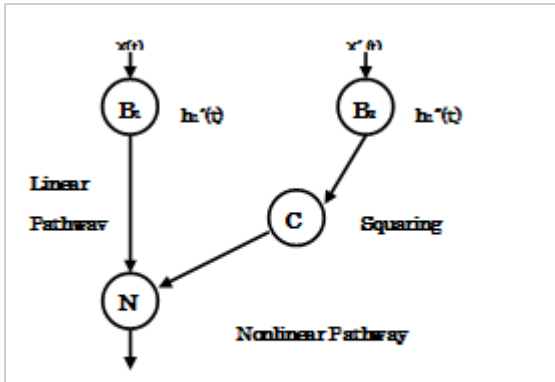


図1 非対称構造のニューラルネットワーク

視覚系の大脳皮質 V1 野および MT 野が動き刺激に反応する領域として、詳しく研究されて来ている。米国 Stanford 大の Prof. Heeger, New York 大の Prof. Simoncelli により提唱されてきた V1 野および MT 野の神経細胞とそのネットワークモデルとして図2の構造が示されている。本研究ではわれわれの解析により、図2の Network の情報処理機能の刺激入力の強度変化の検出、動きのある刺激の方向性のベクトルの検出、動的パターン変化処理の検出の M S T 野のベクトル場の生成を計算論的に下記の手順で明らかにする。石井を中心として、鳥居と共同で研究を進める。視覚系の大脳皮質領の V1 野および MT 野の図2の非線形処理の Half-squaring Rectification それに続く飽和特性と正規化回路が提唱されている。

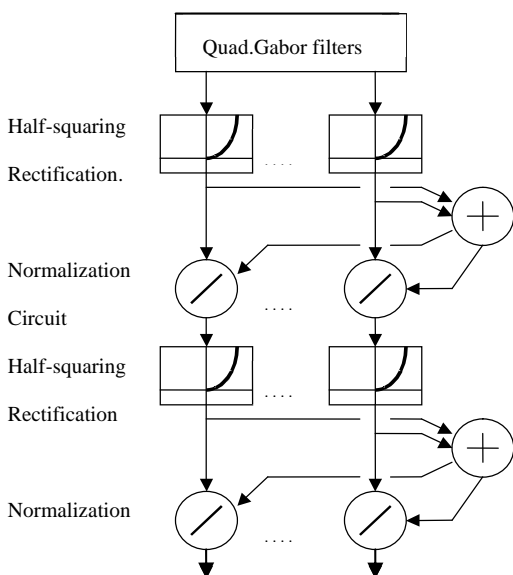


図2 V1野に接続のMT野との層状のニューラルネットワークモデル(Simoncelli, Heeger)

本研究ではこれらの V1 野および MT 野のベクトル生成機能を計算論的に導出のため、Half-squaring Rectification と、それに続く飽和特性をより近似する非線形関数を見出し、は、提案する入力 Gaussian Mixture の刺激により、図3の層状ネットワークの刺激入力に対する強度変化の検出、動きのある刺激の方向性の絶対ベクトルが図4のように V1 から MT に進むと大きくなることが Fukushima(2007 年)らの研究で指摘されており、この絶対ベクトルの MT 野での増大量を計算論的に示す。さらに図2の Normalization による、近傍回路の相対ベクトルの計算論的導出を行う。これにより、MT 野での絶対ベクトルと相対ベクトルの関係を明らかにする。次に、従来の視覚系の大脳皮質のモデルとして、対称構造を持つ Quadrature Energy Model と本研究での非対称構造のモデルの機能比較をするため、図2の基本構造の Gabor Filter を用いた非対称構造のネットワークを考える。

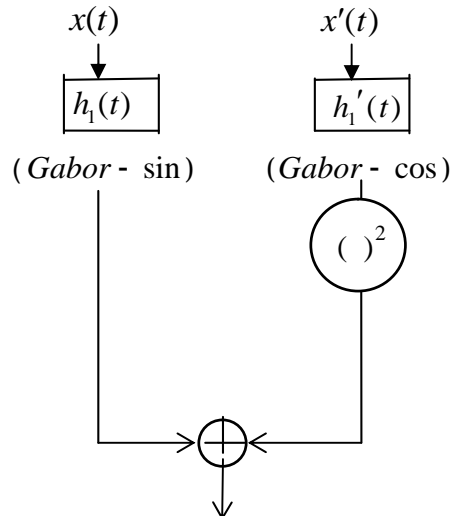


図3 図2の近似の層状ニューラルネットワークの基本の非対称構造の回路

ベクトル場を生成することになるが、これらが MT 野から引き継ぐ M S T 野でベクトルの収斂、発散、回転をいかに生み出すかを明らかにする。

図3が図2の非線形性の Half-squaring rectification を Sigmoid 関数に置き換えて Taylor 展開による多項式展開した、回路である。この近似回路が図1を基本とする奇数偶数の非対称回路の集合をなし、大きなベクトル生成の層状の回路となっていることを計算論的に示した。さらに、図3での細胞のインパルス応答として、sin, cos の Quadrature Gabor Filter である、

