

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02191

研究課題名(和文)ヘテロジニアス微小ノード群による無線通信機能の創発

研究課題名(英文)Creating wireless communication functions by heterogeneous micro-node groups

研究代表者

伊藤 浩之 (Ito, Hiroyuki)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：40451992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：センサノード群を協調動作させる回路・システム設計論の体系化を目的とした。カオス発振器を結合させることにより意味のある集団動作が発現するというアイデアに対して理論的かつ実験的に研究を進め、ノード間での同期の増加や散逸、リレー効果を観測した。外部励起によってノード群の隠れたダイナミクスを観察できる可能性を示し、小規模なニューラルネットワークによりセンサの母集団における測定値の統計的分布を推定する手法等を提案した。ノードの小型化・低消費電力化のために、Si CMOS技術により低雑音・低消費電力な発振器型センサ回路や、後方散乱技術を活用した無線通信ノードを試作し、実測により設計通りの動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特に、発振器型センサの群としての機能創発に関して理論的かつ実験的に研究を進め、発振器群の信号の分析手法に関する多くの研究成果が得られた。例えば、カオスダイナミクスにおける「不完全な同期」のもとで起こる創発・パターン形成現象に基づいたシンプルなアナログハードウェアによる計算技術などを発明した。この技術は、パターン検出用ハードウェアの低消費電力化や小型化に大きく貢献できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：The purpose is to systematize the circuit and system design theory for cooperative operation of a group of sensor nodes. The idea that meaningful collective behavior can emerge by coupling chaotic oscillators was theoretically and experimentally investigated. Increased synchronization among nodes, dissipation, and relay effects were observed. The possibility of observing the hidden dynamics of a group of nodes by external excitation was demonstrated. A method for estimating the statistical distribution of measurements in a population of sensors using a small neural network was proposed. To reduce the size and power consumption of the nodes, an oscillator-type sensor circuit with low noise and low power consumption using Si CMOS technology and a wireless communication node utilizing backscattering technology were fabricated, and their operation was confirmed through actual measurements.

研究分野：電子回路工学

キーワード：センサネットワーク IoT

1. 研究開始当初の背景

物理的に小型な無線センサノードの実現は、様々なモノへの埋め込みによるリアルタイムモニタリングを加速させることから、工学的・産業的に多に価値がある。カリフォルニア大学バークレー校の Smartdust や Neural Dust のような研究が進められているが、超小型センサノード技術には、エネルギー生成と消費、無線通信などの面で多くの課題が残されている。Smart/Neural Dust は無線通信にレーザーや音波を利用しようとしているが、電力効率や集積化・コストの面で問題がある。これらの面で優位である磁界・電磁界を用いた無線通信の場合は、数 mm^2 サイズの低利得アンテナにより微弱電力で信号を送受信することになるため、せいぜいセンチメートルオーダの極短距離通信が達成できる程度である。

そもそも、米粒サイズ未満の超小型センサノードが発電・蓄積できるエネルギーは微弱であり、その単体を高機能化・高出力化することは、技術的に重要ではあるが昆虫を哺乳類に近づけるに等しい高難易度なアプローチに思える。申請者は、昆虫であることの有用性を引き出すようなバイオミメティックでエネルギー効率が高いアプローチの可能性を模索することも工学的に有用ではないかと考えた。つまり、超小型センサノード単体が限定的な能力しか持ちえないのであれば、超小型であることを活かして多数ばらまき、生物的つまりアナログ的に相互作用させて機能を創発させ、システム全体を一つの生物体のように振る舞う、いわゆる「超個体」にすることを目指せば良いのではないかと考えた。この研究の第一歩として、超小型無線ノードの実用化のネックになっている無線通信機能の向上の可能性を、無線ノードとシステムの構成法、協調動作させる仕組みの研究を通して追求したい。

