

令和元年6月25日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00026

研究課題名(和文)非正則性を有するセルオートマトンのための同期アルゴリズムの開発とその応用

研究課題名(英文) Implementations and Applications of FSSP Algorithms for Standard/Non-Standard Cellular Automata

研究代表者

梅尾 博司 (Hiroshi, Umeo)

大阪電気通信大学・情報通信工学部・客員研究員

研究者番号：80132356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、過去50年間に蓄積されたFSSP解を統一的視点から再構成・拡張し、非正則な計算環境下でも動作する新しい同期アルゴリズムを設計・開発し、Natural Computingへの応用を目指す。得られた研究成果の一部は、4冊のBook Chapter (Springer)、25編の国際ジャーナル誌、国際会議議事録として出版され、研究期間中3回の国際会議AFCA 2016, 2017, 2018を主催し、International Journal of Cellular Automataにてセルオートマトン特集号を編集するなど、セルオートマトン研究の発展と振興に努めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、過去50年間に蓄積されたセルオートマトンの同期機構(FSSP解)を統一的視点から再構成・拡張し、非正則な計算環境下でも動作する新しい同期アルゴリズムを設計・開発し、Natural Computingへの応用を目指すものであり、セルオートマトンを基盤とした新しい計算フレームワークの実現を目指す。研究成果は、4冊のBook Chapter (Springer Publishing)、25編の国際ジャーナル誌、国際会議議事録として公表され、英文誌JCAでのspecial issueの編集、3回の国際会議AFCA 2016, 2017, 2018の主催などを通じて国際交流を実現している。

研究成果の概要(英文)：The Firing Squad Synchronization Problem (FSSP) has been studied extensively for more than fifty years, and a rich variety of FSSP algorithms has been proposed. Here we study the FSSP and gives a unified view point of the classical FSSP on standard and non-standard cellular automata. A part of the results obtained in this work has been presented as four book chapters (Springer Publishing), 25 journal and international conference papers. A class of the smallest 4-state FSSP partial solutions, a reconstruction of the first FSSP algorithm and a 6-state fault-tolerant FSSP protocol are included. An international research exchange has been made through an organization of the three international conferences: AFCA 2016, 2017 and 2018 and an edition of international Journal of Cellular Automata (Vol. 13, No3).

研究分野：計算機基礎学

キーワード：FSSP セルオートマトン Synchronization 同期アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

セルオートマトン(Cellular Automaton)は、計算機の誕生に深く関わった von Neumann による自己増殖、自己複製セルオートマトンの研究に由来する。同一構造を持つ単純な計算素子や有限オートマトンを規則正しく配置し、一様に結線したアレイ構造から構成されるセルオートマトンは、VLSI、SIMD 型細粒度並列計算機などの計算モデルとして研究が進められてきたが、近年では物理学、化学、生物学、医学、経済学、数学などの分野で幅広く研究されている。計算機科学に於いても、人工生命、マルチ・エージェントシステム、ダイナミカル・システム、カオス理論などに応用され、幅広く研究されている。自然界、生物の体内、有機媒体、分子集団、バクテリア集団、脳細胞などにおける生体情報処理: Natural Computing に共通する特徴は、均一で単純な計算素子を多数配置し、それらが集団で並列・分散的に局所的な通信を行いながら集合体として大局的な計算を効率よく行うところにある。このような特徴から Natural Computing はセルオートマトン理論が非常にうまく適合する分野と考えられ、従来から多数の知見が集積されているセルオートマトン理論を応用することにより Natural Computing における計算機構造の解明、効率の良いアルゴリズムの設計が容易になるなど大いなる発展が期待されている。セルオートマトン上での同期問題は一斉射撃問題 (Firing Squad Synchronization Problem, 以下では FSSP と略す) として古くから知られ、von Neumann による自己増殖セルオートマトンの動作を一斉に開始・停止させるための同期プロトコル(アルゴリズム、遷移関数と呼ばれる)を設計する問題として提案されて以来、数多くの研究がなされている。隣接セルとの局所通信のみで大規模なセル空間を同期に導き、セル空間全体のグローバル制御の一種と考えられる同期を実現するプロトコルは、局所的な計算を大局的な計算に反映させる非常に基本的でかつ重要なアルゴリズムと認識されている。

