

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25280092

研究課題名(和文) 微生物の生存戦略を組み込んだ確率的ニューロコンピューティングの実現

研究課題名(英文) Stochastic neurocomputing with incorporating the survival strategies of micro-algae cells

研究代表者

尾笹 一成 (Ozasa, Kazunari)

国立研究開発法人理化学研究所・前田バイオ工学研究室・専任研究員

研究者番号：10231234

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：生物の持つ多様性や生存戦略を情報処理に利用することで、より柔軟な処理や機知に富んだ判断を計算機上で実現することが期待される。本研究では、遊泳性微生物ミドリムシの生存戦略行動と多様性を実験で明らかにし、それらをソフトコンピューティング機能として実装することを目指して研究を行った。ノイズ振動子を状態変数としたニューロコンピューティングと粒子シミュレーションタイプのニューロコンピューティングを対象とした。組み合わせ最適化などの問題に対して、短時間に近似解を次々に獲得する機能を実現した。さらに、確率的な計算ルールの適用という新しいアプローチによって、確率的ニューロコンピューティングを実現した。

研究成果の概要(英文)：By using biological diversity and survival strategy for information processing, it is expected that more flexible processing and witty judgment can be realized on the computer. In this study, we studied the survival strategy behavior and diversity of the swimming micro-algae *Euglena gracilis* by experiments and aimed at implementing them as soft computing function. Neurocomputing with photo-resistive noise oscillators as state variables of the neurons and the particle simulation type neurocomputing were targeted. We realized the function to acquire approximate solutions one after another in a short time to the nearly NP-hard problems such as combinatorial optimization problems. Furthermore, stochastic neurocomputing was realized by a new approach of stochastic calculation rule application.

研究分野：微生物工学

キーワード：ソフトコンピューティング 生物物理 微生物 生存戦略 確率の情報処理

1. 研究開始当初の背景

社会のデジタル化の進行に伴い、詳細なプログラミングを要せずに人間が行っている曖昧ながら直感的に近似解を得るソフトコンピューティングがますます重要になってきている。従来型のソフトコンピューティングでは、ファジー論理とニューロコンピューティングを基礎とし、両者を融合することで「柔軟性、近似性、強靭性」を達成しようとしてきた(例えば、ロボット制御における負荷の非線形性への対応をファジーニューラルアルゴリズムによって柔軟に行う制御システムの開発、E.Kayacan et al., Intelligent adaptive model-based control of robotic dynamic systems with a hybrid fuzzy-neural approach, Appl. Soft Computing, 11 (2011) 5735)。一方、生物はその進化の過程で、種の生き残りのために多様な方策を同時に並列して実施し、厳しい環境変化に直面しても全滅を免れるような生存戦略を発達させてきた。特に微生物は取りうる行動の選択肢が限られているため、より柔軟で多様な組み合わせ反応で外部刺激に対応する。

我々はこれまで遊泳性微生物であるミドリムシを対象として、光刺激や化学刺激に対する反応を利用し、センサー機能やマイクロロボット機能を開発してきた。その過程で、ミドリムシの遊泳行動の変化を数値化して光フィードバックを施すことによってニューロコンピューティングを実現でき、柔軟で強靭な解の探索が可能となることがわかった。本研究では、微生物の持つ外部刺激に対する反応の多様性や柔軟な生存戦略をそのままの形でアルゴリズムに取り入れ、状況の動的な変化に柔軟かつ強靭に対応できる情報処理技術を実現していくこととした。その基本原理は「バイオ - 物理フィードバックシステムの自立的時間発展」にある。この自立的時間発展には微生物の持つ生存戦略が反映され、柔軟かつ多様で強靭な情報処理が可能となる。単にソフトコンピューティングのアルゴリズムの開発ではなく、実際のミドリムシなどの微生物そのものを用いた計算実験を併用することで、真の生存戦略を有するマイクロエージェント情報処理を目指した。外部刺激に対する反応ルールを実験から抽出し、それらを確率的に情報処理に適応する新しい方策(確率的ニューロコンピューティング)の実現を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生物の持つ多様性や生存戦略を情報処理に利用することで、より柔軟な処理や機知に富んだ判断を計算機上で実現することである。具体的には、我々が実験で明らかにしてきた遊泳性微生物ミドリムシの生存戦略行動と多様性を数値計算モデルに組み込むことで、ソフトコンピューティング機能(柔軟性、近似性、強靭性、などを兼

