

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24300091

研究課題名(和文) 生体神経回路網とファジィパターン識別法による学習システム

研究課題名(英文) Learning system by cooperation of living neuronal network and fuzzy pattern discrimination method.

研究代表者

工藤 卓 (Kudoh, Suguru)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：10344110

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：我々は、生体信号の解析に適したファジィ推論を利用して、神経電気活動パターン識別手法を確立し、半人工の培養神経回路網における入力メモリ効果について解析した。このヒステリシス効果は、実際に生きている神経細胞を記憶素子として使用することが可能であることを示している。我々はまた、生きている神経回路網への入力がある神経細胞に活動電位を誘発するだけでなく、この入力の影響が神経回路網の内部状態を変化させ、複雑な様式で時間をかけて伝播することも明らかにした。これらの結果は、従来の人工知能の動作原理とは全く異なる知的情報処理が実現される可能性を示唆している。

研究成果の概要(英文)：By using fuzzy reasoning, suitable for analyzing biological signals, we established methods for neuronal electrical activity pattern identification and analyzed the short-term memory effect in a semi-artificial cultured neural network. This hysteresis effect shows that it is possible to actually use living neuronal cells as a memory element. We also clarified that input to the living neuronal network not only evoked the action potential at a nerve cell but also that the influence of this input changes the internal state of the neuronal network and propagates over time in complicated way. These results suggest the possibility of realizing intelligent information processing quite different from the operation principle of conventional artificial intelligence.

研究分野：神経知能工学

キーワード：ファジィ推論 神経工学 ニューロエンジニアリング MEA 分散培養 履歴効果 パターンニング

1. 研究開始当初の背景

神経回路網は、神経細胞が活動電位を誘発することによって、接続している次の神経細胞へと情報を伝搬する。その様式は全か無かの法則で離散的であるが、他方、神経細胞同士の接続点であるシナプスにおいては連続的な伝達が行なわれ、各入力シナプスの伝達効率が変化することや、機能的結合状態が変化することによって神経回路網の出力が変化する。是は記憶・認識・学習の細胞生物学的な基盤と考えられ、是をモデルとした知能モデルが開発され、発展している。しかしながら、これらの情報処理モデルは、未だ離散的・近似的で有り、シナプスに於ける入出力まで詳細に考慮したものであるとは言い難い。この状況は、神経回路網に於ける情報伝達のダイナミクスが明確になっていない部分が多い故に、脳が未だにどちらかと言えば静的なシステムしか考えられていないためである。そこで、神経回路網のネットワークとしての情報伝搬ダイナミクスを明らかにし、生体神経回路網を用いた情報処理を構成的に実現することは、より離散的でない新しい情報処理システムの実現のためにも重要であることが考えられる。分散培養系は細胞間相互作用と細胞の発達依存的な変化を詳細に解析するのに適した系であり、電気活動を多点で計測することにより、環境を制御しやすい小規模ネットワークにおいて神経回路網情報処理とその分子メカニズムを同時に解析可能な利点を持つ。研究代表者は、ラット海馬神経細胞の高密度分散培養系を細胞外電位多点計測皿上に構築し、それまでに分散培養された神経細胞が人工的環境下でも自己組織的に情報処理に適したネットワークを形成すること、またその形成された神経回路において、電流入力に対するメモリ効果が観察されることを見出してきた。本研究はそれらの知見を発展させ、より詳細な解析を行ってダイナミクスを明らかにすると共に、生体神経回路網を用いた情報処理を構成的に実現することを目的として開始された。

2. 研究の目的

本研究の目的は、局所的な神経回路網におけるメモリ効果のより詳細な特徴解析・メカニズムの解明と、これを利用して生体神経回路網を用いた情報処理を構成的に実現することである。特に生体情報処理の連想記憶モデルの構築を目指した。そのために、神経回路網における情動的/物理学的な「状態」の確認とその記述方法を確立し、メモリ効果の細胞生物学的基盤との相関性・自発活動など定常状態の変動とメモリ効果との関連性を明らかにすることを目的とした。

