

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 20 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560260

研究課題名(和文)生命が持つリズムミカルな現象を構造物の振動制御に生かす

研究課題名(英文)Structural vibration control inspired by rhythmic pattern of being

研究代表者

射場 大輔 (Iba, Daisuke)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教授

研究者番号：10402984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、構造物と補助質量の同期に着目し、神経振動子をアクティブ動吸振器の制御系に取り入れることを提案した。この問題に外部からの周期的な入力に対する同期特性を持つ神経振動子を活用することができれば、歩行運動に見られる生物が持っている環境変化に対する高い適応能力と柔軟性をアクティブ制振装置に備えさせられる可能性がある。そこで、2つの神経振動子を相互結合させて構造物の振動応答に同期させ、そのCPGの出力タイミングに応じて動吸振器補助質量を、CPGの出力から換算した目標変位まで、位置制御を用いて駆動するアクティブ動吸振器系を構成し、地震入力を受ける1自由度構造物の制振を行えることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a new control system for active mass dampers. The control system is a feedback system, which combines a single neural oscillator and a position controller. The output of the neural oscillator synchronized with the structure response is a rhythmic command which decides the driving direction of the auxiliary mass, and the amplitude of the oscillator output determines the travel distance of the auxiliary mass. In addition, in order to move the auxiliary mass to the desired value, the position control system consisting of a PD controller is used. As a result of numerical simulation, when the structure was quaked by the several types of the earthquake, the structural vibration was reduced by the effect of the auxiliary mass' motion, and the results showed that the proposed system was verified as the controller for the active mass dampers and was able to be used to solve the stroke limitation problem of the active mass dampers.

研究分野：機械力学

キーワード：機械力学・制御 制震 制御工学 神経振動子 位置制御器

1. 研究開始当初の背景

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、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。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。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、その能力を発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ボ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。

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器の開発を始めた。これまでの成果として、正弦波入力を受ける1自由度の構造物に同期して作動する神経振動子の開発に成功し、また、動吸振器と構造物が保つべき位相関係式及び補助質量に与える変位振幅量を、エネルギー方程式の考察から導出した。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制御を行うシステムを開発し、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ていた。

2. 研究の目的

これまでに、二つの神経細胞の数学モデルを結合することで神経振動子を構成し、さらに神経振動子を繋ぎ合わせて振動子ネットワークとして利用する方法が提案されているが、構造物の制振に対して適切な神経振動子回路網を選択するための指針はなかった。そこで、構造物からの振動入力に対して神経

振動子が強制的に引き込まれる条件を明らかにすること、次に神経振動子からの出力によって動吸振器を駆動して構造物に影響を与える場合において、構造物と制御系の相互の引き込みの条件を明らかにし、さらに外部環境との大域的な同期が発生する条件を明らかにしておく必要があった。また、以前の研究で提案した制御方法では神経振動子からの出力に合わせて動作するPD制御器にはステップ状の目標値を与えていたため、目標を切り換える際に不連続値が存在し、スムーズな位置制御が実現できていなかった。また、利用する位置制御器のゲイン設計に対する手法も確立されておらず、試行錯誤の結果として制御ゲインが与えられていた。これらの課題を解決した後、システム実現性の実験的検証に加え、インパルス及びランダム入力に対して振動制御性能を、他の制御手法と比較しながら検証していく必要があった。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システム構成について検討する必要があった。

そこで研究期間中に実施する設定した解決すべき目標は次の6つとなる。

1. 構造物と神経振動子の強制引き込みの評価法の確立
2. 構造物と制御系及び外部環境間における大域的相互引き込みの評価
3. 動吸振器補助質量の目標値設定手法の確立
4. 動吸振器補助質量用の位置制御器のゲイン設計法の確立
5. インパルス入力等に対する制振システムの制御性能の実験的検証
6. 多自由度構造物への適用に関する基礎検討

