

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19H04185

研究課題名(和文) 深層学習と3Dクラスタリングによる培養神経回路網の活動パターン識別

研究課題名(英文) Identification of electrical activity pattern in a cultured neural network by the combination of 3D-clustering and deep neural networks.

研究代表者

工藤 卓 (Kudoh, Suguru)

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：10344110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：3D時空間クラスタリングと深層学習転移学習を組み合わせた活動パターン識別手法を確立した。本研究では、微小平面電極を底面に備えた細胞電位多点計測皿上に分散培養したラット海馬神経回路網から多点で計測した自発性及び誘発性細胞外電位パターンに時空間3Dクラスタリングを適用し、得られた神経電気活動の時空間パターンを画像化した。学習済みモデルVGG16を用いて転移学習を行ったところ、2カ所の刺激電極による誘発応答パターンと自発性活動パターンを9割以上の高精度で識別することに成功した。さらに、神経活性化経路が情報をコードしており、誘発応答と自発活動におけるストリームは共通のものが存在することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

神経回路網における神経情報コードを解読することは、神経科学の重要な課題のみならず、脳-機械インターフェースにおいて神経活動から意思を読み取るためにも必須である。近年はBig Dataを背景にした深層学習によりパターンを高精度で識別することが可能であるが、神経信号のような生体信号は学習データを大量に用意することが困難である。本研究では、神経電気活動の多点時系列データを時空間情報を保存した形で画像に転換する手法を確立し、転移学習により高精度で識別する手法を開発した。この結果は、電気生理データのみならず、脳波など生体の多点時系列信号の識別に応用することが可能で、神経情報コードの解読に大いに貢献する。

研究成果の概要(英文)：We have established a method for identifying activity patterns by combining 3D spatiotemporal clustering and deep transfer learning. In this study, we applied 3D spatiotemporal clustering to spontaneous and stimulus-induced extracellular potential patterns measured from a rat hippocampal neuronal network cultured on a multi-point measurement dish equipped with planar microelectrodes on the bottom, and visualized the spatiotemporal patterns of neuronal electrical activity. Using the pre-trained model VGG16 for transfer learning, we successfully identified response patterns induced by two distinct stimulation electrodes and spontaneous activity patterns with over 90% accuracy. Furthermore, it was suggested that the neural activation pathway codes information, and there are common streams in induced responses and spontaneous activities.

研究分野：神経工学

キーワード：深層学習 転移学習 VGG16 時空間3Dクラスタリング 培養神経回路網 神経誘発応答パターン 自発性神経活動パターン

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。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 神経回路網における情報処理機構解明の重要性

脳における神経活動は、感覚器官を通じて入力される情報に応じてその内部状態を変化させ、外界からの入力に対応したものを知覚・認識し、それに対する出力を決定する。このアルゴリズムを解明することこそ、脳における生体知能の基盤を理解するということである。神経活動パターンは入力に応じて変化し、その入力に対応づけられた外界のオブジェクトを脳内にて表象するが、この過程で発現する神経活動のダイナミクスを解析し、その生成の一般原理をモデル化することが重要である。

#### (2) 「小さな脳のモデル」としての培養神経回路網

神経回路網における神経活動のダイナミクスを明らかにするには、脳より単純で環境の操作がしやすい利点を持つ培養系をモデルとして解析することも有効である。細胞外電位計測が可能な微小平面電極アレイを底面に備えた培養皿上に分散培養した神経細胞は、培養日数の経過と共に再びネットワークを形成する。概ね培養開始後 10 日前後から、神経細胞同士が相互作用することにより自律的な神経電気活動が観察されるようになる。これを自発性神経電気活動と呼ぶ。また、微小平面電極から電流を印加することにより、電極上の神経細胞に活動電位が発現し、これがネットワークを伝搬することで系全体に誘発応答パターンが観察される。この「小さな脳のモデル」を用いて、ネットワークとしての神経回路網の刺激応答特性を解析し、神経活動の時空間パターンを識別する研究が、神経工学や人工生命などの融合領域的な学問分野で注目されている。

