

機関番号：34504

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19200018

研究課題名（和文） 機能的結合に基づく神経情報ダイナミクス・デコーディング

研究課題名（英文） Neural information decoding by estimation of the dynamic functional connectivity

研究代表者

工藤 卓 (SUGURU N. KUDOH)

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：10344110

研究成果の概要（和文）：

本研究により、神経回路網活動パターンの動的変化を捉える手法を動的クラスタリングとファジィ演算子を応用して開発し、経回路網のもつ回路性の履歴性を発見した。また、ファジィ演算子を応用した神経結合パターン論理性の推定を行う新規手法を確立し、そのプログラムを開発してその有効性を確認した。これは神経細胞間の機能的結合パターンの規則性や論理性をT-ノルム、T-コノルム演算子を用いて抽出し、その時間変化を特長量として神経結合パターン論理性を見積もる手法である。神経ネットワークの刺激依存状態変異の持続時間に関する知見を応用して逐次実行のクラスタリング解析手法を開発し、ダイナミクス・デコーディングを行うプログラムの開発を行った。さらに、分散培養系に外界と相互作用する媒体として LEGO Mindstorm NXT を用いて構成した小型移動ロボットを接続し、センサからの入力を培養系にフィードバックするシステムを開発した。このニューロ・ロボットシステムは神経デコーディングの実証実験用のプラットフォームとして有用である。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we developed analytical methods to elucidate dynamical changing of the pattern of activity in living neuronal network and using the methods, we discovered hysterical effects of living neuronal network on evoked activity. Moreover, the novel technique, which estimates the logic of the neuronal connectivity pattern adapting a fuzzy operator, was established. This is the technique of extracting the regularity and logicalness of a functional connectivity pattern between neurons using T-norm and T-conorm operator. Using the finding about the duration of the stimuli dependent status variation of a living neuronal network, the dynamical clustering analysis technique was established for the culture system, and a program for dynamical-decoding was developed. Furthermore, the small mobile robot was connected to the dissociated culture system as a vehicle for an interaction to the external world. The system with feeds back the input from sensors on the robot body to a culture system was developed. This neuro-robot system is useful as a platform for a substantiation test of the methods of neuronal decoding.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2009年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2010年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
年度			
総計	29,300,000	8,790,000	38,090,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学／感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：複雑系、T-ノルム、神経知能工学、BMI、神経情報コード

1. 研究開始当初の背景

近年、開発が精力的に行われている着者の

意図を直接受信する Brain-Machine Interface (BMI) を備えた義手などの医用機器は、個人の QOL を画期的に向上して自律した生活を支援するものである。しかし、現状の BMI は、脳内の特定部位の漠然とした信号に対して大雑把なパターンマッチングを行い、不完全な推測を行っている段階である。従って、BMI 装着者は機器の制御のために高度な訓練を課されることになり、多くの時間と努力が必要となる。BMI の制御手法については神経活動の時系列データを各細胞の発火率を要素とした多次元状態ベクトルに表現し、クラスタリングによって分類する手法がよく用いられている (N. Matsumoto et al. *Cereb. Cortex* 15(8):1103-1112, 2005)。この手法は有効であるが、時空間パターンを生成している要因が見えないため、神経活動の可塑性による変動を推定できない。これらの点を改善するためには、従来の大局的・静的なパターンマッチングによる神経信号の解読ではなく、脳本来の情報表現である神経細胞間の機能的結合性によるダイナミックな情報表現に対して、時間情報を含んだカテゴリー化を行う必要がある。

2. 研究の目的

上記背景から、本研究では機能的結合性の時間変動パターンに着目し、生物学的知見と情報工学的手法とを融合することにより、時間方向の情報を入れ込んだ新しいダイナミクス・デコーディング解析を確立することを提案の中心目的とした。