これらの研究を進める過程で、神経パターンを識別するファジィパターン識別手法を確立し、生体神経回路網の学習とファジィパターン識別器の学習を協調的に運用する手法を開発することもあわせて目標とした。

3. 研究の方法

実験材料としてはラット胎児大脳海馬分散培養を行い、細胞外電位多点計測皿上に細胞を播種して神経回路網を培養日数の経過に従って自律的に再構成させたものを用いた。電気生理学実験としては細胞外電位多点計測系を用い、培養皿底面に備えた64電極付近の細胞外電位を計測した。神経活動電位スパイクの検出には我々が独自に開発したアルゴリズムを実装したソフトウェアを開発して用いた。神経活動電位スパイクのタイムスタンプと特定の時間窓に於ける発火数をもとに特徴ベクトルを計算し、これに対してパターン識別などの解析を行った。

4. 研究成果

(1) 神経回路網メモリ効果の解析：分散培養した神経回路網において、単一神経細胞のスケールではなく神経回路網スケールで発現するメモリー現象を発見した。これは神経回路網に対する入力の履歴現象である。また印加された電気刺激の影響が神経回路網内に保持される時間(履歴持続時間)を明らかにした。さらに、入力として印加された連続刺激の刺激間隔が、自発性神経電気活動とりわけ自発的に顕れるネットワークバーストの間隔によって保持されるといふ「タイミングメモリー」を実現し、2秒までの刺激間隔に依存した神経活動間隔の変化を確認した。この現象は生体の脳でも発現している可能性があり、タイミングメモリー発現時の神経回路網ダイナミクスを解析することで、どのような機序によって生体が入力されたタイミングを保持しているのかを明らかにできる可能性がある。さらに、このことは工学的・半人工的に構成した培養神経回路網において、外界の事象と対応した入力(入力タイミング)によって神経活動パターンを制御し、メモリーの形成を実現したことであり、神経補綴(ほてつ)技術に資する成果である。

また、神経活動時空間パターンの表現手法の開発を行った。64電極から電気活動を計測された、全ての神経細胞の組み合わせにおいて、自発性神経活動の条件付き発火確率をもとにして神経間の機能的結合を見積もり、機能的結合マップを生成する手法を確立した。

(2) ファジィ推論による神経パターン識別手法の確立：神経電気活動を初めとする生物のデータはばらつき、曖昧性を

持つ。本研究では、曖昧性を取り扱う目的で SOM をファジィ化した Fuzzy-SOM(F-SOM)を用いた。F-SOM では勝者ユニットの選定基準にユークリッド距離を用いず、参照ベクトルの代わりにノードに配置したファジィルールの、入力に対する適合度を用いた。F-SOM により 6 次元の神経回路網の活動パターンを 2 次元に縮約し、自発性神経活動と誘発応答の時空間パターンを解析した。培養神経回路網において、自発性神経活動と誘発応答との空間活動パターンがある程度再現良く分離することを確認しながらも、自発性神経活動と誘発応答は互いに共通した神経電気活動パターンを共有していることを明らかにした。また、F-SOM は神経活動パターン解析手法として有用であることを示した。これらを用いて高ブドウ糖濃度条件下においては誘発応答と自発性神経活動パターンの類似性が上昇することを示唆し、神経活動の時空間パターンにも細胞外ブドウ糖濃度が影響を与えることを明らかにした。

(3) メモリ効果の細胞生物学的機構の探求：細胞外液の  $MgCl_2$  を  $0mM$  として神経回路網を興奮状態におき、シナプス伝達効率を一時的に増大させた場合は、培養期間が 30 日以下でもメモリ効果が観察されることを発見した。更に、記録外液中のグルコース濃度を操作することで自発活動が活発化することを確認した。

