

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560541

研究課題名(和文) 受動的機械回路網による制振制御系設計 達成可能性能とハイブリッド最適化

研究課題名(英文) Vibration Attenuation by Passive Mechanical Networks: Achievable Performance Limitations and Hybrid Optimization

研究代表者

管野 政明 (Kanno, Masaaki)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：80554261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：受動的機械素子を用いた振動抑制に関して、特に近年提案されたイナータという素子の利用を念頭に置き、達成可能性能に関する研究を行った。イナータを用いた場合、 H_2 ノルム、 H_∞ ノルムで性能評価するとメリットは限定的であること、一方、振動吸収部の最大変位に関しては減少させられることが確認された。その他、 H_∞ ノルムでの性能を最適化するための、代数的手法に基づくパラメータ最適化手法を確立した。また、「平均的減衰比」という概念を提案し、それが代数的に特徴づけられることを示し、さらに平均的減衰比に制約を課しながら達成可能性能を低減させる手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：This research project is concerned with analysis of the best achievable performance level of vibration attenuation by means of passive mechanical networks, with the use of the inerter, a recently invented passive mechanical element, in mind. It has been shown that the inerter may improve the performance when measured in terms of the H_2 norm or H_∞ norm but that the improvement can be marginal for a system with a soft spring. Also, it is shown that the inerter may be beneficial when there is a constraint on the travel of the vibration absorption part. An algebraic method is developed that tunes system parameters in order to optimize the H_∞ performance. Moreover, the notion of 'average damping ratio' is introduced, and it is shown that the quantity can algebraically be characterized, which further leads to an approach that minimizes the H_2 performance under a constraint on the average damping ratio.

研究分野：システム制御理論

キーワード：受動的システム 制振制御 達成可能性能 国際研究者交流 イギリス

1. 研究開始当初の背景

(1) 機械系において振動制御は常に重要な問題であり、バネ・ダンパなどの受動的機械素子を用いた受動的制御やフィードバック制御による能動的制御に関して、さまざまな研究が行われ、また多くの制振制御系が到る所で使用されている。受動的機械回路網による制振制御は外部からエネルギーを供給する必要がない、また本質的に系が不安定になることがないという利点があるが、バネ・ダンパから構成される回路網では受動的機械回路網の部分集合しか実現できず、受動的制御の可能性を最大限生かしているかどうか不明であった。機械素子を組み合わせた回路網にて受動的回路網の完全なクラスを実現できるようにするため、近年、イナータと呼ばれる受動的機械素子が考案された。さらに、イナータを用いることにより、既存の受動的機械回路網を上回る性能を達成することができることも実証された。

(2) 近年、制御理論分野において、フィードバック制御による達成可能性能に関する研究が盛んに行われてきた。そこでは、与えられた性能指標に対して達成可能性能に関する表現を陽に解析的に与えることにより、どのような性質を持つ系が制御しやすいかを定性的に明らかにしようとするを目的としていた。また、代数的手法を活用することにより、制御対象の(設計自由度のある)物理パラメータを、最適制御器も勘案しながら制御対象が制御しやすくなるように調整する手法も提案されてきた。

2. 研究の目的

(1) イナータの考案により、原理的には受動的機械回路網の完全なクラスが実現できるようになり、それにより振動抑制性能を向上させることができることも実証された。本研究の目的は、どのような状況下においてイナータが有効であるか、またそれにより達成できる性能を解析的に表現することができるか等、理論的に明確にすることであった。その結果として、イナータの使用を検討すべきか否か、詳細に検討することなく見極める、また性能向上がどの程度になるか大まかに見積もることが可能になる。

(2) 実際に機械回路網を設計する際には、回路網の構成を決定し、そのうちバネ・ダンパ・イナータのパラメータを適切に調整することが必要となる。パラメータの調整に際して、性能指標をパラメータにより表現し、さらに性能のパラメータに対する感度を計算可能にすることにより、パラメータの調整が系統的に行うことができる。それを実現するために、代数的手法に基づいた手法が適している。実際の設計を支援するため、代数的手法に基づいたパラメータ最適化手法も確立する。

