

氏名	ほんぐう じゅんいち 本宮 潤一
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第788号
学位授与の日付	平成28年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の設計と特性解析
審査委員	(主査)教授 森脇一郎 教授 曾根 彰 教授 増田 新 准教授 射場大輔

論文内容の要旨

本論文は、高層構造物の制振システムに採用されるアクティブ動吸振器が有しているストローク制約に関する問題を、従来の線形制御法によって制御系を設計するのではなく、生物の歩行制御に深く関連する神経振動子の数学モデルを利用したシステムを応用することで、解決している。従来の手法とは大きく異なった設計手法であるため、その基本となる神経振動子の特性解析から始め、制御系の提案、そして構造物に制御システムを適用した場合のシミュレーション、そして縮小構造物モデルを用いた実験を通して提案手法の有効性を検討している。

本論文は全10章から構成されている。第1章は序論となり、参考文献を紹介して比較することにより本研究に関わる研究背景と研究目的と意義について述べている。

第2章は、本研究で扱う動吸振器について、構造物のモデリングを含めた一般的な設計方法を述べている。まず、構造物のモデリングとして多質点構造物の低次元モデルの作成方法を示し、続いて、動吸振器の設計方法としてパッシブ動吸振器とアクティブ動吸振器に分けて示している。パッシブ動吸振器は周波数応答のピーク値を最小化する問題としてPQ点理論に基づいた設計方法を、アクティブ動吸振器は費用対効果を考慮した評価関数を用いるLQ理論に基づいた設計方法をそれぞれ記述している。また、パッシブ動吸振器、アクティブ動吸振器それぞれの制振効果を、地震波を用いた数値シミュレーションによって示している。最後に、実際に構造物に対して適用された動吸振器の例として挙げ、実際の動吸振器設計の留意点について述べている。

第3章は、提案するアクティブ動吸振器の制御系に組み込まれる神経振動子の詳細について述べている。まず、神経細胞の役割と構成、神経細胞の等価電気回路モデル、神経細胞モデルを基盤とした神経振動子モデルまでを説明する。次に、神経振動子を非線形振動子として捉えたときの数学的な取扱いを述べている。数学的な取扱いの中では、微分方程式の解のリプシッツ連続性とリミットサイクルの発生条件を示している。

第4章は神経振動子の同期特性について、同期理論を導入して説明している。神経振動子の入出力関係を調査することは神経振動子の工学的応用を考えたときに非常に重要となる。ここでは、まず、同期理論の一般論を導入している。続いて、本研究で用いる松岡神経振動

子の同期領域と同期領域内の同期特性について解析を行った結果を示している。同期領域内の同期特性は位相方向と振幅方向に分けて整理し、特に、振幅方向の同期特性について、新しく提案した位相振幅マップについて詳しく述べている。

第5章は、アクティブ動吸振器の抱える問題と神経振動子の特徴をふまえて、神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の開発へと移っていく。今回新しく提案したアクティブ動吸振器システムは神経振動子と位置制御器を用いた制御系となる。まず、そのシステムの発想の起源となった、神経振動子を用いた歩行ロボットである木村らの開発した「鉄犬」の制御原理を説明し、そこから神経振動子を用いたアクティブ動吸振器システムを提案するまでの経過を説明している。そしてそのシステムが誕生した2011年から現在にいたるまで、どのようにシステムの改善がなされてきたかについて説明し、それぞれ発展の段階について詳細に述べている。

第6章は、これまで提案してきた神経振動子を用いたアクティブ動吸振器について、その設計問題について取り扱っている。まず、現在のところ本制御器が取り扱うことのできる制御対象について述べ、その制御目的の整理を行っている。そして、与えられた制御系に対してどのような設計指標を持つべきかを議論している。次に、本システムの根幹である神経系の設計について述べており、最後に、位置制御系の設計について述べている。

第7章は、提案した神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の制振効果を示すものである。制振効果については、5, 6章で述べているが、それらの結果は、ある特定の地震入力に対してのみであり、実際計測される地震波は発生源と地震を伝達する地盤などの要素の影響を強く受け、様々な特性を持っていることが知られている。また、提案するシステムは制御器の安定性の問題が解決できていない上に、非線形な制御器のため周波数応答によってその特性を評価することができない。よって、提案するシステムの有用性を示すために、様々なタイプの地震波を用いた数値解析を行うことでその結果を考察している。