3. 研究の方法

系神経情報を抽出する素材としては、脳内の神経回路におけるダイナミクスと本質的に相同なダイナミクスを持っている分散培養神経回路網を用い、神経細胞間の結合性に関する各種パラメータを試薬及び・局所電気刺激により制御し、内部状態に摂動を与えることで現れるダイナミクスを解析する。その結果から、神経機能的結合パターンの規則性を抽出してこれを特徴量として定義し、特定の刺激に対する応答特性をカテゴリー化する手法を確立する。具体的には、まず培養細胞の密度に依存した機能的結合状態の経時変化の様態を解析し、本提案解析が最も有効に働く培養条件を確立する。次に学習型 T-ノルム演算子、T'-ノルム演算子を用いて神経細胞間の結合構造を表現し、空間パターンの特徴量データから、ノルムの結合パラメータを勾配法などの非線形探索手法で学習、同定する。そのパラメータ推定によって、特徴的な機能的結合の空間パターンの論理性・規則性を抽出する。さらに、神経回路網ダイナミクスを多重マルコフ過程と捉えてその次数を推定することにより、神経発火活動時系列データのどの範囲を一つのチャンクとして情報表現しているかを検討する。此所まで開発

した手法により、神経回路網活動のダイナミクスを機能的結合性の時間変動パターンの観点からカテゴライズする手法 (ダイナミクス・デコーディング) を確立する。また、識別パターンを現実の事象と結びつけるために、境界条件をより詳細に制御できる高次脳機能模倣系として分散培養系に外界と相互作用するシステムを接続し、ダイナミクス・デコーディングの手法でこの過程を捉え、内部表現をとりだして電子機器を制御可能であることを検証する。

4. 研究成果

長期間安定なラット海馬高密度分散培養系を確立し、電気活動経時変化のキャラクタライズを行った。100 日以上で長期培養を実現し、この培養条件下で、ラット海馬分散培養系に於いて多数の入力を受けるハブ的な神経細胞が出現し、これらは神経回路網に於ける自発的な電気活動により自律的に構成されることが示唆された。また、長期的な培養においては非常に特徴的なバースト状の自発活動が一過性に、高頻度に出現する特定の時期が存在することを発見した。以降バーストは減少し、電極間での自発活動電位の同期性が一層顕著に観察されるようになった。培養初期には明確でなかった同期現象が発現するのはシナプス結合が調整されて全体的なネットワークの構造が変化したためと考えられ、この特徴的な一過性高頻度バースト活動の発現がネットワークの再編成に重要な役割を果たしている可能性がある。さらに興味深いことに、活動電位頻度の各電極間の標準誤差は、高頻度バースト時とその後に大きく増大し、活動電位頻度が高い細胞と低い細胞が不均一に分布するように変化した (図 1)。

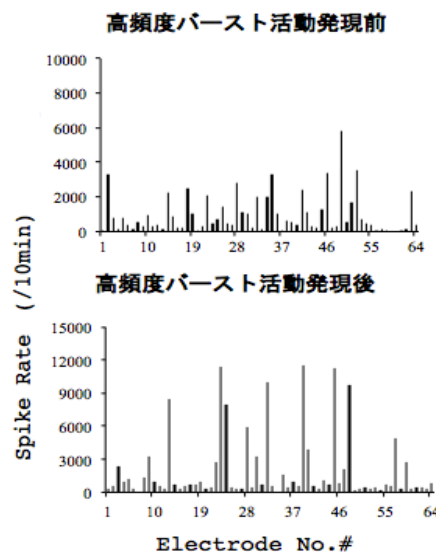


図 1 自発活動パターンの変化

つまり、細胞のシナプス結合の分布が不均一になった可能性が示唆された。

次に、このように自己組織的に不均一ネットワークを構成している半人工的な神経回路網において細胞外電位を多点で計測し、各電極で得られた誘発応答の活動電位頻度を回路網活動の時空間パターンと捉えて特徴ベクトルとして表現した。異なる入力に対する応答パターンの類似性をユークリッド距離で評価したところ、1秒以上前の事前刺激の有無により神経活動パターンが大きく異なる、回路性の履歴現象を発見した。この履歴現象は、個々の神経細胞の発火特性ではなく、回路網全体のパターンを観察することで初めて見いだせる(図2)。この現象をユークリッド距離による比較によって定量的に解析し、この履歴現象が培養日数依存的に変化し、高頻度の自発性バースト活動が観察される十分なネットワークの形成が必須であることを明らかにした。培養神経回路網が履歴を保持し、時間的な情報をダイナミクスにより表現しうることが明らかになった。

