

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04254

研究課題名（和文）地震波形伝送ネットワークとAIを用いた波形未来値予測による高性能な構造振動制御

研究課題名（英文）High performance structural vibration control by a preview of the future seismic waveform generated with a wave transmission network and an AI-based estimation system

研究代表者

平元 和彦（Hiramoto, Kazuhiko）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：00261652

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：日本国内では、強震モニタ等に代表される多数地点での地震波実時間常時観測が行われている。本研究では、地震外乱を受ける構造系の振動制御において、上記の観測網から遠隔地波形情報が取得可能であると想定し、遠隔地伝送波形情報を用いて地震波到達前から制御を行うことによって高い制御性能を実現する手法を開発することを目的として研究を行った。遠隔地震波と到達地震波を入力とした人工ニューラルネットワークを構成して到達地震波の未来波形時系列を推定し、推定未来波形を用いた予見制御手法を提案した。中越地震の記録波形によるシミュレーションを行い、フィードバックのみの制御性能を大きく上回る制御性能が得られることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造系にセンサ・アクチュエータを設置して地震による構造の振動を制御する新しい手法を提案した。強震モニタのような常時観測システムが、近い将来に地震波形情報そのものの実時間伝送も行えるようになることを想定し、震源に近い遠隔地波形情報も利用して到達地震波の未来波形をAIに基づく手法により推定することで、いわば先回りして振動制御する手法を研究した。中越地震の記録によるシミュレーションにより、提案手法は従来のフィードバック制御を大きく上回る性能を達成することを示した。これにより、現在緊急地震速報等に活用されている地震観測網の振動制御へのより高度な利用が実現され、地震を受ける構造系の安全性の向上につながる。

研究成果の概要（英文）：A new active vibration control strategy of structural systems based on the information of future seismic waveform observed in remote observation sites is proposed. A waveform transmission network transmits the observed waveform information of the remote site to the structure under control. The waveform transmission network is realized by interconnecting multiple controlled structures and observation sites. By using the remote waveform information, a preview control method is adopted as the control law. For the preview action, a future seismic waveform in some time interval is needed. An artificial-intelligence-based waveform estimation system is proposed to estimate the future seismic waveform. The core of the wave estimation system is a multi-layered artificial neural network. We show that the proposed control method achieves much higher control performance over the optimized LQ state-feedback control law through a simulation study with a recorded seismic event in Japan.

研究分野：制御工学

キーワード：アクティブ振動制御 地震観測網 未来波形推定 予見制御 ニューラルネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 近い将来発生が危惧されている東海、東南海、南海あるいはそれらの連動地震は、太平洋側地域の広い範囲で震度 6 強以上の揺れを引き起こすことが予想されており、構造物に大きな損害を引き起こす可能性がある。よって、特に制御系が設置される重要な構造物において、振動制御デバイスであるセンサ、アクチュエータのもつ能力を最大限に発揮し、様々な時間・周波数特性を持つ地震外乱に対して高い振動抑制性能を達成するような制御系設計の必要性はますます高くなってきている。
- (2) 現在まで種々の構造系振動制御(パッシブ、セミアクティブ、アクティブ制御)が研究開発され、実用化されているものも多い。セミアクティブ制御やアクティブ制御においては、ほとんどの場合フィードバック制御則が使用されるため、構造系や地震外乱の振動情報がセンサで実時間計測され、制御に使用されている。また、地震学研究や巨大地震に対する減災目的から、日本国内では多数の地点で地震の常時観測が行われている。強震モニタ[1]は、防災科学研究所が全国約 1000 箇所に設置した観測点の実時間震度、加速度等のデータを観測・配信するネットワークであり、その観測データは、緊急地震速報等に活用されている。以上、日本国内においては、既に多数の地点で地震波形が常時実時間計測されている。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記背景の下で、現在は当該構造での観測データのみで制御されている複数の構造系や地震観測サイト間をネットワーク接続し、他所の波形情報を常時得られるような環境を構築し、遠隔地で観測された波形情報をも制御が行われている当概構造の振動制御に活用することを考える。当該構造に地震波が到達する前から、伝送された遠隔地波形情報を利用した制御を行うことにより、ネットワーク接続されたすべての構造系において、従来の性能を大きく上回る高い制御性能を達成する制御手法の開発・提案を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