(4) 生体神経回路とファジィ識別器の協調による連想記憶モデルの構築：ファジィ識別器との協調については未だ限定的な結果しか得られていないが、本研究で得られた知見をもとにした、生体神経回路網と従来型の SOM により衝突回避行動を実現するニューロロボットを開発した。また、研究の進行に伴い、神経回路網の内部状態を定義することの重要性が更にクローズアップされたことから、以下の項目を新たに設定した。

(5) 神経回路網活動パターンのレパートリー：神経活動パターンの識別は活動頻度を計数する時間窓幅に依存するという問題がある。この問題に着目し、自発性神経電気活動を計測し、5 ms 幅の時間窓内の神経電気活動のスパイク検出を行った。この場合、各時間窓における神経電気活動のスパイクの有無をもとに、0 または 1 の値を要素とする 64 次元の特徴ベクトルを算出される。作成した特徴ベクトルをもとに活動の重心を算出する活動重心解析を行い活動パターンの識別と時間変動の解析を行った。z 軸方向の情報を活動重心の出現頻度とした空間的な活動重心の分布を観察した結果、培養日数に依存して活

動パターンのバリエーションが増加することが示唆された。また、活動パターンの再現性も増し、ノイズのようにランダムに顕れる活動と分離することが示唆された。神経回路網における情報を表象する主要な活動パターン(パターンレパートリー)が培養日数に依存して増加する可能性が示唆された。

得られた一連の成果は、半人工的な培養環境にあっても、神経回路網は入力に対して一定のパターン応答を示し、生体神経回路網を用いた情報処理を構成的に実現する事が可能であることを示す。これらの結果は国内外の学会/論文で発表され、特に SOM によるニューロロボット(SOMNR)は高く評価されている。SOMNR は一般にも興味関心を持たれ、日本経済新聞のコラムで紹介された。

## 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 19 件)

1. 大機 悠斗, 伊東 嗣功, 箕嶋 涉, 工藤 卓: 一過性神経電気活動阻害による神経回路網電気活動ダイナミクスに与える影響 The effects of transient abolishment of electrical activity on dynamics in a dissociated neuronal network: 知能と情報 28-3, pp.78-86, 査読有, 2016

2. 箕嶋 涉, 妙中 徹平, 伊東 嗣功, 工藤 卓: 変動的な神経活動パターン抽出のためのオンラインスパイク検出システム Online spike detection system for dynamically fluctuating electrical activity in a neuronal network.: 知能と情報 28-3, pp.655-665, 査読有, 2016

3. 箕嶋 涉, 伊東 嗣功, 工藤 卓: 培養神経回路網の形成過程における自発性神経活動と培養時のブドウ糖濃度の関係性: 電気学会論文誌 C 136-9, pp.136-139, 査読有, 2016

4. K. Miyauchi, K. Tawa, S. N. Kudoh, T. Taguchi, and C. Hosokawa: Surface plasmon-enhanced optical trapping of quantum-dot-conjugated surface molecules on neurons cultured on a plasmonic chip: Japanese Journal of Applied Physics 55, pp.06GN04-1-6, DOI:10.7567/JJAP.55.06GN04, 査読有, 2016

5. Eri Shibata, Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: Does representation of outer objects in living neuronal network synthesize "the concept"?: Proc. Soft Computing and

Intelligent Systems (SCIS) 2016 and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), pp.576-577, 査読有, 2016

6. Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: Relationships between stimulus interval and changes of firing properties: Proc. Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) 2016 and 17th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS), pp.576-577, 査読有, 2016

7. Ito, Hidekatsu; Minoshima, Wataru; Kudoh, Suguru: Relationship between Inter-Stimulus-Intervals and Intervals of Autonomous Activities in a Neuronal Network: Proc. EMBC 2015 (37<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE), pp.1536-1539, 査読有, 2015

8. Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito and Suguru N. Kudoh: The Glucose Concentration-Dependency of Spontaneous Activity in a Cultured Neuronal Network: Electronics and Communications in Japan 97-9, pp.35-41, DOI:10.1002/ecj.11693, 査読有, 2014

9. Ito Hidekatsu, Kudoh Suguru: Fundamental Short-Term Memory of Semi-Artificial Neuronal Network: Proc. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013 35th Annual International Conference of the IEEE, pp.811-814, 査読有, 2013

10. 伊東嗣功, 工藤 卓: 培養神経回路網における誘発応答パターンの履歴現象: 電気学会論文誌 C, Vol.133/No.10, pp.1905-1911, DOI: 10.1541/ieejieiss.133.1905, 査読有, 2013

11. 箕嶋 涉, 伊東嗣功, 工藤 卓: 培養神経回路網における自発性神経電気活動のグルコース濃度依存性: 電気学会論文誌 C, Vol.133/No.10, pp.1912-1917, DOI: 10.1541/ieejieiss.133.1912, 査読有, 2013

12. Chie Hosokawa, Yasutaka Sakamoto, Suguru N. Kudoh, Yoichiro Hosokawa, and Takahisa Taguchi: Femtosecond laser-induced stimulation of a single neuron in a neuronal network: Applied Physics A, Volume 110, Issue 3, pp.607-612, 査読有, 2013

13. Masaaki Suzuki, Koji Ikeda, Munehiro Yamaguchi, Suguru N. Kudoh, Keiko Yokoyama, Ryota Satoh, Daisuke Ito, Masafumi Nagayama, Tsutomu Uchida, Kazutoshi

Gohara: Neuronal cell patterning on a multi-electrode array for a network analysis platform: Biomaterials, 34 (21), pp.5210-5217, 査読有, 2013

14. Shuta, Alice, Kudoh, Suguru N: Functional Connections between Avian and Mammalian Neurons: Proc. Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.1476-1480, DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505399, 査読有, 2012

15. Kudoh, Suguru N., Ito, Hidekatsu, Hayashi, Isao: Neurorobot Vitroid-a Living Test Model for Embodiment Brain Research: Proc. Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS) and 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 1472-1475, DOI: 10.1109/SCIS-ISIS.2012.6505398, 査読有, 2012

〔学会発表〕(計 56 件)

1. Nanami Hirata, Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito, Suguru Kudoh: 培養神経回路網におけるネットワークグラフ構造の培養日数依存的变化 Developmental changes of graph structures in cultured neurons - the analysis with functional-connection map: 第 54 回日本生物物理学会年会, 2016 年 11 月 26 日, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)

2. Okada, Takumi, Minoshima, Wataru, Ito, Hidekatsu, Kudoh, Suguru, N: Analysis of transition of spontaneous electrical activity patterns in cultured neuronal networks 神経回路網における自発性電気活動パターンの時間変遷の解析: 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016, 2016 年 11 月 4 日, 大阪国際交流センター (大阪府・大阪市)

3. Hisauchi, Haruka, Ito, Hidekatsu, Minoshima, Wataru, Kudoh, Suguru: N, Modification of evoked responses in cultured neuronal network induced by patterned series inputs. パターン化連続入力による分散培養系における神経誘発応答の変化: 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016, 2016 年 11 月 4 日, 大阪国際交流センター (大阪府・大阪市)

4. Minoshima, Wataru, Hidekatsu, Ito, Suguru, N. Kudoh: Relationship between Neuronal Electrical Activity and External Glucose Concentration 細胞外グルコースと

神経電気活動の関係：計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2016, 2016年11月4日, 大阪国際交流センター(大阪府・大阪市)

5. Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito, Suguru N Kudoh: Relationship between patterns of spontaneous activity in the cultured neuronal network and glucose concentration of culture medium: 第39回日本神経科学大会, 2016年7月22日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

6. Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N Kudoh: The intervals of electrical stimulus influences synchronized activity in living neuronal network: 第39回日本神経科学大会, 2016年7月20日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