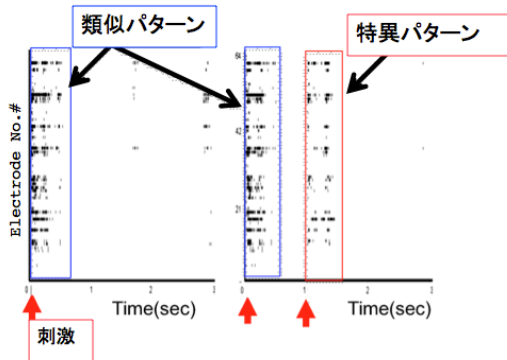


図2 誘発応答パターンの回路性履歴現象

そこで、神経回路網の時間的な安定性を見積もることを考え、時間ごとにクラスタリング手法を適用することで神経活動パターンの定常性を推定した。培養日数14日目のものと63日目のラット海馬分散培養神経回路網の自発活動発火数を30分間記録したデータに対して、kkzを前処理としたX-meansクラスタリング手法を適用した。解析を行った結果、クラスタ数は培養によるばらつきはあるものの30分間でほぼ安定していた。これより、パターンの出現は周期的なものであると示唆された。また、様々な時間範囲でクラスタリング解析を行ったところ、クラスタリングの範囲を広げるのに伴って生成されるクラスタ数が増加する傾向が見られたが、培養日数14日目の培養ではクラスタリングの範囲がある一定の長さを超えるとそれ以降クラスタ数の増加が抑制された。この結果は、自発的な電気活動パターンのレパートリーは安定して一定数あり、パターンレパートリーの出現周期以上のクラスタリング範囲をとることでクラスタの数が一定となることが示唆された。この場合、パターンレパー

トリーの出現周期は60-100秒程度と見積もられた。

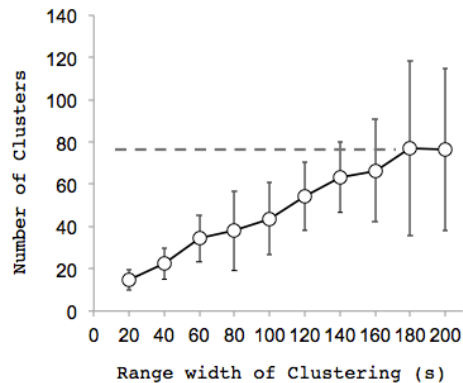


図3 クラスタ数とクラスタリング幅の関係性

神経活動パターンは秒単位の緩やかな周期性を持つことが示唆されたが、これまで空間的な結合パターンは明確に解析できていなかった。そこで、空間的な情報を表現する手段として機能的結合を識別するためのアルゴリズムを開発した。これは学習型T-ノルム演算子、T-コノルム演算子を用いて神経細胞間の結合構造を表現し、空間パターンの特徴量データから、ノルムの結合パラメータを非線形探索手法で学習、同定する手法である。このアルゴリズムを実装し、培養神経回路網の電気生理学的データから計算するソフトウェアを開発した。以下にアルゴリズム実行の例を示す。細胞外電位多点計測システムの64個の電極における発火の時刻スタンプのデータから、任意の x, y, z の3電極を選択し、それらの三電極間の論理性を解析した。 z 電極の第 i 番目のタイムウィンドウに対して、遅延時間 s_x での x 電極のタイムウィンドウの正規化発火頻度 F_{i-sx} と遅延時間 s_y での y 電極のタイムウィンドウの正規化発火頻度 F_{i-sy} を入力とするSchweizer演算子を構成し、その出力を得た。ファジィ演算子の出力と z 電極の第 i 番目の正規化発火頻度 F_i との偏差が最小となるように、Schweizer演算子のパラメータ p_n, p_c を調整した。ただし、 x 電極、 y 電極、 z 電極は特に入力と出力の関係ではないので、これらの三電極は交互に入力と出力とを交換する。その結果、最小偏差を導出するパラメータ p^* が求まり、そのパラメータ p^* から電極 x, y, z 間の論理関係が同定される。

$$p^* = \{p_n, p_c \mid \min(|T(x,y) - F_i^c|, |S(x,y) - F_i^c|)\}$$

次に、ファジィ一致度とファジィ演算子のパラメータ値を解析した。図4に1例を示す。64電極中から選定した3電極 x, y, z について x 電極と y 電極のタイムウィンドウでのファジィ数の正規化発火頻度と z 電極での正規化発火頻度をSchweizer演算子の入出力と