ね備えた情報処理)を実現することである。特に多量の計算を行わないと最適解が得られない組み合わせ最適化などの問題に対して、短時間に近似解を次々に獲得する機能を実現していく。さらに、確率的な計算ルールの適用という新しいアプローチに挑戦し、確率的ニューロコンピューティングを実現していく。

3. 研究の方法

(1)「光 - 微生物相互作用系でのコンピューティング実験」として(1a)「アナログ光照射コンピューティング」、(1b)「人工フェロモンの導入」、および(1c)「化学走性と独立培養系間の相互作用」を調べる。これまでに構築した光 - 微生物フィードバック実験系を高輝度アナログ信号処理対応にし、ミドリムシの光反応の閾値分布(群れの中の個体差)がコンピューティングに反映されるようにする。外部刺激である光の強度に依存してミドリムシの反応がどのように変化するかを数値化して調べ、ニューロン数が10個程度の組み合わせ最適化問題を実際に解く(ミドリムシを直接用いたコンピューティング実験)。光強度の変化が生存戦略を通してニューロコンピューティングの結果に与える影響を明らかにする。さらに孤立した2つの培養系をフィードバックアルゴリズムを通して相互作用させるクロスリンク実験を行い、生存戦略の協調と競合が起こる条件を解析する。

(2)「生存戦略に基づくノイズ振動子によるシミュレーション」: 相互作用系での実験から、ミドリムシの動きの光強度変化による時間発展をノイズ振動子として抽出し、ニューロコンピューティングに組み込む。ノイズ振動子の振動変化の要因として光忌避・光適応・光不感受を想定し、光照射履歴で変化するパラメータとする。サイズの大きな組み合わせ最適化問題を高速に計算するなかで、ミドリムシの生存戦略に基づいた近似解の探索能力を発揮させる。

(3)「ミドリムシ個体を粒子として扱う詳細化モデリング」: ミドリムシを個体として扱う粒子モデルを構築し、個々の粒子が異なった生存戦略を発揮できるように詳細化を行う。上記の3要因のパラメータを各粒子に付与し、実験で得られている結果を再現するように値を調整する。ノイズ振動子として群れを取り扱う場合との差異を調べ、両者の最適な組み合わせ方を明らかにする。

(4)「生存戦略を確率ルールとして適用するニューロコンピューティング」として、(4a)「外部化学刺激」と(4b)「単一セルからの培養実験」を行う。光照射下に見られるミドリムシの行動様式のバリエーションを実験から収集し、適用ルールとする。粒子モ

デルにおける各粒子にルールを適用する確率を光照射履歴や化学物質の条件で変更していくことで、生物のあいまいさや柔軟性をもったニューロコンピューティングが実現できることを実証する。

(5)「環境作用を取り入れたコンピューティングへの展開」: ミドリムシが培地に放出する化学成分とそれによる行動の変化を環境作用として取り入れる。塊を作って環境の変化に耐える行動を再現することで、実際のミドリムシの生存戦略をほぼ全てカバーしたモデルによる情報処理を行う。

4. 研究成果

(1a)「アナログ光照射コンピューティング」: 構築済みの光 - 微生物相互作用実験系を用いて、マイクロ流路に閉じ込めたミドリムシに外部刺激としてアナログ光を照射し、光忌避反応がどのように変化するかを調べた。また、光パルスを照射する実験を行い、照射インターバルがその後の光忌避反応にどのような影響を与えるかを明らかにした。さらにニューロン数が 16 個の組み合わせ最適化問題をアナログ光フィードバックによって実際に解き、数値計算に向けた比較データを得た。ソフトコンピューティングに向けてはミドリムシの動きに対応した動的なモデル問題の構築が重要であることがわかった。