3. 研究の方法

前述した研究の目的を達成するために、次のような計画と方法で研究に臨んだ。

①平成24年度

【研究1】構造物と神経振動子の強制引き込みの評価

申請者は松岡が提案した伸筋と屈筋の駆動をモデル化した非線形連立微分方程式による神経振動子を利用してシステムを構成したが、制御対象となる構造物と制御系が適切に同期しているか否かの評価は行っていない。提案するシステムを実現する為にはこうした引き込み、すなわち同期現象を解析することで、設定したパラメータの有効性を評価する必要がある。そこで、はじめに地盤に正弦波入力を受ける1自由度構造物と神経振動子間に発生する強制引き込みについて、数値計算と位相縮約法を利用して詳しく調べる。これによってより複雑なネットワークを構成する神経振動子に対しても同期の評価が可能となり、将来の多自由度化にも対応が可能となる。ここでは、特に振動子の入力間における位相差を明らかにする。

【研究2】構造物と制御系及び外部環境間における大域的相互引き込みの評価

振動制御システム全体を対象に、強制引き込みの解析手法を発展させて構造物及び動吸振器と制御器間に発生する相互引き込み、また、外力などの周辺環境との相互作用に対して同期が創成できる周波数領域を解析する。この解析では、目標となる性能が満たされさらに必要な機能が発現するかをシステム全体及びその周辺環境まで含めた大域的な同期に関する評価を数値計算によって実施する。

②平成25年度の計画及び方法

【研究1】構造物に対する適切な神経振動子回路網の構成に関する基礎的考察

神経細胞同士を接続して単一の神経振動子を構成した後、さらに複数の神経振動子を接続して神経振動子回路網を構成することが可能であり、それらも自律振動子として機能する。ここでは二つの相互接続した神経振動子が、その接続によってどのような特性、すなわち、同期領域や入出力間の位相差を有するかについて検討し、構造物及び動吸振器と神経振動子間を接続する際に、構造物の振動の低減、すなわちエネルギー消散の観点から動吸振器に与えるべき位相を出力するための振動子の構造や、構造物の振幅の大きさを判断するための構造を明らかにする。

【研究2】多自由度構造物への適用に関する基礎検討

ここでは提案手法の実用化に向けての基礎的な検討を行う。具体的には、これまでの1自由度構造物に対して設計した制振システムを拡張し、多自由度構造物の制振を行うための基礎的検討を行う。利用する神経振動子を複数個用意し、それぞれに異なる自然周波数を与えた場合において、多自由度構造物に入力が作用した場合の神経振動子から得られる出力を数値計算により解析し、周波数毎に分解可能であるかについて検討する。

【研究3】動吸振器補助質量の移動量の決定

構造物の振動状態に合わせて動吸振器の補助質量の移動量を決定する方法について検討していなかった。そこで、構造物の応答を入力として受けている神経振動子の応答を用いて、補助質量の移動量を決定する方法の確立を行う。

③平成26年度の計画及び方法

【研究1】位置制御器のゲイン設計法の確立

動吸振器補助質量を駆動する位置制御器のゲイン設定については、これまで試行錯誤により行っていた。ここでは、構造物の振動を低減させるという観点から、この目的にあった評価指標を設定し、こうした指標の最大化を行う過程で位置制御器のゲインが設計できるように、新しい設計方法を確立する。

【研究2】インパルス入力等に対する制振システムの制御性能の検証

提案した神経振動子と位置制御器を用いて構成したアクティブ動吸振器の制御シ

ステムの性能を検証する。ここでは、数値計算及び、実験によってその有効性を確認する。数値計算においては、様々な地震入力に対する応答を、一般的な最適制御によって設計されたシステムとの比較を通して評価する。また、実験に関しては、インパルス応答に対する制振性能を確認する。

4. 研究成果

研究計画と方法に基づいて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制振システムに関して得られた結果を以下に示す。

