

令和 5 年 10 月 27 日現在

機関番号：22605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11957

研究課題名（和文）非対称構造の多層ニューラルネットによる学習の高効率化のための直交空間の生成

研究課題名（英文）Generation of Orthogonal Sub-spaces for Efficient Learning in Layered Neural Networks with Asymmetric Structures

研究代表者

石井 直宏 (Ishii, Naohiro)

東京都立産業技術大学院大学・産業技術研究科・研究員

研究者番号：50004619

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：視覚系での直交部分空間では非対称構造とRectificationなどの非線形処理が大きく関わる。この二つの特徴が直交部分空間の直交基底を生成することを示した。トラッキング特性の解析を行った。この特性が非対称ニューラルネットワークで優れており、従来のガボールフィルタを持った対称モデル（Energy modelと呼ばれる）に比べ、優れていることを示した。さらに、非対称構造のネットワークが対象モデルに比べ、分類能力が優れていることをベクトル空間上で、証明した。さらに多層のニューラルネットワークにより、高次の次元の直交基底が、低層の基底から構成できることにより、高次の直交基底の生成問題を取り上げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニューラルネットワークの人工知能分野での適用が深層学習を中心として、大きく、進展している。しかし、深層のニューラルネットワークの処理のメカニズムの解明が十分でなく、ブラックボックスでの処理として、残されている問題点も少なくない。そこで、本研究課題は明らかにしてきた生物の視覚神経系ネットワークをベースに、理解、説明可能な層状ネットワークの構成とその処理機構を明らかにして、深層学習のメカニズムの機能の基礎を明らかにすることである。

研究成果の概要（英文）：In the orthogonal subspace of the visual system, nonlinear processing such as asymmetric structure and rectification is closely related. These two characteristics have been shown to generate orthogonal bases in the orthogonal subspace. We analyzed the tracking characteristics. This characteristic was shown to be superior to that of a symmetric model (called an Energy model) with conventional Gabor filters in an asymmetric neural network. Furthermore, it was proved on a vector space that the network with asymmetric structure has better classification ability than the target model. In addition, we took up the problem of generating higher-order orthogonal bases by multi-layer neural networks from lower-order bases."

研究分野：知識情報処理

キーワード：非対称構造ネットワーク Bio-inspired network 非対称、非線形構造 直交基底の生成 高次直交基底の生成 多層構造の基底の生成

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

近年の知能的学習システムの研究、開発が著しい中で、特に、多層ネットワークによる深層学習に注目が高い。しかし、学習の訓練が容易ではなく、初期値の設定、多くのパラメータの設定、深層での学習信号の消失と発散など、多くの問題を抱えている。本研究は、これらのネットワーク構造と異なる、生物系の網膜のネットワークに発想を得た、非対称構造を持つネットワークが情報の選択的直交化空間の生成にきわめて効率の良い構造を有していることを明らかにする。本研究では、視覚情報がボールフィルターを通過後、特徴の形成、学習に有効な直交空間を生成することを明らかにする。この直交空間の生成が従来のネットワークの問題点を改善し、さらに、パターンの分類および学習にも効果的であることを当初の目標とした。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、生物系の網膜に発想を得たニューラルネットワークがどのような特性を持っているかを明らかにしたい。われわれは、catfish の網膜のネットワークが非対称構造を有するのに対して、従来の視覚系で提唱されている Adelson & Bergen の対称構造のモデルとでは、どのような特性の差異を生じるかを明らかにしたい。また、直交空間の生成も明らかにしたい。

(2) 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、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、非対称構造の MT 野の多層構造での直交空間の生成を導き出すことが出来る。さらに、直交性を持つ選択的、再生的な部分空間を生成できることを示したい。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者である石井は New York 大学の故 Prof. Naka 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ィーナ解析から明らかにした。さらに、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に敏感に応答することを示した。本研究は生物の網膜のネットワークからスタートするものであり、ネット構造をベースとする情報処理の機能をシステム論の立場で明らかにする。

