

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：32692

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K23352

研究課題名（和文）人形インタラクション：経験的モード分解と深層学習を用いた人型AIロボットデザイン

研究課題名（英文）Interaction between Humans and Puppets: Humanoid Robot Design using Empirical mode decomposition and Deep learning

研究代表者

董 然 (DONG, Ran)

東京工科大学・コンピュータサイエンス学部・助教

研究者番号：80879891

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：人形浄瑠璃では、人形使いが世界で例を見ない操作方法を用い、その動きは世界で最も美しい感情表現動作と賞賛されている。これが実現できているのは、人形が義太夫節（義太夫と三味線）と呼ばれる日本独特な音楽形式に合わせて物語を演じるという伝統芸能技法を使っているからである。本研究はヒルベルト-ファン変換を用いてその技法に重要とされる序破急の視点から、周波数領域での感情表現解析手法を提案した。また、抽出された特徴量を用いて深層学習のトレーニングデータとするロボットモーション生成手法を開発した。さらに、本研究で開発した手法を融合分野にも応用し、異なる分野での非線形問題にも貢献できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、初めて「音×動き×序破急メカニズム」の視点から、伝統芸能の動きを周波数領域空間で解析を行った。序破急という非決定論的日本伝統芸能メカニズムを用いることにより、人工情動知能アシスタントと連動できるコミュニケーションAIのインタラクション手法の確立に寄与できる。本研究が実施した伝統芸能からのロボット創造は、現在世界に注目されている日本文化や日本の感性のテクノロジーを世界へ発信できる学術研究として期待できると同時に、これまでのAIアシスタントの普及を妨げてきた、対人感覚の欠如を改善し、利用の広がりを飛躍的に進める可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In Ningyo Joruri (puppet theater), the puppeteers use an unparalleled method to manipulate one puppet, and their movements have been praised as the most beautiful emotional expressions in the world. This is made possible by the use of a traditional performing technique in which the puppeteers perform the story to synchronize a Japanese musical form called Gidayu-bushi (Gidayu and Shamisen). In this study, we proposed a method for analyzing emotional expressions in the frequency domain from the viewpoint of Jo-Ha-Kyu that are considered important in this technique using the Hilbert-Huang transform. We also developed a robot motion generation framework that adopts the extracted features as training data for deep learning. Furthermore, we were able to apply the method developed in this study for interdisciplinary fusion and contribute to nonlinear problems in different fields.

研究分野：インタラクション

キーワード：経験的モード分解 ロボット インタラクションデザイン 序破急 伝統芸能 人形浄瑠璃

## 1 . 研究開始当初の背景

何気ない相互のインタラクションとコミュニケーションを通じて、人間がどのように感情を形成するかは未だに解明されていない点が多い。特に、人とロボット等のコミュニケーションをする場合、AI アシスタントの外観と動きを人間に似せれば似せるほど、不気味の谷と呼ばれる不快現象が生じる。不気味の谷とは、ロボット等の人工物が人間に似るほど、人に不快感を与えてしまう現象を指す。不気味の谷現象は、ロボット工学者の森政弘らによって提唱された仮説であり[1]、2015年に Maya B. Mathur らの心理学者によって実在であることを検証された[2]。この不気味の谷現象は、現実の人工物のみならず、バーチャル世界のCGキャラクターなどにも存在している。そのため、人とロボット、CGキャラクター(ボーカーロイド)等とのインタラクションデザインは、クリエイターにとって最も苦勞する部分であり、試行錯誤に頼っていることが多い。

日本伝統芸能であるユネスコ無形文化遺産「人形浄瑠璃文楽」は、3人の人形遣いが一体の人形を操作し、義太夫と三味線使いが義太夫節と呼ばれる音楽により物語を語り、三業一身で舞台を構成し、不気味の谷現象を克服できると提唱されている[1]。これが実現できているのは、文楽人形の独特なカラクリに基づいた所作と呼ばれる動きでキャラクターを演じ、義太夫と三味線使いが日本の伝統芸能の基本理念である「序破急」を用い、義太夫節と呼ばれる音楽形式で物語りしながら、三業一身で舞台を構成しているからである。