2. 研究の目的

最終目標は、超小型なセンサノードと無線ノードの群が相互作用してセンシングや無線通信、群知能的振る舞いをする「超個体システム」を実現することである。究極はパウダー状のノード群の実現であり、センシング・通信機能を有する塗料や材料の創生に貢献できる。本申請では、微小ノード群を協調動作させてセンサデータをメートルオーダの距離で無線伝送させるための回路・システム設計論の体系化を目的とする。具体的には、①複数の無線ノードが出力する微弱信号の位相を自動的に同期するようにしてフェイズドアレイ技術のように空間内で合成し高出力化する手法(高出力化技術)と、②中継器の役割を担う無線ノード同士を相互に同期・協調動作させてアドホック通信する技術(アドホック通信技術)を研究する。①のようにノード同士が強く同期するとセンサノードの信号に集団同期しなくなる可能性があるため、結合強度を回路的に制御できる②の中継器を入れる構想である。

3. 研究の方法

微小無線ノード群を協調動作させてセンサデータをメートルオーダの距離で無線伝送させるための回路・システム設計論の体系化を目指す。共通する検討課題は、意図する機能が創発するようになるためのアーキテクチャ、アンテナ/コイル特性・結合度、周波数、無線信号電力・変調方式などの条件を理論的・実験的に明らかにすることである。一般的に利用できる設計論を構築し、実際のシステムとして動作を実証するところまでを目指す。本申請では無線通信技術に特化し、発電技術は含めずに外部から電源を供給する。センサ回路部は申請者が開発済みの技術を活用する。アナログ/RF 回路かつ非線形回路の研究であるためシミュレーションで全ての条件を網羅できないことがリスクである。したがって、理論計算から試作・測定、モデルや解析手法の改良といったサイクルを毎年繰り返すことにより研究の完成度を高める。検討の取り掛かりとして申請者らの成果である CMOS 発振回路の結合表現式を活用して同期する条件を概算し、MATLAB や回路シミュレータによる詳細な解析を進める。シミュレーションや測定は申請者が保有している設備が利用可能であるが、微小な無線ノードを実装するための集積回路(CMOS, 180nm プロセス)の製造や部品実装は外注する必要がある。電磁波による無線通信の実験を行う場合は、電波法を遵守するために申請者が保有するシールドボックス内で実施する。

4. 研究成果

本研究では実デバイスの試作を行うことから、具体的なセンシング対象を定めることとし、まずは農地のような広大なフィールドにおける多点の温度や照度の統計的なデータを収集することを想定した分散システムを題材として考えることとした。また、最近得られた研究成果をもとに、カオス発振器を結合させることにより意味のある集団動作が発現するというアイデアを試すことにした。図1のように、1つのトランジスタと、2つのインダクタ、1つのキャパシタ、1つの抵抗で構成される単純な発振器が光強度に応じた反応を示すように、その電源を小型ソーラパネルで供給し、1つのインダクタは他のデバイスと磁気結合するように設計した。さらに、デバイス群を外部から刺激するための大きなコイルを有するエキサイター回路を近接させることにした。これらの相互作用を解析するためにノード群をモデル化し、回路パラメータなどの条件に応じた回路動作を求められるようにした。さらに、コイル間の距離や回路設定、照度を変え