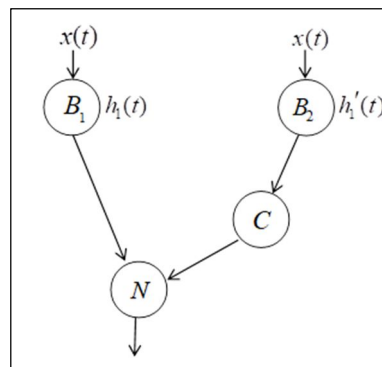


図1 生物の網膜の非対称ネットワーク

(2) 本研究では、われわれの非対称モデルと従来の対称構造モデルの比較のため、図2及び図3に示すように、各々のネットワークのユニットを構成した。図2が図1の catfish の網膜回路の並列回路であり、ガボールフィルタの三角関数 \cos , \sin が並列回路の各々に割り当てられる。この並列回路を非対称構造ネットワーク・ユニットと呼ぶことにする。図3が従来の対称回路の Energy model の並列回路であり、これを対称構造ネットワーク・ユニットと呼

ぶことにする。本研究では、図2と図3のネットワークについての特性と直交空間の生成を計算論的解析とシミュレーションで示したい。

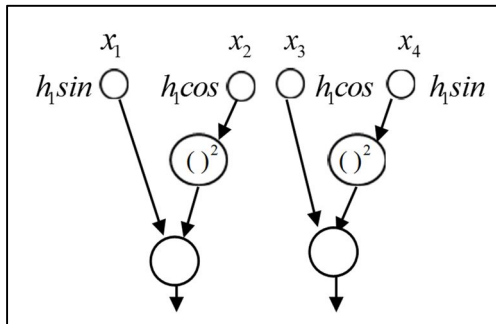


図2 非対称構造ネットワーク・ユニット

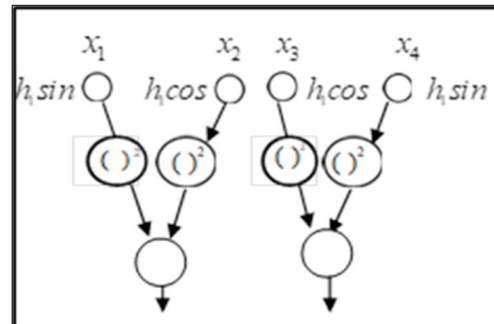


図3 対称構造ネットワーク・ユニット

(3) 本研究では、われわれの非対称楕モデルと従来の対称構造モデルの直交空間の生成の可能性を追求するため、ランダムパターンを生成して、各構造ネットワークの基底による入力処理の値の行列式による独立性の検討を行う。また、非対称構造ネットと対称構造ネットの各々の基底とフーリエ基底の比較から、直交空間の生成を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 本研究ではわれわれが提唱する非タウ小構造のネットワークが直交空間とどのような関係があるのかを非対称構造のネットワークと従来モデルの対称構造のネットワークの特性を明らかにした。

(2) トラッキング特性を示す。非対称構造のネットワークの視覚の最初の刺激を受けるB細胞のインパルス応答はガボールフィルタのConvolution networkとしての応答となる。ここで、ガボールフィルタはガウス関数と $\cos(x)$ の積およびガウス関数と $\sin(x)$ の積で示される。

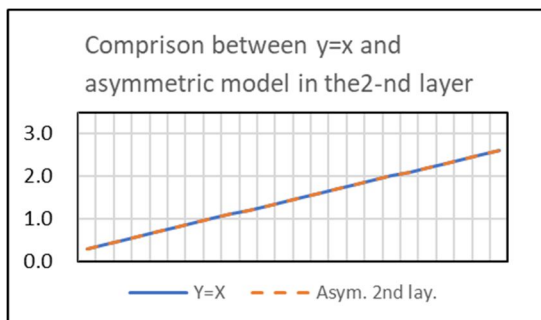


図4 非対称構造ネットの追従特性

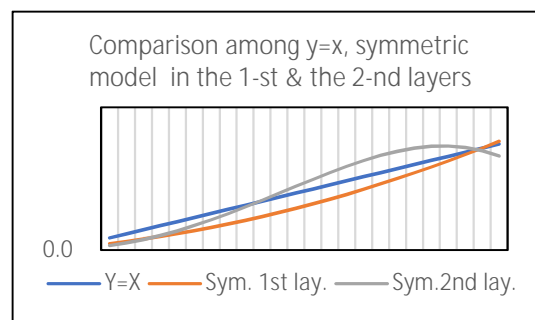


図5 対称構造ネットの追従特性

ここでは、ガボールフィルタの非対称および対称構造ネットの追従特性のシミュレーション実験の比較により、図4の非対称構造ネットの追従性が良いのに対して、図5の対称構造ネットの追従性が十分でないことを示している。これは対称構造ネットの直交空間性の欠如から示される。非対称構造のネットの基底群は直交空間となるフーリエ空間を構成する基底群に近いが対称構造のネットの基底群はフーリエ空間の基底群の一部のみで、十分な直交空間の生成の基底にはなっていない。

