

平成 30 年 5 月 2 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06011

研究課題名(和文) 生物の挙動に学ぶ新規単電子情報処理システムの開拓

研究課題名(英文) Development of novel information-processing single-electron systems mimicking behaviors of organisms

研究代表者

大矢 剛嗣(OYA, TAKAHIDE)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：30432066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：研究期間中に、計画通り細胞性粘菌/蟻/軍隊ガニといった生物の挙動を模倣した各単電子回路の実現可能性を回路設計及び動作シミュレーションを通して見出したほか、ミツバチの挙動についても単電子回路化が可能であることを見出した。さらに、生体に学び雑音・揺らぎを利用するというものについては例えばニューラルネットワーク模倣回路に雑音利用能力を付与することで信頼度・パフォーマンスが高くなるものがあることを見出した。それぞれの研究に関して研究期間全体を通して英語論文誌に採択および国際会議・国内学会発表を実施することができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, as planned firstly, feasibility of novel information-processing single-electron circuits that mimic useful behaviors of slime molds, ant groups, and soldier crabs has been found by simulating operations of each designed circuit. In addition, it has been found that the behavior of honeybees had also been mimicked to construct the system. Moreover, for example, it has also been found that the circuit based on a certain neural network having a noise-harnessing ability had been able to obtain stabler operation than conventional circuits. Results from each topic have been accepted and published as journal papers, and they also have been reported in many international and domestic conferences.

研究分野：単電子デバイス

キーワード：単電子回路 生物模倣情報処理 非線形情報処理

1. 研究開始当初の背景

近年ナノテクノロジー研究の目覚ましい発展により量子デバイス/ナノデバイスによる次世代集積回路・Beyond CMOS デバイスの実用化が近付いてきた。電子を一個単位で扱うことができる単電子回路(本研究課題の対象回路・デバイス)もそのようなデバイスの一つに挙げられる。単電子回路研究の黎明期には「CMOSに替わる」というある種のキャッチフレーズの下、様々な回路が提案されてきたが、近年単電子デバイスの持つ独特な物理現象を利用し「単電子デバイスだからこそその情報処理システム」を構築しようという流れも出てきている。これは、元々単電子回路が通常の CMOS 回路とは動作原理が異なることに基づいており、当初研究がなされていた「単電子トランジスタによる回路」ではない手法での回路・情報処理システムを作ろうという流れから生まれたものである。

一方、生物や自然界が生み出す現象を工学的見地から考えると、非常に効率の良い情報処理を行っていると思なすことができる。例えば、細胞性粘菌の集団はある種の化学物質を隣り合う仲間同士でやり取りすることにより、効率よく餌を摂取することが知られている。また、蟻が餌の探索・確保のために群行動する(いわゆる「蟻の行列」)際、二種類のフェロモンを巧みに使い、効率よく実行していることが知られる。これらは、物理現象としてモデル化ができ、さらには最適化問題等の非線形問題を解く能力があることが報告されている。ここで、回路やデバイスの物理(現象)と、上記のような情報処理の基としたい物理(現象)を一対一対応させることにより新たな情報処理回路・システムが生み出せる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生物の挙動に学ぶ新規単電子並列情報処理システムを開拓することである。これは、単電子回路の基盤となるナノデバイスの作製プロセスが近年発展してきており、大規模なデバイスが構築可能となってきた一方、そのようなデバイスに対して「そのデバイスだからこそその情報処理アーキテクチャ」の構築が発展途上であり、「単電子情報処理システム」と呼ばれるような系がまだ完成されていないことによる。これまでの研究により二次元アナログ単電子情報処理システムの構築可能性とそのシステムが独特な挙動を示すこと、小規模アナログ・デジタル混載単電子回路による生物の挙動に学んだ情報処理の実現可能性を見出している。本提案では上記2研究から得られた知見および外部報告を基に、生物様情報処理を行うフルアナログの新しい単電子情報処理システムの構築を行う。これまでの研究では、基にする生物挙動にはデジタルの要素がないにも関わらず、アナログ・デジタル混載回路による表現を行ってきた。本来は

