

平成30年 5月15日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2017

課題番号：26420186

研究課題名（和文）制振性能とエネルギー消費との最適バランスを追求した鉄道車両の制御系設計

研究課題名（英文）A Synthesis Method of Railway Vehicle Control System to Strike a Reasonable Balance between Vibration Suppression Performance and Power Consumption

研究代表者

不破 勝彦（FUWA, KATSUHIKO）

大同大学・情報学部・教授

研究者番号：70324481

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：鉄道車両においては、高速輸送のための車両の軽量化と同時に、良好な乗り心地も要求されている。鉄道車両の乗り心地は、運転中に発生する振動に依存する。本研究では、鉄道車両の良好な乗り心地を実現するための制御系設計を行なうことを目的としている。鉄道車両の振動を上下方向と左右方向に分割し、制振のために必要となる制御の空間を与えた上で各々の振動を抑制する。左右方向の振動については、最適化の視点でエネルギー消費量と制御性能が考慮できる制御系であることが特徴である。制御器の実現アルゴリズムを開発するとともに、実験による検証を行なった。

研究成果の概要（英文）：Weight reduction of railway vehicles is necessary to achieve high-speed transportation and optimal comfort. The ride quality of railway vehicles depends on the vibration of the car bodies generated while in motion. In the present study, a feedback method for synthesizing control systems to improve the ride quality is discussed. Separating the overall vibration of railway vehicles into lateral and vertical vibration components, vibration suppression can be achieved for each component by constructing independent control subspaces. In particular, a control subspace that manages lateral vibrations can not only achieve vibration suppression but also optimally evaluate the control energy and the control performance simultaneously. To evaluate this approach, an algorithm that designs the controller is proposed, and its usefulness is verified experimentally.

研究分野：制御工学

キーワード：乗り心地 振動制御 固有空間 出力零化制御 最適化 フィルタ

1. 研究開始当初の背景

鉄道車両による輸送能力を向上させるためには、良好な乗り心地を実現しつつ輸送に伴うエネルギー消費を低減することが必要不可欠である。一般には、搬送物の重量変化に伴い車両の振動特性は変化するため、良好な制御性能を達成することは困難であるばかりでなく、安定性さえも損なう恐れもある。申請者らは、制振性能と安定化を独立に指定することができる制御方法について研究してきた。この研究を拡張して、最適性も考慮することができれば、鉄道車両による輸送能力を高める問題を解決することができるかと考え、研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、鉄道車両の良好な乗り心地を実現し、かつ輸送に伴うエネルギー消費を低減する振動抑制制御系を構築する。制振性能とは独立にエネルギー消費量をできるだけ低減するための制御系設計を行なうことを目的としている。具体的には

- (1) 鉄道車両の縦揺れ(上下方向)と横揺れ(左右方向)を抑制するための制御方法
- (2) 左右方向の制振特性とは独立に制御系の安定性のみならずエネルギー消費との最適化を図る制御方法を各々明らかにし、
- (3) 鉄道車両を模擬した制御システムを製作し、実験による検証を行なう。

3. 研究の方法

制御系設計に関する理論的研究とその検証を行なう実験的研究に大別される。

理論的研究では

- (1) 制振のための固有空間の分割と幾何学的条件の導出

上下方向の振動特性と左右方向の振動特性から振動モードを特定し、固有空間として表現する。制御のための状態空間が、上下方向の制振を実現するための固有空間と左右方向の制振を実現するための固有空間に分割できるための条件を明らかにする。上下方向の固有空間については、出力零化制御を実現するための制御則を求めるとともに、エネルギー消費とのバランスを図る最適制御の考え方を導入する。

- (2) 最適制御の導入

左右方向の固有空間については、制振性能と制御性能が分離できるための条件を明らかにするとともに、エネルギー消費とのバランスを図る最適制御の考え方を導入する。

- (3) 制御則の導出

上記(2)の分離のための条件を満足させる制御則を導出する。分離条件は行列2次方程式の可解性に帰着され、解を求めるために理論的な定式化と数値的な検証を行なう。上記(1)の結果と統合して、最終的な制御則を導出する。