#### (3) 神経活動パターン符号化に関する現状の問題点

神経活動パターンを解析する際には神経電気活動パターンを表現する特徴ベクトルを生成するが、一般的には測定電極から得られたスパイク列を一定の幅の時間窓で区切り、其の範囲に含まれる活動電位スパイクを計数することが行われている。しかし、厳密に考えれば、神経細胞間の伝達にはシナプス遅延が発生するため、周期的に活動する複数の神経細胞間には相対的な位相ずれが存在し、神経細胞間のパターンを形成する時間幅はネットワーク全体で一定とはならないはずである。従って、このような時間窓に依存しない神経活動の符号化が必要であるという背景があった。また、神経活動は時間方向と空間方向に広がりを持つ時空間パターンであるが、この時空間に情報がどのように埋め込まれているかについての考察が十分為されているとは言えない状況があった。

### 2. 研究の目的

#### (1) 時間窓幅に拠らない神経情報の符号化

空間的・時間的に近い位置で発現した神経活動は一つの情報を表現する要素であると考え、3次元の時空間ラスタプロットにクラスタリングを適用し、スパイクイベント群の時空間的連続性に基づいた活動パターンを抽出する手法を提案し、この手法を確立することを研究のひとつの大きな目的とした(図1)。

#### (2) 深層学習を用いた神経活動パターンの抽出

また、近年 AI によるパターン識別精度の高さが注目され、深層学習の発展がめざましい。そこで、本研究においても時空間的連続性によってまとめられたスパイク列群からのパターン抽出の手法として、深層学習を利用して高精度の神経発火パターンを分離する手法を開発することも研究の柱とした。

#### (3) 神経活動パターンの抽出における時間的发展と空間的關係性との重要性の比較検討

取り出された神経活動のパターンには時間的連続性と空間的連続性の2種の情報が存在するが、そのいずれが神経活動パターンの識別に貢献しているのかを明確にすることも研究テーマの重要な課題とした。

#### (4) 自発性活動と誘発応答活動の關係性の解明

さらに、神経回路網における自発性活動パターンと誘発応答パターンを抽出・比較し、その類似性、独立性を検証し、「自発性活動と誘発応答活動が分離独立した現象ではなく、自発性活動は神経活動の内部状態を形成し、誘発応答パターンのソースになっているのではないか」という仮説を確かめる。

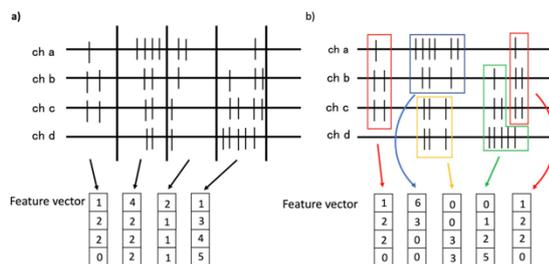


図1. 特徴ベクトルの生成についての考え方. a) 計測時間を一定時間窓で区切り、この範囲での発火率から特徴ベクトルを生成する従来の考え方. b) 時空間的なまとまりをもとに一定の時間幅によらない特徴ベクトルの生成.

これらの知見を統合して、外界の情報に対して半自律的に内部状態を更新し、環境に適応する「小さな脳のモデル」としての培養神経回路網を確立・展開することが、研究全体を通じた概念的な目標である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 生体神経回路網における神経電気活動多点計測

本研究全体を通じて一貫して、細胞外電位多点計測皿上に分散培養したラット海馬由来細胞に神経回路網を再構築させた培養神経回路網を実験材料として使用した(図2)。

#### (2) 神経活動パターンの抽出

本研究では、X-means を応用した 3D 時空間データ多層クラスタリング手法、学習済み深層学習モデルを用いた転移学習を用いて神経活動パターンの抽出を行った。これらの手法の確立が本研究の中心である。