まず、神経振動子の特性を解析するため、位相縮約法を利用し、振動子のダイナミクスにおいて位相を導入した。そこから、位相感受関数、位相結合関数、そして位相応答関数を導出し、外力と振動子において同期が発生する振動数の領域を求めた。さらに、求めた同期領域内で同期完了後に残る位相差（位相ロッキング点）を数値計算によって求めた。得られた神経振動子の位相ロッキング点を図1に示す。

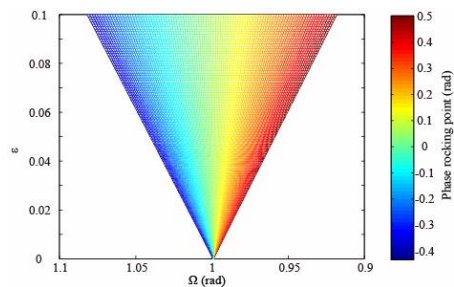


図1. 位相ロッキング点

これらの解析より、神経振動子の同期領域は、振動子の自然振動数を中心として、入力振幅に依存して広がっていくことがわかり、また、入出力の位相差は、入力周波数が振動子の自然振動数と同じ場合は0となり、入力周波数が小さければ位相は進み、大きければ位相が遅れていくことがわかった。

続いて、複数の振動子からなるCPGが有する基本特性を明らかにするため、対向する対形結合した神経振動子の同期特性について、同様の方法を利用して調べた。その結果、単一の神経振動子に比べ、対形結合神経振動子の位相結合関数の振幅は小さくなり、その結果、同期領域は狭くなることがわかった。これは、相互に結合された振動子間の結びつきの影響によって、本来の振動子が有する自然周波数への引き込みが強くなり、外部からの周期的な入力に対して鈍感になっていると結論づけられた。

次に、提案しているシステムを多自由度構造物へ適用することを目的として、自然周波数の異なる複数の振動子を用意し、多自由度

構造物の振動応答から、特定の周波数成分を抽出する方法、すなわち、振動モード解析を神経振動子によって行う方法を提案した（図2）。

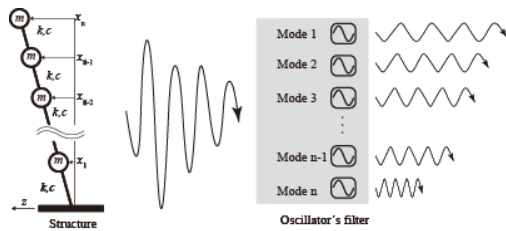


図2. 複数の神経振動子による多自由度構造物の周波数分解

具体的に、3自由度構造物モデルにインパルス入力を与え、その時の最上階の加速度応答を、自然周波数をそれぞれの固有振動数に一致させた神経振動子群に入力し、その出力の有する周波数成分を解析した。このとき、神経振動子が有する同期領域の性質によって、自然振動数から離れた周波数成分には振動子が反応しないため、振動子がバンドパスフィルタとして反応し、適切に周波数の分解が行えることがわかった。また、地震波入力を受ける構造物の応答に対して、同じ周波数分解を試みたところ、同様に固有振動数成分毎に応答を分解することが可能であることが確認できた（図3）。これらの結果を利用することで、提案しているアクティブ動吸振器の神経振動子を利用した制御方法が多自由度構造物においても有効に作動する可能性があることがわかり、神経振動子が有する特性をうまく生かすことにより、スマートで設計が簡単な制振システムを構成するための足がかりを得ることができた。

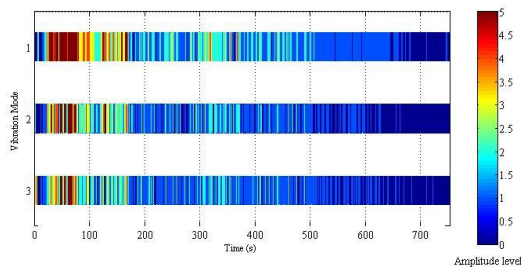


図3. エルセントロ波を入力とする多自由度構造物応答の周波数分解

次に、提案している神経振動子を利用したアクティブ動吸振器の制御システムにおいて、構造物の応答に合わせて補助質量の移動量を決定するための手法について検討した。ここでは、振動子への入力となる正弦波の振幅を増加させたときの周期解となる出力の奇跡を予め求めておき、それらを擬似的な等高線と見立てた位相振幅マップ（図4）を提案した。