フルアナログでの実行が望ましく、本研究ではこれを達成するものとする。対象生物として、細胞性粘菌の挙動、蟻の群行動、軍隊ガニの群行動の3つをメインターゲットとする。研究期間の初期に対象生物の挙動に学んだ単電子回路対応の情報処理アーキテクチャの設計を行う。設計においては二次元回路をデザイン内に取り込むことを想定している。これは、例えば回路が生み出す時空間パターンが、蟻や軍隊ガニが歩き回る様に対応付けられたり、細胞性粘菌が繁殖していく様に対応付けられると考えられるためである。その後、設計アーキテクチャを基に各情報処理回路を構築し、シミュレーションにより動作確認・検証を行う。最終的には、各生物様新規単電子システムの理論を確立し、実現可能性を見出す。

3. 研究の方法

本研究の目的である生物の挙動に学ぶ新規単電子情報処理システムの開拓を実現するために、次の3つのことを研究対象とする。それは、(1)「細胞性粘菌に学ぶ情報処理手法」の単電子回路化、(2)「蟻の群行動に学ぶ情報処理手法」の単電子回路化、(3)「軍隊ガニの挙動に学ぶ情報処理手法」の単電子回路化である。これら3項目の検討および融合を通して最終的には「生体様単電子情報処理システム」理論の確立をする。これまでの研究により得た知見を基盤として、研究協力者(大学院学生)と共に上記3項目を各年度並行して実施する。並行して研究を遂行することは、(1)~(3)の研究内容についてある程度の独立性が保たれていること、および研究協力者に適宜役割分担をするため可能である。初年度は各回路の設計、小規模回路での動作実証を、次年度以降は初年度の結果を踏まえた大規模回路化や応用展開を行い、提案理論の確立に繋げ研究を完遂させる。

4. 研究成果

上述の目的・方法を踏まえて以下のことについて検討を行い、結果を得た。研究期間中に、計画通り細胞性粘菌/蟻/軍隊ガニといった生物の挙動を模倣した各単電子回路の実現可能性が高いことを回路設計及び動作シミュレーションを通して見出したほか、ミツバチの挙動についても単電子回路化が可能であることを見出した。加えて、雑音・揺らぎを利用することによる、単電子回路の動作安定性向上の可能性を見出した。さらに、生体に学び雑音・揺らぎを利用するというものについては例えばニューラルネットワーク模倣回路に雑音利用能力を付与することで信頼度・パフォーマンスが高くなるものが見出した。それぞれの研究に関して研究期間全体を通して英語論文誌に採択および国際会議・国内学会発表を実施することができた。

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8件)

K. Satomi and T. Oya, "Design of Slime-Mold-Inspired Multi-Layered Single-Electron Circuit," International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, 12 pages (2017). (査読有)

DOI: 10.1080/17445760.2017.1410818

T. Tanabe and T. Oya, "Study of Single-electron Information-processing Circuit Mimicking Foraging Behavior of Honeybee Swarm," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 56, 06GF13(7 pages), (2017). (査読有)

DOI: 10.7567/JJAP.56.06GF13

M. Takano, T. Asai, and T. Oya, "Design and evaluation of single-electron associative memory circuit," International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems, vol. 32, pp.259-270 (2017). (査読有)

DOI: 10.1080/17445760.2016.1165219

R. Hirashima and T. Oya, "Design of Thermal-Noise-Harnessing Single-Electron Circuit for Efficient Signal Propagation," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, 06GG10(8 pages), (2016). (査読有)

DOI: 10.7567/JJAP.55.06GG10

他 4 件 (全て査読有)

[学会発表](計94件)

1. T. Oya, "Noise-Harnessing Nanodevices," 2018 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA 2018), (Tarragona, Spain), Sep., 2018. (発表決定)

2. N. Kurata and T. Oya, "Design of "bubble-Inspired Single-Electron circuit" Mimicking Behavior of Bubble Film," 2018 International Symposium on Nonlinear Theory & Its Applications (NOLTA 2018), (Tarragona, Spain), Sep., 2018. (発表決定)

3. 鄭 万輝, 大矢剛嗣, "パルス発生・伝搬場におけるニューラルネットワーク," 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, (東京), 2018 年 3 月.