提案法の概要を説明するため、図 1 に示されるような振動制御されている 2 つの構造系 A および B を考える。地震発生時刻を $t=0$ とし、震央での(一般に直接観測されない)地震波形を $w_0(t)$ とする。左図(a) 従来法では、現在まで行われている振動制御手法が示されている。時刻 $t=t_A$ に構造系 A に波形 $w_A(t)$ が到達した時点で、構造系 A の制御が開始される。その後、時刻 $t=t_B$ で構造系 B に地盤を伝播した波形 $w_B(t)$ が到達し、その時刻から構造系 B の制御が開始される。これに対し、右図(b) 提案法では、構造系 A と B を相互にネットワーク接続し、震央に近い構造系 A に波形 $w_A(t)$ の地震波が到達した時刻 $t=t_A$ に、波形情報 ($w_A(t)$ 時刻暦) がネットワーク経由で構造系 B に即時かつ継続的に伝送される(同時に構造系 A 制御開始)。構造系 B は、構造系 A から伝送された $w_A(t)$ の波形情報と時刻 $t=t_B$ に構造系 B に到達する地震波 $w_B(t)$ 両者の情報を用い時刻 $t=t_A$ から振動制御を行う。

本研究では、このような遠隔地波形の伝送を前提に、外乱や目標値の未来情報を用いて高い制御性能を実現するための制御手法として知られている予見制御の適用を考える。予見制御は、図 2 左側のブロック線図に示すように、構造系自身のセンサで観測されるフィードバック制御部と、外乱未来値を用いたフィードフォワード制御部(予見動作部)から構成される。通常、予見制御手法は、目標値の未来値が既知の位置決め制御問題などに適用されている。

本研究課題においても、構造系 B に到達する波形 $w_B(t)$ の未来値を得ることができれば、予見制御則を適用でき、制御性能の改善が期待されるが、一般に地震波形の未来の時系列を得て予見動作を行うことは不可能である。本研究では、以下で詳述する到達地震波の未来波形を推定するためのシステムを構築し、推定された未来波形を用いて予見制御を行うことで、従来の振動制御手法に比しての制御性能の向上を図る。

図 1 において、先に地震波が到達する構造系 A の波形 $w_A(t)$ と時刻 $t=t_B > t_A$ に構造系 B に到達する波形 $w_B(t)$ は、同一震源の地震から生ずるため、ネットワークを介して構造系 B に伝送される $w_A(t)$ は、構造系 B に到達する波形 $w_B(t)$ の未来情報を含む。しかし、震源と構造系 A、B 間の

