

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16K06158

研究課題名(和文) 大域的な繰り返し構造に着目したマス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御

研究課題名(英文) Wave analysis and wave control of damped mass-spring systems based on global periodic structure

研究代表者

長瀬 賢二 (Nagase, Kenji)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：70303667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、複雑な結合を有するマス・ばね・ダンパ系に対する波動解析・波動制御法の議論の確立を目指して、システムの大域的な繰り返し構造(ラプラス変換上での1階の漸化式表現)に着目した解析・設計法について議論した。特に、一方向に連鎖するマス・ばね・ダンパ系に対する結果の自然な拡張として、各質点が、隣り合う層に加えてその隣の層以降の質点にも結合を有する多段結合系や、質点が左右方向に加えて上下方向にも結合している多重結合系、ならびに、隣り合う層との結合が一組の単結合系において、サブシステムの内部構造を規定しない繰り返し系に対し、上記繰り返し構造に着目した解析・設計法について議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

波動制御法は、モード制御法の適用が難しい、大規模な繰り返し構造系に対して有用な振動制御法として期待されている。質点をばね・ダンパで単純に一方向に結合したシステムは、波動制御法の典型的な適用対象であるが、より複雑な結合を有するシステムに対しては、その議論は十分に行われていなかった。本研究では、その議論を、質点が隣り合う層に加えてその隣の層以降にも結合を有する場合や、左右方向に加えて上下方向にも結合する場合、および、隣り合う層との結合が一つの場合において、サブシステムの内部構造を規定しない場合へ拡張を行った。それにより、波動制御法の議論の適用対象を大きく広げることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to establish a general framework for the wave analysis and control of intricately connected damped mass-spring systems, and discussed the analysis and design method focusing on the global periodic properties of the structures (first order recurrence formula expression in the Laplace transformation domain). As a natural extension of the previous results for the simple cascade-connected damped mass-spring systems, we especially considered: damped mass-spring systems whose connections are beyond adjacent masses; damped mass-spring systems whose masses have two dimensional connections (in the longitudinal and lateral directions); and general mono-coupled periodic systems whose internal structure of the subsystem is not specified explicitly. For the above systems, we discussed the analysis and design method for the wave analysis and control by utilizing the above periodic properties of the systems.

研究分野：制御工学，機械力学

キーワード：波動制御 振動制御 マス・ばね・ダンパ系 周期系

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建造物の長大化や軽量化、また、車両などの高速・高性能化の要求を背景に、様々な分野で振動問題が顕在化しており、振動制御は重要な研究課題である。

振動制御における振動抑制の主な考え方として、モード制御法と波動制御法がある[1,2]。モード制御法は、振動を振動モードの和として解釈し、振動モードの特性を改善することで制振を行う手法であり、現在広く利用されている。しかしながら、モード制御法は、モデル化やコントローラ設計の労力が制振モードの増加に伴い飛躍的に増大するため、制振モードが比較的少ない小規模なシステムに適した手法と考えられている。

一方、波動制御法は、システムの繰り返し構造に着目し、振動を進行波の和として解釈し、波の反射を抑制することで制振を行う手法である。この手法は、二次定数(伝搬定数など)と呼ばれる伝達関数に基づく解析・設計法であるため、パラメータ変動に対して高いロバスト性を有することや、また、コントローラの形が建造物の長さや繰り返し構造の数に依存しないなどの特徴が知られており、モード制御法の適用が難しい、多数の制振モードを有する大規模な繰り返し構造系に対し有用な制振法として期待されている[3]。

しかしながら、波動制御法は、現在までのところ、進行波による解析手法が確立されている、一様な弦やはり、また、一方向に連鎖する単純なマス・ばね・ダンパ系など、比較的簡単なシステムを主な適用対象としており、その適用範囲の拡大が望まれている。

