

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 8 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05864

研究課題名(和文) 神経振動子を組み込んだアクティブ動吸振器群による分散型制振ネットワークシステム

研究課題名(英文) Structural vibration control network using active mass dampers controlled by neural oscillators

研究代表者

射場 大輔 (Iba, Daisuke)

京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授

研究者番号：10402984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：動物の歩行や羽ばたき運動に深く関連するとされる神経振動子の数学モデルをアクティブ動吸振器の制御に組み込む方法について検討した。これまでに神経振動子と位置制御器を組み込むことで動吸振器が有する問題、補助質量のストローク制約を考慮して制振する方法を提案したが、本研究ではさらに位置制御器のゲインを設計する方法および滑らかな補助質量の目標変位の生成方法について検討した。また、構造物の複数の振動モードを制振するための制御方法についても提案を行った。そして、対故障性やロバスト性能を満足するシステムを開発するため、神経振動子群から構成されるネットワーク構造についての基礎検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a new active mass damper system consisting of a neural oscillator model, which plays a significant role in biological locomotion, and a position controller to solve a serious disadvantage about the stroke limitation of the auxiliary mass of the active mass damper. The objective of this study was to improve the vibration control performance of the proposed active mass damper system by designing control gains of the position controller and generating smooth desired displacement of the auxiliary mass. Additionally, we proposed a control method for reducing multiple vibration modes of high-rise structures. Furthermore, to improve the robust and anti-failure performance of the proposed system, we investigated basic properties of network structures consisting of a swarm of neural oscillators.

研究分野：機械力学，振動工学，計測制御，機械要素，ヘルスマニタリング

キーワード：動吸振器 制振 アクティブ制御 神経振動子 ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

高出力・軽量・低コスト・高効率化が進む機械及び、高層化・長大化が進む建築・土木構造物の振動制御問題は時代が進むとともにますます深刻な課題となっている。特に、地震が多発する我が国において建築構造物の振動エネルギーを適切に消散させることは非常に重要な問題である。こうした問題に対してパッシブ制御やセミアクティブ・アクティブ制御に関する研究が活発に行われてきたが、横浜ランドマークタワーに代表される高層構造物には風や小・中規模の地震によって発生する振動を速やかに低減させるため、アクチュエータを伴うアクティブ動吸振器を構造物上部に設置する対策が取られてきた(図1)。しかし、大地震が発生した際には、従来の制御法では動吸振器に与える制御力が過大となり、動吸振器の質量を制限された範囲に収めて動作させることができなくなる。また、地震によって構造物が損傷を受けた場合、その振動特性が大きく変化する恐れがあるため、設計した制御器のロバスト性も問題となる。そのため先の東日本大震災のような巨大地震の際には、折角の制振システムを、その能力を發揮させることなく完全に停止せざるをえないという現状がある。

一方で、生物の歩行に関する研究において神経振動子に注目が集まっている。動物の歩行にはその体内にあるリズム発生器が深く関わっているという生物学者による報告があり、例えば人間も神経振動子からの単純な命令で歩行という複雑な動作をロバストに行うことが可能であるとされ、この原理を利用したロボットの歩行に関する研究が盛んに行われている。それらの研究では歩行などの脚式移動を対となる脚の振動現象と捉え、外部環境の影響を受ける左右の二脚に同期する神経振動子モデルを作製し、その出力に合わせて脚を動作させる試みがなされている。例えば、神経振動子の出力を利用して生物を模擬した四足歩行ロボットの対となる二足のアクチュエータを逆位相で同期させ、センサ入力に対して適切な位相関係性を保持・生成できるように制御系を構成し、従来は非常に難しいとされていた不整地の走破に成功している。

こうした一見すると無関係な動吸振器による構造物の制振と脚式移動ロボットの歩行は、周期的な動作を必要とするという共通点を持つ。そこで申請者は、大地震の影響を受けて振動する構造物を、制限された範囲内で動作するアクティブ動吸振器によって制振することを目的とし、動吸振器の補助質量に与える適切な振動数と位相の関係を構造物の応答に同期しながら状態を変化させる神経振動子によって創成し、さらに神経振動子の出力に合わせて補助質量の位置を制御する機能を組み合わせた制御系の開発を始めた。これまでの成果として、地震入力を受ける1自由度構造物に同期して作動する神経振動子の開発に成功し(図2)、また、動吸振器と構造物が保つ