実験的な研究では

- (4) 実現アルゴリズムの開発

得られた制御則に基づき、制御器実現のた

めのアルゴリズムを開発する。

- (5) 鉄道車両を模擬した制御システムによる振動実験装置の構築

鉄道車両を模擬した柔軟物体の支持系を製作し、前輪と後輪位置に小型加振システムと、さらに振動の検出用に加速度センサを取り付けている実験装置を構築した。

- (6) 制御性能の評価

制御器を設計するためのモデルを構築し、固有空間の分割と性能の分離のためのおおの条件を満足する制御則を求め、制御器として実現させて、リアルタイム制御システムに組み込む。柔軟物体の振動変位量とエネルギー消費量をモニタリングし、最適性の評価指標を見積もる。

4. 研究成果

研究の目的である「鉄道車両の良好な乗り心地を実現し、かつ輸送に伴うエネルギー消費量を低減する振動抑制制御系の設計」に対して、その成果を以下に記述する。

- (1) 固有空間分割と幾何学的条件の導出

鉄道車両は外的要因により様々な方向の振動が生成しており、その振動は縦揺れと横揺れの振動の合成により記述できるものと考えられる。本研究では、縦揺れを上下方向の振動、横揺れを左右方向の振動として記述し、各々の振動を独立に制御することができれば、目的にある「良好な乗り心地」を実現することができるものと着想した。得られた成果としては、振動モードに伴う固有空間を、上下方向の振動モードと左右方向のそれとの各固有空間に分割させるための条件として、空間における幾何学的条件(直交条件)の成立が必要であることがわかった。この条件を満足しない場合、互いの方向の振動モードが干渉する可能性もある。干渉の程度は、同定実験を通じて近似的に把握し、制御を行なうものとする。

従来法では、方向を区別することなく、振動抑制制御問題を考察の対象としていたが、本研究のように振動の方向により制御する対象を固有空間として分離することでその実現を図る手法は独創的な点であると考えている。国内外の研究において、制振のみならず、予測制御との組み合わせにより震災で甚大な被害をもたらした脱線などの事前防止対策に貢献できる可能性も考えられる。

- (2) 上下方向の振動制御則の導出

制御対象が上記(1)の幾何学的条件を満足しかつ最小位相特性を有する場合には、固有空間の極が不可制御極になるように出力零化制御で制振を行なう制御則を導出する。制御系が安定にならなければ上下方向の振動を抑制することはできず、最小位相の仮定がそれを保証する。しかしながら、予備実験を行った結果、非最小位相特性を有するモデルとして同定されるケースもあり、当初の予想とは異なった。そこで、完全な不可制御極に

伴う固有空間（以降、不可制御空間と呼ぶ）を構成するのではなく、制御器のハイゲイン化により限りなく不可制御空間に近似することが可能な新しい制御系設計法を開発した。この設計法は

既存の制御器に別途定数ゲインを付加するだけで、容易に近似的な不可制御空間を構成することができる

ハイゲイン化を行っても制御系の安定性は保証される

といった特徴を有するものであり、とりわけ、ハイゲイン化で不可制御の程度を調整できる点は国内外の研究において他に類を見るものではなく、出力零化制御の分野に一石を投じるものと考えられる。また、ゲインの調整で不可制御と可制御の分割の程度を調整できれば、出力零化のみならず、外乱抑制と過渡応答の性能を最適に制御するような制御系の構築へ展開できる可能性もあり、産業応上の有効性を高めることに寄与できるものと考えられる。

(3) 最適化空間の構築と制御則の導出

制御対象が上記(1)の幾何学的条件を満足する場合には、固有空間の極が可制御極になる（この空間を以降、可制御空間と呼ぶ）ようにし、左右方向の振動を抑制する制御系を構成する。可制御性を有することから、制振性能のみならず制御性能も考慮できるような制御方を考察した。具体的には、閉ループ系にフィルタを併合させて安定化を図る。その際、閉ループ系を構成しても、与えられた希望のフィルタ特性を損なわないようにする工夫が必要となる。本研究では、次数の指定も考慮した設計法になっている。フィルタの高次化によって、制御帯域を確保しつつ良好な制振性能も実現できる特徴を有する。さらに、制御性能においては、最適化のための評価関数を与えて、制御性能とエネルギー消費とのバランスを図るような設計となっている。ただし、制御対象の動特性によっては、安定性を優先するあまり希望とする制振ならびに制御性能を達成することが困難な事象も生じた。安定なフィルタが閉ループ系に内在する制御は、強安定化制御の問題として定式化することができ、この新たな問題の解決に向けた基礎検討として、デュアルオブザーバを適用した強安定化制御を考察した。そして、強安定化を達成するための必要十分条件として、制御対象の不変零点における幾何学的重複度と制御対象の伝達関数の階数とよる条件に帰着できることを新たに見出した。従来の強安定化制御器の設計は、 pip 条件を前提とした補間条件を満足するある複素関数を決定する問題に帰着されるものであり、計算機向きの方法とは言い難い。しかしながら、提案する設計法では設計問題が線形行列不等式により定式化され、解が存在すれば凸計画法を用いて効率的に解くことができる特徴を有する。