本研究では、この日本独特の三業により、観客に叙情的に感情移入させる伝統芸能の洗煉された舞台構成原理(序破急:テンポとリズムの変化)を瞬時周波数領域において抽出する。抽出された特徴量を深層学習でAIに学習させ、不気味の谷現象を超えられる人型AIアシスタントのインタラクションデザイン法の確立を目指す。また、経験的モード分解を用いて提案した解析手法の汎用性が高く、他分野への応用もできるため、融合分野への適応も容易であると考えられる。

## 2 . 研究の目的

以上の背景から本研究の目的は下記の3点とした。

### (1) 音×動き×序破急メカニズムにおける人形浄瑠璃の感情表現を物理的・数学的に解明する

義太夫の語りに関わった浄瑠璃人形の所作は叙情的で、観客が人形浄瑠璃に感動し、涙を流すことがあるほど、強い感情移入が起るといわれている[3]。これが実現できているのは、日本の伝統芸能の基本理念である「序破急」を用い[4]、人形、義太夫、三味線の三業一身で舞台を構成しているからだと思われる。その序破急に基づいた人形の所作データを経験的モード分解を用いて瞬時周波数領域で解析する。

### (2) 周波数領域でのロボットモーション生成手法を提案する

所作の感情表現の特徴量は、瞬時周波数領域の高周波成分に多く含まれると考える。瞬時周波数領域に抽出された特徴量を、深層学習を用いてAIに学習させることで、感情表現のある動きの自動生成を目指す。

### (3) 提案した経験的モード分解を用いた解析手法を分野へ適応する

本研究で開発した解析手法はモーションのみならず、融合分野にも応用できたため、他分野への融合を行う。

## 3 . 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、本研究は以下の方法で行った。

### (1) 周波数領域における人形浄瑠璃の感情表現メカニズム解析・抽出

人形浄瑠璃の基本所作には、<型>と呼ばれる美しいプリミティブがあり、義太夫節に合わせて演じられる。本研究では、人形浄瑠璃の三業一身の相対的インタラクションメカニズムを解明するため、人形の動き(型)と義太夫節の音を、学習に必要な量で高精度にキャプチャにした。キャプチャされた義太夫と三味線の音と、それに合わせた細かい感情表現の動きに対して、経験的モード分解を用いて、周波数領域で解析を行い、人形浄瑠璃のインタラクションメカニズムを深層学習で可能な非線形モードに分解した。

また、伝統芸能の所作は、義太夫節にリードされて表現するものであるため、義太夫のストーリーが序破急を作る鍵だと言えよう。義太夫と三味線のテンポこそが、序破急を作る重要なファクターであるため、回帰型ニューラルネットワーク(RNN: Recurrent Neural Network)を用いたビート推定を使用し、音のテンポをデータ化した。義太夫と三味線の音声からのビート抽出作業に関しては、ビート認識ライブラリ「madmom」[5]を用いて序破急を抽出した。また、抽出された序破急を検証するため、西洋音楽に基づいて作成したPerfumeのダンスとの比較を行った。

## (2) 経験的モード分解と深層学習を併用したロボットモーションデザイン手法の提案

感情表現のインタラクションを自動生成するため、深層学習を用いて AI に学習させる必要がある。そこで、本研究は解析した序破急メカニズムを用いて、義太夫、三味線とモーションのリンクを学習し、序破急の感情表現マニフォールドを抽出した。

経験的モード分解で抽出した非線形周波数成分の高周波部分、感情表現の些細な動き（セカンダリモーション）を学習させることにより、モーションを強化する形（スタイライゼーション）で、インタラクションを作ることができる。これにより、機能を実現する（プライマリモーション）しか、ほとんどデザインされていないロボットのモーションを、より人間に近い、しなやかさのある動きを生成できる手法を提案した。