#### (3) 神経活動時空間パターンの時間軸・空間軸方向の展開の重要性の検討

転移学習における神経活動信号の画像化を工夫することで、時間軸・空間軸方向の情報展開を解析した。

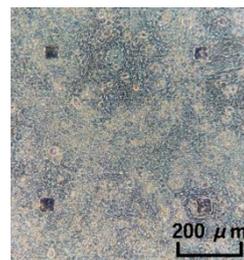


図2. ラット分散培養神経回路網の例 (E18DIV67)

### 4. 研究成果

#### (1) 3D 時空間データ多層クラスタリング手法の確立

本研究の大きな目標の一つは<時間窓に依存しない>神経活動パターンの符号化であった。そこで、本研究では、神経活動スパイクに<空間的に隣接した活動>と<時間的な変化の連続性>を基にした時空間クラスタリングを適用することで、神経細胞の活動スパイク列の間に存在する相対的な位相のずれを考慮した活動パターンの抽出を試み、神経活動スパイク列のタイムスタンプデータを、そのスパイクが検出された電極位置の 2D 座標値とスパイクの 1D タイムスタンプデータによる 3D データとして表現した。ただし、活動電位スパイクのタイムスタンプをそのまま Z 軸方向の特徴量とする場合、電極の空間座標である X, Y 座標の情報解像度に対して、Z 軸方向の解像度が高すぎることになり、結局 Z 軸方向のみでクラスタリングすることと大きな差が出ないということが確認された。生体信号においてはこのような問題に特に注意を向ける必要がある。そこで、Z 軸方向は神経活動電位のバースト活動に着目し、このバースト開始時刻を相対的に数値化することで、3 軸の解像度を揃えた。この 3D タイムスタンプデータに対して時空間クラスタリングを適用し、時間・空間の両方で距離が近い位置にあるバースト活動を 1 つの活動パターン (クラスタ) として抽出した。このとき、要素数が 1 であるクラスタは排除した。これにより、一定の時間窓幅に依存せず、時空間両方向で近く、連続した一連の神経電気活動パターンを抽出した(図3)。

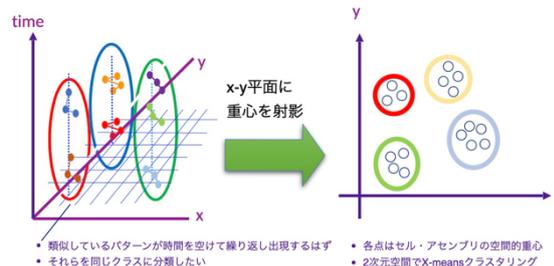


図3. 3D 時空間データ多層クラスタリング手法の概要

#### (2) 空間情報優先神経活動パターンイメージと時間情報優先神経活動パターンイメージによる神経信号の画像化と転移学習を利用した神経活動パターンの抽出

本研究では、転移学習 (TL, Transfer Learning) を用いた多層畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional neural network, CNN) により、自発性神経電気活動と異なる電極により誘発された誘発応答活動の識別を行うために、3D 時空間データ多層クラスタリングによって抽出された神経電気活動パターンを神経電気活動パターンイメージとして表現した。時空間クラスタリングにより抽出された個々の神経活動時空間パターンについて、そのパターンに含まれるスパイク数を計測チャンネルごとに計数した。ただし、パターン発現時間内にバースト発火があっても、その発火が他の活動パターンに含有されていた場合、そのチャンネルの要素の値は 0 とする。以上の手続きにより、抽出された各活動パターンは定格的な 64 次元の特徴ベクトルに変換される。その後、時空間クラスタリングによって抽出された個々のセルアセンブリ (パターンレパートリー) はそのセルアセンブリに含まれる 3D 時空間発火パターンを  $8 \times 8$  の 2D 空間パターンマップに変換し、この 2D 空間パターンマップを時間方向に結合して入力画像 (神経電気活動パターンイメージ) として表現した(図4)。作成された画像には、抽出された神経電気活動パターンの空間的な連続性と時間的な連続性の両方の情報が含まれている。そこで、CNN の下層の側で神経電気活動パターンの空間的な連続性を処理させる空間情報優先神経活動パターンイメージと、神経電気活動パターンの時間的な連続性を処理させる時間情報優先神経活動パターンイメージの 2 種類の画像を生成した。画像サイズは、使用する学習モデルである VGG16 の既定のサイズである  $224 \times 224$  とし、 $8 \times 8$  の 2D 空間パターンマップをその活動パターンの発現時間