この位相振幅マップと、実際の構造物の応答を入力として適当な軌跡を描く神経振動子の出力を比較するため、振動子出力を位相振幅マップ上でプロットし、最近傍探索法を利用して地図上で一番近い点を求めることで、その点が所属する振動子の出力レベルを決定する。振動子の出力は、その入力、すなわち構造物の応答に依存して変化することから、この地図上でレベルに適切な係数をかけることで補助質量の移動距離を決定すれば、構造物の揺れに応じた大きさの補助質量移動量が決定できることになる。

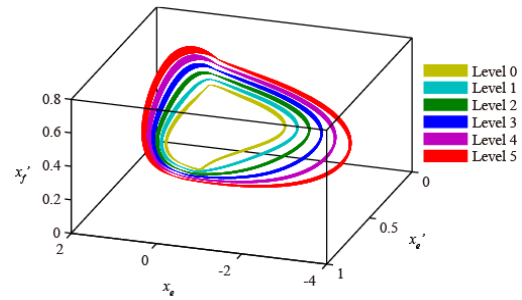


図4. 位相振幅マップ

そこで、これらのシステムを統合してフィードバック制御系を構成した（図5）。このシステムに対して様々な地震入力を与え、そのときの動吸振器補助質量の動作によって構造物の振動を低減することが可能であるかについて数値計算により確認した。この数値計算の結果を示す。ここでは、神経振動子の出力と、位相振幅マップを比較して決定した動吸振器補助質量に与える目標値を図6に示し、このアクティブ制振システムの有効性を確認するため、動吸振器を搭載していない非制御の構造物と、加速度応答波形を比較した。その結果を図7に示す。この図より、制御によって最大の加速度が半減していることが確認できる。



図5. 提案したシステムのブロック線図

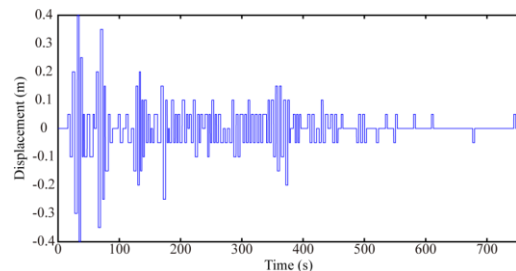


図6. 補助質量の目標変位

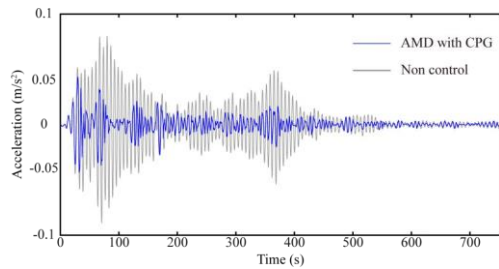


図 7. 構造物の加速度応答の比較

さらに、同程度の制振性能を有する最適制御システムを利用して、提案する手法の利点について示した。本手法は、位置制御器によって目標変位まで補助質量を移動させる方法を採用しているため、補助質量が持っている可動範囲に移動量を抑えておくことを、最大目標変位を設定するだけで実現できる。実際に、3倍の地震波入力が与えられた場合、線形制御則である最適制御システムでは、補助質量の移動量が3倍となるのに対して、提案手法ではその可動範囲の制約内に抑えることが可能であることが数値計算の結果（図8）によって示されている。