して入力し、演算子のパラメータを調整した結果、この実験例では $p^*=p_c=730.5$ が得られた。また、同様に、(B)では、 $\mu^*_{xz}=1.0$, $\mu^*_{yz}=1.0$ で $w_x=11s$, $w_y=10s$ となり、 $p^*=p_c=617.98$ が得られた。(C)では、 $\mu^*_{xz}=0.76$, $\mu^*_{yz}=0.91$ で $w_x=11s$, $w_y=10s$ となり、 $p^*=p_c=630.23$ が得られた。これらの結果から、 x 電極と z 電極の正規化発火頻度、あるいは、 y 電極と z 電極の正規化発火頻度はファジー一致度の高い値で一致していた。また、Schweizer 演算子のパラメータから、 x , y , z 電極の入出力関係は論理和に近かった。 x , y , z 電極の三電極間は、スパイクが発火した際に、発火信号が素早く伝搬するように、三電極間は論理和に近い弱い OR 関係となり、ほぼ直線結合の状態となっていることを示している。ただし、*cb60* の 102.4s 前後のスパイク発火していない時間帯では、Schweizer 演算子のパラメータの値は $p^*=p_n=0.0$ として求められるので激烈積を示している、激烈積は x , y , z 電極が 2 入力 1 出力の強い AND 関係を示している。これらの結果から、*cb60* の 102.4s 前後では、三電極間は 2 入力 1 出力の激烈積の結合関係を保っていたが、102.4s の発火スパイクにより、三電極間が論理和に変化し直線結合の状態となったと考えられる。本手法では、強い AND 関係から弱い OR 関係に変化するという電極間のダイナミクスも表現することができた。

これらの知見を元にして、ダイナミックに変動する神経活動パターンをデコーディングするプログラムを開発した。

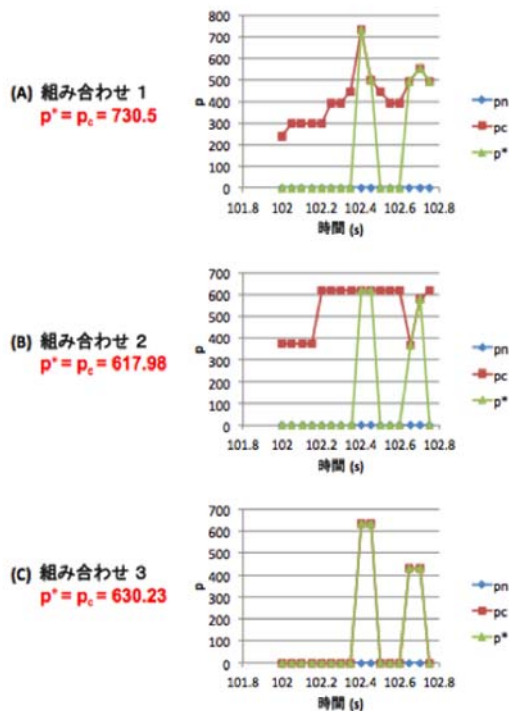


図4 ファジー演算子の推定

さらに、識別パターンを現実の事象と結びつけるために、境界条件をより詳細に制御で

きる高次脳機能模倣系として、Hebb 則学習と自律分散アーキテクチャを応用したニューロ・ロボットを構築した。具体的には LEGO Mindstorm NXT と AAI 社の KheperaII を用いて、センサと神経活動により制御されるアクチュエータで駆動される 2 輪を持つ小型移動ロボットを作成した(図5)。

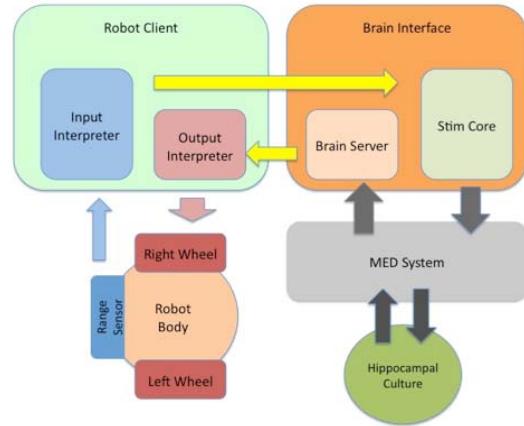


図5 ニューロ・ロボット

このロボットに搭載したセンサからの入力を培養系にフィードバックし、実際に神経活動パターンとロボットに埋め込んだ行動規則によって神経細胞の電気活動パターンで衝突回避行動を発現することに成功した。