4. 倉田信彦, 大矢剛嗣, "シャボン膜に学ぶ単電子情報処理," 2018 年第 65 回応用物理学会春季学術講演会, (東京), 2018 年 3 月.

5. 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, "ミツバチの採餌行動を模倣した粗粒情報処理デバイスの設計," 第 8 回分子アーキテクニクス研究会, (愛媛), 2017 年 12 月.

6. T. Tanabe and T. Oya, "Design of Multi-Layer Single-Electron Information-Processing Circuit for

Nonlinear Problem Mimicking Foraging Behavior of Honeybees," the 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2017), (Jeju, Korea), Nov., 2017.

7. W. Zheng, F. Maehara, and T. Oya, "Study of Unique Neural Network on Pulse Signal Generating and Propagating Medium," the 30th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2017), (Jeju, Korea), Nov., 2017.

8. 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, "ミツバチの採餌行動を模倣した多層単電子情報処理回路の構築," 第 78 回 2017 年応用物理学会秋季学術講演会, (福岡), 2017 年 9 月.

9. T. Tanabe, T. Oya, "Design of single-molecule information-processing circuit mimicking foraging and information sharing behaviors of honeybees," The biannual International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE9), (Kanazawa, Japan), Jun., 2017.

10. T. Oya and T. Shinada, "Design of majority logic gate for single-dopant device," The 2017 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW), (Kyoto, Japan), Jun., 2017.

11. 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, "ミツバチの餌探索と情報共有行動を模倣した単電子回路の設計," 2017 年第 64 回応用物理学会春季学術講演会, (神奈川), 2017 年 3 月.

12. M. Takano and T. Oya, "Study of performance improvement of single-electron associative memory circuit," Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference (ANNIC 2016), (Barcelona, Spain), Nov., 2016.

13. K. Satomi and T. Oya, "Design of Slime-mold-inspired Multi-layered Single-electron-circuit," the 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), (Kyoto, Japan), Nov., 2016.

14. T. Tanabe and T. Oya, "Study of Single-electron Information-processing Circuit Mimicking Foraging Behavior of Honeybee Swarm," the 29th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2016), (Kyoto, Japan), Nov., 2016.

15. 里見航汰, 浅井哲也, 大矢剛嗣, "粘菌の挙動を模倣した情報処理手法の粗粒デバイスへの実装検討," 第 7 回分子アーキテクニクス研究会, (福岡), 2016 年 10 月.

16. 高野 誠, 浅井哲也, 大矢剛嗣, "単電子連想記憶回路の設計と粗粒デバイスへの応用検討," 第 7 回分子アーキテクニクス研究会, (福岡), 2016 年 10 月.

17. 里見航汰, 大矢剛嗣, "粘菌の挙動を模倣した多層単電子情報処理回路の設計,"