順に結合した。結合の際、同じ向きと要素数で結合すると、電極8の右隣に電極1、電極64の下に電極8が結合され、本来空間的に近接していない電極同士の繋がりが特徴量として強くなる可能性がある。そのため、隣り合う電極は実際の電極配置上のもとの常と同じにする必要がある。以上のことを考慮し、2D空間パターンマップを結合する際に電極の上下、左右、斜めの隣り合う電極は実際の電極配置と同じであること、

活動パターンを画像として結合する際に隣り合う活動パターンは活動パターンの発現時間においても隣同士であることを画像生成の条件とし、この2つの条件のもと、2種類の入力画像をそれぞれ作成した。これらの空間的な関係性と時間的な関係性の両方を保持した画像として表現されたデータに対し、既存の学習済みモデルであるVGG16を用いた転移学習により、活動パターンの識別、特徴抽出を試みた。その結果、空間的連続性が局所情報として配置される空間情報優先神経活動パターンイメージ、時間的連続性が局所情報として配置される時間情報優先神経活動パターンイメージのうち、時間情報優先神経活動パターンイメージで表現された自発性活動、誘発応答活動A、誘発応答活動Bの識別におけるバリデーショングデータの識別精度は、 $99.97 \pm 0.02\%$  (平均±標準誤差,  $N=5$ ) と高精度であった。また、空間情報優先神経活動パターンイメージを入力画像とした際の学習過程より早く収束した(図5)。

一方で、空間情報優先神経活動パターンイメージを入力画像とした学習において、トレーニングデータの識別精度と損失は概ね高精度かつ低損失に収束する傾向があったが、バリデーショングデータの識別精度と損失は収束しなかったことから、空間情報優先神経活動パターンイメージに対しては過学習を起こしていることが考えられる。

### (3) 神経活動時空間パターンの時間軸・空間軸方向の展開の重要性の検討

空間情報優先神経活動パターンイメージの大局的な情報として、3Dクラスタリングに

より抽出された神経活動パターンが時系列順に隣り合っていることから、バリエーションが豊富な活動パターンが散らばっていることが学習に影響した可能性がある。CNNは、入力層に近い低階層において、局所的な、近い空間位置にある画素の値の組み合わせを特徴量として抽出し、より高階層において、局所特徴同士の組み合わせを特徴量として抽出する。時間的連続性が局所情報として配置される時間情報優先神経活動パターンイメージを対象とする方が早く学習が収束することから、時間的連続性の方がデータの識別の特徴量としてより重要である可能性が考えられる。神経活動パターンは神経細胞間の機能的接続を反映する。神経回路網における細胞間の機能的な接続が神経情報を伝搬するが、そこでは必ずシナプス前細胞の発火の後にシナプス後細胞が発火するという時間的連続性がある。また、神経活動の空間パターンに同時活動している複数の神経細胞の活動が含まれている場合でも、空間的に近い神経活動の間に機能的接続が存在しているとは限らない。一方、神経活動の時間パターンに、連続活動している複数の神経細胞の活動が含まれる場合、時間的な距離の近さは空間的な距離の近さに転換されており、この場合、局所的で距離が近い神経細胞間には機能的接続が存在している可能性は高い。空間的な近さと細胞間接続の確率とは相関が低いが、時間的な近さと細胞間接続の確率は相関があるからである。このことは、機能的な接続は、本来時間的な連続性を基準として抽出すべきものであり、空間的な近接性を基準として抽出すべきものではないということを反映している。即ち、神経機能的接続は神経活動の時間的連続ストリームとして解析すべきであることを示唆する。