この成果は、デコーディング手法の実証実験を行うプラットフォームとして非常に有効である。

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 10 件)

1. S.N. Kudoh, M. Tokuda, A. Kiyohara, C. Hosokawa, T. Taguchi and I. Hayashi: Vitroid - the robot system with an interface between a living neuronal network and outer world, Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems, Inderscience publishers, 査読有, 4(2), pp.135-149, 2011
2. Ai Kiyohara, Takahisa Taguchi, Suguru N. Kudoh: Effects of electrical stimulation on autonomous electrical activity in a cultured rat hippocampal neuronal network, EEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Wiley DOI: 10.1002/tee.20639, 査読有, 6(2), pp.163-167, 2011
3. Suguru N. Kudoh, Ai Kiyohara, Minori Tokuda, Takahisa Taguchi: Paradigms representing the relationship between the inner of a brain and the outer world, EEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Wiley DOI: 10.1002/tee.20606, 査読有, 6(1), pp.51-57, 2010
4. Chie Hosokawa Suguru N. Kudoh Mariko Suzuki Ai Kiyohara Yoichiro Hosokawa Kazunori Okano Hiroshi Masuhara Takahisa Taguchi: Micro-channel fabrication by

femtosecond laser to arrange neuronal cells on multi-electrode arrays, Appl Phys A, Springer DOI 10.1007/s00339-010-5836-4, 査読有, 101, pp.423-428, 2010

5. 工藤 卓, 清原 藍, 田口隆久: 分散培養系において「クオリアが生じる可能性」についての考察, 電気学会, 査読有, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム) 129-C (1) pp.32-45, 2009.

6. 清原 藍, 田口隆久, 工藤 卓: 分散培養系における自発性活動電位と誘導活動電位との関係性, 電気学会, 査読有, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム) Volume 129-C (10) pp.1815-1821, 2009.

7. Chie Hosokawa, Suguru N. Kudoh, Ai Kiyohara, Yoichiro Hosokawa, Kazunori Okano, Hiroshi Masuhara and Takahisa Taguchi: Femtosecond laser modification of living neuronal network, Springer, 査読有, Appl. phys. A, 93, pp. 57-63, 2008.

8. Chie Hosokawa, Suguru N. Kudoh, Ai Kiyohara and Takahisa Taguchi: Resynchronization in neuronal network divided by femtosecond laser processing, Lippincott Williams & Wilkins, 査読有, Neuroreport, vol. 19, No. 7, pp. 771-775, 2008.

9. Suguru N. Kudoh, Chie Hosokawa, Ai Kiyohara, Takahisa Taguchi and Isao Hayashi: Biomodeling system - Interaction Between Living Neuronal Network and Outer World, 富士技術出版社, 査読有, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.5, pp.592-600, 2007

10. 工藤 卓, 清原 藍, 田口 隆久: 分散培養神経回路網に於けるシナプス機能的結合の不均一分布, 電気学会, 査読有, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム), 127-C (10), pp.1611-1618, 2007

[学会発表] (計 34 件)

1. Suguru N. Kudoh, N. FUJIWARA, H. ITO, M. TOKUDA, and C. HOSOKAWA, Neuro-robot with autonomous activity in the neuronal circuit, Sociatyneuroscience 40th annual meeting 2010 年 11 月 16 日, San Diego Convention Center, U.S.A

2. Suguru N. Kudoh, Naohiko Fujiwara, Hidekatsu Ito, Minori Tokuda and Ai Kiyohara, Neuro-Robot Vitroid, with simple coupling approach, 7th Int. Meeting on Substrate-Integrated Microelectrode Arrays, 2010 年 7 月 1 日 Friedrich-List-Halle, Reutlingen, Germany

3. Hidekatsu Ito, Kwansei Gakuin University, Japan, Chie Hosokawa and Suguru N. Kudoh, Memory on a Chip, Proc. IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science 2010 (MHS2010), 2010 年 11 月 8 日, 名古屋大学

4. Isao Hayashi, Megumi Kiyotoki, Ai Kiyohara, Minori Tokuda, Suguru N. Kudoh, Fuzzy Bio-Interface: Logicality of Living Neuronal Network and Control of Fuzzy Bio-Robot System, Proc. of World Conference on Soft Computing (WConSC2011), 2011 年 5 月 23 日, San Francisco, U.S.A.