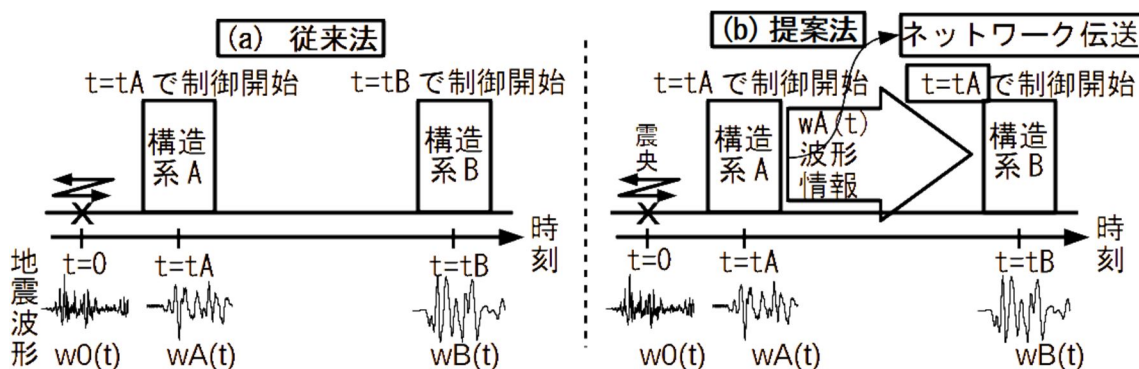


図 1: 制御系の概念図

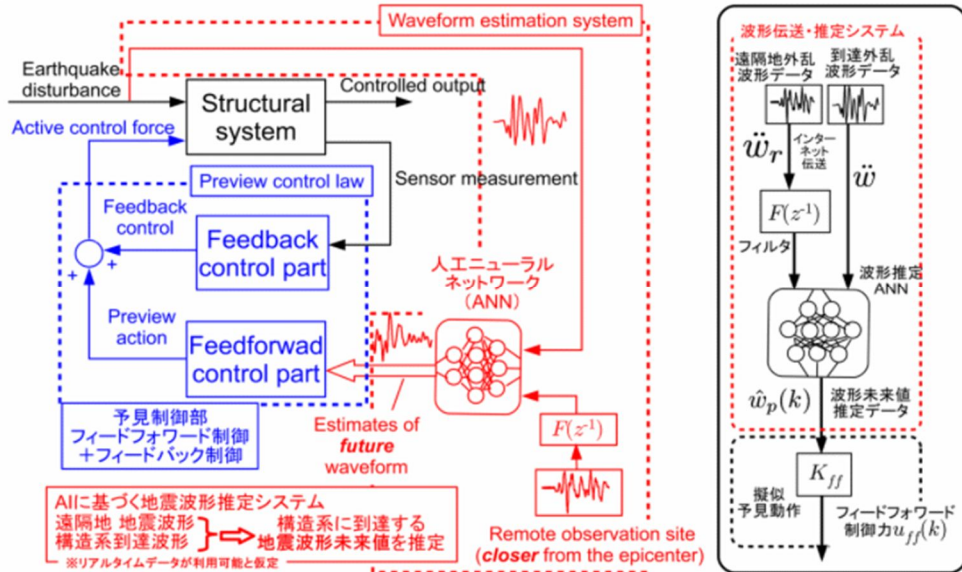


図 2 : AI に基づく波形推定システムを伴う予見制御系

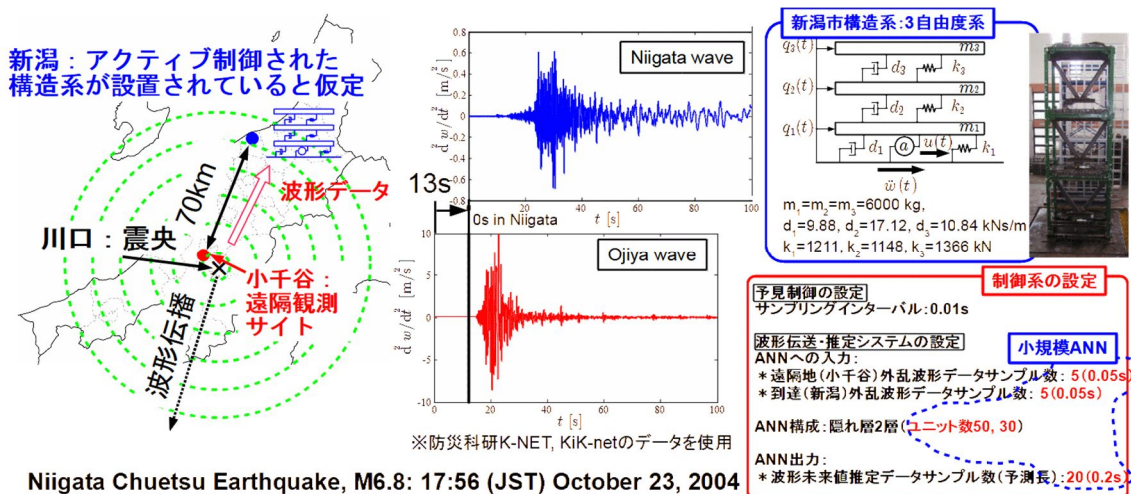


図 3 : 中越地震記録波形を用いたシミュレーション

完全または極めて正確な地盤特性を得ることは一般に不可能であり、予見制御の実現のためには、伝送される波形情報 $w_A(t)$ から波形 $w_B(t)$ の未来値をどのように得るかが課題になる。本研究では、地震外乱の波形の未来値を推定する機構として、図 2 にその概念図が示される人工ニューラルネットワーク (ANN) を使用する。ANN は、構造系 A と B で過去記録された実際の地震波形を用いて、予見動作を正確に行える程度まで波形 $w_B(t)$ の未来値を推定するように学習される。ANN で推定された $w_B(t)$ の未来波形系列 (図 2 中 $\hat{w}_p(k)$) と設計される予見フィードフォワード制御ゲイン行列 (図 2 中 K_{ff}) を用いて、予見動作が行われる。

4. 研究成果

2004 年の中越地震の記録地震波を用いたシミュレーションを行う。図 3 にシミュレーションの設定を示す。新潟市にアクティブ制御された 3 層構造物があると仮定し、提案する予見制御手法によって振動制御されると想定する。震央である川口町 (現長岡市) に近い小千谷市の波形データは、ネットワークによって約 70 km 離れた新潟市にある当該構造に即時伝送されると仮定する。S 波 (主要動) の伝播速度が一般に 3.5 ~ 4.5 km/s 程度であることを考慮すると、高速ネットワーク伝送によって新潟市に地震波が到達する前に小千谷波形データを伝送することは十分可能である。