べき位相関係性を、エネルギー方程式の考察から導出、さらに神経振動子のリミットサイクルから事前に構成した振幅位相地図と現在の振動子の出力を比較することによって補助質量の移動量を決定する手法を開発した。そして神経振動子の出力に合わせてPD制御器により補助質量の位置をステップ状に変化させるシステムを開発し、数値計算により構造物の振動低減が実際に可能であることを示した。また、現在、構造物モデルとアクティブ動吸振器による実験装置を完成させており、実験によって提案したシステムの検証を行っている。

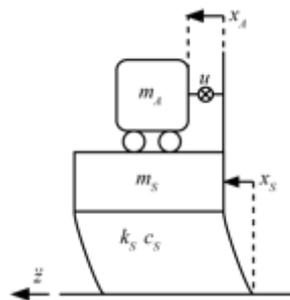


図1. 構造物と動吸振器



図2. 神経振動子と位置制御器を利用した動吸振器制御システムのブロック線図

2. 研究の目的

申請者らは、神経振動子と位置制御器(PD制御)を利用して地震入力を受ける構造物の振動を低減する制振ユニットの基本的な構成を提案し、実験によってその効果を示してきたが、構造物の制振性能を評価指標とした適切な位置制御系の選択指針及びその設計法はなかった。また、神経振動子による補助質量の目標値を生成する方法の提案をしてきたが、出力される目標値は矩形波として出力されていたため、補助質量を動作させる際にピーキーな制御力が発生し、制振性能を悪化させていた。また、神経振動子は、非線形振動子の特徴としての外部入力に対する同期特性から、入力周波数のゆらぎに対する適応性を備えているが、この性質から發揮される制振装置としてのロバスト性の評価を明らかにする必要があった。さらに実際の構造物を考慮した多自由度モデルを制振対象とした場合の複数の振動モードを同時に制振するシステム構成について検討する必要性があった。これには複数の神経振動子を用意し、それぞれの振動子が構造物のそれぞれの固有振動数に対して反応できるようにすることで対応が可能であると考えられるが、これまでにこれを考慮したシステムの構成を考えた例はなかった。さらにその発展として、複数の振動子がネットワークを構成した際に、すなわち、単一系から

ネットワーク系へ振動子の構成が展開された場合に、それによって得られるシステムの冗長性や相互接続による創発的な動作が制振性能に与える影響に関する研究は、申請者の知る限りでは皆無であった。

そこで今後の研究を進展させるために特に重要となる次の4つの課題の解決を本申請の研究開発期間で達成すべき目標とした。

- ① 制振性能の改善を目的とした位置制御系の設計
- ② 神経振動子からの滑らかな補助質量用の目標値生成
- ③ 神経振動子を組み込んだ制振ユニットのロバスト性の評価法
- ④ 複数神経振動子を利用した構造物の複数の振動モード制御法に関する検討
- ⑤ 複数の神経振動子から構成される制振ネットワークシステムの基礎的検討

3. 研究の方法

前述した研究の目的を達成するために、次のような方法で研究に臨んだ。

平成27年度

【研究1】位置制御器による制振性能の改善

これまでに申請者は、松岡の神経振動子と位置制御器を利用して制振システムユニットを構成したが、位置制御器のゲイン設計において通常のPD制御器のゲイン設計法を用いてきており、構造物・制御系からなるシステムの制振性能を評価指標として考慮してゲイン設計を行っていなかった。そこで、制振システムに組み込む位置制御器のゲイン設計に関する研究を行った。

平成28年度

【研究2】補助質量用の滑らかな目標値生成と定常応答解析による位置制御器のゲイン設計

これまでに神経振動子の出力を利用して、大小の矩形波形状の補助質量目標変位を生成してきた。構造物の応答に対して同期している神経振動子から比較的単純なアルゴリズムで目標変位の生成が可能であったが、目標値が切り替わるタイミングで大きなパルス波形が制御力に現れることが問題であった。そこで、神経振動子の出力を振幅と位相情報に分解し、その情報を元にして振動子がゼロクロスする瞬間に半周期分の正弦波を生成することで補助質量の目標値を出力するアルゴリズムを開発した。