3. 研究の方法

(1) イナータを用いることにより、構成可能な受動的機械回路網のクラスが広がるが、それがどの程度、実際的な制振制御に有効であるかを検討するために、 H_2 ノルムや H_∞ ノルムという制御の分野で用いられる指標を用いて制振性能を測った。特に、代数的手法に基づき H_2 ノルムや H_∞ ノルムの最適値の特徴づけを行った。その結果、そのような指標を用いた場合、イナータの使用による性能向上が限定的である場合があることも確認された。イナータによりどのようなメリットが生まれるのかを確認するために、その他の現実的な性能指標も検討した。特に検討したのは、制振機構部の主振動系部からの相対変位や、制振性能のロバスト性である。前者に関しては、主として数値シミュレーションにより相対変位の最大値を求めることにより評価した。

(2) システムの H_2 ノルムを計算するためには、本質的には連立一次方程式を解けば良く、パラメータを含む系に対しても、数式処理システムを用いることにより、 H_2 ノルムを計算することは(計算時間の問題を除けば)簡単に行える。一方、振動制御の分野で特に用いられる H_∞ ノルムは、例えば数値計算に基づくものでは、とある行列が虚軸上に固有値をもつかどうかを判定することにより求められる。一方、研究代表者は先行研究において、代数的手法を用いることにより H_∞ ノルムが精度保証付きで求めることが可能であることを示している。この手法を拡張することにより、系にパラメータが含まれている場合、パラメータと H_∞ ノルムを代数的に関連付けることが可能である。また、その結果を用いることにより、 H_∞ ノルムのパラメータに関する感度を計算することが可能である。このような方法に基づき、パラメータを調整して H_∞ ノルムを低減する手法を確立した。

(3) 系の振動特性を特徴づける要素として、極の位置、減衰比などがある。インパルス応答、ステップ応答などの時間応答の絶対値の最大値等は計算が難しいため、その代替となる計算しやすい特徴量が望まれる。ここでは、個々の極の減衰比ではなく、極の(実部の)総和及び極の虚部の総和を考え、それらの比を考えることにより、系全体の振動特性を評価した。系が与えられたならば、極の総和は直ちに計算が可能である。一方、極の虚部の絶対値の総和に関しては、直接的には求めることができない。ここで、研究代表者の先行研究である、最適制御の際に用いられる多項式スペクトル分解の代数的手法を活用することを考えた。

4. 研究成果

(1) イナータを用いた受動的機械回路網を用いることにより、 H_2 ノルムや H_∞ ノルムで測

った場合の制振性能は向上することを理論的解析によって確認した。しかしながら、バネ定数が小さい、いわゆる柔らかい系においては、その性能向上の度合いが小さいことも確認された。現実的な系においては、取り付け上の制約等により、振動吸収部である動吸振器の許容される振幅に限界がある場合がある。インパルス外乱に対する動吸振器の最大振幅に制約がある場合、イナータを用いることにより、 H_2 ノルムや H_∞ ノルムの意味での制振性能を向上させることが可能であることが、シミュレーションベースで確認された。現在、その結果をより精緻に検証しているところである。また、最大振幅は計算上正確に求めることが難しいということもあり、最大振幅の代替となる、計算が容易な指標の模索及びその妥当性の検証も進めている。特に計算に関しては、パラメータを含んだ場合でも計算可能で、パラメータ最適化が行いやすいものを引き続き検討していく。

