

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14108

研究課題名（和文）固有振動数成分除去法を用いた残留振動制御に関する研究

研究課題名（英文）Study of suppression of residual vibration by elimination of the natural frequency component

研究代表者

栗原 海（Kurihara, Kai）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：90896888

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、天井走行クレーンの制御入力設計に固有振動数成分除去法を提案した。本報では、多自由度系モデルに対する固有振動数成分除去法の有効性の検証、およびロープ長さの変化を利用したアクチュエータへの負荷を軽減する手法の開発を行った。前者については、多自由度系にモード変換を適用し、それぞれのモードで非線形性や減衰の影響を含むみなし外力を導出し、対応する固有振動数を除去することで残留振動を抑制できることを示した。後者については、ロープ長さの変化に自由度を持たせ、台車加速度に加えてロープ長さの範囲を制限する関数を用いて目的関数を設定することで、ロープ長さを利用した台車加速度低減が可能であると示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

残留振動とは機械システムの動作停止時に系に残っている許容できない振動を挿し、天井走行クレーンやロボットアームといった高速運転が求められる機械では問題になり得る。本研究では天井走行クレーンを対象としているが、提案している固有振動数成分除去法はクレーンに限らず一般的な機械に適用可能である。多自由度系への適用、および時間的に変化するパラメータを考慮した制御が可能となったことで、本手法の適用範囲もより広くなった。したがって、残留振動が問題となる機械全般への対策としての利用が可能である。また、本研究では様々な系で残留振動抑制の必要条件を示しており、これは対策法の発展につながるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, the natural frequency component elimination method is proposed for the control input design of an overhead travelling crane. In this paper, the effectiveness of the natural frequency component elimination method for multi-degree-of-freedom system models is verified, and a method to reduce the load on actuators using changes in rope length is developed. For the former, we applied mode transformation to a multi-degree-of-freedom system, derived the deemed external forces including the effects of nonlinearity and damping in each mode, and showed that residual vibration can be suppressed by removing the corresponding natural frequencies. For the latter, the objective function was set up by adding a degree of freedom to the rope length variation and using a function that limits the range of the rope length in addition to the trolley acceleration, and it was shown that the trolley acceleration can be reduced by using the rope length.

研究分野：機械力学

キーワード：振動制御 天井走行クレーン 残留振動 固有振動数成分 非線形系

1. 研究開始当初の背景

残留振動とは機械システムの動作停止時に系に残っている許容できない振動を指し、天井走行クレーンやロボットアームといった高速運転が求められる機械では、残留振動の発生により、安全性の低下のみならず、振動が収まるまで正確な位置決めができないことから作業効率の深刻な低下が引き起こされる。本研究で対象としている天井走行クレーンの運転においては熟練者の運転技術に頼ることで残留振動の発生を回避しているものの、高齢化にともなう熟練作業者の減少は今後も進むことが現実視されている。一方、物流の著しい拡大にともないクレーン作業のさらなる高速化に対する需要は高まっており、近年、安全性向上、作業効率化、コスト削減のすべてを実現することができる天井走行クレーンの自動化が強く望まれている。

クレーンの自動化を行うにあたっては、目標位置における吊り荷の残留振動を抑制するための手法が必要となる。クレーンの残留振動の制御手法が備えるべき要件としては、高速搬送を行う際に避けられない吊り荷振れ角の増大にともなって現れる非線形性に対応できること、多種多様な使用環境においてリアルタイムで系パラメータを正確に同定することは困難であるため不確かさを許容できるロバスト性を有すること、搬送中にロープ長が変化する場合のような系パラメータの時間的変動に対応できること、高次モードの残留振動が生じることがあるため多自由度系にも適用できること、などが挙げられる。これまでクレーンの残留振動の制御手法に関して多くの研究が行われているが、上の要件をすべて兼ね備えた手法は未だ存在していない。

2. 研究の目的

本研究では、天井走行クレーンの制御入力設計に固有振動数成分除去法を提案する。線形不減衰系について、有限時間作用する外力が系の固有振動数成分を持たないなら、外力が作用し終わったとき残留振動が生じない、という性質がある。この性質を非線形性や減衰を有する一般的な系の制御に応用した手法が固有振動数成分除去法である。この手法を天井走行クレーンのオープンループ制御に適用し、台車への制御入力のみで吊り荷の残留振動を抑制しつつ、指定時間で目的位置に搬送する手法の確立を目指す。

天井走行クレーンを対象とした残留振動の抑制および実機への適用を可能とする制御手法を確立すべく、主に次の2つの事項について調べる。

- (1) 多自由度系モデルに対する固有振動数成分除去法の有効性を検証すること。
- (2) ロープ長さの変化を利用してアクチュエータへの負荷を軽減する手法を開発すること。