(1b)「人工フェロモンの導入」: ミドリムシの遊泳軌跡を追従する形で光照射を行い、人工的なフェロモン効果を導入するプログラムを開発した。フェロモンの蓄積や蒸発などをパラメータとし、ミドリムシの集団が作る密集パターンの時間変遷を実験によって明らかにできた。定常的なステーションを設けた結果では、ステーション間を結ぶ帯状の領域が形成されることがわかった。

(1c)「化学走性と独立培養系間の相互作用」: 外部刺激としてエタノールと過酸化水素を与えてミドリムシの反応を調べた。エタノールでは単純な負の化学走性が見られた。過酸化水素では刺激開始直後は負の化学走性を示したが、時間が経過すると逆に過酸化水素濃度の高いところに集まった。その原因は、過酸化水素によってミドリムシの細胞内のメタボリズムが大きく攪乱され、遊泳制御ができなくなったことであると推定された。この場合にミドリムシは休止することで生存を目指すことがわかった。独立培養系間の相互作用の実験では協調的なパターンロジック操作および競合的なリソース占有が実現できた。

(2)「生存戦略に基づくノイズ振動子によるシミュレーション」: 256 振動子を実装したプログラムを開発し、その性能を組み合わせ

最適化問題を対象として検証した。ミドリムシの光反応をベースとした振動子強度変化を与えることで、最適近似解を次々と獲得することに成功した。実験で見られた時間進展によって光反応が強化される現象や光に対する適応の効果を導入するには、光に当たった履歴を持つ振動子を作成すれば良いことがわかった。個々のミドリムシの動きをシミュレートするプログラムの結果をほぼ再現でき、より短時間でマルチエージェントによる最適化やロバストネスを実現できる可能性が示された。

(3)「ミドリムシ個体を粒子として扱う詳細化モデリング」: ミドリムシを個体として扱う粒子シミュレーションを行った。数万個の粒子を想定していたが、PCのメモリとOSの関係でメモリ上での実行を数千個にとどめることが有効でありそれで十分であることが判明した。実験から導き出した光耐性の獲得やLevyフライト運動の実装を行うアルゴリズムを考案し、実装した。また近接粒子間の相互作用パラメータを追加する機能を導入した。昨年度に開発したノイズ振動子のシミュレーションと比べて、粒子数の増加に伴って解への固着が増大することがわかった。

(4a)「外部化学刺激」: PDMS 中の拡散を利用することで化学物質を送り込む構造を設計した。ミドリムシの閉じ込め領域と化学物質を流すチャンネルとが分離されるため、定量的な計測が可能となった。環境応答型コンピューティングのベースとしてCO2ガスを対象としてミドリムシの環境応答を調べた。

(4b)「単一セルからの培養実験」: ミドリムシのセルひとつをマイクロ流路に閉じ込め、増殖培養によってクローン集団を得る技術を開発した。分裂によってひとつのセルから増殖させて40 - 80個体のクローン集団を作り出し、青色光の勾配を与えて個体群の挙動を調べた。同じ環境で増殖した個体群においても、光耐性の強い個体が出現するなど、多様性が発現していることがわかった。また、分裂増殖の過程で、分裂時に静止していたセルが分裂を終えて遊泳を開始する時間にズレが生じていくことが判明した。このような分裂の非対称性が拡大されて多様性の発現をもたらしていると考えられる。

(5)「確率的ニューロコンピューティングと環境対応実験」: より計算が効率的に進められるノイズ振動子タイプのシミュレーションを軸とし、ミドリムシ独自の性質として光に対して回避行動の効率があがる効果(Gradual evacuation, GE効果)と光に対して耐性が増える効果(Photo adaptation, PA効果)のそれぞれを法則として確率適用法として導入した。GE効果を確率0.05で導入す