5. Isao Hayashi, Megumi Kiyotoki, Ai Kiyohara, Minori Tokuda, Suguru N. Kudoh, In Vitro Logicality for Neuro-Robot Hybrid,

Proc. of the fifteenth International Conference on Cognitive and Neural Systems (ICCN2011), 2011 年 5 月 14 日, p.84, Boston, U.S.A.

6. Isao Hayashi, Hisashi Toyoshima, Takahiro Yamao,

A Measure of Localization of Brain Activity for the Motion Aperture Problem Using Electroencephalograms, Proc. of the 11th Annual Meeting of Vision Sciences Society (VSS2011), 2011 年 5 月 10 日, No.53-407, p.242, Naple, U.S.A.

7. Isao Hayashi, Suguru N. Kudoh, Fuzzy Bio-interface: Can fuzzy set be an interface with brain?

Proc. of the 22nd Midwest Artificial Intelligence and Cognitive Science Conference (MAICS2011), 2011 年 4 月 16 日, Omron Plenary Lecture, pp.2-6, Cincinnati, U.S.A.

8. 工藤 卓 環境と相互作用する培養神経回路網～神経科学とニューロ・ロボティクス 先端医療バイオロボティクスセミナー (招待公開) 2010 年 7 月 30 日 名古屋大学 東山インキュベーション

9. Isao Hayashi, Megumi Kiyotoki, Ai Kiyohara, Minori Tokuda, Suguru N. Kudoh, Acquisition of Logicality in Living Neuronal Networks and its Operation to Fuzzy Bio-Robot System, Proc. of 2010 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE2010) in 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI2010), 2010 年 7 月 22 日, pp.543-549, Barcelona, Spain

10. 山口 洋平, 工藤 卓, 探索型特徴抽出による BCI の開発 第 25 回 生体・生理工学シンポジウム, 2010 年 9 月 23 日, 岡山大学

11. 中西 亮太, 伊東 嗣功, 藤原 直彦, 工藤 卓, 閼階層クラスタリングによる神経回路網活動パターンの解析, 第 25 回 生体・生理工学シンポジウム, 2010 年 9 月 23 日, 岡山大学

12. 井上 裕一郎, 藤原 直彦, 伊東 嗣功, 工藤 卓, クラスタリングによる神経活動パターンのダイナミクス解析, 第 25 回 生体・生理工学シンポジウム, 2010 年 9 月 23 日, 岡山大学

13. 藤原 直彦, 工藤 卓, テンプレートマッチングを用いたニューロ・ロボットによる培養神経回路網と外界の相互作用 平成 22 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 2010 年 9 月 2 日 熊本大学

14. 徳田 農, 細川 千絵, 工藤 卓, 刺激応答履歴性を利用したニューロ・ロボット 平成 22 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 2010 年 9 月 2 日 熊本大学

15. 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, The dynamics of the evoked activity and the spontaneous activity in the cultured rat hippocampus neurons, 第 47 回日本生物物理学会年会, 2009 年 10 月 30 日, アステイ徳島

16. 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, Autonomous modification of the network activity in dissociated rat hippocampal neurons, 第 82 回日本生化学会大会, 2009 年 10 月 24 日, 神戸ポートアイランド

17. Suguru N. Kudoh, The network dynamics and spontaneous activity in dissociated rat hippocampal culture, Neuroscience 2009, SfN's 39th annual meeting, 2009 年

