

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01487

研究課題名（和文）使い易いマン・マシンインターフェースのための適応型非線形筋電検出技術の開拓

研究課題名（英文）Development of adoptive nonlinear myoelectric signal detection technique for user-friendly man-machine interface

研究代表者

葛西 誠也（Kasai, Seiya）

北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：30312383

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：筋肉が発する電気信号から使用者の動きや意図を検知し機器に伝える筋電型マン・マシンインターフェースをより使い易くするため、本研究では筋電信号の検出精度を高めることと筋電検出系と一体化できかつ表現力に富んだ感覚フィードバック機構の研究を行った。生物の感覚器に倣った独自の非線形筋電検出技術に使用者や環境の状態に適応する機構をもたせることで安定した筋電検出を可能にした。また、複数の小型偏心モーター振動子を干渉させるシンプルな方式で単体振動子では不可能な2.5 Hzという超低周波振動を生成できることを示し、表現力の高い人工感覚デバイスのプロトタイプを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、使用者の動きや意図を読み取る筋電検出に非線形工学を適用する独自手法により難点を克服する新しい技術を創り出した。また、振動をとおして使用者に情報伝達する人工感覚の情報量を大幅に増やす方法を開拓した。これらの成果は、直感的な操作を可能にする筋電型インターフェースの問題点を解決し「思い通り」の操作体験を提供できるようするものであり、操作手順が煩雑な種々の機器を使いやすくする技術につながる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a user-friendly man-machine interface (MMI) that can detect the user's motion and intention using surface electric myosignal (EMS). The newly developed MMI includes the reduction of the error in the EMS detection and a MMI-integrable vibration haptic feedback device with rich expression. The EMS detection error was reduced by a self-parameter optimization mechanism in our unique nonlinear EMS detection technique, which could make the system adaptive to the user and the environment. We also showed an artificial haptic device integrating two small vibration motors that could generate a super-low frequency vibration down to 2.5 Hz by beating, which was two orders of magnitude smaller than that from single motor.

研究分野：半導体電子デバイス

キーワード：筋電検出 非線形 感覚フィードバック

1. 研究開始当初の背景

筋肉が発する筋電位から使用者の動きや意思を読み取り機器に伝える筋電型マン・マシンインターフェース (MMI) は、電動義手やロボットなど様々な機器の直感的な操作を可能にする。モーションキャプチャとは異なりインターフェースを身につけ移動することができるため、日常生活で利用し易い方法である。しかしながら、現状では筋電型 MMI は誤動作が多く、思い通りと感じられる操作性を実現できていない。

2. 研究の目的

本研究では、誰もが日常生活で容易に使える筋電型 MMI を目指し、「思い通り」の操作体験が得られる MMI 技術を創出する。そこで、生物の感覚メカニズムに倣った独自の非線形筋電検出手法をベースに、操作性劣化要因である筋電信号の誤検出を抑制しつつ検出精度の向上を図る。さらに、ユーザーに身体感覚を与えることで制御性を高める感覚フィードバック機構に着目し、筋電検出系と一体化可能で表現力が高い人工感覚生成デバイスを開発する (図 1)。



図 1 本研究のコンセプト

3. 研究の方法

筋電型 MMI における「思い通り」の操作性は、意図と結果が一致することで想起される感覚である。ここでは、使用者と被操作機器の間で操作意図と結果に関わる情報が過不足なくやりとりされなければならない。この観点に立つと、現在の筋電型 MMI の操作性にかかわる問題は、「筋電検出デバイスの誤検出が多い」=「使用者から機器へ伝達される情報精度の不足」、「機器状態を知る手段が視覚のみである」=「機器から使用者へ伝達される情報量の不足」の2つにあると理解される。そこで本研究では、筋電検出デバイスにおける情報精度劣化を引き起こす誤検出を抑制する技術、および、人工感覚をとおして使用者に機器の状態をフィードバックする仕組みを導入しフィードバック情報量を高める技術をつくりだすこととした。