- 2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会, (新潟), 2016年9月.
18. 高野 誠, 大矢剛嗣, "単電子階層型ニューラルネットワーク回路への展望," 2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会, (新潟), 2016年9月.
 19. 田鍋俊彦, 大矢剛嗣, "ミツバチの採餌行動を模倣した単電子回路の構築," 2016年 第77回応用物理学会秋季学術講演会, (新潟), 2016年9月.
 20. T. Tanabe and T. Oya, "Design of new single-electron information-processing circuit mimicking behavior of swarm of honeybees," the 2016 TechConnect World Innovation Conference and Expo, (Washington D.C., U.S.A.), May, 2016.
 21. 里見航汰, 大矢剛嗣, "粘菌の挙動を模倣した単電子情報処理回路の設計," 2016年 第63回応用物理学会春季学術講演会, (東京), 2016年3月.
 22. 高野 誠, 大矢剛嗣, "熱雑音導入による単電子連想記憶回路の性能向上の検討," 2016年 第63回応用物理学会春季学術講演会, (東京), 2016年3月.
 23. Y. Hamana, T. Asai, T. Oya, "Design of new logic circuit mimicking soldier crab ball gate for single-molecule device," The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), (Hawaii, U.S.A.), Dec., 2015.
 24. R. Hirashima, T. Asai, T. Oya, "Design of thermal-noise-harnessing neuromorphic nano-electronic circuit based on axon of neuron for single-molecule device," The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), (Hawaii, U.S.A.), Dec., 2015.
 25. M. Takano, T. Asai, T. Oya, "Design of nano-electronic neural-network associative memory circuit for single-molecule devices," The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), (Hawaii, U.S.A.), Dec., 2015.
 26. K. Satomi, T. Asai, T. Oya, "Design of single-electron 'slime mold' circuit for single-molecule device," The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies 2015 (Pacifichem 2015), (Hawaii, U.S.A.), Dec., 2015.
 27. T. Oya, "Novel Functional Nonlinear Nanodevices," 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015), (Hong Kong, China), Dec., 2015.
 28. R. Hirashima, T. Oya, "Design of Thermal-noise-harnessing Single-electron Circuit for Efficient Signal Propagation," the 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2015), (Toyama, Japan), Nov., 2015.
 29. 高野 誠, 浅井哲也, 大矢剛嗣, "連想記憶ニューラルネットワークの粗粒デバイスへの応用検討," 第6回分子アーキテクトゥクス研究会, (京都), 2015年10月.
 30. 濱名良樹, 大矢剛嗣, "軍隊ガニの挙動に学ぶ信号入力位置自在な単電子論理回路の構築," 2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会, (名古屋), 2015年9月.
 31. 平島 諒, 大矢剛嗣, "熱雑音による単電子信号伝送の高速化と評価," 2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会, (名古屋), 2015年9月.
 32. 里見航汰, 大矢剛嗣, "単電子粘菌回路の設計," 2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会, (名古屋), 2015年9月.
 33. 高野 誠, 大矢剛嗣, "単電子箱による連想記憶回路の設計," 2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会, (名古屋), 2015年9月.
 34. M. Takano, T. Asai, T. Oya, "Design of nano-electronic neural-network associative memory circuit," 14th International Conference on Unconventional and Natural Computation(UCNC2015), (Auckland, New Zealand), Aug., 2015.
 35. K. Satomi, T. Asai, T. Oya, "Design of slime-mold-inspired single-electron circuit," 14th International Conference on Unconventional and Natural Computation(UCNC2015), (Auckland, New Zealand), Aug., 2015.
- 他 59 件
(内 国際会議: 19 件, 国内学会: 40 件)
- 〔図書〕(計1件)
T. Oya and T. Asai, "Emerging computations on nano-electronic circuits and devices," Molecular Architectonics: The Third Stage of Single Molecule Electronics, T. Ogawa, Ed., pp. 135-163, Springer, New York (2016). (1章分を分担執筆)
- 〔その他〕
ホームページ等
<http://arrow.ynu.ac.jp/publication.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者
大矢 剛嗣 (OYA, Takahide)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 30432066
- (4)研究協力者
倉田 信彦 (KURATA, Nobuhiko)
鄭 万輝 (ZHENG, Wanhui)
田鍋 俊彦 (TANABE, Toshihiko)

里見 航汰 (SATOMI, Kota)
高野 誠 (TAKANO, Makoto)
濱名 良樹 (HAMANA, Yoshiki)
平島 諒 (HIRASHIMA, Ryo)