10月19日, McCormick Place, Chicago
18. 工藤 卓, 清原 藍, 徳田 農, 細川 千絵, 田口 隆久, "試験管"としてのニューロ・ロボット"Vitroid"(生物と機械の融合-バイオロボティクス-, シンポジウム)(招待講演), 第61回日本生物工学会大会 2009年9月24日, 名古屋大学, 名古屋
19. 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓. Self-organization of the cultured neuronal network and dynamics of the evoked activity, 第32回神経科学大会, 2009年9月17日, 名古屋国際会議場
20. 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, 分散培養系における神経回路網の自律調整機構と一過性の活動抑制, 第24回生体・生理工学シンポジウム, 2009年9月24日, 東北大学
21. 林 勲, 清時 愛, 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, ファジィ演算子による神経培養細胞の活動電位解析
第25回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 筑波, 2009年7月14日, 1B3-01
22. Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, Isao Hayashi, A Robust Pattern of Neuronal Response to Outer Phenomena in "Vitroid", the Hybrid Neuro-Robot, Proc. of the Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2008), 2008年9月18日, pp.269-274, Nagoya, Japan
23. 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 林 勲, 田口 隆久, 外界と相互作用しながら自己組織化する培養神経回路網(招待講演), 日本比較生理学会第30回大会, 2008年7月19日, 北海道大学 理学部, 札幌
24. 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 林 勲, 田口 隆久, "Vitroid"-試験管"としてのニューロ・ロボット ハイブリッド(招待講演), 日本知能情報ファジィ学会北海道支部セミナー, 2008年5月15日, 北海学園大学 工学部, 札幌
25. ロボットを用いた生体神経回路網の身体性, 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 細川 千絵, 田口 隆久, 林 勲
計測自動制御学会第9回システムインテグレーション部会講演論文集, 2008年12月5日, pp.1063-1064, 岐阜
26. 工藤 卓, 徳田 農, 清原 藍, 田口 隆久, 林 勲, ニューロ・ロボットにおける in vitro 学習, 第24回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 2008年9月3日, pp.204-207, 大阪
27. Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, Isao Hayashi, Vitroid - A Robot with Link between Living Neuronal Network in Vitro and Robot Body, Proc. of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA2008), 2008年8月8日, pp.WC3-5, Takamatsu, Japan
28. Suguru N. Kudoh, Minori Tokuda, Ai Kiyohara, Isao Hayashi, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, Neuronal Responses to Sensor Inputs in the Miniature Neuro-Robot Hybrid, Proc. of the 6th International Meeting on Substrate-Integrated Micro Electrode Arrays (MEA2008), 2008年7月10日, pp.33-36, Reutlingen, Germany
29. 工藤 卓, 分散培養系に於ける神経活動の不均一分布(招待講演), 日本生物物理学会

第45回年会, 2007年12月21日, パシフィコ横浜, 横浜
30. Suguru N. Kudoh, Ai Kiyohara, Chie Hosokawa, Takahisa Taguchi, Isao Hayashi, Interaction between living neuronal network and outer world by programmable multisite stimulation system, Proc. of the 2007 IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS2007), 2007年11月12日, pp.44-49, Nagoya, Japan
31. Isao Hayashi, Takahisa Taguchi, Suguru N. Kudoh, Learning and Memory in Living Neuronal Networks Connected to Moving Robot (招待講演), Proc. of 8th International Symposium on advanced Intelligent Systems (ISIS2007), 2007年9月5日, pp.79-81, Sokcho, Korea
32. 林 勲, 徳田 農, 清原 藍, 田口 隆久, 工藤 卓, 生体表現システム: ファジィ推論を用いた培養神経細胞における適応学習の解析, 第23回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, 2007年8月29日, pp.565-570, 名古屋
33. 清原 藍, 工藤 卓, 徳田 農, 細川 千絵, 田口 隆久, 林 勲, 培養神経細胞による外界認知の試み, 第17回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, 2007年8月10日, pp.123-128, 名古屋
34. 林 勲, 山ノ井 高洋, 工藤 卓, Biologically Inspired Model: 脳神経・知覚・ロボティクスによるハイブリッドシステムを目指して, 第17回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集(特別講演), 2007年8月10日, pp.1-6, 名古屋

〔図書〕(計 2件)

1. 工藤 卓, 細川 千絵: 医療応用バイオロボティクスへの発展 Medical Bio 5月号, 第7巻第3号, pp.36-39, (2010)
2. 林 勲, 工藤 卓: 神経回路網の身体性: 分散培養系神経回路網ロボット スキルと組織, 国際高等研究所, 榎木 哲夫(編), 第8章, pp.175-193, (2010)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hsi.ksc.kwansei.ac.jp/~snkudoh/>
<http://www.kcn.res.kutc.kansai-u.ac.jp/~ihaya/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

工藤 卓 (KUDOH N. SUGURU)

関西学院大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 10344110

(2) 研究分担者

林 勲 (HAYASHI ISAO)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号: 70258078

(3) 連携研究者

細川 千絵 (HOSOKAWA CHIE)

(独) 産業技術総合研究所・健康工学研究部門・研究員

研究者番号: 60435766