2. 研究の目的

1. で述べたように、波動制御法は、システムの繰り返し構造を利用した解析・設計手法である。従来考慮されてきたマス・ばね・ダンパ系は、質点が、隣接する質点のみとばね・ダンパで一方向に連結されているシステムである。この場合の繰り返し構造(サブシステム)は一意に定まり、隣り合う質点の速度と力の関係は、ラプラス変換上で、2変数、1階の漸化式で表される。一方、研究代表者らは近年、質点が、隣接する質点に加え、その隣の質点ともばね・ダンパで結合されたシステム(二段結合系)について、波動制御法の検討を行った。この場合のシステムは、上記の様な局所的な繰り返し構造(隣接する質点の変数間の漸化式表現)を有していないものの、変数の次元を拡大し、サブシステムを適切に選べば、大域的な繰り返し構造を見出すことができ、この場合のシステムの動特性も、従来同様、1階の漸化式(変数の数は4つ)で表され、従来同様の解析・設計手法が適用可能であることが分かった。

このことから、局所的な変数の関係のみならず、大域的な変数の関係に着目することで、これまで波動制御法の適用が難しいと考えられていたシステムに対しても、波動制御法の適用が可能である可能性がある。そこで本研究では、複雑な結合を有するマス・ばね・ダンパ系に対する波動解析・波動制御法の議論の確立を目指し、システムの大域的な繰り返し構造(ラプラス変換上での1階の漸化式表現)に着目した解析・設計法について考える。

3. 研究の方法

2. で述べたように、本研究では、複雑な結合を有するマス・ばね・ダンパ系に対する波動解析・波動制御法の確立を目指す。本研究では、特に、質点が、ばね・ダンパで、多段、もしくは、多方向に結合されたシステム、および、システム特性が周期的に変化するシステムに対し、上記漸化式表現に基づく解析・設計法について検討を行う。具体的には、以下を行う。

質点が隣接する層を超えて多段に結合されたシステム(多段結合系)は、高層ビルやテンセグリティ構造などを抽象化したモデルである。ここでは、まず、従来結果の自然な拡張として、従来の単段結合系、二段結合系の結果[4,5]を、三段結合系へ展開することを考える。そして、その結果をもとに、一般の n 段系への展開を試みる。

質点が多方向に結合されたマス・ばね・ダンパ系は、二次元波、三次元波などを想定した解析モデルであるが、これらについても、システムを、縦・高さ方向に結合された複数の質点が、横方向に連鎖するシステムとみなせば、多段結合系と類似した、ラプラス変換上での1階の漸化式表現で表されると考えられる。そこでまず、二次元波を想定した、質点が平面内に格子状に配置された状況を考え、その議論の展開の可能性を探る。

システム特性が周期的に変化するシステムに関しても、各周期を一つのサブシステムととらえれば、その繰り返し構造とみなすことができるため、それらもラプラス変換上での1階の漸化式表現が可能となると考えられる。そこで、サブシステム内の構造を規定しない状況を考えることで、それらに対する議論の展開を試みる。

さらに、適用対象のさらなる拡大を目指し、ロボットシステムやテンセグリティ構造体への適用の可能性や、知能材料を用いた制御系実装の可能性などについても併せて検討を行う。

4. 研究成果

3. で述べたように、本研究では、質点が、ばね・ダンパで、多段、もしくは、多方向に結合されたシステム、および、システム特性が周期的に変化するシステムに対し、上記漸化式表現に基づく解析・設計法について検討を行った。

質点が隣接する層を超えて結合された多段結合系に関しては、まず、二段結合系(図1)の二次定数(伝搬定数(図2)、特性インピーダンス)の性質の詳細な議論から始め、それを一般の n 段結合系へ展開が可能であることを明らかにした。ここでは、二次定数の解析関数としての性

質に基づく解析・設計法についての詳細な議論を行った。特に、二段結合系については、単段結合系の場合と同様、一定比で変化する場合についても議論の展開が可能であることを明らかにした。波動制御の振動制御に対する有効性についても、数値シミュレーションにより検証し、良好な結果を得た。