2. 研究の目的

本研究では、過去 50 年間に蓄積された FSSP 解を統一的視点から再構成・拡張し、非正則な計算環境下でも動作する新しい同期アルゴリズムを設計・開発し、Natural Computing への応用を目指す。計算媒体の非同期性、移動性、可塑性、動的な形状形成、動的故障の発生など非正則な諸特性を有する様々なセル空間上で、効率よく動作する同期アルゴリズムを開発するとともに、ある種の非正則性の条件下における同期の実現可能性・不可能性の限界について、探求を進める。同期が実現可能な場合は、有限オートマトンによる実装可能性を追求し、同期に必要な時間、内部状態数、局所通信量等の計算量を求める。状態数の削減には、申請者が先に開発した代数的手法と従来から知られている幾何学的な手法(Geometrical method)を併用し、両者の利点を生かした FSSP アルゴリズムを設計する。

3. 研究の方法

セルオートマトンの挙動は極めて高度な非線形性を有し、その動作の予測、解の試算、アルゴリズム設計等には効率の良い計算機シミュレーションは必要不可欠である。過去 10 年間に蓄積してきたセルオートマトンのための大規模なシミュレーション・ソフトウェアを改良・拡張し、これらのソフトウェア群を、非正則なセル空間にも適用する。本システムの特徴は、セル空間の形状、アレイの次元性、セル間通信量、考察すべき問題の様々な制約条件など、テキスト情報で記述されたパラメータに基づき、容易にシステムの再構成が可能で、ターゲット・セルオートマトンの動作並びにその上で実行されるアルゴリズムを様々な観点から動的に解析することが可能である。また本システムの最大の特徴は、シミュレーション時のバックトラック機能、遷移関数におけるマスク付きワイルドカード設定などの機能を備え、複数ユーザが同一画面上でインタラクティブにセル・アルゴリズムを設計できる。さらにセル・アルゴリズムをマクロに記述する時間・空間図式から直接的にマイクロな記述に対応する遷移関数を自動生成する機能を保持している。報告者は、セルオートマトンに関する複数の国際会議: Automata, ACRI, AFCA の創設者の一人として関わり、過去 20 年間にわたりこれらを開催・主導してきた。研究期間中では、Automata 2016, Automata 2017, Automata 2018, ACRI 2016, ACRI 2018, AFCA 2016, AFCA 2017, AFCA 2018 を開催する。これらの国際会議を開催することにより、常に世界中の第一線のセルオートマトン研究者と連携・交流をはかることが可能であった。