3. 研究の方法

(1) 多自由度系まで含めて固有振動数成分除去法の有効性を検証する。検証には図1のような二重振り子型クレーンを模した二自由度系モデルを用いる。これは吊り荷に加えてフックを質点として扱うモデルであり、図中の θ_1 および θ_2 に生じる残留振動を固有振動数成分除去法を用いて抑制する。

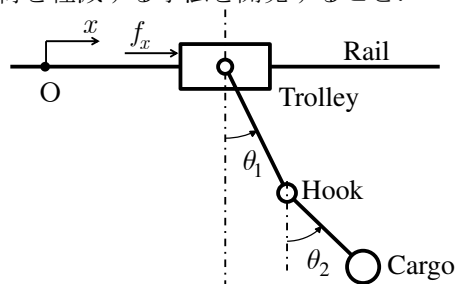


図1 二自由度系モデル

①まず、図1の二自由度系モデルへの固有振動数成分除去法の適用方法について検討する。固有振動数成分除去法は系の持つ非線形性や減衰の影響を、減衰のない線形系に作用する外力(みなし外力)として捉えて、固有振動数成分の除去を行うことで残留振動を抑制する。図1のような二自由度系モデルでは、非線形性や減衰の影響を外力と捉えた運動方程式にモード変換を行い、各モード外力をそれぞれのモードに対応するみなし外力と捉える。それらのみなし外力から対応する固有振動数の成分を除去することで残留振動の抑制を図る。

②次に、パラメータに推定誤差がある場合にも残留振動の抑制効果を高める方法について考える。過去の研究で、単振り子型の1自由度系モデルにおいては、みなし外力から固有振動数近傍の成分をも低減させる条件を加えることでロバスト性を向上できることを示している。二自由度系モデルでも同様に固有振動数近傍の成分を低減することでロバスト性の向上を図る。

(2) ロープ長さの変化を利用したアクチュエータの負荷軽減手法を開発する。図2のようにロープ長さの変化するモデルを使用する。

①まず、ロープ長さ変化を考慮して固有振動数成分除去法を適用する。ロープ長さが変化する場合は、非線形性や減衰の影響と同様にその影響を外力とみなすことで残留振動の抑制が可能である。

②次に、ロープ長さの変化を利用して台車加速度の低減を図る。ロープ長さの変化を時間関数で表し、台車の軌道とロープ長さの変化の両方を変数として最適化を行う。最適化では台車加速を最小化する目的に加えて、ロープ長さの変化が任意の範囲でのみ行われるように目的関数を設定する。

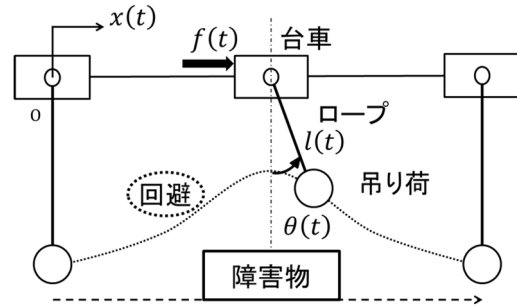


図2 ロープ長が変わるクレーン

4. 研究成果

(1) 多自由度系モデルを用いた検証

①二自由度系モデルに固有振動数成分除去法を適用して数値シミュレーションを行った結果を図3に示す。図3には一定時間ごとのクレーンの状態を図示している。図3の左図は制御開始時および終了時の台車の条件のみを決めて制御を行った場合、右図は固有振動数成分除去法を適用した場合である。制御終了時（右端）に左図では残留振動が生じているものの、右図では生じていない。このことから、二自由度系モデルでも固有振動数成分除去法を適用することで残留振動を抑制することが可能である。

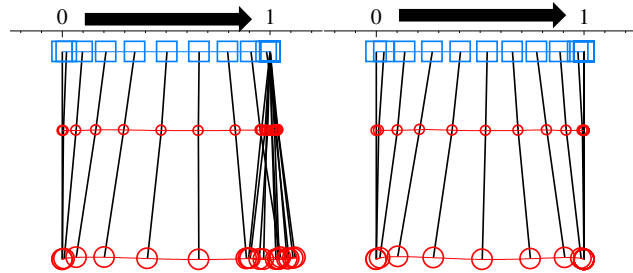


図3 クレーンの運動（右は本手法適用後）

本報では検証を図1の二自由度系モデルで行った。一方で、提案した手法は、多自由度系に対してモード変換を行い各モードのみなし外力から対応する固有振動数成分を除去する、という手順が明瞭な手法である。したがって、二自由度よりも多い多自由度系のモデルであっても同様の手順で適用可能である。