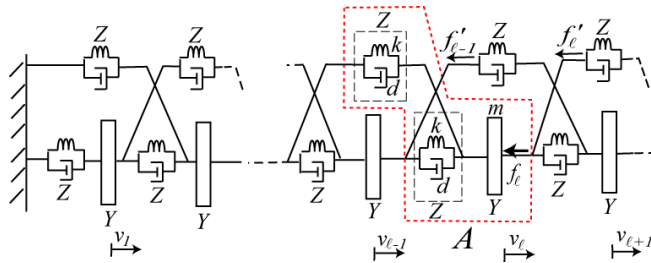


図1 二段結合マス・ばね・ダンパ系

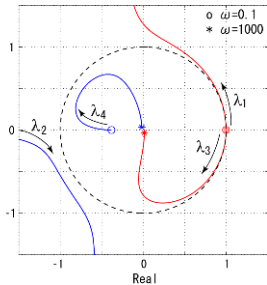


図2 伝搬定数

二次元波，三次元波などへの展開を想定した解析モデルである，多方向に結合されたマス・ばね・ダンパ系に対しては，特に，平面内に格子状に配置された質点があればね・ダンパで結合されたシステムを考えた（図3，4）。システムは，縦方向に結合された複数の質点が，横方向に連鎖する多重結合系とみなすことができる（図4のA）。そこではまず，二重結合系（縦方向に並ぶ質点が2つの場合）の漸化式表現の導出からはじめ，その二次定数が，単段結合系の場合と同様，波動解析の議論に必要な性質を満足することを確認した。また，その議論を，一般の n 重結合系へ展開を行った。振動制御への有効性についても，多段結合系と同様，数値例により良好な結果を確認している。

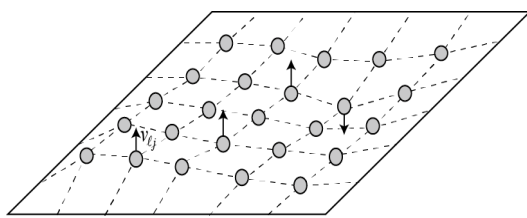


図3 平面波のモデル

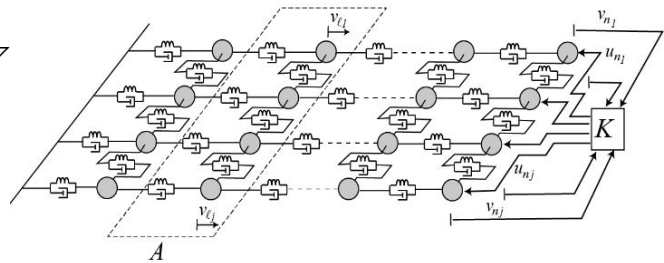


図4 質点が多方向に結合したマス・ばね・ダンパ系

システム特性が周期的に変化するシステムに関しては，各周期を一つのサブシステムととらえると，上記同様，繰り返し構造とみなすことができ，ラプラス変換上での1階の漸化式表現が可能となる。周期的に変化するシステムとしては，図5に示す，内部構造を規定しないサブシステムが，隣り合う層と一組の力と速度を交換する状況（単結合繰り返し系）について考えた。サブシステムの内部構造としては，図6に示すものなど，様々なものが考えられる。そのシステムに対し，波動解析が適用可能なシステムの条件を明らかにするとともに，それを満たすシステムの二次定数が，波動解析・制御の議論に必要な性質を満たすことを確認した。また，伝搬定数が一定となる条件を考え，その条件を満たす漸化式の条件も導いた。その条件を満たすシステムの例として，図6のようなサブシステムが一定比で変化するものが考えられる。図7は，図6(c)のサブシステムが一定比で変化する場合における，波動制御コントローラの制御効果である。