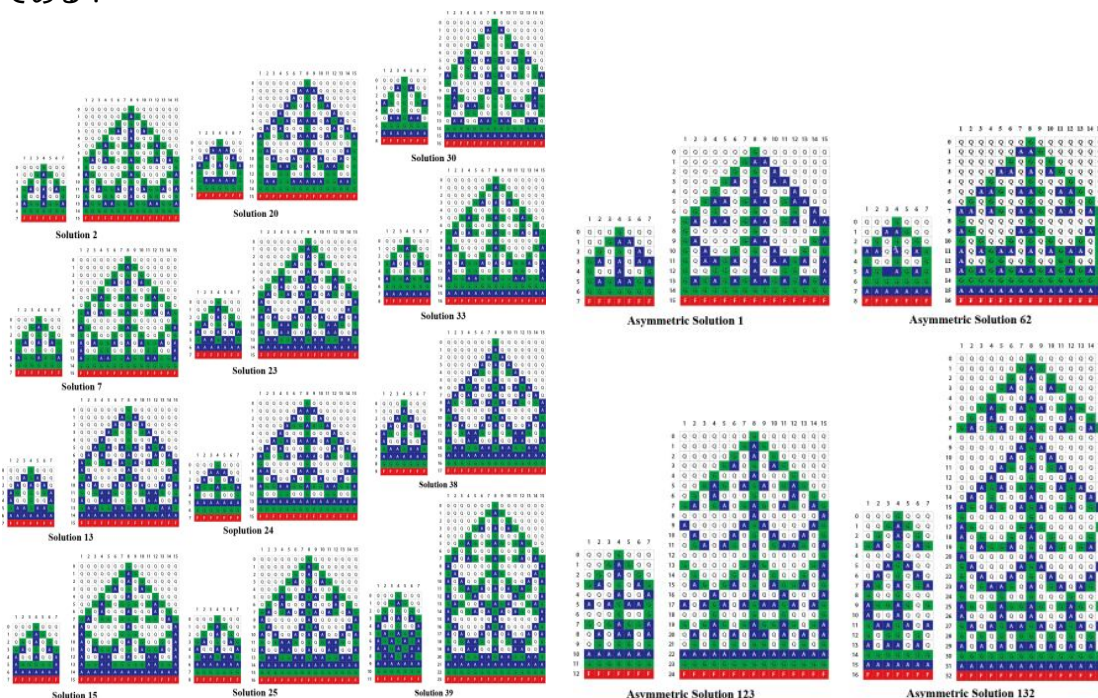
4. 研究成果

得られた研究成果の一部は、25 編の論文、国際会議議事録、4 冊の Book chapter、10 件の口頭発表として公表された。未発表の研究成果も多数残されており、研究期間終了後も発表を予定している。図をまじえて、主要結果を次に示す。

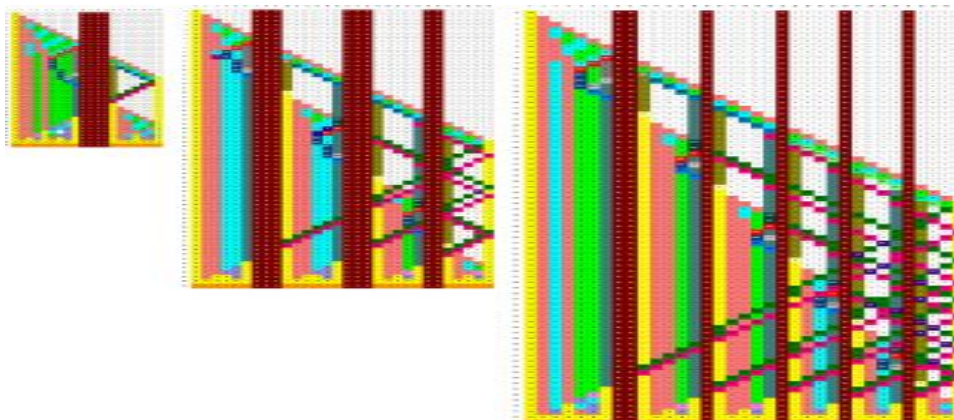
一般化アルゴリズムの設計と実装 任意の位置に initiator を配置できる二つの一般化 FSSP アルゴリズムを設計する。一つは $2n-2$ ステップ最適時間 $O(n \log n)$ 最小状態変化計算量を同時に満足する FSSP であり、もう一つは $3n$ ステップ 6 状態(世界最小)で動作し、 $O(n \log n)$ 最小状態変化計算量を有する FSSP アルゴリズムである。

Goto FSSP アルゴリズムの再構成 Goto アルゴリズム [1964] は世界で最初に設計された FSSP として知られているが、中身は(論文として公表されなかったために)全く知られていなかった。本研究では、同アルゴリズムをゼロから再構成し、165 状態、4378 個の遷移ルールのセルオートマトン上に実現する。これまでは数千から数百万個の内部状態が必要と考えられていたものである。構成されたアルゴリズムは同期時間のみならず状態変化計算量においても最適なことを明らかにする。