(2) H_∞ ノルムは、入出力を持つ系における、正弦波入力に対する出力の最大増幅率（ゲイン）を表すため、機械系の振動抑制問題において頻繁に用いられる指標である。パラメータ等を含まない固定された系の H_∞ ノルムの計算に関しては数値計算手法が確立している。本研究において、パラメータを含む系に対して、代数的手法によりパラメータと H_∞ ノルムを関連付ける手法を提案した。その結果は、パラメータの H_∞ ノルムに対する感度の計算も可能にするものである。さらに、その手法を制御系設計も含んだ最適制御問題に対して拡張した。具体的には、 H_∞ ループ整形設計法と呼ばれる実用上有用な H_∞ 制御問題に対し、制御対象に含まれるパラメータを残したまま、達成可能な最適性能 (H_∞ ノルム) が計算可能であることを示し、またフィードバックにより達成可能な性能が最小となるように制御対象のパラメータをニュートン法に基づき最適化するアルゴリズムを提案した。これにより、良い性能を得るために制御器を適切に設計することに加えて、制御しやすいように制御対象のパラメータを調整し、より良い性能を得られるようになった。

(3) 振動制御では、主振動部及び振動を吸収する動吸振器の部分の振幅の幅を小さくすることを目的としているが、定常状態における入出力信号の振幅比であれば H_∞ ノルムにより評価可能である。一方、インパルス応答やステップ応答に関しては、(1)でも指摘している通り、最大振幅の計算は容易ではない。ここでは、最大振幅を直接計算する代わりに、振動系の極の虚部や実部と虚部の比である減衰比を検討することにより、応答の振動的性質を測ることを検討した。具体的には、極の実部の和と虚部の絶対値の和を考え、それらの比を「平均的減衰比」という新しい概念として提案した。また、パラメータがある系

に対して、そのような値が代数的に特徴づけられることを確認した。

さらに、先行研究において、あるクラスの H_2 制御問題に関しては、達成可能性能が最適設計により得られる閉ループの極の和と開ループの極の和の差として表現できること、また制御対象にパラメータが含まれている場合でも、その量が代数的に特徴づけられることを示していた。この結果は、最適性能に対して簡単な表現があることを示すと同時に、極の和であるため、極の虚部の情報が失われ、 H_2 ノルムで測った場合、同じ達成可能性能ではあるが、ある系では振動的であり別の系ではほとんど振動がない、ということがあり得ることを意味していた。先行研究の結果を拡張し、 H_2 制御問題において、平均的減衰比に制約を課しながら達成可能性能を最小化する、制御対象と制御系の同時設計手法を提案した。これにより、最終的な系が過度に振動的になることなく、良好な応答を得る設計手法が確立された。

上の手法では、極の虚部の絶対値の総和を求めるために、代数的手法に基づく多項式スペクトル分解手法を拡張した。多項式スペクトル分解では、原点（虚軸）対称に根を持つ多項式が与えられたとき、その根のうち左半平面にあるもののみを根として持つ多項式を求める。得られた多項式の根の虚部の絶対値の和は、元の多項式の上半平面にある根の総和の虚部と等しい。そのため、根が 90° 回転するように元の多項式に対して座標を回転させ、それに対してスペクトル分解することを考える。但し、その場合、実多項式が必ずしも得られないため、Hurwitz の安定判別法も利用して、限界安定となる状況を用いて特徴づけた。

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1件)

- ① M. Kanno and S. Hara, Symbolic-numeric Hybrid Optimization for Plant/Controller Integrated Design in H_∞ Loop-shaping Design, Journal of Math-for-Industry, 査読有, Vol. 4, pp. 135-140, 2012 (2012B-8), http://j-mi.org/contents_file/contents_files/loader/0/Article/277/file/default/JMI2012B-8.pdf

[学会発表] (計1件)

- ① S. Fukamachi, M. Kanno, and S. Hara, Sum of Imaginary Parts and Performance Limitation of the LQG Problem for SIMO Systems, 53rd IEEE Conference on Decision and Control, pp. 6665-6670, 2014/12/16, Los Angeles (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

管野 政明 (KANNO, Masaaki)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号：80554261

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

Malcolm C. Smith