さらに、新たに構成された目標変位生成器が組み込まれた制振システムに利用される位置制御器のゲイン設計問題に取り組んだ。目標変位が正弦波の形状をなしているため、動吸振器補助質量の運動を支配する方程式において正弦波が入力されるとし、その定常応答をPID制御器のゲインを含めた形で理論的に導出し、固有振動数に相当する振動数で振幅・

位相が適切な値となるような制約条件を与えることで位置制御器のゲイン設計を行う手法を提案した。

平成29年度

【研究3】複数の神経振動子を利用した多自由度構造物の制振

複数の固有振動数を有する構造物の振動を低減可能な動吸振器システムにするため、複数の神経振動子を備えた神経系を提案した。それぞれの神経振動子を構造物の固有振動数に合わせて用意し、その出力を利用して複数の振動モードを制振するために、1次モード用にはこれまでと同様の位置制御系を利用し、2次モード用には神経振動子の出力をそのまま制御力として用いる力制御系を用意した。これは、動吸振器の変位振幅が大きくなる低次モードにおいては補助質量のストローク制約を考慮することが重要になるため、従来の位置制御器による動作を用い、そして高次モードに対しては同じ位置制御系を用意すると低次と高次の目標変位を分解する必要がありシステムが複雑になるため、目標変位との偏差をフィードバック量として必要としない力制御系を用意した。また、ストローク制約の限界値付近で動作中の動吸振器が高次モード用の制御力によって制約条件を越えてしまわないように補助質量の変位に依存して力制御系の制御力を調整する関数を用意した。また、ストローク制約の限界値付近で動作中の動吸振器が高次モード用の制御力によって制約条件を越えてしまわないように補助質量の変位に依存して力制御系の制御力を調整する関数を用意した。

【研究4】複数の神経振動子から構成される制振ネットワークシステムの検討

構造物の複数の振動モードを同時に制振するために開発したアクティブ動吸振器による制振システムには構造物の固有振動数と同じ数の神経振動子を組み込んだ。制御器には低次モード用に位置制御器を、そして高次モード用に力制御器を導入したが、それぞれを振動子・制御器を完全に独立して動作させ、その出力を足し合わせた結果を利用する手法をとることはできなかった。単一で神経振動子を利用する場合と異なり、それぞれの振動子間での同期や協調動作などが重要な課題となることがわかり、神経振動子群のネットワークの構成方法や利用方法についての基礎検討を行う必要性がでてきた。ネットワーク構造を適切に設計して利用することで、将来的には構造物の複数の振動モードの制振システムについての設計法のみならず、複数の神経振動子が協調動作をすることでロバスト性能を保証できる制振システムやシステムの内部に発生した故障に対する耐性を向上させることが可能になる。

そこで、神経振動子による制振ネットワークを構成するための基礎的な検討を行うため

に固有振動数と入力ゲインが異なる神経振動子が外部の入力に対してどのような反応を示すか調査する研究を開始した。

4. 研究の成果

平成27年度

【研究1】位置制御器による制振性能の改善
 提案した制振システムでは、動吸振器の補助質量を目標位置まで移動させるにあたって、比例ゲインと微分ゲイン（制振時において補助質量がオーバーシュートによって可動範囲を超えないようにするため、仮想ダンパとして使用）を有するPD制御器を利用していた。しかしながら、通常的位置制御器としてのゲイン設計を行っており、特に微分ゲインは試行錯誤的に決定していた。そこで、より良い制振性能を発揮できるように、エネルギー吸収効率を評価指標に取り入れて適切な経路設計を行い、その経路に沿って補助質量が移動できるようにPID制御器の改善を行った（図3）。具体的には適切な経路に沿って動吸振器補助質量が動作するには目標値に対してオーバーシュートすることや、振動的な振る舞いを起こすことを避ける必要があるため、PIDゲインを含めた運動方程式から求められる補助質量の変位とその目標変位間の内積を評価指標としてその最大値を与えるPIDパラメータを探索した。そうして得られたPIDゲインを用いて構造物の制振に関する数値計算を行った結果、LQ制御器と同様の制振性能を有することが示された。また、当初目標としていた動吸振器の補助質量に対するストローク制約を簡単に設定できることを確認した。しかしながら、制御力にはピーク形状が見られ、最大制御力をLQ制御器と比較すれば効率が悪い制御器であることが確認できた。