### (4) 瞬時空間パターンマップによる解析

神経機能的接続は神経活動の時間的連続ストリームとして解析すべきであることが示唆された

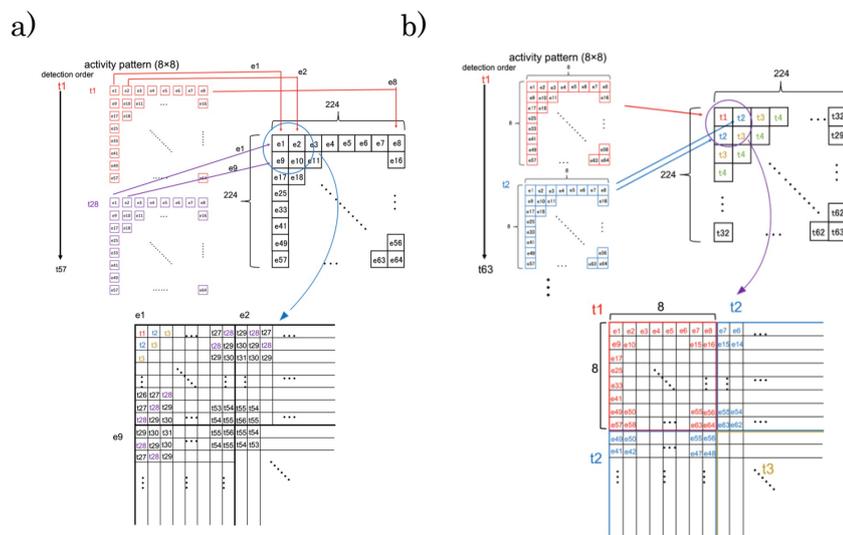


図4. 空間情報優先神経活動パターンイメージ(a)と時間情報優先神経活動パターンイメージ(b)の生成。

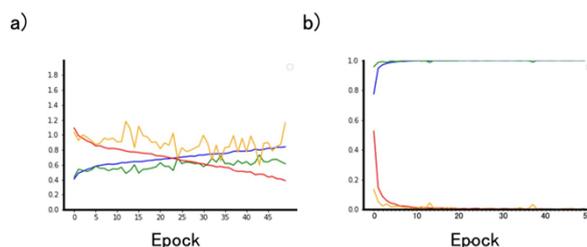


図5. VGG16を用いた学習結果(E18DIV117)。青線と赤線がトレーニングデータの識別精度と損失、緑線とオレンジ線がバリデーショングデータの識別精度と損失を示す。a) 空間情報優先神経活動パターンイメージ、b) 時間情報優先神経活動パターンイメージ。

ため、神経活動パターンを瞬時空間パターンが連続したストリームであるという観点に立って解析する手法を考案した。瞬時空間パターンとは、解析時間窓の幅を最小のシナプス伝達時間より短い1ms幅として、同時発火する神経細胞の組を空間パターンとして表現したものである。この場合、発火数が著しく少なくなるため、複数回の刺激を行って得られる各電極における発火確率を輝度値として画像化した(図6)この短い時間窓内で同時発火する神経細胞同士は、「細胞間の直接的な信号伝達がない」ことが保証される。つまり、この瞬時の時間窓における活動マップには、神経細胞同士の接続ではなく、分岐または並列した独立の信号伝搬経路(ストリーム)の時間切片が表現されている。この空間パターンは、シナプス結合した神経細胞からなる特定の伝搬経路による信号伝達の活動足跡である。さらに、3D時空間クラスタリングから生成した画像に適用したと同様に、異なる入力に対する応答を複数の連続した瞬時空間パターンを合成した画像から識別した。その結果、空間情報優先神経活動パターンイメージを対象としても、時間情報優先神経活動パターンイメージを対象としても、バリデーションデータの識別精度は共に90%を越えた。このことは、空間的な偽接続の顕在化が少ない瞬時空間パターンマップの場合は、空間情報優先神経活動パターンの作成手法で信号をイメージ化してもストリームのな情報伝搬が抽出される可能性が示唆された(図7)。