7. Nanami Hirata, Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito, Suguru N. Kudoh: The graph structure of functional connections in cultured neuronal network: 10th FENS Forum of Neuroscience, 2016年7月2日-7月6日, Copenhagen(Denmark)

8. Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: Relationships between interval of autonomous activity in living neuronal network and stimulus property: 10th FENS Forum of Neuroscience, 2016年7月2日-7月6日, Copenhagen (Denmark)

9. Takumi Okada, Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito, Suguru N. Kudoh: Analysis of the transition of electrical activity patterns in cultured neuronal networks: 10th FENS Forum of Neuroscience, 2016年7月2日-7月6日, Copenhagen (Denmark)

10. Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito and Suguru N Kudoh: Relationship between patterns of autonomous activity and external glucose concentration of culture medium: MEA meeting 2016, 2016年6月28日-7月1日, Reutlingen(Germany)

11. Suguru N Kudoh, Ryuto Hamada, Wataru Minoshima and Hidekatsu Ito: 2-D mapped neuronal-activity-patterns for generating behaviors of Neurorobot Vitroid: MEA meeting 2016, 2016年6月28日-7月1日, Reutlingen(Germany)

12. 工藤卓, 濱田竜人, 芝田恵理, 伊東嗣功, 箕嶋渉: ニューロロボットの生体神経回路網への入力と応答~半人工の神経回路網と電気刺激で"対話"する: 第30回人口知能学会全国大会, 2016年6月7日, 北九州国際会

議場(福岡県・北九州市)

13. 伊東嗣功, 箕嶋渉, 工藤卓: 電気刺激によって発現する生体神経回路網のメモリー現象 Memory phenomenon in living neuronal network expressed by electrical stimulus: 第30回人口知能学会全国大会, 2016年6月6日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

14. Kudoh, Suguru: Minoshima, Wataru; Ito, Hidekatsu: Neurorobot System "Vitroid" as a Model for Small Brain Circuit: EMBC 2015, 2015年8月29日, Milano(Italy)

15. Minoshima, Wataru; Ito, Hidekatsu; Kudoh, Suguru: Discriminating Patterns of Neuronal Activity by Self Organization Map with Fuzzy Sets: EMBC 2015, 2015年8月29日, Milano(Italy)

16. Yuto Ooki, Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: The effects of transient abolishment of electrical activity on dynamics in a dissociated neuronal network: SCIS&ISIS 2014, 2014年12月5日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

17. Yoshinori Matsui, Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: Stability of neuronal electrical activity pattern evoked by two inputs stimulation.: SCIS&ISIS 2014, 2014年12月5日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

18. Yasunori Fukui, Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima, Suguru N. Kudoh: Validation of long-term changes of evoked response with Self-Organization Map: SCIS&ISIS 2014, 2014年12月5日, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市)

19. 工藤卓: 培養神経回路網における情報表現: 第52回日本生物物理学会年会, 2014年9月25日, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市)

20. A. Shuta, H. Ito, W. Minoshima, S.N. Kudoh: Relationship between pattern of bursting spontaneous activity and intracellular  $Ca^{2+}$  transients 局所ネットワーク内  $Ca^{2+}$ 変動とネットワークバースト活動との関係性: ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2014, 2014年9月18日, 金沢大学鶴間キャンパス(石川県・金沢市)

21. 伊東 嗣功, 工藤卓: 培養神経回路網の活動間隔は電気刺激によって記録される: 第37回日本神経科学大会, 2014年9月13日,

パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

22.大機 悠斗、伊東 嗣功、箕嶋 涉、工藤 卓: 一過性神経活動阻害が神経回路ダイナミクスに与える影響: 2014 年電気学会電子・情報・システム部門大会、2014 年 9 月 5 日, 島根大学(島根県・松江市)

23.伊東 嗣功、工藤 卓: 神経回路網の活動間隔と刺激間隔の関係について: 2014 年電気学会電子・情報・システム部門大会、2014 年 9 月 5 日, 島根大学(島根県・松江市)