(3) 適応的直交性の比較を示す。外部からのガウス性ノイズの移動刺激のシミュレーションを、非対称構造および対称構造ネットで行い、外部移動刺激に対して、出力の直交性の生成する割合を計算論的に明らかにした。その結果を図6に示す。図6の(a)-(e)は移動刺激を示し、青色のバーが非対称構造ネットの出力の直交性の大きさを示し、灰色のバーが対称構造の直交性の度合いを示す。非対称構造のネットでの直交性の度合いが大きいことが計算論的に示される。これに対して、対称構造ネットの直交性の度合いが低く、非対称構造のネットでの移動刺激に対しての適応的直交性の大きいことを示している。

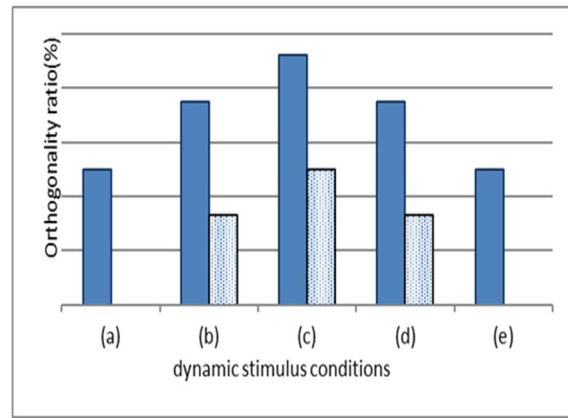


図6 非対称構造および対称構造ネットの直交性

(4) 入力パターンに対する独立性の非対称構造、対称構造ネットでの比較を行う。入力パターンが非対称構造ネットの基底群でどのように変換されるか、また、対称構造のネットでの基底群で、どのように変換されるかは関連するネットワークの重みとの積の関係から、きわめて重要である。入力パターンがネットワークの基底により変換され、ネットワークの重みにより、期待しうる出力となるのが問題となる。

ここでは2値のランダムな入力パターンを生成して、非対称構造ネットと対称構造ネットの各々の基底によるパターンの独立性の検証を各々の基底を通過後のパターンの行列の行列式により、独立性の検証を行った。その結果を図7に示す。図7の左側の2本のバーが非対称構造ネットを表し、青色は行列式 $\neq 0$ の独立性のパターン数が大きく、赤色は行列式 $=0$ の従属性のパターン数が小である。同じ入力パターンで対称構造ネットは右の2本のバー独立性が小さく、従属性が大きい。非対称構造の直交基底による入力パターンの独立性が大きい。

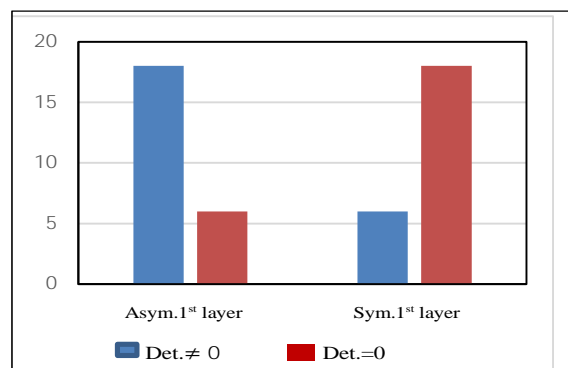


図7 非対称、対称構造ネットの基底による独立性

(5) 非対称構造ネットでの直交基底の生成、選択と置き換えを実施する。非対称構造ネットの性能向上のため直交基底の生成とその操作が重要となる。直交基底の生成、その選択と置き換えによりネットの分類精度が大きく、改善される。上述の実験(3)での非対称構造および対称構造のネットの各々の基底による入力パターンの独立性の検証で従属性を表す、行列式 $=0$ のパターンは、ネットの第2層での直交高次基底の生成、高次基底の交換でパターンの独立性への変換が可能となる。高次基底の変換の実験結果を図5に示す。図8の最初の青色(非対称構造ネット)と黄色(対称構造ネット)の2本のバーは、各々のネットの基底によりパターンの従属性、行列式 $=0$ であるが各々のネットの第2層目の高次基底の変換により(図8の第2、第3、第4の青色と黄色のバー)、独立性へ変換する様子を示している。このようにネットの多層化での高