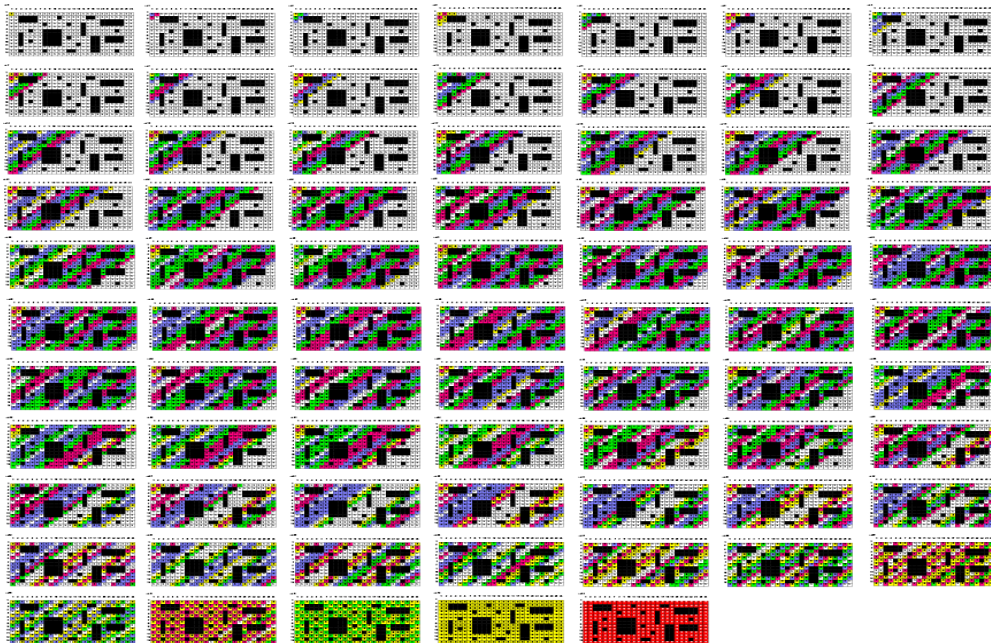
4 状態部分解の完全解明. 先に Umeo, Kamikawa and Yunes [2009]にて公表した 4 状態最適時間部分解(partial solution)は、サイズ $2^k(k-1)$ のリング・セルオートマトン上で動作する同期アルゴリズムで、遷移関数が対称性を有する FSSP 解として、17 種存在することが知られていた。その後、Weng Ng [2011]により、非対称型が 80 種存在することが明らかになった。これらは現在 2 のべき乗部分解として知られている。本研究では 2 のべき乗以外にも、39 種の対称型、132 種の非対称型部分解の存在を明らかにし、それらの遷移関数の数理構造を明らかにする。次の二つの図は、それぞれ対称型並びに非対称型部分解の同期に至る計算状況を示すものである。



耐故障性を有する FSSP 解の設計と実装 p 個の故障セグメントを持つ長さ n のセル空間に対して、 $2n-2+p$ ステップで動作する同期アルゴリズムを 164 個の内部状態、4792 個の遷移ルールを持つセルオートマトン上に実現する。次の図は、それぞれ $n=20, p=1$, $n=30, p=3$, $n=35, p=5$ のセル空間上での同期に至る計算状況を示している。



さらに、サイズ $m \times n$ の 2 次元アレイ上で $2m+2n-4$ ステップで同期に至る 6 状態、939 個の遷移ルールを有する耐故障性 FSSP アルゴリズムを設計し、同アルゴリズムの正当性を示すとともに、同期可能な故障パターンを特徴付けを明らかにする。次の図は、 $m=13, n=26, p=20$ のセル空間上での同期に至る計算状況を示している。



5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 25 件)