ると solution number が約 1.3 倍に増加するが、performance score は増加しなかった。また、PA 効果を確認率 0.05 で導入すると solution number も performance score も 2 分の 1 以下に減少した。これらの効果を同時に確認率 0.05 で適用すると、solution number が 1.3 倍となり performance score は 2.6 倍に増加した。この結果により、2 つの効果を同時に導入する確率的ニューロコンピューティングが有効であることが実証できた。より多数の現象論的記述ルールを適用すべくミドリムシの光応答の安定性と環境ストレスの関係を実験で調べた。環境ストレスを大きく受けた場合には、耐性が失われる場合が確率的に発生することがわかった。これらを確認率的ニューロコンピューティングに適應するために、効果ルールの適用確率を計算の進行にともなって徐々に変化させる確率変遷のアルゴリズムを開発できた。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

(1) K.Ozasa, J.Won, S.Song, S.Tamaki, T.Ishikawa, M.Maeda, PLoS ONE, 12 (2017) e0172813. "Temporal change of photophobic step-up responses of *Euglena gracilis* investigated through motion analysis" <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0172813>

査読有

(2) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, Procedia Eng., 168 (2016) 1450-1453. "Toxic Effect Monitoring by Analyzing Swimming Motions of Microbial Cells Confined in Microfluidic Chip with Micro-Trench Flow Injection" <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.414>

査読有

(3) N.Kanayama, T.Sekine, K.Ozasa, S.Kishi, T.Nyu, T.Hayashi, M.Maeda, Langmuir, 32 (2016) 13296-13304. "Terminal-Specific Interaction between Double-Stranded DNA Layers: Colloidal Dispersion Behavior and Surface Force" <http://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b03470>

査読有

(4) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, Sci. Rep., 6 (2016) 24602. "Autonomous oscillation/separation of cell density artificially induced by optical interlink feedback as designed interaction between two isolated microalgae chips" <http://dx.doi.org/10.1038/srep24602>

査読有

(5) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, Key Eng. Mater., 644 (2015) 185-188. "Real-time analysis of chemotactic motion

of *Euglena* cells confined in a microchip toxicity sensor" <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.644.185>

査読有

(6) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, Artificial Life, 21 (2015) 234-246. "Autonomous Pattern Formation of Micro-organic Cell Density with Optical Interlink between Two Isolated Culture Dishes"

http://dx.doi.org/10.1162/artl_a_00159

査読有

(7) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, Procedia Eng., 87 (2014) 512-515. "Toxicity Sensing by Using Chemotactic Reaction of Microbial Cells Confined in Microfluidic Chip"

<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.422>

査読有

(8) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, Plant Cell Physiol., 55 (2014) 1704-1712. "Transient freezing behavior in photophobic responses of *Euglena gracilis* investigated in a microfluidic device" <http://dx.doi.org/10.1093/pcp/pcu101>

査読有

(9) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, Neurocomput., 140 (2014) 291-298. "Analog Feedback in *Euglena*-Based Neural Network Computing Enhancing Solution-Search Capability through Reaction Threshold Diversity among Cells "

<http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2014.03.009>

査読有

(10) K.Osaza, A.Mason, O.Korostynska, I.Nakouti, M.Ortoneda-Pedrola, M.Maeda, A.Al-Shamma'a, Key Eng. Mater., 605 (2014) 432-436. "Electromagnetic Wave Sensing of *Euglena gracilis* Viability and Quantification"

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.605.432>

査読有

(11) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, Key Eng. Mater., 605 (2014) 95-98. "Chemical sensing via chemotaxis of *Euglena* confined in an isolated micro-aquarium"

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.605.95>

査読有

(12) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, LabChip, 13 (2013) 4033-4039. "Gas/liquid sensing via chemotaxis of *Euglena* cells confined in an isolated micro-aquarium"