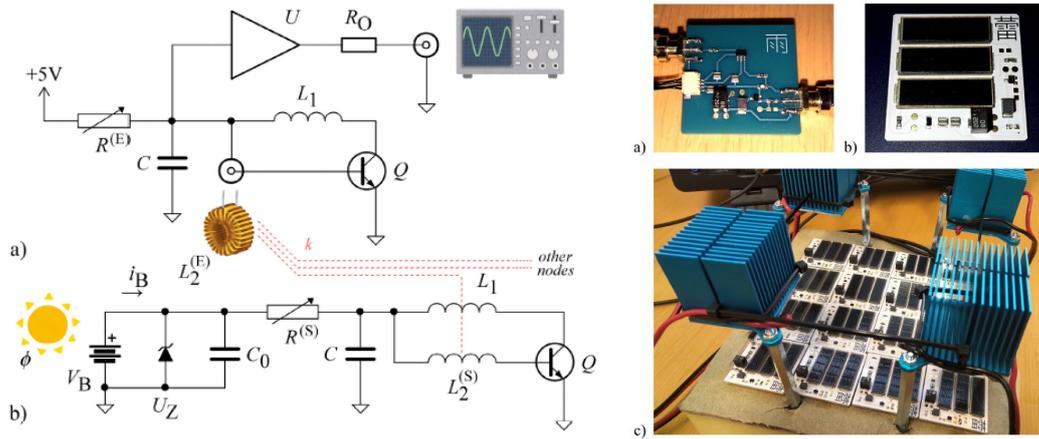


図 1：カオス発振器の回路図と実験の様子（出典：L. Minati, et al., IEEE Access, pp.36536-36555, Vol. 8, 2020.）

た場合など様々なシナリオにおける動作を解析した。また回路を試作し、実測により、同期の増加や散逸、ノード間でのリレー効果を観測することに成功した。さらに、設定によっては、エキサイターからの励起信号によりノード間の同期を強化あるいは妨害できることを確認した。つまり、外部励起によってノード群の隠れたダイナミクスを観察できる可能性を見出すことができた。

上述したように、エキサイターからの励起信号を活用することにより同期の強化や隠れたダイナミクスが観測できる可能性を見出したことから、微小ノード間の無線信号の反射を活用して群全体から放射される信号強度を高める方法や、群全体のバックスキタリングによる無線通信をするための基礎技術を研究した。まずは一つのノードが反射する信号レベルを高めることができる条件を計算し、図 2 のようにアンテナ側の基準インピーダンスを高くすることで反射信号レベル（変調波のパワー）を改善できることを明らかにした。例えば、基準インピーダンスを従来の $50\ \Omega$ ではなく $550\ \Omega$ に高めることができれば約 $10\ \text{dB}$ 程度のリンクバジェットの改善が期待できる。さらに、発振器型センサの出力信号で反射係数を変調する方式において、ノード単体で期待しうる消費電力・センシング分解能・感度・信号帯域幅の関係を定式化することでトレードオフを見通した設計を可能にした(図 3)。これらのモデル式と測定値が良く一致することを確認した。また、発振器型センサ回路の性能向上が不可欠であるため、スロープブースト方式を用いた弛張発振器型センサ回路を発明した。180 nm Si CMOS プロセスによる試作・評価(図 4)の結果、430 nW の低消費電力動作、0 から 197 pF のワイドレンジ動作、710 aF の分解能を達成した。従来の発振器型セ