図 2 の波形推定システムは、小千谷波形データ、さらには到達後の新潟波形データを用い、予見制御のために必要な新潟波形データの未来値 $\hat{w}_p(k)$ を推定する。ここで、制御系のサンプリング周期は 0.01 秒とし、予見するステップ長は 20 ステップ、すなわち 0.2 秒間の未来波形の時系列を推定するように ANN を学習させた。なお、ANN の入力とする小千谷波形データ、新潟波形データのサンプル数はそれぞれ過去 5 ステップ (0.05 秒間) である。ANN には、中間層が 2 層の多層型の一般的なものを採用した。アクチュエータの発生可能な制御力の上限の下で、制御性能が最適化されるように ANN 中の重みやバイアス、および予見制御の設計変数である重み係数を遺伝的アルゴリズム (GA) で最適化した。

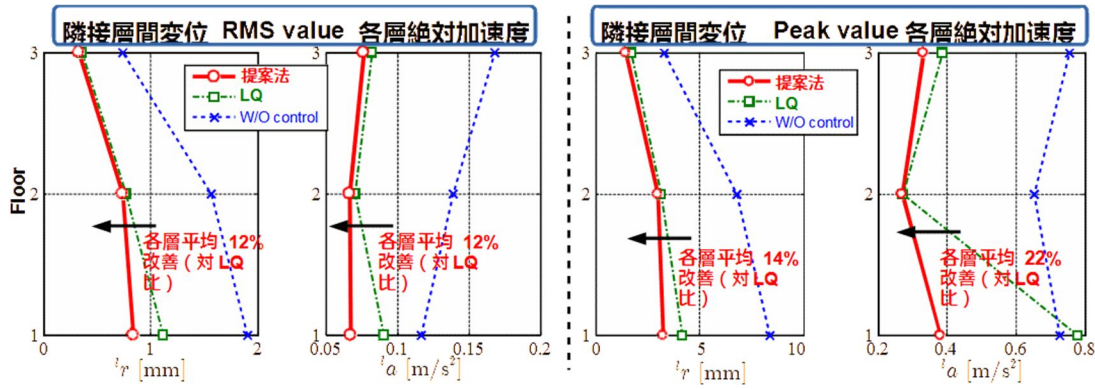


図4：3層構造制御結果（LQ制御：最適レギュレータとの比較）

W/O control：制御なし，LQ：最適レギュレータ，提案法：波形推定を伴う予見制御

提案手法との比較のため，図1(a)の既存手法で実現可能なアクティブ制御則の一つである最適レギュレータ（LQ制御）を設計した．最適レギュレータは，構造系に設置したセンサから検出される状態変数（各層変位，速度）をフィードバックして制御する手法であり，遠隔地の波形情報は使用しない．従来から高い制御性能やロバスト性を有することが知られており，多くのアクティブ振動制御系において採用されている制御則である．本研究では，最適レギュレータ設計の際，調整可能な設計パラメータである重み係数を予見制御と同一のアクチュエータ制御力の制限下で，GAにより最適化した．

3層構造の隣接層間変位，各層絶対加速度のRMS値およびピーク値を図4に示す．これより，提案する予見制御手法は，重み係数の調整により制御性能を最適化したLQ制御の性能をいずれの指標においても各層あたりの平均で10%以上改善している．今回，予見制御，LQ制御いずれの場合もアクチュエータの許容最大力は4500Nに設定されており，波形推定システムを伴う予見制御が，効率的に高い振動抑制性能を実現していることが示される．

以上より，提案する波形推定システムを伴う予見制御系は，地震観測ネットワークを利用することによって，本研究課題の目的である設置された制御機器であるセンサ，アクチュエータの能力を最大限に活用した従来手法からのさらなる振動制御性能の改善を達成した．

ここで説明した成果は，研究の進捗状況に応じて国内外の講演会で発表[3]，[4]，[5]，[6]され，それらをまとめたものが論文[2]において発表された．また，その後，複数の遠隔観測サイトの波形データを導入することによるさらなる制御性能の改善を試みた結果についても，国内の講演会で発表された[13]，[17]．