(1) 筋電検出精度の向上：筋電型 MMI の仕組みを辿ると、誤検出の要因は信号検出するために身体にとりつける表面電極と皮膚の接触変化に由来する。そこで研究代表者が独自に開発した非線形筋電検出技術をもとに、操作者や環境の状態によって変化する表面電極の接触状態を検知し動的に非線形関数のパラメータを最適値に調整する仕組み「適応的筋電検出」を開拓する。
 (2) 振動による人工感覚の表現力拡張：被操作機器の動きなど多くの情報を振動をとおして表現するには、振動のバリエーションを拡げなければならない。しかし MMI と一体化可能なボタン型偏心モーター振動子の可変パラメータは振動周波数 (~振動強度) 一択であり、しかもその範囲は狭い。そこで、複数の振動子を集積し振動合成・制御することで単一振動では不可能な多彩な振動を生み出す。

4. 研究成果

(1) 筋電検出精度の向上と関連技術

本研究の非線形筋電検出系の調整は単純である。唯一のパラメータであるシグモイド型非線形素子 (シュミットトリガ) のしきい値を自動的に最適化すればよい。これを具現化するべく非線形素子のしきい値の自動制御化システムを設計・試作した。このシステムでは筋電検出回路の出力を常時モニタして逐次最適しきい値を予測し、動的にしきい値を変更する (図 2(a))。

しきい値最適化のためのアルゴリズムは、出力 SN 比と応答遅延時間を性能指標として設計した。しかし実験の過程でこれら 2つの指標はトレードオフの関係にあることが判明した。例えば SN 比を高めるようにしきい値を設定すると応答遅延が生じる。そこで機器制御に支障がない SN 比を維持しつつ、遅延時間を短縮可能なしきい値を実験的に探索した。探索結果に基づきしきい

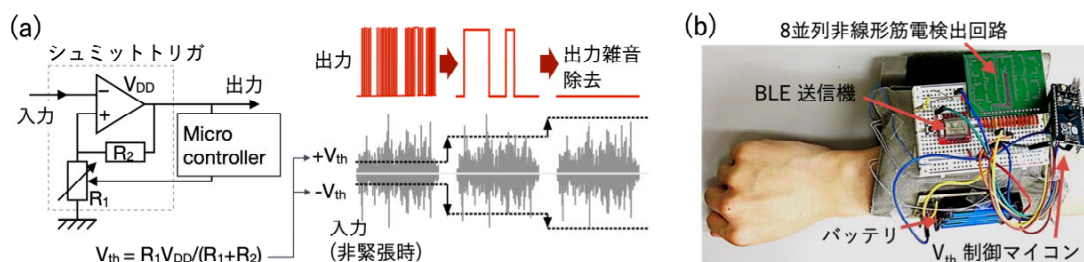


図 2 (a) 適応型非線形筋電検出システムの仕組みと (b) 携帯型実装

値を自動調整するアルゴリズムを設計した。

非線形筋電検出回路においてしきい値を変更できる機構を組み込み、しきい値最適化アルゴリズム実装した小型マイクロコンピュータと組み合わせ、筋電型MMIを構築した。加えて、バッテリー駆動で携帯可能なシステムへ発展させた(図2(b))。ロボットアーム制御によって本システムによる適応的安定筋電検出をデモンストレーションした(図3)。

自動調整機構を実装した非線形筋電検出システムの使用者適応能力を評価するため8名の使用者による機能検証を行った。7名に対して基準となるSN比と応答速度が達成され、使用者に対するシステムの適応能力が確認された。しかし1名のみ所望のSN比を達成することができなかった。この問題に対する解決策として、非線形素子並列数を増す手法が有効であることを実験的に確認した。