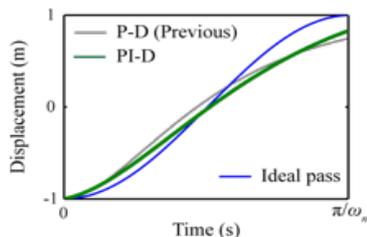


図3. 補助質量の経路設計とPIDゲイン設計

平成28年度

【研究2】補助質量用の滑らかな目標値生成と定常応答解析による位置制御器のゲイン設計

神経振動子の出力を振幅と位相情報に分解し、その情報を元にして振動子がゼロクロスする瞬間に半周期分の正弦波を生成することで補助質量の目標値を出力するアルゴリズムを開発した。これによって動吸振器補助質量の目標変位は滑らかに生成されることになり（図4）、制御力の最大値を大幅に低減できるシステムが得られた（図5）。

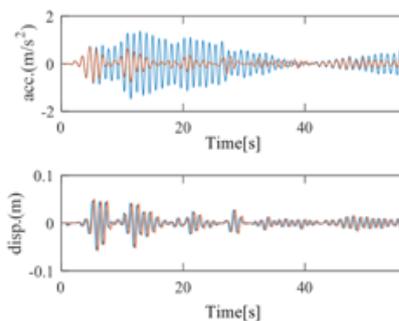


図4. El Centro地震波に対する構造物の応答と生成された滑らかな目標値

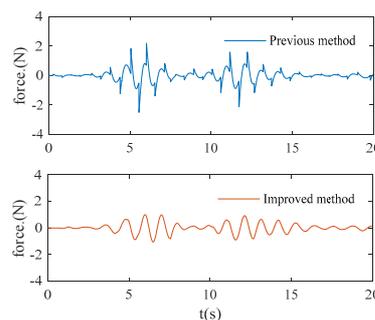


図5. 滑らかな目標値生成による最大制御力の低減

また、提案した補助質量の目標値生成手法と位置制御系の設計方法の有効性を数値シミュレーションによって確認した。提案手法による制振シミュレーションでは、これまでのシステムと同様な制振性能に設定した場合、出力される制御力の最大値が大幅に改善されることがわかった。しかしながら、複数の固有振動数を有する構造物、すなわち多自由度構造物に提案したシステムを適用すると、構造物の高次の固有振動数を刺激してスピルオーバーが発生し、ロバスト安定性を示すことができなかった。

平成29年度

【研究3】複数の神経振動子を利用した多自由度構造物の制振

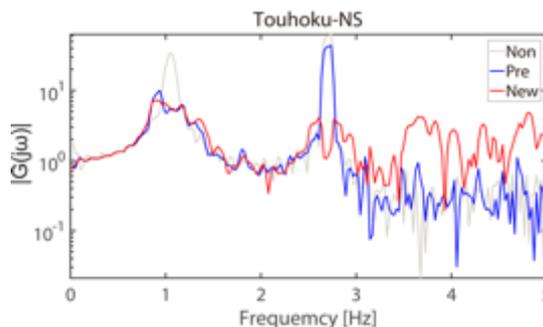


図6. 構造物の複数モードの制振

複数の固有振動数を有する構造物の振動を低減可能な動吸振器システムにするため、複数の神経振動子を備えた神経系の有効性を数

値計算によって確認した。上記システムの有効性を数値シミュレーションによって確認した結果、構造物の複数の振動モードが低減可能であることがわかった (図6)。

【研究4】複数の神経振動子から構成される制振ネットワークシステムの検討

神経振動子による制振ネットワークを構成するための基礎的な検討を行うために固有振動数と入力ゲインが異なる神経振動子が外部の入力に対してどのような反応を示すか調査する数値計算を行なった。まず、1 Hz の固有振動数を有する神経振動子を基準に、振動数が増減する方向に 0.01 Hz 毎に 200 種類、そして外部入力に対するゲインを 0.01 から 0.01 ずつ増加させて 2.0 まで、こちらも 200 種類用意し、合計 40,000 種類の神経振動子を用意した。そしてその神経振動子群に対して単一の正弦波を入力し、それら振動子群の応答を観察した。観察するために、振動子の出力の大きさをグレースケールで表現し、周波数方向の違いを横軸に、そして入力ゲインの違いを縦軸に並べて行くことで応答を可視化できるようにした (図7)。