国内外の研究において、強安定化制御器の計算機向きの設計手法が望まれていたことを鑑みると、本研究の設計法は、この分野に一石を投じるものと考えられる。ただし、デュアルオブザーバを本研究のフィルタ併合系に含めることが困難であるため、デュアルオブザーバと双対になる状態推定器に強安定化設計法を適用することが今後の検討課題となっている。現時点では、各設計条件も双対になることを予想している。

(4) 実現アルゴリズムの開発

各制御器を実現するためのアルゴリズムを開発した。まず、前述(2)の上下方向の振動制御則を反映した制御器について述べる。外的要因に伴う振動が制御量に表れないようにするために、外的要因に伴う信号の不可制御の程度と制御系の安定化を図る制御器をハイゲインパラメータにより定式化する。不可制御性の近似は「低感度」として位置付け、低感度特性はボード線図を描ながら見積もり、希望の低感度化が達成されたときのハイゲインパラメータを決定する。なお、安定性に関しては(2)でも述べたとおりハイゲイン化を行ってもその保証は確保されている。そのため、試行錯誤のような交互繰り返しを必要とせず、アルゴリズムの構成は比較的簡便な内容となっていることが特徴である。得られたハイゲインパラメータにより制御器を求める。

つぎに、前述(3)の左右方向の制振と最適化を実現する制御則を反映した制御器について述べる。予備実験を通じてフィルタを3次遅れ系として定式化するが、この次数での最適化を達成する設計法はこれまでに報告されていない。そこで、最適化を達成するための解を求める方法として繰り返し計算を用いない図的な方法を開発し、解の存在領域を視覚化して制御器を設計するアルゴリズムとした。ただし、解領域の中からどの解を選択すればよいのかは、シミュレーションや実験を通じて試行錯誤的に決定せざるを得ず、今後解領域と性能との関連を検討する必要があると考えている。

成果としては、不可制御の程度を調整できることから、不可制御空間を完全に構築すると安定性が損なわれるような制御系、あるいは部分空間として不可制御の空間を与えれば十分であるような制御系の設計分野に貢献できるものと考えている。また、希望のフィルタを併合させることを優先すると最適化が達成されることは必ずしも保証されないが、解領域を与えることで問題を解決できたことも成果の一つと考えている。この考え方を応用して、フィルタの部分にあたる動特性を逆システムにして最適なモデルマッチング制御系に展開することも考えられる。従来の最適制御系に適当な動的補償器を与えて、最適化以外の制御系を構築することができる図的なアルゴリズムが得られたことは

特記しておきたい。

(5) 制御系の評価ならびに実現のための周辺技術開発

実験装置のモデルに基づき、(4)の実現アルゴリズムを適用して制御器の設計を行ない、リアルタイム制御システムに実装して制御系の有効性を評価する。鉄道車両の乗り心地を良好にするためには、制御帯域を確保しかつ制振を達成することが重要であるため、フィルタのパラメータと次数を変化させても最適化の評価指標値に変化がないことを評価のポイントとした。柔軟物体を上下方向と左右方向に加振させ、振動変位量とエネルギー消費量をモニタリングし、最適性の評価指標値を見積もった。その結果、(1)の直交条件を完全には満足せず、試行錯誤的ではあるが干渉の影響を考慮した設計を行なった。フィルタを高次数にしても最適化問題を解くことができ、計算上で見積もることができる制振性能と制御性能を実験でも確認することができた。制御器コストは懸案であるものの、フィルタのパラメータと次数の調整により最適な制御計画を立案できる点で意義があるものと考えられる。ただし、評価指標値が変化しない分、制御性能は保守的な結果となってしまった。すなわち、制御系全体としてはバランスが図れた性能となっているものの、単体での制御性能あるいは省エネルギー化が必ずしも良好であるわけではないため、さらに研究を進める意義があるものと考えられる。