<http://dx.doi.org/10.1039/c3lc50696g>

査読有

(13) T.Hayashida, T.Kawashima, D.Nii, K.Ozasa, K.Umemura, Chem. Lett., 42 (2013) 666-668. "Kelvin Probe Force Microscopy of Single-Walled Carbon Nanotubes Modified with DNA or Polyethylene Glycol" <http://dx.doi.org/10.1246/cl.130121>

査読有

(14) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, Key Eng. Mater., 543 (2013) 431-434. "Microfluidic Gas Sensing with Living Microbial Cells Confined in A Microaquarium"

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.543.431>

査読有

(15) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, Appl.Soft Comput., 13 (2013) 527-538. "Euglena-based neurocomputing with two-dimensional optical feedback on swimming cells in micro-aquariums" <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2012.09.008>

査読有

〔学会発表〕(計 28 件)

(1) "マイクロフルイディクスを利用した走化性の検証", 尾笹一成, 第 90 回日本細菌学会総会、ワークショップ「ミクロな微生物社会を掴む新技術」、仙台、3月(2017)。招待講演

仙台国際センター展示棟(宮城県仙台市)

(2) "ミドリムシの光応答に基づいたニューロコンピューティング", 尾笹一成, NI-SIGNAC-CCS 合同研究会、東京、3月(2017)。東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)

(3) "ユーグレナの光忌避運動にみるセルの性質の多様化", 尾笹一成、前田瑞夫, ユーグレナ研究会第 3 2 回研究集会、東京、1 1 月(2016)。0-1

東京大学本郷キャンパス(東京都文京区)

(4) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, "Logic Pattern Operation Using Two Separated Groups of Euglena Cells in Microchips by Optical Crosslink Feedback", 20th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS2016), Dublin, Ireland, 10-13(10) October, 2016.

(5) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, "Toxic Effect Monitoring by Analyzing Swimming Motions of Microbial Cells Confined in Microfluidic Chip with Micro-Trench Flow Injection", EuroSensors2016, Budapest, Hungary, 4-7(5) September, 2016.

(6) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, "Euglena-Inspired Neurocomputing with 256

Photo-Responsive Noise Oscillators", Unconventional Computation and Natural Computation 2016 (UCNC2016), Manchester, UK, 11-15(12) July, 2016.

(7) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, "Artificial Interaction between Two Isolated Micro-Algae Populations for Autonomous Pattern and Rhythm Formation", 15th International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALife2016), Cancun, Mexico, 4-8 July, 2016.

(8) "ユーグレナの生存戦略と機能化", 尾笹一成、前田瑞夫, 「自然知能の構造とデザイン」シンポジウム、東京、1月(2016)。東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)

(9) "ユーグレナの光忌避運動の変遷", 尾笹一成、前田瑞夫, ユーグレナ研究会第 3 1 回研究集会、宮崎、1 1 月(2015)。0-3 Kiten ビルコンベンションホール(宮崎県宮崎市)

(10) K.Ozasa, J.Won, S.Song, M.Maeda, "Real-Time Motion Analysis of Euglena Cells Swimming in a Microfluidic Chip for Environmental Toxicity Biosensing", 19th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS2015), Gyeongju, Korea, 25-29(27) October, 2015.

(11) "光フィードバックによるミドリムシへの人工フェロモン効果", 尾笹一成、前田瑞夫, 日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪、9月(2015)。16pCT-7

関西大学千里山キャンパス(大阪府吹田市)

(12) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Adaptation of Euglena Cells to Blue Light Investigated with Optical Feedback System", Multinational Congress on Microscopy 2015 (MCM2015), Eger, Hungary, 23-28(24) August, 2015.

(13) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Differences in photophobic response between Euglena gracilis and Chlamydomonas reinhardtii", 10th European Biophysics Congress (EBSA2015), Dresden, Germany, 18-22(21,22) July, 2015.