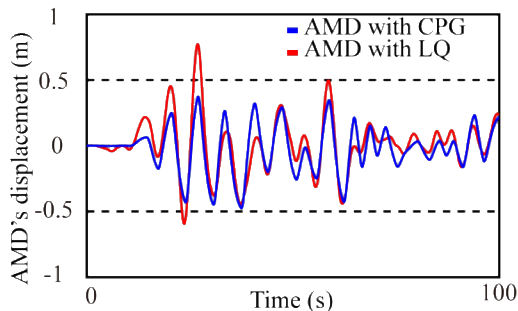


図 8. 補助質量のストローク制約



図 9. 実験装置

次に、提案した手法の実装を試みた。図9に製作した実験装置を示す。ここでは、補助質量がボールねじを介して DC モーターによって駆動される。このとき、補助質量と構造物上部の相対変位をレーザー変位系で計測し、構造物上部の絶対加速度を MEMS 型の加速度センサによって計測している。提案した神経振動子と位置制御器によるアクティブ

動吸振器の制御システムは、マイコンに実装した。

この実験装置を用いて、まず、補助質量の位置決め制御実験を行った。ステップ状の目標値に対して、動吸振器の補助質量が PD 制御器によって駆動されて移動していくことが確認できた。移動の際に若干のオーバーシュートが確認できた。また、インパルス応答を確認することによって、提案したシステムの制振効果を確認した。この結果、提案した手法によってより速く構造物の応答が収束していることが確認できた。

最後に、位置制御器のゲイン設計手法に関する提案を行った。ここでは、位置制御器として PD 制御器を想定している。構造物が外部入力を受けて振動している際にはその固有振動数成分が顕著に現れることから、その周波数で正弦波加振されていることを想定し、その応答を低減させるために補助質量の理想的な運動も正弦波であると仮定した。このとき、PD 制御器のゲインを含めた形で、補助質量の運動方程式から、位置に関する解析解を求め、この理論値が仮定した経路に近くように両者の内積を設計指標として、その指標を最大化するゲインを数値計算により求めた。こうして提案した設計手法によって得られた PD 制御器のゲインを用いて構造物の振動制御を行った結果、提案した設計手法の有効性が確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子と位置制御器を組み合わせた制御系によって駆動されるアクティブ動吸振器を利用した構造物の振動制御, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 823, 2015 (査読有) .

〔学会発表〕(計 25 件)

1. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Takayuki Sasaki, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, "A driven active mass damper by using output of a neural oscillator (Effects of position control system changes on vibration mitigation performance)", Proc. of SPIE, Smart Structures and NDE 2015, No.9435-35, 2015. 3. 8, San Diego, USA.
2. 信田健太郎, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 地震入力に対する直列結合型神経振動子のフィルタ特性, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, GO22-Fri-3, 2014. 12. 5, 幕張メッセ(千葉市).
3. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子と振幅位相地図を用いた多質点構造物の地震応答の周波数分解, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, GO22-Fri-4, 2014. 12. 5, 幕張メッセ(千葉市) .
4. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の制振性能に関する研究(数種類の地震に対する振動応答の比較), 第 57 回自動制御連合講演会, 2D05-5, 2014. 11. 10, ホテル天坊 (群馬県渋川市).

5. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子と位相幅マップを用いたアクティブ動吸振器に関する研究 (振動台実験による制振効果の検証), Dynamics and Design Conference 2014, 426, 2014. 8. 26, 上智大学 (東京都) .
6. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Relationship between oscillator's natural frequency and amplitude map -Matsuoka neural oscillators having same limit cycles-, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 3A23, pp.1-9, 2014. 8. 3, 札幌コンベンションセンター (札幌市) .
7. Kentaro Shinoda, Daisuke Iba, Junichi Hongu, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Application of Fitz Hugh oscillator for semi-active control -Filtering of structure response and regulating of variable damper-, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, 1C141, pp.1-12, 2014. 8. 3, 札幌コンベンションセンター (札幌市) .
8. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, A Simple Vibration Control System for Active Mass, Sixth World Conference on Structural Control and Monitoring, 216, pp.1-11, 2014. 7. 15, Barcelona, Spain.
9. Daisuke Iba, Junichi Hongu, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, Proc. of SPIE, Smart Structures and NDE 2014, 90613M, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2045019>, 2014. 3. 9, San Diego, USA.
10. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 自然周波数の異なる複数の神経振動子を利用した多質点構造物の振動応答の各モード周波数への分解, 日本地震工学会・大会 2013, 226, 2013. 11. 11, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都) .
11. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を利用したアクティブ動吸振器による構造物の振動制御(振幅マップからの動吸振器のストローク幅指定方法), 第 56 回自動制御連合講演会, 129, 2013. 11. 6, 新潟大学 (新潟市) .
12. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, Comparison of Synchronization Property for Vibration Control (Matsuoka Neural Oscillator and Stuart-Landau Oscillator), Proceedings of SICE Annual Conference 2013, pp. 935-936, 2013. 9. 14, 名古屋大学 (名古屋市) .
13. 仙田 群, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子により位置制御される動吸振器の 1 自由度構造物モデルへの適用, 日本機械学会第 1 3 回運動と振動の制御シンポジウム, D11, pp.1-10, 2013. 8. 26, 九州産業大学 (福岡市) .
14. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 構造物の振動応答に対する神経振動子群の同期特性について(2 個の振動子で構成されるネットワークの場合), 日本機械学会第 1 3 回運動と振動の制御シンポジウム, D13, pp.1-10, 2013. 8. 26, 九州産業大学 (福岡市) .
15. 信田健太郎, 射場大輔, 本宮潤一, 中村守正, 森脇一郎, セミアクティブ振動制御法に用いる FitzHugh 振動子のフィルタ特性, 日本機械学会第 1 3 回運動と振動の制御シンポジウム, D18, pp.1-9, 2013. 8. 26, 九州産業大学 (福岡市) .
16. Tomo Senda, Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, Development of control system for dynamic absorber using neural oscillator and position controller, Proc. of 11th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics, No. 832, pp.1-9, 2013. 7. 1, Pisa, Italy.
17. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Characteristics of single neural oscillator for controller of active mass damper (Global entrainment and phase locking point), Proc. of The 15th Asia Pacific Vibration Conference, No. 343, pp.1-6, 2013. 6. 2, Jeju, Korea.
18. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Evaluation method for a controller of active mass damper using central pattern generator, Proc. of Smart Structures and NDE 2013, No.8692-104, 2013. 3. 10, San Diego, USA.
19. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の提案と評価法の検討, 日本地震工学会・年次大会, pp.1-2, 2012. 11. 8, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都) .
20. 仙田 群, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を利用した地震外力を受ける構造物の振動エネルギーの計測, 第 5 5 回自動制御連合講演会, No.1310, pp.1-4, 2012. 11. 17, 京都大学 (京都市) .
21. 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 神経振動子を用いたアクティブ型の振動制御器の評価方法について (1 自由度の構造物と単一神経振動子の場合), 第 5 5 回自動制御連合講演会, No.1374, pp.1-4, 2012. 11. 17, 京都大学 (京都市) .
22. 広畑 賢, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, Stuart-Landau 方程式を用いた位相推定フィルタ, 第 5 5 回自動制御連合講演会, No.1369, pp.1-4, 2012. 11. 17, 京都大学 (京都市) .
23. Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Synchronization of structure and neural oscillator for active mass damper, Proc. of 15th World Conference on Earthquake Engineering, No. 3697, pp.1-11, 2012. 9. 24, Lisbon, Portugal.
24. 広畑賢, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 調和的な可変減衰器を用いたセミアクティブ振動制御 (並列二自由度系への適用と Stuart-Landau 方程式を利用したフィルタリング), Dynamics & Design Conference 2012, No.411, pp.1-11, 2012. 9. 18, 慶応義塾大学 (横浜市) .
25. 仙田 群, 本宮潤一, 射場大輔, 中村守正, 森脇一郎, 構造物の応答と同期した神経振動子を用いた動吸振器の位置制御, Dynamics & Design Conference 2012, No.408, pp.1-8, 2012. 9. 18, 慶応義塾大学 (横浜市) .

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・工芸科学研究科・准教授

研究者番号：10402984