## (3) 経験的モード分解を用いた解析手法を他分野へ融合

本研究が用いる経験的モード分解という手法は、フーリエ変換やウェレット変換より非線形性質を捉えることができるため、電磁界解析と感染症対策への応用も試みた。

## 4. 研究成果

本研究は下記の研究成果が得られた。

### (1) 周波数領域における人形浄瑠璃の感情表現メカニズム解析・抽出

日本の伝統芸能である人形浄瑠璃は、独特の構造で感情を表現している。そのため本研究では、人形浄瑠璃の序破急メカニズムを解析し、瞬間周波数領域でのその特徴量（メカニズム）を明らかにした。図 1 が示しているのは、人工知能を用いて音声データからビートを抽出した結果である。本研究は日本独特な序破急を解明するため、西洋音楽のメカニズムを用いた Perfume のダンスとの比較実験を行った。図 1(a) の人形浄瑠璃のビート抽出から確認できるように、人形浄瑠璃の音声のテンポはいつも変化しているのが分かる。それに対して、図 1(b) が示すのは Perfume の音楽のビートは、西洋音楽のメカニズムに基づいて作ったため、ビートがほぼ変化していないことが分かった。

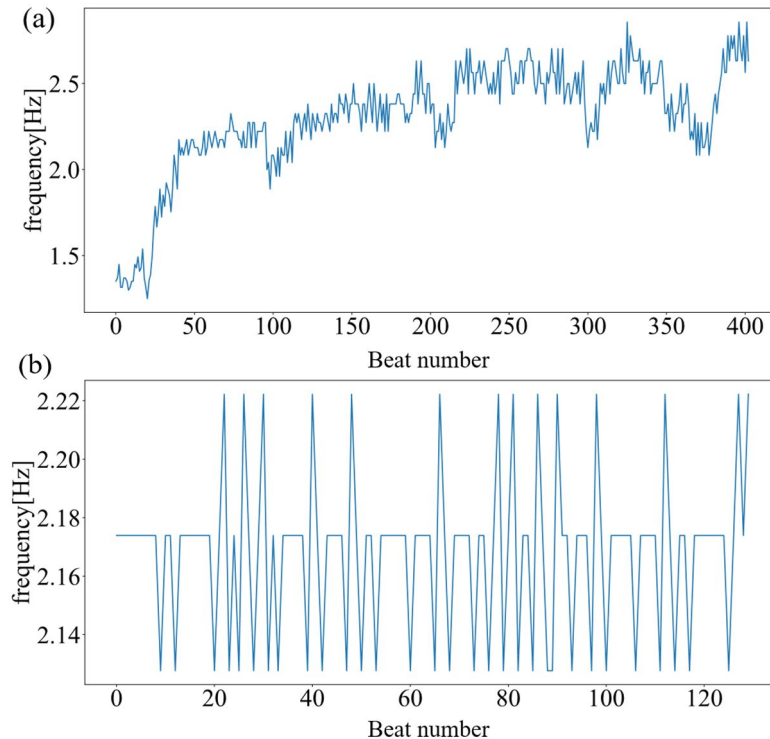


図 1 RNN ライブラリ madmom を用いたビート抽出

(a) 人形浄瑠璃文楽 (b) Perfume dance

次に、それぞれのモーションに対して周波数領域での解析を行った。図 2 が示しているのは、人形浄瑠璃文楽と Perfume dance の経験的モード分解を用いた瞬時周波数領域解析のスペクトラムである。人形浄瑠璃文楽のモーションは音声のテンポに同期し、序破急を作っていることが、図 2(a) から確認できる。それに対して、Perfume の動きは、西洋音楽のビートに同期し、2Hz 前後に集中していることが、図 2(b) から判明した。