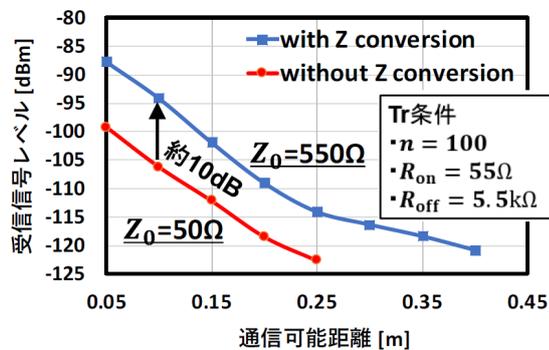


図 2：インピーダンス変換回路の効果（出典：渡邊 伊織, 東京工業大学 工学院 修士論文, 2021）

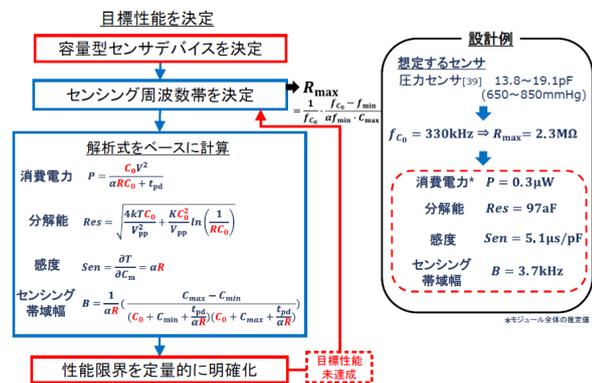


図 3：設計フローチャート（出典：渡邊 伊織, 東京工業大学 工学院 修士論文, 2021）

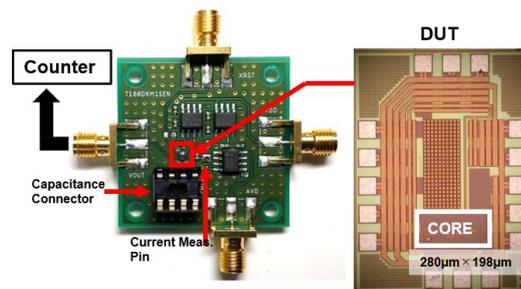


図 4：発振器型センサ回路（出典：R. Onishi, et al., ASP-DAC2021）

ンサ回路と比較して優れたエネルギー効率と分解能を有していることを確認した。さらに、弛張発振器型センサ回路についてドリフトの原因特定と改善方法検討のためにプリント基板を作成した。発振周期と温度特性の関係を実測した結果から、温度依存性を補正することでドリフトを改善できることを示した(図5)。発振器型センサ回路技術を活用した極低消費電力無線センサチップを180nm Si CMOS プロセスで設計・製造した。各ノードに用いられる発振器型センサ回路のノイズ性能を改善するための電圧積分フィードバック技術(図6)を開発した。180nm Si CMOS プロセスで設計し、実測の結果、2.12ppmの容量分解能を7.52マイクロワットの消費電力で達成した。

本研究で扱う分散型センシングの実際のアプリケーションを考えた場合に、超小型無線センサ同士が相互作用できないケースも考えることから、これまでの研究を発展させて、カオスダイナミクスも利用する方法を発明した。この方法では、まず、各センサをカオス発振器に接続し、測定値に依存する周波数を含む送信信号を生成する。小さなニューラルネットワークを介して、信号のスペクトルの重ね合わせを考慮することにより、センサの母集団における平均値など測定値の統計的分布の側面をニューラルネットワークで推定する(図7)。この手法を理論的かつ実験的に検証した。

さらに、カオス発振器を用いたセンサノード同士をアナログ的に結合させて統計的な情報をセンシングする手法について、無線通信における周波数帯域の制約(アンテナの帯域や電波法等による帯域の規制)により広帯域なカオス信号をそのまま無線伝送することが不可能であることから、帯域制限されたカオス信号による同期の可能性を研究した。その結果、狭帯域なスペクトルでも同期が可能であることを示し(図8)、一方で帯域の中心周波数と幅が重要であることが分かった。多くの解析手法を用いて、ある領域ではスレーブ発振器の活動が帯域の設定に明確に追従し、他の領域では、異なる、より複雑な効果が現れることを確認した。また、このようなカオス発振器同士が結合したネットワークにおける同期の挙動について研究を深め、カオスダイナミクスにおける「不完全な同期」のもとで起こる創発・パターン形成現象をリザーバーコンピューティングに利用することを提案した(図9)。

以上より、微小ノード群を協調動作させてセンサデータをメートルオーダーの距離で無線伝送させるための回路・システム設計論の体系化を目的として研究を進め、相互結合したカオス発振器の群

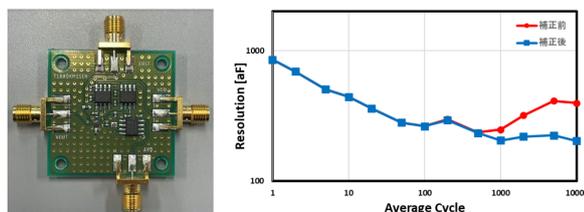


図5: ドリフト改善の検討(出典: 大西 遼, 東京工業大学 工学院 修士論文, 2022)

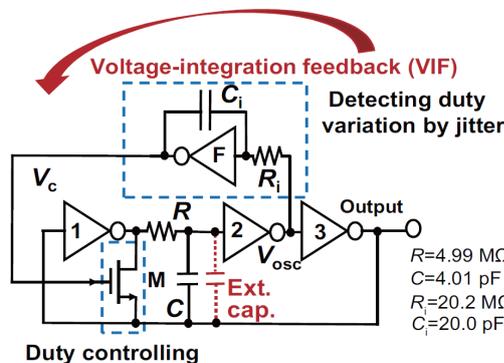


図6: 電圧積分フィードバック技術を用いた発振器型センサ回路(Z. Li, et al, JJAP, 62 SC1096, 2023)