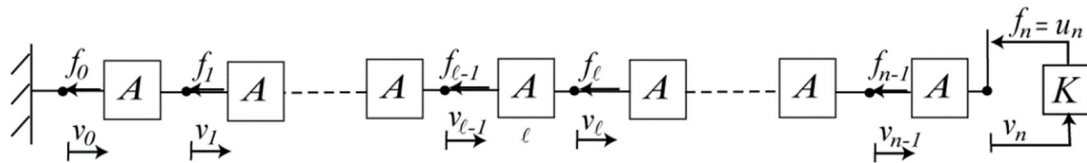


図5 単結合繰り返しシステム

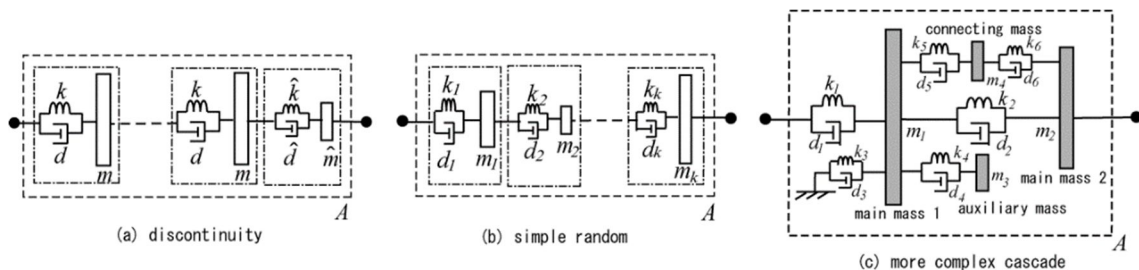


図6 サブシステムの内部構造の例

波動解析・制御法の異分野への適用の可能性については、その運動モデルより、テンセグリティ構造に加え、図 8 のような、リンク結合された多剛体系（ロボットシステムを抽象化したもの）などにも展開が可能であるとの感触を得た。知能材料による制御系の実装とともに、今後の展開が期待できると考えている。

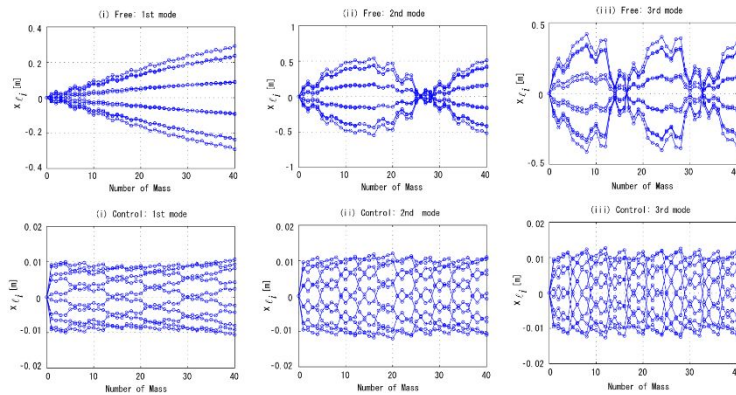


図 7 制御結果（上段：無制御，下段：波動制御）

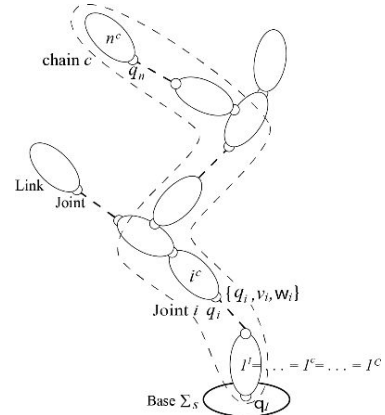


図 8 ツリータイプシステム

< 引用文献 >

[1] M.J. Balas: Active Control of Flexible Systems, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 25, No. 3, pp. 415-436 (1978)

[2] D.R. Vaughan: Application of Distributed Parameter Concepts to Dynamic Analysis and Control of Bending Vibrations, Journal of Basic Engineering, Vol. 90, No. 2, pp. 157-166 (1968)