次基底の生成、変換はパターン処理に、有効となる。

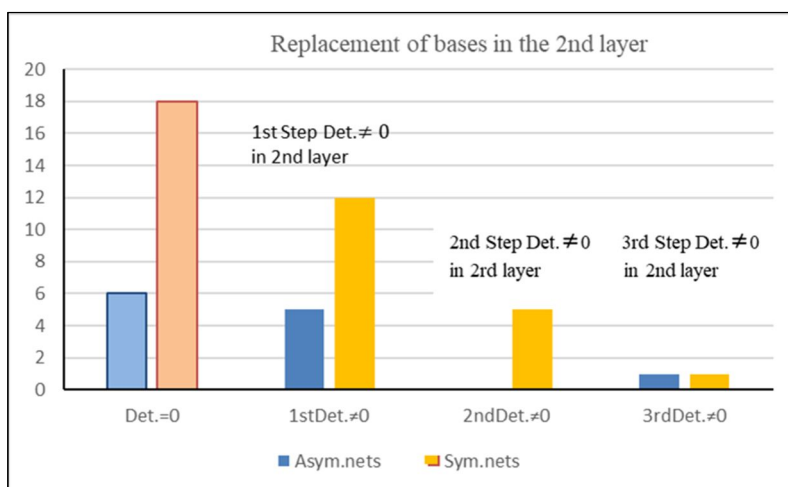


図8 ネットワークの第2層での高次基底の入れ替えによる独立性の変化

(6) 高次直交基底の生成によるパターンの分類性能の向上 非対称構造ネットでの高次直交基底の生成により、Reuters data collection のデータ分類に適用して、高精度の分類が可能となった。図9にCocoa, Copper, Cpi データが高次元基底の生成により正確に分類可能となることを示す。線形分離のステップを経て、最終の黄緑色の高次直交基底の生成がパターンの分離を正確に実行することになる。

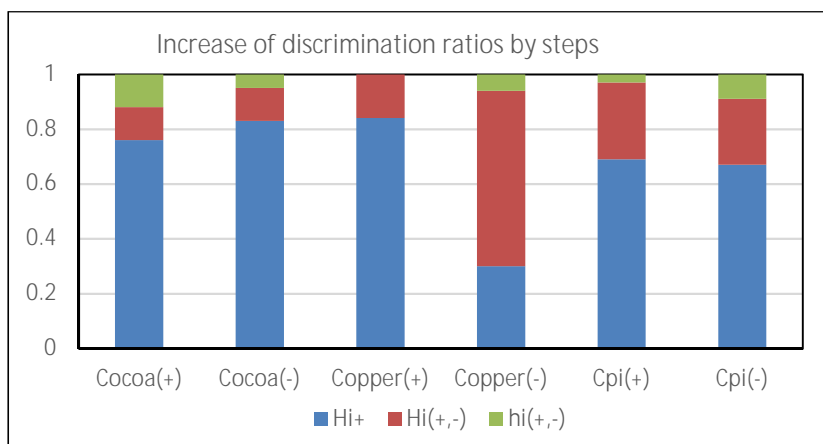


図9 Reuters collection データの高次直交基底生成による分類

〈引用文献〉

Adelson, E. H., Bergen, J. R. Spatiotemporal energy model for the perception of motion. Journal of Optical Soc. of America, A, 1985, 284-298

Naka, K-I., Sakai, H., Ishii, N. Generation of transformation of second order nonlinearity in catfish retina, Annals of Biomedical Engineering, vol.16, 1988, 53-64

Ishii, N., Deguchi, T., Kawaguchi, M., Sasaki, H., Matsuo, T., Adaptive Orthogonal Characteristics of Bio-inspired Neural Networks, Logic Journal of the IGPL, Oxford-Academic, vol.30(4), 2022, 578-598