第8章は、提案した神経振動子を用いたアクティブ動吸振器について、ストローク制約を考慮して駆動した結果を示すものである。様々な地震入力に対する制振効果については、この章では提案したアクティブ動吸振器システムについて、補助質量を位置制御する際の目標となるストローク量を飽和関数を用いて制約する。さらに、地震加速度はその振幅を前章の3倍にし、PQ点理論で設計されたパッシブ動吸振器とLQ理論によって設計されたアクティブ動吸振器らと比較することで、提案したシステムの利点について示している。

第9章は、1自由度振動系にアクティブ動吸振器が搭載されているモデルに対して、提案する神経振動子を組み込んだアクティブ動吸振器の制振効果を小型試験体によって実験的検証することを目的とする章となっている。

第10章は、本論文の結論であり、2011年から続いている神経振動子を用いたアクティブ動吸振器に関する現在まで明らかになっていること、そして今後の課題について列挙している。

本研究で提案した神経振動子を用いたアクティブ動吸振器の制御システムは、特に高層構造物の制振問題で動吸振器が有するストローク制約に関連する問題を簡単に解決できる手法であり、工学的価値の高い論文である。

論文審査の結果の要旨

本研究は、生物学の分野で研究されてきた神経振動子の数学モデルを、高層ビルの風による振動を低減する目的で設置されるアクティブ動吸振器の制御手法に利用することで、大地震が発生した際にもシステムを停止させることなく速やかに構造物の振動を止める方法の開発を目的としている。

従来のアクティブ動吸振器は大きな地震が発生すると補助質量の運動がストローク制約を超えてしまう恐れがあり、一定レベル以上の加速度を検知した場合はシステムを停止させていた。本研究では、この問題に対して構造物の応答に合わせて動吸振器の補助質量を駆動するタイミングを、構造物の固有振動数に自然振動数を合わせた神経振動子のリズムカルな出力を利用して生成、かつ補助質量の移動量も振動子の出力の成長に合わせて設定し、その指令値まで位置制御器を用いて移動させるシステムとすることで、どのような大きさの入力が構造物に与えられたとしても振動子の出力を補助質量のストローク制約と同じ大きさに飽和させることで制約を超えて動作することがない制御アルゴリズムを提案した。

本論文は、その制御アルゴリズムを提案するにあたり、単体の神経振動子の特性解析から始め、制御システム内で使用するための振動子の設計方法の提案、位置制御系のゲイン設計手法、そしてストローク制約を厳密に満足するよう、構造物の加速度の影響を補償する項の制御力への追加等について提案し、主に数値シミュレーションを通して設計方法の妥当性、制振性能の評価、ストローク制約方の有効性について示した。

本研究で提案した手法は、神経振動子の有するその他の特性、すなわち、外部環境の変化に対する追従性や柔軟性を適切に利用することで、今後、構造物のパラメータ変動に対する制振性能に関するロバスト性などを持ったシステムへと発展させることも可能であり、今後の研究の進展によって広く普及することが可能であると考えられる。

本論文の内容は、以下に示す4編の学術論文と7編の査読付き国際会議論文として公表されており、そのうち9編は申請者が筆頭著者である。

査読付き論文

- (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），日本機械学会論文集（投稿中），2015.
- (2) 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の制御法（ストローク制約を考慮した補助質量の駆動），日本建築学会構造系論文集（投稿中），2015.
- (3) 本宮潤一，射場大輔，中村守正，森脇一郎，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，日本建築学会構造系論文集，Vol. 80 No. 714，2015.
- (4) 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. 815，2015.

国際会議論文 (査読付き)

- (1) Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura, Ichiro Moriwaki, A design method of a PID controller for use in an active mass damper system incorporating a neural oscillator, 6th Asia Pacific Vibration Conference, 527, 2015.
- (2) 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.
- (3) 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, 1C14, pp1-12, 2014.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Junichi Hongu, Daisuke Iba, Morimasa Nakamura and Ichiro Moriwaki, Control Method of Active Mass Damper using Neural Oscillator, Proc. of The 14th Asia Pacific Vibration Conference, No. 129, pp. 640-649, 2011.