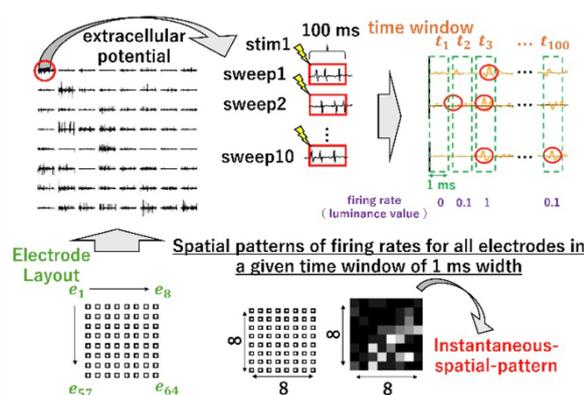


図6. シナプス伝達に必要な最小時間以下の時間窓で計数した神経活動スパイクを瞬時空間パターンとして符号化する手法の概要。

### (5) 自発性活動と誘発応答活動の関係性の解明

自発性活動, 異なる電極からの刺激印加によって誘発された2種の誘発応答から得られた神経活動パターンに対して3D時空間クラスタリングを適用し, さらにラフクラスタリングによって類似した神経活動パターンをクラスにまとめる解析を行った。其その結果, 2種の誘発応答パターンが同一のクラスに含有される割合より, 誘発応答と自発性活動が同じクラスに含有される割合のほうが多かった(図8)。この結果は, 自発性活動は神経活動の内部状態を形成し, 誘発性応答パターンのソースになっているという仮説と一致する。

### (6) 「小さな脳のモデル」としての分散培養神経回路網の展開

以上の結果の他, 本研究の中核的テーマで得られた知見を応用した以下のニューロロボット研究を展開している。

#### (6) -① 移動型ニューロロボットへの展開

誘発応答の神経活動パターンは, 刺激による直接的な誘発応答というよりは, 刺激がトリガーとなったある状態を表現する自発性活動によるパターンであると捉え, 生体神経回路網の自発性活動によるロボット制御を設計した。この設計は自発性活動と誘発応答活動とが時空間パターンを共有していることを前提としている。

#### (6) -② 言語学習の要素となる分節化を神経回路網に実装する試み

神経回路網への連続入力パターンに対する培養神経回路網の応答から, 連続入力を分節化する機能が発現しようとする仮定し, 言語学習の要素となる分節化を神経回路網に実装することを目指している。神経活動パターンの識別に, 本研究課題による成果を応用している。