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Masashi Kawaguchi, Hiroshi Sasaki, Tokuro Matsuo	4. 巻 30(4)
2. 論文標題 Adaptive Orthogonal Characteristics of Bio-inspired Neural Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Logic Journal of the IGPL	6. 最初と最後の頁 578-594
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jigpal/jzab004	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 Naohiro Ishii, Kazunori Iwata, Yuji Iwahori, Tokuro Matsuo	4. 巻 LNCS(Springer)
2. 論文標題 Comparison of Fourier Bases and Asymmetric Networks in the Bio-inspired Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Computational Intelligence - 18th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2023	6. 最初と最後の頁 200-210
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43085-5_16	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 Naohiro Ishii, Kazunori Iwata, Naoto Mukai, Kazuya Odagiri, Tokuro Matsuo	4. 巻 LNNS(Springer)
2. 論文標題 Classification Performance in the Bio-inspired Layered Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Congress on Information and Communication Technology (ICICT)	6. 最初と最後の頁 167-179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-3236-8_13	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 Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Masashi Kawaguchi, Hiroshi Sasaki, Tokuro Matsuo	4. 巻 CCIS1600(Springer)
2. 論文標題 Generation of Orthogonality foe Feature Spaces in the Bio-inspired Neural Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Applications of Neural Networks-23rd EANN2022	6. 最初と最後の頁 15-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-301-08223-8_2	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 Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Naoto Mukai, Kazuya Odagiri, Tokuro Matsuo	4. 巻 LNCS13469(Springer)
2. 論文標題 Tracking and Classification of Feature Space in the Bio-inspired Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hybrid Artificial Intelligent Systems-17th HAIS	6. 最初と最後の頁 27-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-15471-3_3	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 Ishii Naohiro, Deguchi Toshinori, Kawaguchi Masashi, Sasaki Hiroshi, Matsuo Tokuro	4. 巻 JNL
2. 論文標題 Adaptive Orthogonal Characteristics of Bio-Inspired Neural Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Logic Journal of the IGPL	6. 最初と最後の頁 1~21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jigpal/jzab004	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 Ishii Naohiro, Matsuo Tokuro	4. 巻 31
2. 論文標題 Generation of Chow Parameters and Reduced Variables Through Nearest Neighbor Relations in Threshold Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Neural Systems	6. 最初と最後の頁 2150045~2150045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0129065721500453	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 Ishii Naohiro, Deguchi Toshinori, Kawaguchi Masashi, Sasaki Hiroshi, Matsuo Tokuro	4. 巻 LNCS 13113
2. 論文標題 Inheritances of Orthogonality in the Bio-inspired Layered Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Intelligent Data Engineering and Automated Learning -IDEAL2021	6. 最初と最後の頁 21~32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-91608-4_3	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 Ishii Naohiro, Iwata Kazunori, Mukai Naoto, Odagiri Kazuya, Matsuo Tokuro	4. 巻 LNCS 12861
2. 論文標題 Features Spaces with Reduced Variables Based on Nearest Neighbor Relations and Their Inheritances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Computational Intelligence, IWANN2021	6. 最初と最後の頁 77 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-85030-2_7	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 Naohiro Ishii, Toshinori Deguchi, Masashi Kawaguchi, Hiroshi Sasaki, Tokuro Matsuo	4. 巻 Editor Lazaros
2. 論文標題 Generation of Orthogonality for Feature Spaces in the Bio-inspired Neural Networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd Engineering Applications of Neural Networks Conference - EANN 2022	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 NAOHIRO ISHII, TOSHINORI DEGUCHI, MASASHI KAWAGUCHI, HIROSHI SASAKI, TOKURO MATSUO	4. 巻 JNL
2. 論文標題 Adaptive Orthogonal Characteristics of Bio-Inspired Neural Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Logic Journal of the IPGL(Oxford Univ.)	6. 最初と最後の頁 1-21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jigpal/jzab004	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 Naohiro Ishii, Kazunori Iwata, Kazuya, Odagiri, Toyoshiro Nakashima, Tokuro Matsuo	4. 巻 4(1)
2. 論文標題 Reduction of Variables through Nearest Neighbor Relations in Threshold Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Smart Computing and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 36-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Naohiro Ishii, Kazunori Iwata, Kazuya Odagiri, Toyoshiro Nakashima, Tokuro Matsuo	4. 巻 2
2. 論文標題 Reduction of Variables and Generation of Functions Through Nearest Neighbor Relations in Threshold Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 21st Engineering Application of Neural Networks, Springer	6. 最初と最後の頁 569-578
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-48791-1_45	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 Naohiro Ishii, Kazuya Odagiri, Hidekazu Iwamoto, Satoshi Takahashi, Kazunori Iwata, Tokuro Matsuo	4. 巻 12344
2. 論文標題 Tourists Movement Analysis Based on Entropies of Markov Process	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 HAIS2020: Hybrid Artificial Intelligent Systems, LNCS, vol.12344, Springer	6. 最初と最後の頁 573-584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-61705-9_47	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 -

〔学会発表〕 計0件

〔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	小田切 和也 (Odagiri Kazuya) (30449491)	椋山女学園大学・文化情報学部・教授 (33906)	
研究分担者	松尾 徳朗 (Matsuo Tokuro) (80433142)	東京都立産業技術大学院大学・産業技術研究科・教授 (22605)	

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
---------	---------