[3] 長瀬, 早川: 柔軟構造物のアクティブ振動制御における最近の動向 マス・バネ・ダンパ系にみるモード制御法と波動制御法, システム/制御/情報, Vol. 44, No. 5, pp.253-258 (2000)

[4] H. Ojima, K. Nagase, Y. Hayakawa: Wave-based Analysis and Wave Control of Damped Mass-Spring Systems - Characterization from the Propagation Constants - , 計測自動制御学会論文集, Vol. 38, No.3, pp. 239-246 (2002)

[5] 長瀬, 中道: 多段結合を有するマス・ばね・ダンパ系の波動制御 (基礎理論とテンセグリティ構造体への応用), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 79, No. 806, pp. 3732-3747 (2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 K. Nagase, A. Doshita, T. Midoro	4. 巻 146
2. 論文標題 Analytical Properties of Secondary Constants of Uniform and Uniformly Varying Mono-Coupled Periodic Structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 106974
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymsp.2020.106974	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 箕土路 拓也、長瀬 賢二	4. 巻 33
2. 論文標題 非一様な二段結合マス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 207～218
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5687/iscie.33.207	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 箕土路 拓也、長瀬 賢二	4. 巻 85
2. 論文標題 多段結合マス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 19-00054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/transjsme.19-00054	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 Julien Amar, Kenji Nagase	4. 巻 131
2. 論文標題 A Unified Framework for Dynamics and Control of Tree-Type Systems using Exponential Coordinates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 446～468
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ymsp.2019.03.033	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 田上 浩大、長瀬 賢二	4. 巻 55
2. 論文標題 並列仮想ばねを利用した自己釣り合い力を有するマルチエージェントシステムのフォーメーション制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 466 ~ 475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.466	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 箕土路 拓也、長瀬 賢二	4. 巻 84
2. 論文標題 二段結合を有するマス・ばね・ダンパ系のインピーダンスマッチングコントローラの正実性について	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 18-00302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.18-00302	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 K. Nagase, T. Yamashita, N. Kawabata	4. 巻 77
2. 論文標題 On a Connectivity Matrix Formula for Tensegrity Prism Plates	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Mechanics Research Communications	6. 最初と最後の頁 29 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mechrescom.2016.08.003	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11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 長瀬 賢二
2. 発表標題 単結合機械システムの波動解析・波動制御（一般繰り返し構造系への展開を目指して）
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 第96回定期総会講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Julien, K. Nagase
2. 発表標題 Design Optimization of Tree-type Robotic Systems using Exponential Coordinates and Genetic Algorithms
3. 学会等名 The 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長瀬 賢二
2. 発表標題 単段・多段結合を有するマス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 第95回定期総会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 箕土路 拓也, 長瀬 賢二
2. 発表標題 一定比で変化する二段結合マス・ばね・ダンパ系の波動解析・波動制御
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Julien, K. Nagase
2. 発表標題 Dynamics and Control of Tree-Type Manipulator Systems using Exponential Coordinates
3. 学会等名 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堂下 綺斗, 長瀬 賢二
2. 発表標題 繰り返し構造からなるマス・ばね・ダンパ系の波動制御
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田上浩大, 長瀬賢二
2. 発表標題 大域的に利用可能な自己釣り合い力を有するマルチエージェントシステムのフォーメーション制御
3. 学会等名 第36回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中大地、長瀬賢二、土橋宏規
2. 発表標題 クォータニオン表現を用いた多指ハンドロボットのシームレスマニピュレーション
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 勝山颯人、長瀬賢二、土橋宏規
2. 発表標題 誘電エラストマーを用いた振動発電における発電率向上のための回路構成の検討
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上一輝、長瀬賢二
2. 発表標題 非境界層におけるマス・パネ・ダンパ系の波動制御
3. 学会等名 2016年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Masuda, K. Nagase
2. 発表標題 Adaptive Formation Control with Self-Equilibrium Forces
3. 学会等名 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2016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
---------	---------