$$G(t) = A \exp(-t^2 / 2\sigma^2 \xi^2) \sin(t') \quad \text{および}$$

$$G(t) = A \exp(-t^2 / 2\sigma^2 \xi^2) \cos(t')$$

を適用した。この非対称構造の回路では、非対称な構造であるため、その出力が直交性を有することを計算論的に示すことができた。

従来の Quadrature Energy Model が独立性の出力を生成するため、最適化による独立性の手法が採用されているが、非対称構造では、それらの最適化を特に必要としない。さらに、視覚系の動きの情報の把握は、周波数領域での展開が有効であることから、非対称構造の回路での周波数領域での計算論的解析を行った。その結果、非対称構造の回路は、入力位相情報も取り出すことが出来るのに対し、Energy Model では、位相情報が取り出せない。さらに、複雑な刺激条件では、非対称構造の回路の優位性を示すことが出来た。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Masashi Kawaguchi, Hiroshi Sasaki, Application of Asymmetric Networks to Movement Detection and Generating Independent Subspaces, Communication in Computer and Information Science, 査読有 vol.744,(EANN2017),Springer2017,267-278 DOI: 10.1007/978-3-319-65172-9\_23

Naohiro Ishii, Ippei Torii, Kazunori Iwata, Kazuya Odagiri, Toyoshiro Nakashima, Generation of Reducts Based on Nearest Neighbor Relations and Boolean Reasoning, Lecture Notes in Computer science, 査読有, vol.10334,(HAIS 2017), Springer2017 査読有, vol.7824, Springer, 2017,391-401 DOI: 10.1007/978-3-319-59650-1\_33

Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Masashi Kawaguchi, Hiroshi Sasaki, Application of Asymmetric Networks to Motion Detection and Independent Subspaces, Proc. Int. Conf. on Applied Computing & Comput. Science, 査読有, IEEE Computer Society,2017,228-233,DOI:10.1109/ACIT-CSII-BCD.2017.76

Naohiro Ishii, Ippei Torii, Kazunori Iwata, Kazuya Odagiri, Toyoshiro Nakashima, Generation of Reducts and Threshold Functions and Its Networks for Classification, Lecture Notes in Computer Science,vol.10585,(IDEAL2017), Springer 2017, 査読有, vol.10585,Springer, 2017, 415-424 DOI: 10.1007/978-3-31968935-7

Ippei Torii, Kaoruko Ohtani, Takahito Niwaq, Naohiro Ishii, Development of Objective Index to Determine Autism by Eyeball Movement, Journal of Computer,Vol.13.1.2018, 査読有, vol.13.1, 2017, 35-43 DOI: 10.17706/jcp.13.1.35-43

Naohiro Ishii, T. Deguchi, M. Kawaguchi, H. Sasaki, Motion Detection in Asymmetric Neural Networks, 査読有, Lecture Notes in Computer Science, (ISNN2016),

vol.9719, Springer, 2016, 409-417

DOI: 978-3-319-40662-6

Naohiro Ishii, T. Deguchi, M. Kawaguchi, H. Sasaki, Application of Asymmetric Networks to Bio-inspired Neural Networks for Motion Detection, Advances in Intelligent Systems and Computing(UKCI2016), 査読有, vol.513, Springer, 2016, 231-244

DOI: 978-3-319-40237-6

Ippei Torii, K.Ohtani, T. Niwa, Naohiro Ishii, Development of Assessment Tool Judgiing Autism by Ocular Movement Measurement,,Lecture Notes in Computer Science, (HCI International2016), vol.9737, 査読有, Springer, 2016, 237-248

DOI: 978-3-319-40662-6

Ippei Torii, Takahito Niwa, Naohiro Ishii, Measurement of Pixel Number Variation Abnormality in Pursuit Eye Movement of Children with Autism, Journal of Neurology & Experimental Neuroscience, 査読有, vol.3.1, 2017, 18-24

DOI: 10.17756/jnen.2017-022

Toshinori Deguchi, Naohiro Ishii, On Learning Parameters of Incremental Learning in Chaotic Neural Network, Communications in Computer and Information Science, ( EANN2016 ), 査読有, vol.629, Springer, 2016, 241-252

DOI: 978-3-319-44187-0

〔学会発表〕(計 2 件)

Naohiro Ishii, Data Computations for Applied Informatics, IEEE/ACIS Int. Conf. SNPD216

(基調講演)、Shanghai, China (国際学会)

DOI: 10.1109/SNPD.2016.7515868

Naohiro Ishii, Surface Problems in Information Sciences, IEEE/ACIS Int. Conf. SNPD

2018(基調講演)、Busan, Korea (国際学会)

June 27-29, 2018

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

石井 直宏 (ISHII, Naohiro)

愛知工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50004619

(2)研究分担者

鳥居 一平 (TORII, Ippei)

愛知工業大学・情報科学部・教授

研究者番号：50454327