検出した筋電位から所望操作(随意運動)を推定するために、組合せ最適化技術を適用することを想定し、その一環として独自の最適化計算システム「電子アマーバ」の応用展開を図った。MMIへの適用の前段階として4足歩行ロボットの運足推定とその精度向上を試みた。本ロボットは各足の接地情報と少数の動作制約から適切な運足をリアルタイムで探索し、歩行運動につなげる。このシステムに身体姿勢をセンシングし最適化計算の情報として随時追加することで運足推定精度が向上するメカニズムを実装した。また、随意運動の推定のみならず、機器側の状態に応じて感覚フィードバックを介さず直接操作補助動作を生み出す人工的な反射機能に向けて、最適化システムで解法可能な問題のバリエーションを拡張した。

筋電位から随意運動を読み出すさらなる手段として、バイオリザバーコンピューティングの着想を得て、実験実証を試みた。これは身体を非線形素子ネットワークと見做し、異なる身体箇所筋電位を同時多数センシングし、学習重み付けすることで意図した動きを表現する。従来のニューラルネットを用いた機械学習識別では、ネットワークのノードを外部回路に担わせていたが、本研究ではノード機能を使用者の身体に委ねた点が決定的に異なる。前腕の複数箇所より筋電を取得しリザバー出力とみなしたシステムを構築し、筋電位と手の3次元運動を同時に計測システムに学習させた。しかしながら、表面筋電の線形結合のみでは手の運動を適切に再現できなかった。波形観察・解析により、原因は筋電信号を構成する個々の活動電位の時間スケールと身体運動の時間スケールの相違と推測されたため、筋電信号の時間積分をリザバー層波形として追加した。結果、再現度が大幅に改善し、バイオリザバー計算による所望動作の高精度同定の可能性を得ることができた(図4)。

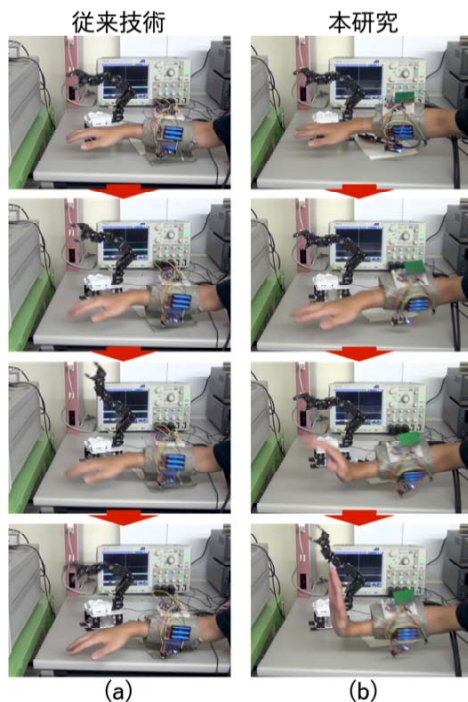


図3 手の掌背屈動作による筋電型ロボットアーム制御：(a)従来技術、(b)本研究。従来技術では掌背屈以外の動作にも応答し制御不能になるが、本研究では安定して掌背屈のみに応答する

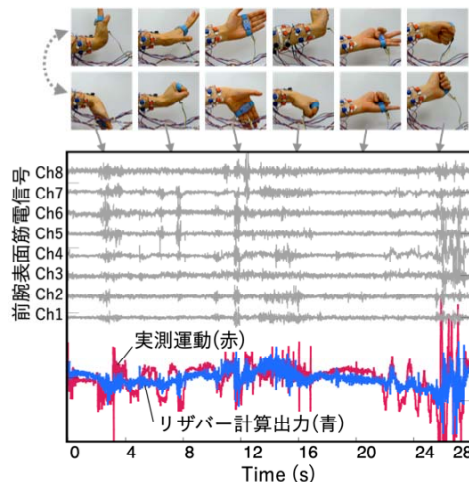


図4 多点で取得した筋電信号とその積分波形をリザバー出力とみなし実測運動(力)を学習した例

(2) 振動による人工感覚の表現力拡張：基本的な構成として2個の小型のボタン型偏心モーター振動子を集積し、振動の干渉によって振動差周波に相当する超低周波成分を生成する。振動の時間的・空間的な多様性を、2つの振動周波数や回転方向を独立に制御することで獲得する。これらを実験実証するため、2つの振動子を固定する支持ホルダを設計し、3Dプリンタで作製した。