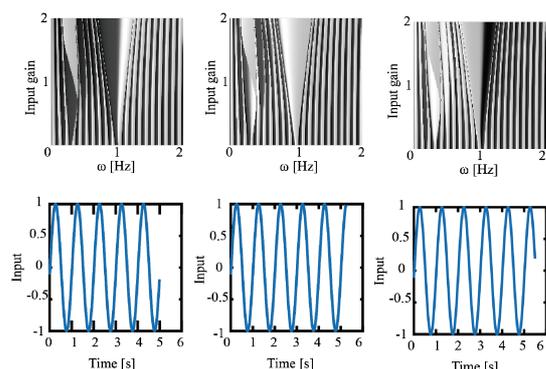


図7. 神経振動子群の応答の可視化

この可視化によって入力に対して同期している振動子群の応答が簡単に確認できるようになり、同期中の振動子の位相の移り変わりも評価できるようになった。

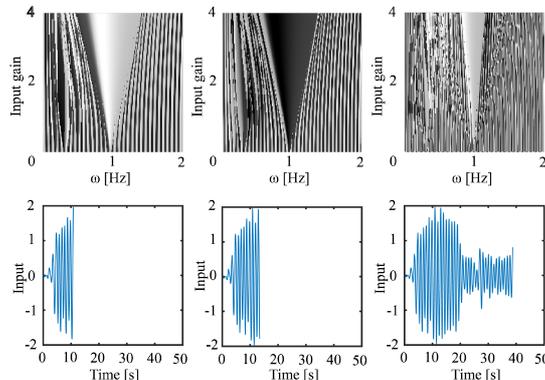


図8. El Centro NS 波により振動する構造物の応答とそれを入力とした神経振動子群の同期の様子

さらに、地震入力 (El Centro NS 波) を受ける構造物の応答を振動子群への入力として与えた場合に、振動子群がどのような同期を起こしているかについて調べた (図8)。

この結果より、神経振動子への入力振幅の大きさによって同期領域が変化する様子が確認できた。同様にして構造物の固有振動数が部材の損傷により変化した場合のシミュレーション、複数の固有振動数を有する構造物の応答に対するシミュレーションを行い、神経振動子ネットワークを利用したロバスト性能を有し、複数の振動モードを制振可能な制振システムを構成するための考察を行った。現状の単一神経振動子を利用した制振システムと比較してよりロバストなシステムを構築する場合について、そして複数の振動モードを制振する場合についても、構成した振動子群から外部入力に同期している領域を抽出し、それらの領域からの出力を利用して補助質量の目標値を生成すれば良い。今後はそうした機能を有する振動子ネットワークについて研究内容を発展させる予定である。

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 3 件)

1. Experimental evaluation of a control system for active mass dampers consisting of a position controller and neural oscillator, T. Sasaki, D. Iba, J. Hongu, M. Nakamura and I. Moriwaki, Journal of Physics: Conference Series, Volume 744 (2016), Number 1, doi:10.1088/1742-6596/744/1/012040 (査読無し)。
2. 神経振動子と位置制御器を組み合わせたアクティブ動吸振器 (補助質量の加速度応答を考慮した制振のための PD 制御器設計法), 本宮 潤一, 射場 大輔, 中村 守正, 森脇 一郎, 日本機械学会論文集, Vol. 82 (2016) No. 837 p. 15-00599, <https://doi.org/10.1299/transjsme.15-00599>, (査読有り)。
3. 神経振動子を組み込んだアクティブ動吸振器システムで利用する PD 制御器の設計法, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.714, p. 1261-1269, 2015, <https://doi.org/10.3130/aijs.80.1261>, (査読有り)

[学会発表] (計 17 件)

1. Output analysis of swarm of neural oscillators stimulated by earthquake-induced acceleration responses of a structure, Hideya Tokumura, Daisuke Iba, Jyunichi Hongu, Sohei Shima, Ichiro Moriwaki, Proc. SPIE 10598, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and