本研究課題では，国内で最近特に充実してきている全国規模の常時地震観測・配信網のさらなる高度化を想定し，実時間で得られる遠隔地波形情報を用いた振動制御手法について研究を行った．以下に研究成果をまとめる．

- 観測・配信網から遠隔地の波形情報を伝送することによって，制御される構造系のある地点に到達する地震波形の未来値をAIに基づく手法で推定する波形推定システムを提案し，波形推定システムを活用した予見制御系の適用を検討した．
- 中越地震の記録波形を用いたシミュレーションを実施し，提案する波形推定システムを伴う予見制御系が，従来のフィードバック制御の性能を大きく上回る制御性能を達成することを示した．

以上の成果により，大地震を受ける制御を伴う構造系の安全性がより向上する．本手法は，近い将来発生が危惧される東海，東南海，南海地震（あるいはそれらの連動地震）に対するよりレジリエントな社会実現の一助となり得る．

今後は，前述の複数観測地点の取扱い，将来到来する未知の地震波に対しても正確な予見動作を行うような汎用性の高い波形推定システムについて引き続き検討を行う予定である．

この成果に加え，本研究課題に関連して以下の研究成果を得ることができた．

- 遠隔地観測データを使用しないで地震波形を推定し，その結果を用い，予測制御に基づくセミアクティブ振動制御系を設計する方法について研究を行った[12]．
- 車両のセミアクティブサスペンションの制御において，路面外乱の未来値を運転支援用のカメラで検出可能であるという仮定の下で，予見データを用いた制御系設計について研究した[14]，[16]．この制御系設計問題は，外乱の未来情報が最近の技術の発展により入手可能であるという意味で，本研究課題と同様の構造を有している．
- 地震外乱を受ける配管系や構造系に対し，設置部相対加速度に比例した抵抗力を発生する慣性力ダンパを設置して振動制御を行う手法について検討した．配管系に対する慣性力ダンパの最適設置台数，設置位置，慣性質量値を最適設計する手法を開発した[7]，[8]，[15]．

また,慣性力ダンパの慣性係数値を可変化する機構を着想し特許出願[18]を行い,その機構を前提とした慣性力ダンパによる構造系のセミアクティブ振動制御について検討した[9],[11].