前段として、使用者がうける身体表面の振動状態を計測するため、ピエゾ振動センサを用いた独自の測定系を構築した。これにより振動子ホルダの固定圧と振動周波数の関係を詳細に評価し、固定圧を一定にすることにより振動の再現性が確保できることを確認した。以降の実験ではホルダ固定圧はホルダが身体に固定されかつ使用者が圧迫感を強く感じない25 mmHgに統一した。さらに、振動の空間パターンを評価するために、光学顕微鏡にハイスピードカメラを取り付け、皮膚上の5 μmのマーカートの振動軌跡を2000 fpsで追尾できる測定系も構築した。

試作ホルダを用いた振動型人工感覚デバイス(図5(a))により、超低周波振動の生成を確認した(図5(b))。振動周波数はほぼ2振動子の差周波と等しい。振動の空間パターンは複雑である

が (図 5(c))、2 つの円運動の合成であるトロコイドで記述できることがわかった。しかしながら、2 振動子の力学的結合によって容易に位相同期が意図せず生じる問題が発生した。位相同期すると、単一振動とほぼ等しい振動周波数と空間パターンしか得られず、多様性は失われる。差周波が小さいほど同期しやすく、低周波振動の下限が 10 Hz 程度に制限された (図 6(a))。

そこで位相同期を抑制するためのホルダの設計を試みた。トロコイドパターンから力学的結合の情報を抽出し、振動子ホルダの形状との関係を詳細に調査し、横方向および縦方向振動の結合強度を共に弱めてホルダ形状を見出した。本ホルダにより 2.5 Hz もの低周波数振動の生成が可能になった (図 6(b))。単体振動と比較し 1/100 もの超低周波振動が生成可能な、表現力が高い振動型人工感覚デバイスを実現できた。