- [1] H. Umeo: How to synchronize cellular automata -Recent Developments-, **Fundamenta Informaticae**, 査読有, pp.1-27, (2019).
- [2] 磯川, 今井, 梅尾, ペーパー: セルオートマトン入門, **システム/制御/情報**, 査読有, Vol.7, No.13, pp.1-5, (2019)
- [3] N. Kamikawa and H. Umeo: A smaller-state implementation of real-time sequence generator for $\{n^3 | n=1, 2, 3, \dots\}$. **Proc. of the Artificial Life and Robotics**, 査読有, pp.150-155, (2019).
- [4] H. Umeo, N. Kamikawa, M. Maeda, and G. Fujita: Implementations of FSSP algorithms on fault-tolerant cellular arrays. **Proceedings of ACRI 2018, LNCS 11115**, 査読有, pp.274-285, (2018), DOI:10.1007/978-3-319-99813-8-25.
- [5] H. Umeo, N. Kamikawa, and G. Fujita: The Smallest FSSP Partial Solutions for One-Dimensional Ring Cellular Automata. **Proc. of ICTAC 2018, LNCS 11187**, 査読有, pp.455-471, (2018).
- [6] N. Kamikawa and H. Umeo: A smaller-state implementation of real-time sequence generator for $\{n^3 | n=1, 2, 3, \dots\}$. **Proc. of the 6th Intern. Symp. on Computing and Networking**, 査読有, pp.1-7, (2018).
- [7] 上川, 梅尾: セルオートマトン上の実時間数列 $\{n^3 | n = 1, 2, 3, \dots\}$ 生成アルゴリズムの正当性について. **情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用(TOM)**, 査読有, Vol. 11, No. 1, pp.53-63, (2018).
- [8] N. Kamikawa and H. Umeo: Correctness of Real-time Generation Algorithm for Sequence $\{n^3 | n = 1, 2, 3, \dots\}$ on Cellular Automata. **Journal of IPSJ TOM**, 査読有, Vol. 11, No. 1, pp.53-63, (2018).
- [9] H. Umeo, M. Hirota, Y. Nozaki, K. Imai, and T. Sogabe: A new reconstruction and the first implementation of Goto's FSSP algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, **318**, 査読有, pp.92-108, (2018).
- [10] H. Umeo, K. Imai, and A. Sousa: A design of generalized minimum-state-change FSSP algorithms. **Natural Computing**, 査読有, Vol. 17, No.3, pp.441-453, (2018), DOI 10.1007/s11047-017-9265-2.
- [11] H. Umeo: A survey on non-optimum-time FSSP algorithms for cellular automata. **Post Proceedings of International Workshop on Natural Computing**, (Suzuki ed.), 査読有, Springer Switzerland, pp.1-23, (2018)
- [12] T. Isokawa, K. Imai, N. Matsui, F. Peper, and H. Umeo (Eds.): Special issue for AUTOMATA 2014, **Journal of Cellular Automata**, 査読有, Old City Publishing, Vol.13, No.3, pp.1-286, (2018)
- [13] H. Umeo and N. Kamikawa: Four-state partial synchronizers for a large-scale of processors -symmetric synchronizers. **Proc. of Future Computing 2018, The Tenth**

International Conference on Future Computational Technologies and Applications, 査読有, pp.1-6, (2018).

[14] N. Kamikawa and H. Umeo: 能力の小さい1ビットセルオートマトンで生成可能な数列についての考察. **情報処理学会論文誌 数理モデルと応用**, 査読有, Vol.10, No.1, pp1-13 (Mar. 2017).

[15] H. Umeo: A class of minimum-time synchronization algorithms for 2D rectangular arrays based on L-shaped mapping. **Proc. of the Ninth International Conference on Future Computing Technologies and Applications, FUTURE COMPUTING 2017**, 査読有, pp.20-25, (2017).

[16] H. Umeo: A survey on non-minimum-time FSSP algorithms for cellular automata. **Proc. of the International Conference on Natural Computing, IWNC9**, 査読有, pp.1-29, Springer, (2017)

[17] H. Umeo and N. Kamikawa: A New Class of the Smallest Four-State Partial FSSP Solutions for One-Dimensional Ring Cellular Automata. **14th International Conference on Parallel Computing Technologies (V. Malyskin (Ed.)), PaCT 2017, LNCS 10421**, 査読有, Springer International Publishing, Switzerland, pp.1-14, (2017), DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2-22.

[18] H. Umeo, K. Kubo, and A. Nomura: Smaller-State Implementations of 2D FSSP Algorithms -- Recent Developments --. **International Conference on Theoretical Aspects of Computing ((Dang Van Hung et al. (Ed.)), ICTAC 2017, LNCS 10580**, 査読有, Springer International Publishing, Switzerland, pp.136-152, (2017), DOI: 10.1007/978-3-319-67729-3-9.

[19] N. Kamikawa and H. Umeo: A Note on Sequences Generated by Small One-bit Cellular Automata. **Journal of IPSJ TOM**, 査読有, Vol.10, No.1, pp1-13 (Mar. 2017).

[20] L. Manzoni, A. E. Porreca, and H. Umeo: The firing squad synchronization problem on higher-dimensional CA with multiple updating cycles. **Proc. of the Fourth International Symposium on Computing and Networking, CANDAR 2016**, 査読有, IEEE CPS Press, pp.258-261(2016).