- Aerospace Systems 2018, 105982T (27 March 2018).
2. Active mass damper system for high-rise buildings using neural oscillator and position controller: generation method for desired stroke of auxiliary mass using synchronous detection, J. Hongu, D. Iba, Proc. SPIE 10595, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII, 1059522 (15 March 2018).
 3. 神経振動子と位置制御器を組み合わせたアクティブ動吸振器用制御システムの実装と制振実験による性能評価, 徳村 秀哉, 射場 大輔, 本宮 潤一, 佐々木 貴之, 島 颯平, 中村 守正, 森脇 一郎, 日本機械学会 2017 年度年次大会講演論文集, J1010202, pp.1-5, 2017.
 4. 神経振動子を用いた絶対加速度フィードバック型アクティブ動吸振器 (位相ダイナミクス制御による正弦波状の目標値生成法), 本宮 潤一, 射場 大輔, 第 15 回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, C03, pp.1-9, 2017.
 5. 神経振動子と位置制御器を利用したアクティブ動吸振器による多自由度構造物の制振, 島 颯平, 射場 大輔, 本宮 潤一, 中村 守正, 森脇 一郎, 第 15 回運動と振動の制御シンポジウム講演論文集, C04, pp.1-9, 2017.
 6. Active mass damper system for high-rise buildings using neural oscillator and position controller: sinusoidally varying desired displacement of auxiliary mass intended for reduction of maximum control force, D. Iba; J. Hongu; T. Sasaki; S. Shima; M. Nakamura; I. Moriwaki, Proc. SPIE 10168, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2017, 101683F (12 April 2017).
 7. 神経振動子を用いた歯車の位相角の推定 (適応型神経振動子の開発) 石井祐之助, 射場大輔, 宮本論, 本宮潤一, 中村守正, 森脇一郎, 平成 28 年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 14A24, 2017.
 8. 自然周波数が異なる神経振動子群の周期外力に対する応答, 徳村秀哉, 射場大輔, 島 颯平, 佐々木貴之, 本宮潤一, 中村守正, 森脇一郎, 平成 28 年度関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 15P14, 2017.
 9. 位置制御系の固有振動数と減衰比を考慮した PD ゲイン設計法 (神経振動子と位置制御器を利用したアクティブ動吸振器による構造物の制振), 島 颯平, 射場 大輔, 本宮 潤一, 中村 守正, 森脇 一郎, 日本機械学会 D&D2016, 229, pp.1-9, 2016.
 10. Active mass damper system for high-rise buildings using neural oscillator and position controller considering stroke limitation of the auxiliary mass, Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, SPIE Smart Structures and Materials, Paper 9799-121, 2016.
 11. 神経振動子と位置制御器を組み合わせたアクティブ動吸振器による多自由度系の制振(複数の振動子と飽和関数の組み合わせによる特定周波数帯の抽出)/島 颯平, 射場大輔, 本宮潤一, 佐々木貴之, 中村守正, 森脇一郎, 関西学生会平成 27 年度学生員卒業研究発表講演会, 15P12, pp.1-2, 2016.
 12. Design method of PID controllers for active mass damper systems incorporating neural oscillators, Junichi HONGU, Daisuke IBA, Takayuki SASAKI, Morimasa NAKAMURA, Ichiro MORIWAKI, Proc. of The 16th Asia Pacific Vibration Conference, 2015, 527, 708-713.
 13. 神経振動子と位置制御器によって駆動されるアクティブ動吸振器補助質量のストローク制約, 本宮 潤一, 射場 大輔, 中村 守正, 森脇 一郎, 日本地震工学会・大会 - 2015, P2-19, pp.1-8.
 14. 神経振動子と位置制御器を用いたアクティブ動吸振器による多自由度系の制振 (高次モードに対するロバスト安定性の検証), 島 颯平, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015, 2H1-1, pp.1-4.
 15. 神経振動子と位置制御器によって駆動する アクティブ動吸振器(補助質量の加速度応答に基づく PID 制御器設計), 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, D&D2015, 323, 2015.
 16. 神経振動子と PID 制御器を組み合わせたアクティブ動吸振器: エネルギー吸収を考慮した制御ゲインの設計, 佐々木 貴之, 本宮 潤一, 射場 大輔, 中村 守正, 森脇 一郎, MoViC2015, C101, 2015.
 17. 神経振動子を組み込んだアクティブ動吸振器に関する研究: 神経振動子の状態量に基づいて補助質量の目標値を決定した場合, 本宮 潤一, 射場 大輔, 中村 守正, 森脇 一郎, Movic 2015, C102, 2015.
- [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]
該当なし
6. 研究組織
(1) 研究代表者
射場 大輔 (IBA DAISUKE)
京都工芸繊維大学・機械工学系・准教授
研究者番号: 10402984
- (2) 研究分担者, 連携研究者, 研究協力者
該当なし