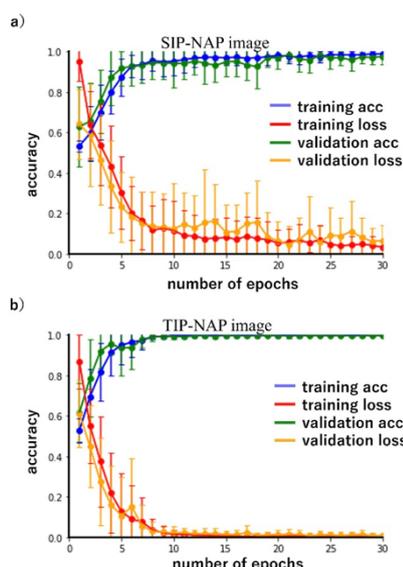


図7. 瞬時空間パターンによる神経活動パターンの抽出. a) 空間情報優先神経活動パターンイメージ b) 時間情報優先神経活動パターンイメージ。

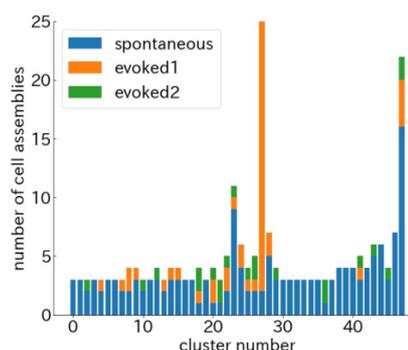


図8. ラフクラスタによる類似神経活動パターンクラス要素の, 自発性活動と, 2種の誘発応答活動の内訳. 自発性活動は全てのクラスに広く含有されている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kai Hirokawa; Suguru N. Kudoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Associative Learning Based on Functional Connectivity in a Cultured Neuronal Network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 proc.2022 Joint 12th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 23rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SCISISIS55246.2022.10002136	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 該当する
1. 著者名 N. Yamaguchi and S. N. Kudoh,	4. 巻 -
2. 論文標題 A Neuro-robot System Generating Collision Avoidance Behavior Using Short-term Depression Effects in a Cultured Neuronal Network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 proc.2022 Joint 12th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 23rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SCISISIS55246.2022.10002119	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 該当する
1. 著者名 K. Ogomori and S. N. Kudoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Neuronal electrical activity pattern extracted by 3D clustering and discriminated by a deep CNN	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 proc.2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Prague, Czech Republic	6. 最初と最後の頁 1804-1809
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SMC53654.2022.9945174	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 該当する
1. 著者名 Suguru N. Kudoh	4. 巻 11
2. 論文標題 A semi-living broken Dialogue Agent Depending on the Internal State of a Living Neuronal Network	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th International Conference on Human-Agent Interaction	6. 最初と最後の頁 419-421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3623809.3623947	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 該当する

1. 著者名 Ogomori Kaito, Kudoh Suguru N.	4. 巻 15
2. 論文標題 Identification of the spatiotemporal activity patterns of cultured neuronal networks using deep convolutional neural networks (CNNs)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2023 15th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/BMEiCON60347.2023.10321992	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 該当する