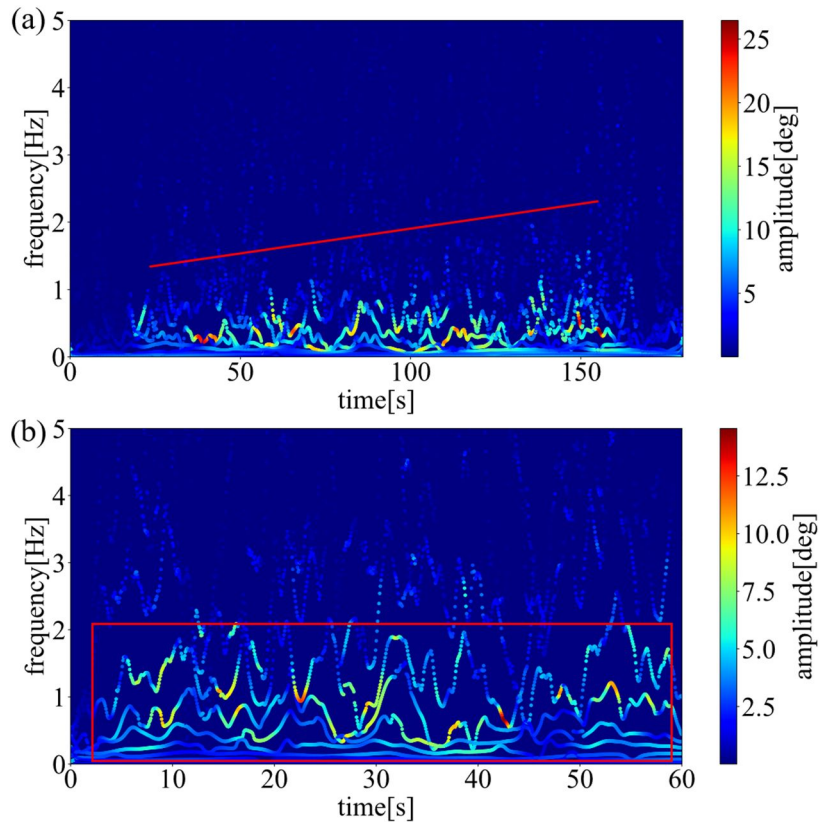


図2 経験的モード分解を用いた瞬時周波数領域解析

(a) 人形浄瑠璃文楽 (b) Perfume dance

以上をまとめると本研究項目では、序破急をベースにした日本の伝統芸能を分析した。序破急は、観客と交流するための人形浄瑠璃で使用される伝統芸能のアートコンセプトである。まず、モーションキャプチャシステムを使用して、人形のモーションとその音楽を採取した。次に、人形の動きを西洋舞踊のPerfumeと比較し、深層学習を使用して変化するテンポを検出し、序破急のメカニズムを示すことができた。このように、本研究から得られた序破急に基づく文楽人形技法は、感情のあるインタラクションデザインに貢献できると考えられる。

## (2) 経験的モード分解と深層学習を併用したロボットモーションデザイン手法の提案

モーションキャプチャシステムを使用したヒューマノイドロボットのモーション実装は、通常、人間のような動きを実現するためのキーフレーム手法に基づいている。抽出されたキーフレーム間でキャプチャされたデータを補間することにより、ロボットはモータの最高速度制限の問題を解決して、ささやかな動きを捨てることで、大まかな人間の動きを再現できる。しかしながら、キーフレーム方式を使用すると、微妙な感情表現の動きが不足する可能性がある。これは、不気味の谷現象を引き起こす原因にもなるため、ヒューマノイドロボットに人間の繊細な動きまで実装することが極めて重要である。

この研究項目では、モーションキャプチャデータを使用したロボットモーション実装のためのキーフレームレス手法を提案することである。実装されたロボットの動きを生体力学的に分