②二自由度系モデルに対し、さらにロバスト性向上手法も適用した結果を図4に示す。図4は横軸に固有振動数の推定誤差をとり、縦軸に残留振動の大きさをとったものである。左図が1次モード、右図が2次モードの残留振動の大きさであり、実線および点線はそれぞれロバスト性向上手法を適用する場合としない場合である。図4より、1次モードについてはロバスト性向上手法を適用することで誤差が大きい場合も残留振動を抑制できていることがわかる。2次モードについても、誤差が大きくなる場合には残留振動が大きくなってしまいが、誤差が0.1（10%）程度までは残留振動は小さくなっている。

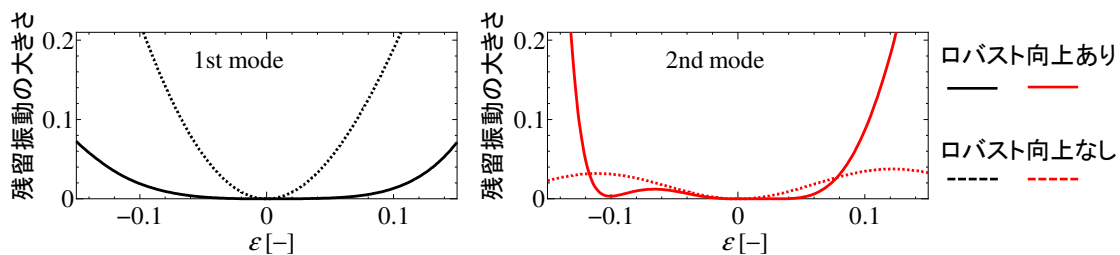


図4 固有振動数の推定誤差に対する残留振動の大きさの変化

③ロバスト性についてさらに詳細に検討するために、図1のモデルのフックの位置を変化させた場合のロバスト性について調べた。その結果、1次モードはフックの位置によってロバスト性は大きくは変わらないことがわかった。一方で、2次モードはロバスト性向上手法を適用しない場合はロバスト性の変化は小さいが、適用した場合はフックの位置が高い（台車に近い）ほどロバスト性の悪化が見られた。これはロバスト性向上手法を適用した結果台車加速度が大きくなり、2次モードへの入力が大きくなるためだと考えられる。

④以上より、二自由度系モデルに対する固有振動数成分除去法およびロバスト性向上手法の有効性が示された。先に述べたように、本手法は二自由度より多い多自由度系のモデルであっても適用可能である。また、クレーンに限らず残留振動が問題となる多自由度系の機械全般への本手法の応用が期待できる。

(2) ロープ長さの変化を利用した制御手法の開発

①ロープ長さが任意に変化する場合に、固有振動数成分除去法を適用した場合の結果を図5に示す。図5より、制御終了時（右端）で残留振動が生じていないことから、ロープ長さが変化する場合でも本手法が有効であることが示された。したがって、ここでのロープ長さの変化のように、時間的に変化するパラメータも非線形性や減衰の影響と同様にみなし外力として考慮することで、固有振動数成分除去法を用いた残留振動抑制が可能である。

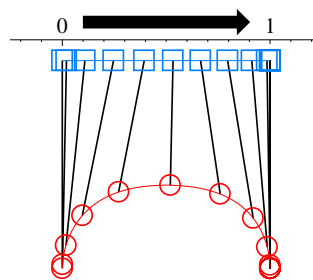


図5 ロープ長さの変化を考慮した運動

②台車加速度の二乗積分値とロープ長さの範囲を制限する関数の線形和を目的関数にして最適化を行った。また、ロープ長さの変化を表す式に持たせた自由度で最適化による低減がどう変わるかも調べた。その結果を図6に示す。図6の横軸はロープ長さ変化の自由度であり、縦軸は台車加速度の平均値である。図6より、自由度が大きくなるほど加速度は低減しているが、その減少量は小さくなっている。したがって、最適化の際に持たせる自由度は少なくとも十分であることがわかる。

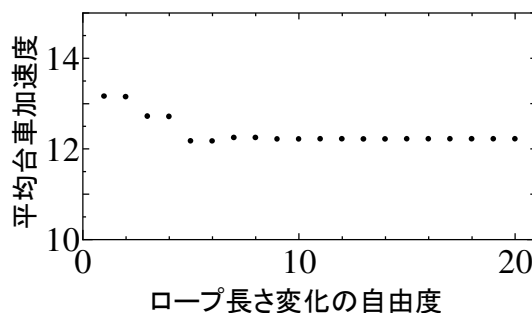


図6 最適化による加速度低減

③以上より、残留振動を抑制しながら、ロープ長さの変化を利用した台車加速度の低減が可能であることが示された。本報ではロープ長さを用いたが、時間的に変化するパラメータであれば同様に固有振動数成分除去法を適用でき、その変化を利用した制御もできる。また、目的関数を変えれば加速度のみならず様々な応用が考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗原海, 山崎徹
2. 発表標題 固有振動数成分除去法を用いた二重振子型クレーンのロバスト制御
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2022
4. 発表年 2022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
---------	---------