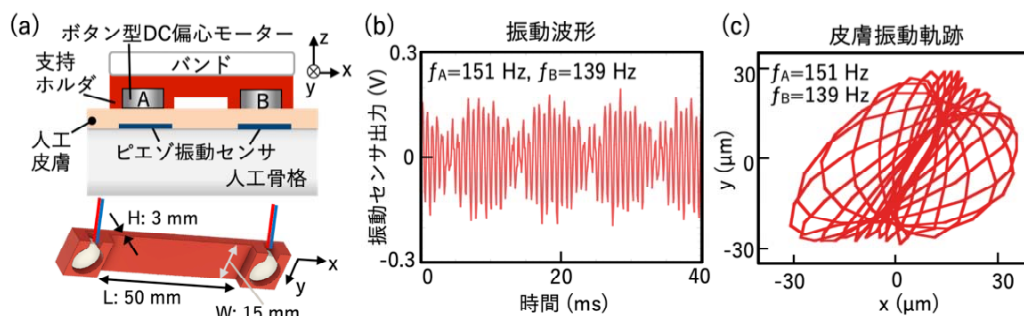


図 5 (a) 小型ボタン型振動子集積デバイスと実験系、(b) 差周波 12 Hz での干渉振動波形と (c) 振動空間パターン

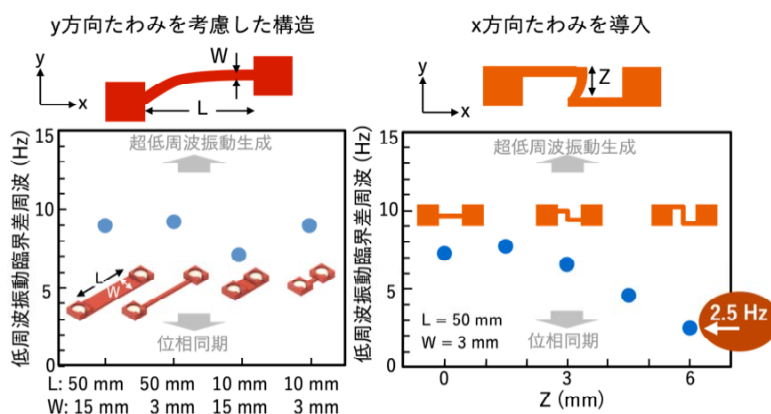


図 6 干渉による超低周波振動と位相同期の境界となる差周波の支持ホルダ形状依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saito Kenta, Suefuji Naoki, Kasai Seiya	4. 巻 16
2. 論文標題 Effect of asymmetric deformation dynamics in amoeboid organism on its search ability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 036003 ~ 036003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-3190/abe6f9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Kenta, Aono Masashi, Kasai Seiya	4. 巻 10
2. 論文標題 Amoeba-inspired analog electronic computing system integrating resistance crossbar for solving the travelling salesman problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20772.1 ~ 20772.9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-77617-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Saito Kenta, Kasai Seiya	4. 巻 13
2. 論文標題 Effect of feedback delays on solution quality in amoeba-inspired computing system that solves traveling salesman problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 114501 ~ 114501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abbfe1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Kenta, Suefuji Naoki, Kasai Seiya	4. 巻 16
2. 論文標題 Effect of asymmetric deformation dynamics in amoeboid organism on its search ability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioinspiration & Biomimetics	6. 最初と最後の頁 036003 ~ 036003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1748-3190/abe6f9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Saito, N. Suefuji, S. Kasai, and M. Aono	4. 巻 5
2. 論文標題 Amoeba-inspired electronic computing system and its application to autonomous walking of a multi-legged robot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Logics	6. 最初と最後の頁 1799-1814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Saito, N. Suefuji, S. Kasai, and M. Aono	4. 巻 ISMVL2018
2. 論文標題 Amoeba-Inspired Electronic Solution-Searching System and Its Application to Finding Walking Maneuver of a Multi-legged Robot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 IEEE 48th International Symposium on Multiple-Valued Logic	6. 最初と最後の頁 127-131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISMVL.2018.00030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 K. Saito, S. Kasai, M. Aono
2. 発表標題 Evaluation of Solution Search Performance of Amoeba-Inspired Electronic Computing System for Solving Maximum Cut Problem
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Kasai
2. 発表標題 Electronic implementation of nature-inspired functionalities dealing with fluctuations
3. 学会等名 MJIT-UTM Nanotech: Materials and Devices 2021 Prominent Lecture Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kasai
2. 発表標題 Stochastic resonance in electronics
3. 学会等名 Krakow Condensed Matter (UPeL) Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齋藤俊介, 河口研一, 葛西誠也
2. 発表標題 リザバコンピュータに向けたエサキダイオード非線形発振ノードの基礎的検討
3. 学会等名 第11回分子アーキテクトニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斉藤健太, 葛西誠也, 青野真士
2. 発表標題 アナログ電子アメーバにおける遅延による不安定状態の解探索性能への影響評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大沼柊, 斉藤健太, 葛西誠也, 青野真士
2. 発表標題 確率的傾斜法を用いた粘菌型自律歩行ロボットの歩行効率化
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葛西誠也
2. 発表標題 ガウス分布関数の相対変化率の発散とまさつがない双安定系の確率共鳴
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤俊介，河口研一，葛西誠也
2. 発表標題 非線形エサキダイオードを用いた電子リザーブノードの構成と結合
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田嶋孝一、稲田一稀、葛西誠也
2. 発表標題 振動型感覚フィードバックシステムにおける皮膚振動情報の定量評価
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大沼柊、斉藤健太、末藤直樹、葛西誠也、青野真士
2. 発表標題 粘菌型自律歩行ロボット行動決定のための動態時系列センシング
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大沼柊、斉藤健太、末藤直樹、葛西誠也、青野真士
2. 発表標題 粘菌型自律歩行ロボットの身体感覚による路面状態センシング
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Kasai
2. 発表標題 Amoeba-inspired electronic computer solving optimization problem
3. 学会等名 International Symposium for Neuromorphic Hardware Research Center (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 葛西誠也
2. 発表標題 非線形電子デバイスによる生物機能の模倣と理解
3. 学会等名 電子情報通信学会システムナノ技術に関する特別研究専門委員会(SNT)第3回研究会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 葛西誠也
2. 発表標題 Nature- and bio-inspired electronic devices making use of fluctuation
3. 学会等名 ナノ学会ナノ機能・応用部会合同研究会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Kasai
2 . 発表標題 Electronic Representation of Nature-inspired Functions for Nano-scale Electronic Systems
3 . 学会等名 Nanotech Malaysia 2018 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Kasai
2 . 発表標題 Stochastic resonance in electron devices and its application
3 . 学会等名 ACSIN 2018 Informal Satellite Workshop Material Intelligence -Unconventional Computing by Network-based Materials- (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Saito, N. Suefuji, S. Kasai, and M. Aono
2 . 発表標題 Amoeba-inspired electronic solution-searching system and its application to finding walking maneuver of a multi-legged robot
3 . 学会等名 2018 IEEE 48th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Inada, K. Tajima, and S. Kasai
2 . 発表標題 User-adaptive Surface Myoelectric Signal Detection System Using Nonlinear Device Network
3 . 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤健太、葛西誠也、青野真士
2. 発表標題 電子アメーバSAT解探索システムにおけるエラーと解探索効率の相関
3. 学会等名 2018電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末藤直樹、斉藤健太、葛西誠也、青野真士
2. 発表標題 粘菌アメーバ型最適化問題解探索にもとづく4脚ロボットの自律歩行
3. 学会等名 2018電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 葛西誠也、青野真士、斉藤健太、末藤直樹
2. 発表標題 最適化問題を解く電子アメーバとその応用
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤健太、末藤直樹、葛西誠也、青野真士
2. 発表標題 粘菌に着想を得たTSP解探索アルゴリズムの電子回路実装
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末藤直樹、斉藤健太、青野真士、葛西誠也
2. 発表標題 非同期CMOS 論理回路に問題をマッピングしたアメーバ型探索電子システムの動的挙動
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田嶋孝一、葛西誠也
2. 発表標題 振動子物理結合による感覚フィードバックの表現力拡張
3. 学会等名 電子情報通信学会電子デバイス・シリコン材料デバイス・電子部品材料合同研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 葛西誠也	4. 発行年 2018年
2. 出版社 化学同人	5. 総ページ数 8 (201)
3. 書名 分子アーキテクニクス 単分子技術が拓く新たな機能 (CSJカレントレビュー)、3章 Basic concept-4: 揺らぎを利用したエレクトロニクス	