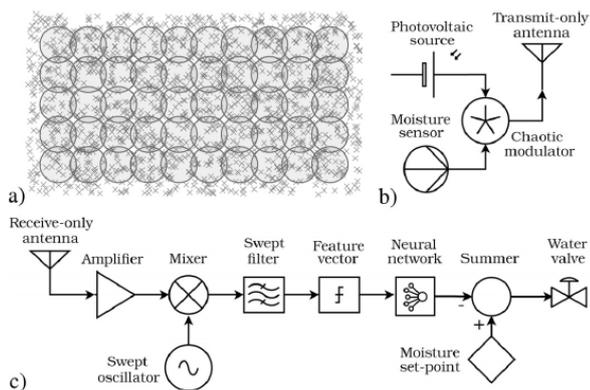


図7: 精密灌漑への応用を想定したコンセプト。(出典: L. Minati, et al., Chaos, Solitons and Fractals, 155 (2022) 111749)

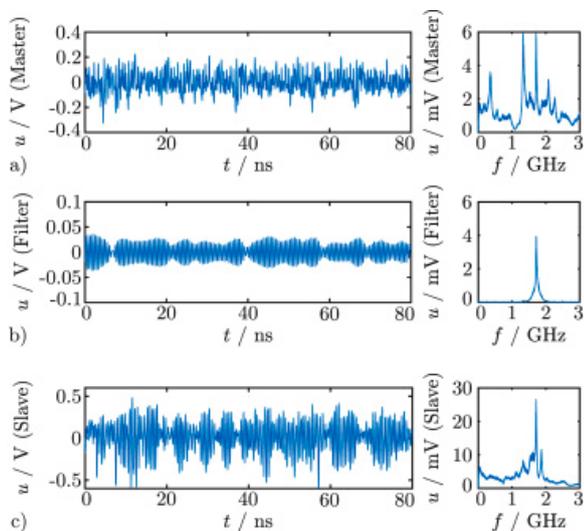


図8: 狭帯域な伝送路によるカオス発振器間の結合(出典: L. Minati, et al., Chaos, Solitons and Fractals, 165 (2022) 112854)