24.Yoshinori Matsui, Keisuke Izutani, Hidekatsu Ito, Wataru Minoshima and Suguru N. Kudoh: Stability of neuronal electrical activity pattern evoked by input stimulation depends on culture days: 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会、2014 年 9 月 3 日, 島根大学(島根県・松江市)

25.福井 康弘、伊東 嗣功、箕嶋 涉、周田ありす、工藤 卓: 自己組織化マップにより生成されたニューロ・ロボットの行動と神経活動との関係性: 第 30 回ファジィシステムシンポジウム、2014 年 9 月 1 日, 高知城ホール(高知県・高知市)

26.S. Kudoh, H. Ito, W. Minoshima, Y. Fukui: STABILITY OF EVOKED ACTIVITY IN A CULTURED NEURONAL CIRCUIT- ANALYZED BY SELF-ORGANIZATION MAP (SOM): 9th FENS Forum of Neuroscience in Milan, 2014 年 7 月 7 日-7 月 9 日, Milano(Italy)

27.Wataru Minoshima, Hidekatsu Ito, Alice Shuta, and Suguru N. Kudoh: Spontaneous Electrical Activity in Rat Hippocampal Neuronal Network Depends on Extracellular GGlucose Concentraion: 9th FENS Forum of Neuroscience in Milan, 2014 年 7 月 7 日- 7 月 9 日, Milano(Italy)

28. Hidekatsu Ito, Suguru N. Kudoh : Short ISI stimulation modifies firing property of a cultured neuronal network: MEA Meeting 2014, 9th International Meeting on Substrate-Integrated Microelectrode Arrays, 2014 年 7 月 2 日, Reutlingen (Germany)

29.泉谷 圭祐、井上 裕一郎、伊東 嗣功、妙中 徹平、工藤 卓: 培養神経回路網活動パターン・レパートリーの識別と自発活動の周期 Discrimination of pattern repertoires of spatiotemporal activity in cultures neuronal network and cycle of spontaneous activity: 平成 25 年電気学会 電子・情報・システム部門大会、2013 年 9 月 4 日, 北見工

業大学(北海道・北見市)

30.Minoshima Wataru, Kudoh Suguru, Ito Hidekatsu: The Glucose Concentration-Dependent Spontaneous Electrical Activity in a Cultured Neuronal Network: Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) 2013, 35th Annual International Conference of the IEEE, 2013 年 7 月 3 日, 大阪国際会議場(大阪府・大阪市)

31.伊東 嗣功、工藤 卓: 刺激タイミングに依存した、神経回路網の時空間活動パターン Stimulus timing dependent spike pattern characteristic of a neuronal network: Neuro2013, 2013 年 6 月 20 日, 国立京都国際会館(京都府・京都市)

32. S.N.Kudoh, Y. Inoue, H. Ito: The cluster analysis of electrical activity pattern in a cultured neural network on multielectrode array (MEA) dish: NEUROSCIENCE 2012, 2012 年 10 月 13 日-10 月 17 日, New Orleans(USA)

33.Hidekatsu Ito and Suguru N. Kudoh: Hysteresis of evoked activity pattern in cultured neuronal network: MEA meeting 2012(8th International meeting), 2012 年 7 月 12 日, Reutlingen(Germany)

34. Suguru N. Kudoh and Hidekatsu Ito: How to link neuronal network activity to robot behavior: MEA meeting 2012(8th International meeting), 2012 年 7 月 12 日, Reutlingen(Germany)

〔図書〕(計 1 件)

1. Suguru N. Kudoh: "Design to perform information processing in living neuronal network" a book chapter in "Creative Engineering Design in Robotics and Mechatronics", edited by Maki Habib, IGI Global, Hershey, pp.25-40 (323p), 2013

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

工藤 卓(KUDOH, Suguru)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号: 10344110