1. 著者名 浅田 紘基, 工藤 卓	4. 巻 39
2. 論文標題 深層学習を用いた培養神経回路網の瞬時空間パターン識別	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本知能情報ファジィ学会 ファジィ システム シンポジウム 講演論文集	6. 最初と最後の頁 400-404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14864/fss.39.0_400, <a href="https://www.jstage.jst.go.jp/article/fss/39/0/39_400/_article/-char/ja">https://www.jstage.jst.go.jp/article/fss/39/0/39_400/_article/-char/ja</a>	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25件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Ayumi Nishikawa, Suguru N. Kudoh
2. 発表標題 Functional connections in a cultured chimera network of neuronal cells derived from chick and rat cerebrum
3. 学会等名 Society for Neuroscience annual meeting, Neuroscience 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 百瀬 仁人, 工藤 卓
2. 発表標題 入力応答の自発的分節化による生体神経回路網の意味概念の生成の試み
3. 学会等名 第38回ファジィシステムシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤卓
2. 発表標題 ニューロロボットとファジィ認知工学
3. 学会等名 SICEライフエンジニアリング部門シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大龍海斗, 工藤 卓
2. 発表標題 3Dクラスタリングと転移学習を用いた多層畳み込みニューラルネットワークによる神経活動パターン抽出の試み
3. 学会等名 2022年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅田紘基、工藤卓
2. 発表標題 培養神経回路網における神経信号伝搬経路の瞬時空間パターン抽出
3. 学会等名 2022年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新田一輝, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網への連続入力における高頻度入力パターンの切り出し - 階層型クラスタリングによる解析
3. 学会等名 2022年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 工藤 卓
2. 発表標題 ニューロロボットは記号設置の夢を見るか？
3. 学会等名 東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻「先端知能機械情報学セミナー」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kai Hirokawa, Suguru N. Kudoh
2. 発表標題 The analysis of dynamics and the relationship between spontaneous and evoked activity as cell assemblies in a cultured neuronal network
3. 学会等名 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川 あゆみ, 工藤 卓
2. 発表標題 異種混合神経回路網におけるCa <sup>2+</sup> ピークと細胞外電位スパイクとの相関解析-機能的神経伝達の検出に向けて
3. 学会等名 2021年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣川 快, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網におけるセル・アセンブリのダイナミクスおよび自発的活動と誘発応答の関係性
3. 学会等名 第37回ファジィシステムシンポジウム(FSS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山島 大輝, 工藤 卓
2. 発表標題 生体神経回路網による刺激応答活動パターンの連想的記憶誘導の試み
3. 学会等名 2021年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhao Enming, Kudoh Suguru, N
2. 発表標題 An attempt to reproduce associative learning on a cultured neuronal network for development of a self-learning neurorobots. 自己学習型ニューロロボットののための、培養神経回路網における連想学習再現の試み
3. 学会等名 生物物理学会第59回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三谷諒, 工藤卓
2. 発表標題 ニューロロボット構築のための培養神経回路網の経時変化
3. 学会等名 第36回ファジィシステムシンポジウム (FSS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 趙 恩明, 工藤 卓
2. 発表標題 生きている培養神経回路網による自己学習可能なニューロロボットの開発
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 作田 尋路, 工藤 卓
2. 発表標題 参照型階層クラスタリングによる生体神経回路網におけるセル・アセンブリの階層構造解析
3. 学会等名 2019年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上 巧, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網への電流刺激効果伝搬の時系列解析
3. 学会等名 2019年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 趙 恩明, 工藤 卓
2. 発表標題 生体神経細胞によるネットワークにおける入力応答パターンの連合
3. 学会等名 FAN2019(第29回インテリジェント・システム・シンポジウム)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsunori Kishimoto, Suguru N Kudoh, Takahisa Taguchi, Chie Hosokawa
2. 発表標題 Resonance laser effect on optical trapping of cell surface molecules
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryu Umebayashi and Suguru N. Kudoh
2. 発表標題 Neurorobot “ Vitaenoid ” - an Interaction System between a Living- Neuronal-Network and Outer Environment
3. 学会等名 ALIFE 2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Asada and Suguru N. Kudoh
2. 発表標題 Analysis of the occurrence rate of neural activity patterns in a cultured neuronal network using instantaneous-spatial-pattern representation.
3. 学会等名 Neuroscience 2023 (2023 Annual Meeting of Society Neuroscience U.S.A.) ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuki Nitta and Suguru N. Kudoh
2. 発表標題 Attempt to quantify the segmentation of continuous input by a cultured neuronal network
3. 学会等名 Neuroscience 2023 (2023 Annual Meeting of Society Neuroscience U.S.A.) ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅田 紘基, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網における入出力関係の瞬時空間パターン表現による解析
3. 学会等名 2023年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新田 一輝, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網による連続刺激に対する分節化の検証
3. 学会等名 2023年度電気学会電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅田 紘基, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経回路網における入力応答の信号伝搬経路の共起抽出
3. 学会等名 第46回日本神経科学大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新田 一輝, 工藤 卓
2. 発表標題 培養神経細胞ネットワークにおける高頻度連続入力に対する誘発応答の同定
3. 学会等名 第46回日本神経科学大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

関西学院大学 研究活動情報  
[https://research-activity.kwansei.ac.jp/topic/index.php?c=topics\\_view&pk=1706796042](https://research-activity.kwansei.ac.jp/topic/index.php?c=topics_view&pk=1706796042)

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

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