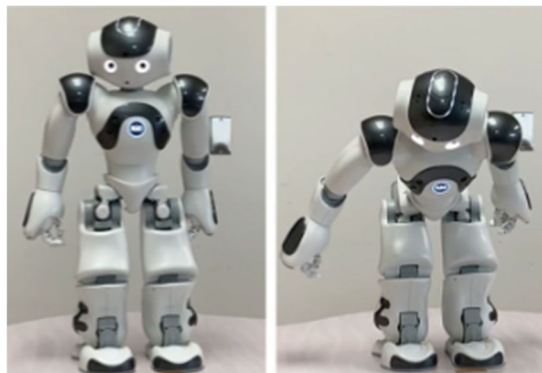


図3 経験的モード分解を用いたロボットモーション実装

析するために、多変量経験的モード分解(MEMD: multivariate empirical mode decomposition)を使用し、これらのデータを周波数領域の非線形モードに分解した。ヒルベルトモーションスペクトルの分析によると、モーションキャプチャデータの各フレームを使用する場合の最大モータ速度の制限問題を解決するために、高周波成分を除去できることが明らかになった。図3が示しているのは、経験的モード分解を用いたロボットへの実装結果であり、モータが正常に作動しながら、最大限度で人間の細かい動きを表現しているのが分かる。この結果を用いることで、経験的モード分解を用いたロボット実装法が有用であることを検証できた。

次に、ロボットモーションの細かい動きを自動的に生成させるために、深層学習に基づく非線形モードの自動生成フレームワークを提案する。本研究項目の方法は、多変量経験的モード分解を使用して人間の動きを基本的な動き(プライマリモーション)と繊細な動き(セカンダリモーション)に分解し、オートエンコーダ生成ネットワークを使用し、それらの間の生体力学的関係をAIに学習させる。実験結果は、生成ネットワークによってより人間に近い現実的な動きの特徴を学習することができ、図4が示すように、ロボットの無機質な動きに対し、生体力学に基づいた繊細な動きをロボットに追加することによって、ロボットのリアリズムを高めることができることを示した。

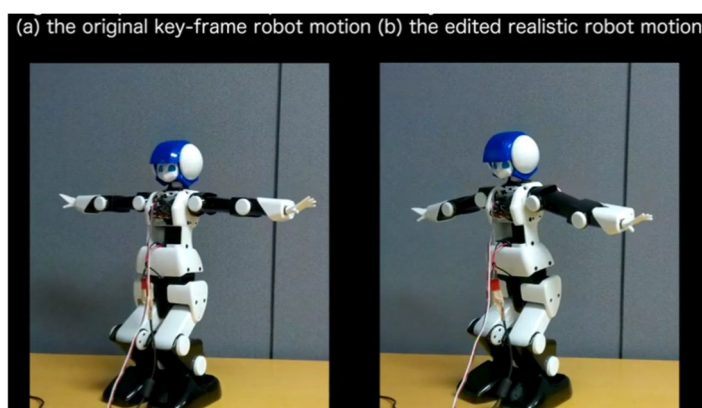


図4 経験的モード分解と深層学習を併用したロボットモーション生成

### (3) 経験的モード分解を用いた解析手法を他分野へ融合

本研究では、感情表現モーションの解析と自動生成以外に、他分野への融合成果も得られた。電磁界解析の研究項目では、タンゲステン表面のファズ構造をまず、ランダムフラクタルに基づくアルゴリズムを使用して人工的に生成した。次に、有限差分時間領域法を使用して、フラクタル次元サイズが異なるファズ構造での電磁波の伝播をシミュレーションした。ファズ構造周辺の電磁浸透と反射を分析するために、本研究が提案した解析手法を用いて、3次元経験的モード分解に基づいた空間周波数領域でのファズ構造の光学性質を調べた。

また、電磁界解析以外に、疫学への応用も行った。東京都のCOVID-19新規感染者に、本研究で提案した解析手法を適用し、経験的モード分解に基づいた瞬時周波数解析を行った。その結果、分解された非線形モードに疫学的な意味を解明した。これらの非線形モードを監視と分析することにより、COVID-19の蔓延を阻止するための公衆衛生および社会的対策を評価し、瞬間周波数領域で定量的に視覚化することができると考えられる。