(14) "マイクロ流路チップ内でのユーグレナの増殖過程", 尾笹一成、前田瑞夫, ユーグレナ研究会第 3 0 回研究集会、奈良、1 1 月(2014)。P-19

東大寺総合文化センター(奈良県奈良市)

(15) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Cell Multiplication and Movement Analysis of Swimming Euglena Confined in a Flow-isolated Micro-aquarium", 18th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (microTAS2014), Austin, USA, 26-30(29) October, 2014.

(16) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Toxicity Sensing by Using Chemotactic Reaction of Microbial Cells Confined in Microfluidic Chip", Eurosensors 2014, Brescia, Italy, 07-10(08) September, 2014.

(17) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Toxicity sensor using Euglena living cells confined in a microfluidic chip", RSC-Tokyo International Conference, Chiba, Japan, 04-05(05) September, 2014.

(18) "ミドリムシの化学走性を利用した細胞毒性モニターチップ", 尾笹一成、前田瑞夫, 第75回応用物理学会学術講演会、札幌、9月(2014)。18a-PA2-1
北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市)

(19) "マイクロ流路中で調べたミドリムシの光忌避応答の運動モード", 尾笹一成, 第12回クラミドモナス研究会、東京、9月(2014)。CP-1
中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区)

(20) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Dynamic Connection-Path Network Computing by Artificial Pheromone Effects for Euglena Cells", Unconventional Computation and Natural Computation 2014 (UCNC2014), Ontario, Canada, 14-18(17) July, 2014.

(21) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Maeda, "Real-time analysis of chemotactic motion of Euglena cells confined in a microchip toxicity sensor", 4th International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (ICMAST2014), Bilbao, Spain, 8-11(11) June, 2014.

(22) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, "Introduction of Artificial Pheromone Effects on Euglena Cells toward Ant Colony Optimization Experiments", 2nd International Conference on the Theory and Practice of Natural Computing (TPNC 2013), Caceres, Spain, 3-5 December, 2013.

(23) "マイクロ流路内のユーグレナのCO2化学走性", 尾笹一成、原正彦、前田瑞夫, ユーグレナ研究会第29回研究集会、筑波、11月(2013)。0-1
筑波大学筑波キャンパス(茨城県つくば市)

(24) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, "Cell Movement Tracking of Euglena Gracilis Confined/Multiplying in An Isolated Micro-Aquarium", EMBO/EMBL Symposium 2013: Seeing is Believing - Imaging the Processes of Life, Heidelberg, Germany, 3-6 October, 2013.

(25) "独立したミドリムシ培養系間の光フィードバック", 尾笹一成、原正彦、前田瑞夫, 日本物理学会2013年秋季大会、徳島、9月(2013)。28aPS-123
徳島大学常三島キャンパス(徳島県徳島市)

(26) K.Osaza, A.Mason, O.Korostynska,

I.Nakouti, M.Ortoneda-Pedrola, M.Maeda, A.Al-Shamma'a, "Electromagnetic Wave Sensing of Euglena gracilis Viability and Quantification", 3rd International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (ICMAST2013), Prague, Czech Republic, 13-17 September, 2013.

(27) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, "Chemical sensing via chemotaxis of Euglena confined in an isolated micro-aquarium", 3rd International Conference on Materials and Applications for Sensors and Transducers (ICMAST2013), Prague, Czech Republic, 13-17 September, 2013.

(28) K.Ozasa, J.Lee, S.Song, M.Hara, M.Maeda, "Optical interlink-feedback between two isolated culture dishes of Euglena toward cooperative/competitive bio-computing", Unconventional Computation and Natural Computation 2013 (UCNC2013), Milano, Italy, 1-5 July, 2013.

〔図書〕(計0件)

〔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
<http://www.k-ozasa.net/>

6. 研究組織

(1)研究代表者
尾笹一成(OZASA, Kazunari)
国立研究開発法人理化学研究所・前田バイオ
工学研究室・専任研究員
研究者番号:10231234

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
Simon Song
Department of Mechanical Engineering,
Hanyang University, Korea, Professor