1. 著者名 Maria Lis, Shu Omuna, Dawid Przychyna, Piotr Zawal, Tomasz Mazur, Kacper Pilarczyk, Pier Luigi Gentili, Seiya Kasai, Konrad Szacilowski	4. 発行年 2021年
2. 出版社 World Scientific Publishing Company	5. 総ページ数 -
3. 書名 Alternative Computing, Chapter "From oscillatory reactions to robotics. A serendipitous journey through chemistry, physics and computation​"	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 非一様解探索システム、非一様解探索方法及び非一様解探索プログラム	発明者 青野真士、葛西誠也、大古田香織、福田真悟	権利者 Amoeba Energy, 北海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-184993	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 パルス発生回路	発明者 葛西誠也, 末藤直樹	権利者 北海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-12464	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ロボット、ロボット制御方法、およびプログラム	発明者 葛西誠也、斉藤健太、末藤直樹、青野真士	権利者 Amoeba Energy , 北海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-093128	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 デバイス	発明者 葛西誠也、斉藤健太、青野真士	権利者 Amoeba Energy , 北海道大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-093127	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

研究室ホームページ http://www.rciqe.hokudai.ac.jp/labo/qid/ 北海道大学大学院情報科学院 / 大学院情報科学研究所 ネットジャーナル 4 https://www.ist.hokudai.ac.jp/netjournal/net_44_1.html
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ポーランド	AGH University of Science and Technology		