[21] N. Kamikawa and H. Umeo: A construction of five-state real-time Fibonacci sequence generator. **Artificial Life and Robotics**, 査読有, pp.1-9, (2016), DOI 10.1007/s10015-016-0309-2.

[22] H. Umeo and K. Imai: A class of minimum-time, minimum-state-change generalized FSSP algorithms. **Proc. of the 12th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2016, LNCS 9863**, 査読有, pp.144-154 (2016).

[23] K. Kamikawa and H. Umeo: An implementation of fault-tolerant FSSP algorithms. **Proc. of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, NOLTA 2016**, 査読有, IEICE, pp.218-221(2016).

[24] S. Adachi, J. Lee, F. Peper, and H. Umeo: Universal 2-state 24-neighborhood asynchronous cellular automaton with inner-independent open rule. **Proc. of the Fourth International Symposium on Computing and Networking, CANDAR 2016**, 査読有, IEEE CPS Press, pp.202-208(2016).

[25] H. Umeo: How to synchronize large-scale ultra-fine-grained processors in optimum-time. **Proc. of Cloud Computing, The seventh International Conference on Cloud Computing Grids, and Visualization**, 査読有, pp.81-86, (2016).

〔学会発表〕(計 10 件)

[1] H. Umeo: Synchronization Problem in Cellular Automata, **International Conference on Applied Analysis and Mathematical Modeling**, 査読無, invited talk, pp. 147, (March, 2019)

[2] H. Umeo: A class of 4-state FSSP solutions, pp.1, **LA Symposium**, 査読無, (2018)

[3] H. Umeo: A reconstruction of the first FSSP algorithm, **Biomath Communications**, 査読有, Vo.5, pp.77, (2018)

[4] H. Umeo and N. Kamikawa: A quest for the smallest four-state partial solutions -- recent developments. **Proc. of the 21st International Workshop on Cellular Automata and Discrete Computing**. 査読有, pp.1, June 7-9, Milan, Italy, (2017).

[5] 梅尾, 廣田, 野崎, 今井, 曾我部: FSSP アルゴリズムの再構成と実装, **信学技法**, 査読無, COMP2017-13, pp.1-7, (2017).

[6] H. Umeo: A reconstruction and implementation of the first FSSP algorithm, 査読無, **LA Symposium**, pp.1, (2017).

[7] H. Umeo: How to synchronize cellular arrays in minimum-time, **システム・情報部門**

- 学術講演会 2016, SICE Symp. on Systems and Information, 査読無, pp.296-301, (2016)
- [8] 上川 梅尾:マルチレイヤー・セルオートマトンを用いた耐故障性一斉射撃アルゴリズムの実装, **信学技法**, CAS2016-46, NLP2016-72, 査読無, pp.43-47, (2016).
- [9] H. Umeo: A biologically-motivated synchronization problem in cellular automata, **Proc. of International Conference on BIOMATH 2016, Biomath Communications**, 査読有, Vol. 3, Issue 1, pp.69, June, (2016).
- [10] 上川 梅尾: 能力の小さい 1 ビットセルオートマトン上で生成可能な数列についての考察, **第 110 回数理モデル化と問題解決研究会**, 情報処理学会, 査読無, pp.1-6, Vol.2016-MPS-110 No.1, (2016)

〔図書〕(計 4 件)

- [1] H. Umeo: Cellular Automata, Firing Squad Synchronization Problem in. **Encyclopedia of Complexity and System Science**, R. A. Meyers (Ed.), 査読有, pp.3537-3574, Springer, New York, (2019).
- [2] H. Umeo: FSSP algorithms for 2D rectangular arrays, Recent developments. **Reversibility and Universality**, 査読有, A. Adamatzky (Ed.), Springer, pp.5-36, (2018).
- [3] H. Umeo: A class of non-optimum-time FSSP algorithms. **Advances in Unconventional Computing** (A. Adamatzky ed.), 査読有, Springer Switzerland, pp.495-521, (2017).
- [4] H. Umeo: Small synchronizers and prime generators. **Designing Beauty: The Art of Cellular Automata**, (A. Adamatzky and G. J. Martinez ed.), 査読有, Springer Switzerland, pp.87-95, (2016).

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

- (1)研究分担者 無し
- (2)研究協力者 無し

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、研究者個人に帰属されます。