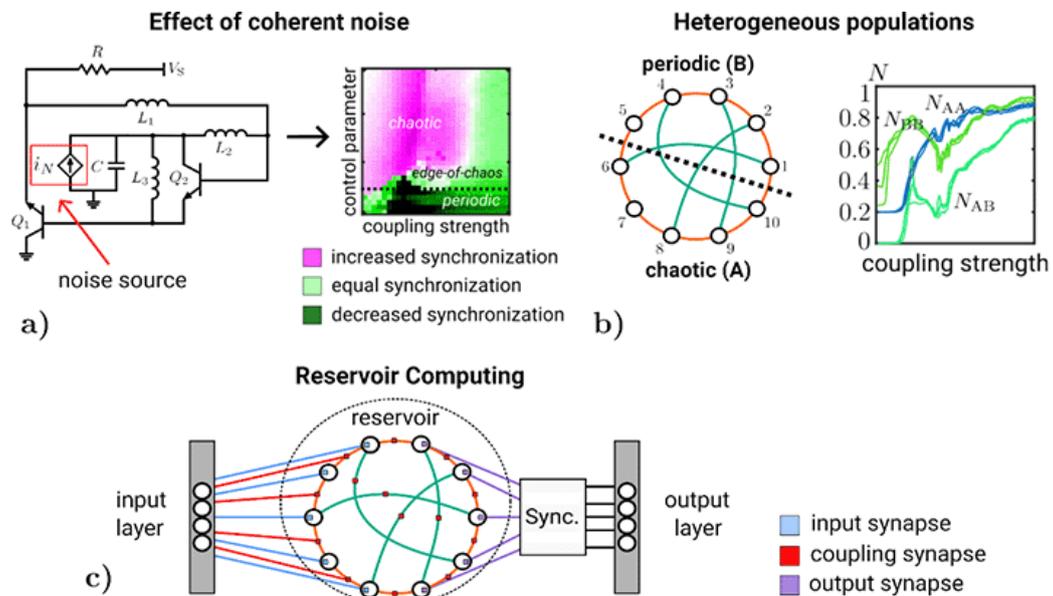


図 9：ネットワークの同期現象に及ぼすコヒーレントノイズとヘテロジニアスな集団の影響と物理的リザーバーの提案（出典：<https://www.titech.ac.jp/english/news/2022/064682>）

によるセンシング手法や、低雑音・低消費電力な発振器型センサ回路と、それを活用した無線通信ノードの成果が得られた。したがって、研究目的を概ね達成することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Ludovico Minati, Korkut Kaan Tokgoz, Hiroyuki Ito	4. 巻 155
2. 論文標題 Distributed sensing via the ensemble spectra of uncoupled electronic chaotic oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 111749 ~ 111749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2021.111749	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 該当する
1. 著者名 LUDOVICO MINATI, KORKUT KAAN TOKGOZ, MATTIA FRASCA, YASU HARU KOIKE, JACOPO IANNACCI, NATSUE YOSHIMURA, KAZUYA MASU, AND HIROYUKI ITO	4. 巻 8
2. 論文標題 Distributed Sensing Via Inductively Coupled Single-Transistor Chaotic Oscillators: A New Approach and Its Experimental Proof-of-Concept	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 36536 ~ 36555
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.2976139	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 該当する
1. 著者名 Ludovico Minati, Jim Bartels, Chao Li, Mattia Frasca, Hiroyuki Ito	4. 巻 162
2. 論文標題 Synchronization phenomena in dual-transistor spiking oscillators realized experimentally towards physical reservoirs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 112415 ~ 112415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2022.112415	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 該当する
1. 著者名 Ludovico Minati, Boyan Li, Jim Bartels, Zixuan Li, Mattia Frasca, Hiroyuki Ito	4. 巻 165
2. 論文標題 Incomplete synchronization of chaos under frequency-limited coupling: Observations in single-transistor microwave oscillators	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chaos, Solitons & Fractals	6. 最初と最後の頁 112854 ~ 112854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chaos.2022.112854	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 該当する

1. 著者名 Zixuan Li, Sangyeop Lee, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito	4. 巻 62
2. 論文標題 Low-power and high-resolution capacitance sensing using CMOS inverter-based RC oscillator by employing voltage-integration feedback	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1096 ~ SC1096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acbd58	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 -

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Ryo Onishi, Koki Miyamoto, Korkut Kaan Tokgoz, Noboru Ishihara, Hiroyuki Ito
2. 発表標題 Capacitive Sensor Circuit with Relative Slope-Boost Method Based on a Relaxation Oscillator
3. 学会等名 The 26th Asia and South Pacific Design Automation Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Korkut Kaan Tokgoz, Ludovico Minati, Hiroyuki Ito
2. 発表標題 Current-Starved Chaotic Oscillator Over Multiple Frequency Decades on Low-Cost CMOS
3. 学会等名 The 26th Asia and South Pacific Design Automation Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊伊織, 石原 昇, 伊藤 浩之
2. 発表標題 インピーダンス変換回路によるRFバックスキッピング信号レベルの改善
3. 学会等名 短距離無線通信研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 伊織, 石原 昇, 伊藤 浩之
2. 発表標題 インピーダンス変換回路による RFバックスキュタリング信号レベルの改善
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Finding Order Using Chao https://www.titech.ac.jp/english/news/2022/064682 The whole in a part https://www.titech.ac.jp/english/news/2022/065324 Just Listen to the Chaos https://www.titech.ac.jp/english/news/2022/062916 Many Buds to a Blossom https://www.titech.ac.jp/english/news/2020/046529

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
---------	---------