<引用文献>

- [1] 防災科学技術研究所, 強震観測網 (K-NET, KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- [2] K. Hiramoto and T. Matsuoka, Active vibration control of structural systems with a preview of a future seismic waveform generated by remote waveform observation data and an artificial intelligence-based waveform estimation system, Journal of Vibration and Control, Vol. 26, pp. 1602-1613 (2020). DOI: 10.1177/1077546319901024
- [3] K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda, High performance structural vibration control by a preview of the future seismic waveform generated with a wave transmission network and an AI-based estimation system, Proc. ASME Pressure Vessels & Piping Conference (2019).
- [4] 平元和彦,松岡太一,観測ネットワークを通じて得られた地震波形情報の共有による振動制御系の性能向上,日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2019 講演論文集 (2019).
- [5] 平元和彦,松岡太一,遠隔地地震波形情報とAIを用いた高性能なアクティブ振動制御,日本地震工学会・大会-2019 講演論文集 (2019).
- [6] 平元和彦,松岡太一,砂子田勝昭,観測ネットワークを通じて得られた遠隔地震波形を利用した2自由度型振動制御,日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集 (2019).
- [7] 山崎一生,平元和彦,砂子田勝昭,慣性質量要素を有する振動制御デバイスを適用した配管系の動的最適化,日本機械学会 2019 年度年次大会講演論文集 (2019).
- [8] 山崎一生,平元和彦,慣性質量要素を有する振動制御デバイスを適用した配管系の動的最適設計,日本機械学会論文集, Vol. 86, No. 891 (2020). DOI:10.1299/transjsme.20-00059
- [9] 植田涼介,平元和彦,山崎一生,慣性力ダンパの慣性質量係数切替による構造系のセミアクティブ振動制御,日本機械学会北陸信越支部代 57 期総会・講演会講演論文集 (2020).
- [10] K. Sato and K. Hiramoto, Semi-active vibration control of structural systems based on linear approximation of switched linear system, Proc. of the 15th International Conference on Motion and Vibration (2020).
- [11] I. Yamazaki and K. Hiramoto, Semi-active vibration control for structural systems with a variable inertia mass damper, Proc. of the 15th International Conference on Motion and Vibration (2020).
- [12] 佐藤 馨,平元和彦,MLD モデルに対する最適予測制御入力を学習したニューラルネットワークによる構造物のセミアクティブ振動制御,日本機械学会論文集, Vol. 87, No. 901 (2021). DOI:10.1299/transjsme.21-00180
- [13] 平元和彦,佐藤 馨,遠隔地観測地震波形情報を用いる構造系の予見型アクティブ制御: 推定システムの多重化とアンサンブル化,日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021 講演論文集 (2021).
- [14] 佐藤 馨,平元和彦,MLD モデルの最適予測制御によるセミアクティブサスペンションの振動制御,日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021 講演論文集 (2021).
- [15] 山崎一生,平元和彦,慣性質量ダンパを適用した三次元配管系の動的最適設計,日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2021 講演論文集 (2021).
- [16] 佐藤 馨,平元和彦,非ニュートン流体特性を考慮したMLDモデルの最適予測制御によるセミアクティブサスペンションの振動制御,日本機械学会第17回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2021) / 第30回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集 (2021).
- [17] 古澤駿磨,平元和彦,遠隔地観測地震波形を用いた構造系の振動制御: 複数地点観測データを利用した性能向上,日本機械学会北陸信越支部 2022 合同講演会講演論文集 (2022).
- [18] 平元和彦,山崎一生,可変慣性質量ダンパ,特願 2020-200763 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 YAMAZAKI Issei, HIRAMOTO Kazuhiko	4. 巻 86
2. 論文標題 Optimal design of piping systems using a vibration control device generating an inertial resistance force	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 17 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00059	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 K. Hiramoto and T. Matsuoka	4. 巻 -
2. 論文標題 Active vibration control of structural systems with a preview of a future seismic waveform generated by remote waveform observation data and an artificial intelligence based waveform estimation system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Vibration and Control	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1077546319901024	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 SATO Kaoru, HIRAMOTO Kazuhiko	4. 巻 87
2. 論文標題 Semi-active vibration control of structural systems with a neural network that trained preview optimal control for MLD model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 21 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.21-00180	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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 古澤駿磨, 平元和彦
2. 発表標題 遠隔地観測地震波形を用いた構造系の振動制御 : 複数地点観測データを利用した性能向上
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部2022合同講演会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 馨, 平元和彦
2. 発表標題 非ニュートン流体特性を考慮したMLDモデルの最適予見制御によるセミアクティブサスペンションの振動制御
3. 学会等名 日本機械学会第17回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2021) / 第30回スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎一生, 平元和彦
2. 発表標題 慣性質量ダンパを適用した三次元配管系の動的最適設計
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2021講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 馨, 平元和彦
2. 発表標題 MLDモデルの最適予見制御によるセミアクティブサスペンションの振動制御
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2021講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平元和彦, 佐藤 馨
2. 発表標題 遠隔地観測地震波形情報を用いる構造系の予見型アクティブ制御：推定システムの多重化とアンサンブル化
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2021講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植田涼介, 平元和彦, 山崎一生
2. 発表標題 慣性力ダンパの慣性質量係数切替による構造系のセミアクティブ振動制御
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部代57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaoru Sato and Kazuhiko Hiramoto
2. 発表標題 Semi-active vibration control of structural systems based on linear approximation of switched linear system
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Issei Yamazaki and Kazuhiko Hiramoto
2. 発表標題 Semi-active vibration control for structural systems with a variable inertia mass damper
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Hiramoto, T. Matsuoka and K. Sunakoda
2. 発表標題 High performance structural vibration control by a preview of the future seismic waveform generated with a wave transmission network and an AI-based estimation system
3. 学会等名 ASME 2019 Pressure Vessels & Piping Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平元和彦, 松岡太一
2. 発表標題 観測ネットワークを通じて得られた地震波形情報の共有による振動制御系の性能向上
3. 学会等名 Dynamics and Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平元和彦, 松岡太一, 砂子田勝昭
2. 発表標題 観測ネットワークを通じて得られた遠隔地震波形を利用した2自由度型振動制御
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎 一生, 平元 和彦, 砂子田 勝昭
2. 発表標題 慣性質量要素を有する振動制御デバイスを適用した配管系の動的最適化
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平元和彦, 松岡太一
2. 発表標題 遠隔地震波形情報とAIを用いた高性能なアクティブ振動制御
3. 学会等名 日本地震工学会・大会 - 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 可変慣性質量ダンパ	発明者 平元和彦, 山崎一生	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-200763	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	松岡 太一 (Matsuoka Taichi) (80360189)	明治大学・理工学部・専任教授 (32682)	

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