#### <引用文献>

- [1] Mori, Masahiro, Karl F. MacDorman, and Norri Kageki. "The uncanny valley [from the field]." IEEE Robotics and Automation Magazine, 19.2, (2012): 98-100.
- [2] Mathur, Maya B., and David B. Reichling. "Navigating a social world with robot partners: A quantitative cartography of the Uncanny Valley." Cognition 146 (2016): 22-32.
- [3] Invitation to UNESCO Intangible Cultural Heritage Bunraku [Internet], Culture Digital Library. Japanese. Available from: <http://www2.ntj.jac.go.jp/unesco/bunraku/jp/introduction/index.html>
- [4] Akira Tanba, The Musical Structure of No, TOKAI UNIVERSITY PRESS, 1978.
- [5] Bock, S., Korzeniowski, F., Schluter, J., Krebs, F., and Widmer, G. (2016, October). Madmom: A new python audio and music signal processing library. In Proceedings of the 24th ACM international conference on Multimedia (pp. 1174-1178).

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 3件）

1. 著者名 Dong Ran, Cai Dongsheng, Ikuno Soichiro	4. 巻 20
2. 論文標題 Motion Capture Data Analysis in the Instantaneous Frequency-Domain Using Hilbert-Huang Transform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6534 ~ 6534
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20226534	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 Dong Ran, Chang Qiong, Ikuno Soichiro	4. 巻 in press
2. 論文標題 A deep learning framework for realistic robot motion generation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Computing and Applications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00521-021-06192-3	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 Dong Ran, Fujita Yoshihisa, Nakamura Hiroaki, Ikuno Soichiro	4. 巻 in press
2. 論文標題 Electromagnetic Penetration and Reflection Analysis in Fractal Structures using Three-dimensional Empirical Mode Decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2022.3161997	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 Dong Ran, Ni Shaowen, Ikuno Soichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Nonlinear frequency analysis of COVID-19 spread in Tokyo using empirical mode decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-06095-w	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 Dong Ran, Shigeta Daisuke, Fujita Yoshihisa, Ikuno Soichiro	4. 巻 9
2. 論文標題 Photonic Crystal Frequency Demultiplexer Design for Electromagnetic Wave using FDTD and MEMD	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 65 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.9.65	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 Hou Zhuo, Cai Dongsheng, Dong Ran	4. 巻 SIGGRAPH '21
2. 論文標題 Photonic Rendering for Hair Cuticles using High Accuracy NS-FDTD method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM SIGGRAPH 2021 Talks	6. 最初と最後の頁 1 ~ 2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3450623.3464678	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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 森下 貴康、董 然、阿部 邦美、生野 壮一郎
2. 発表標題 k段飛ばしMrR法の数値特性と並列化効率の数値的検証
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 重田 大祐、董 然、生野 壮一郎
2. 発表標題 MEMDを用いたフォトニック結晶内の電磁波周波数解析
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takayasu Morishita, Ran Dong, Kuniyoshi Abe, Yoshihisa Fujita, Soichiro Ikuno
2. 発表標題 Parallelization Efficiency of k-skip Mister R for Large Scale Linear System obtained from Electromagnetic Analysis
3. 学会等名 Compumag 2021 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 董 然, 藤田 宜久, 中村 浩章, 生野 壮一郎
2. 発表標題 フラクタル構造内電磁波伝播現象に対する三次元経験的モード分解を用いた空間周波数解析
3. 学会等名 第30回MAGDAコンファレンス (MAGDA2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 董 然, 生野 壮一郎
2. 発表標題 経験的モード分解を用いた東京都 COVID-19 新規感染者のトレンド解析
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 董然, 生野壮一郎
2. 発表標題 多変量経験的モード分解を用いた電磁波瞬時周波数解析と可視化
3. 学会等名 2020年度非線形問題の解法と可視化に関する研究会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 森下貴康, 董然, 生野壮一郎
2. 発表標題 残差履歴に応じて適応的に収束改善をするk段飛ばしMrR法の検討と評価
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス (MAGDA2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 董然, 重田大祐, 生野壮一郎
2. 発表標題 時間発展電磁界解析に対する経験的モード分解の適用可能性の検討
3. 学会等名 第29回MAGDAコンファレンス (MAGDA2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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