本研究では、フィルタの自由度、不可制御性の近似の自由度を与えた制御系になっている点では、国内外における幾何学的アプローチによる各種制御分野（外乱局所化、非干渉化、多自由度化等）の研究に一石を投じるものと考えられる。しかしながら、エネルギー消費の視点も踏まえて、これらの制御分野に共通する「制御性能が微視的には良好であっても巨視的には必ずしも良好とはいえない」ことが明らかとなった。制御系全体を俯瞰したとき、本結果を通じて、巨視的な評価指標のもとでこれら自由度を活用した制御系設計の枠組みを構築する問題設定を今後の展望として掲げておきたいと考える。

最後に、制御系実現にあたり、様々な補償をする必要に迫られたため、新しく開発された制御技術について記述する。

安定性を見積もるためのリアプノフ方程式の解法

予備実験において、最適化を行なう前にまずは制御系を安定化するフィードバックゲイン行列を設計するため、Lyapunov 方程式を解く。制御対象のモデルとフィルタとの併合系より、従来法であると 15 次の連立 1 次方程式を解く問題に帰着されるが、数値的な誤差を含み正確なフィードバックゲイン行列を得ることが困難であった。そこで、従来法を改良し、5 次の連立 1 次方程式と Affine 変換によりフィードバックゲイン行列を得る設計法を新たに見出すことができた。15 次

連立 1 次方程式の未知数すべてを数値計算によって得る方法ではなく、5 次分のみ連立 1 次方程式の数値解とし、残りは他の解の線形結合で得られるため、比較的解の精度を劣化させないことが特徴である。しかしながら、設計法の一般化や離散時間系の対応など未解決な問題も存在し、さらなる研究に着手する予定である。

低周波外乱を抑制する制御系の構築

実験装置固有の低周波外乱が存在しており、予備実験において制御対象の同定を行なう際、モデル化誤差としてその影響が現れることが懸念された。しかしながら、リアルタイム制御システムを構成する DSP のヒープ領域の問題もあり、できるだけ高次にならない制御器の設計が求められる。そこで、外乱抑制特性の低感度化を実現するため、従来法のように外乱モデルを含めた拡大系による設計ではなく、外乱抑制特性の伝達関数の零点を配置することで低次元化を図る設計法を新たに見出すことができた。これにより、低周波外乱の低感度化を低次元の制御器で実現することが可能となるが、現時点では制御対象の次数が限定されていること、原点零点に限定されていることなど、設計法の一般化に対する未解決な問題も存在し、さらなる研究に着手する予定である。

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 16 件)

K.Fuwa and T.Narikiyo, Minimal-Order Observer with a Function of Estimating Unmeasurable Inputs by High-Gain Feedback Control, IEEJ Transactions on Electronics Information and Systems, 査読有, Vol.137, No.12, 2017, pp.1580-1590

DOI:10.1541/ieejieiss.137.1580

不破勝彦、手島大仁、成清辰生、3 次遅れ要素による高域遮断フィルタを併合した最適レギュレータ、電気学会論文誌 C、査読有、Vol.137, No.12, 2017, pp.1615-1616

DOI:10.1541/ieejieiss.137.1615

不破勝彦、谷口卓由、松本和也、河井悠介、二輪型倒立ロボットの急停止制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.40, 2017, pp.17-19

不破勝彦、佐藤晃浩、吉兼駿介、内藤悠介、Diophantine 方程式による最小次元状態推定器の設計法と評価、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.40, 2017, pp.20-22

不破勝彦、船坂勇太、加藤勇太、祖父江弘頭、手島大仁、零点を考慮した外乱オブザーバによる振動制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.40, 2017, pp.23-25

不破勝彦、田中智也、成清辰生、デュアルオブザーバを用いた強安定化制御器の一

考察、電気学会論文誌 C、査読有、Vol.136、No.12、2016、pp.1643-1652

DOI:10.1541/ieejieiss.136.1643

不破勝彦、成清辰生、大羽達志、耐故障性を考慮した安定な零点配置制御系の一考察、電気学会論文誌 C、査読有、Vol.136、No.2、2016、pp.143-156

DOI:10.1541/ieejieiss.136.143

不破勝彦、神野優綺、離散時間リアプノフ方程式の一解法、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.39、2016、pp.1-3

不破勝彦、岡村将成、松田隆宏、山田英司、二輪型倒立ロボットの傾斜路走行制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.39、2016、pp.4-6

不破勝彦、黒田紘夢、近和哉、後藤敬太、鉄道車両を想定した振動制御の一考察、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.39、2016、pp.7-9

不破勝彦、水野昂輝、峯大介、近藤佑樹、LEGO Mindstorms NXT を用いた二輪型倒立ロボットの同期制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.39、2016、pp.10-12

矢子充、加藤大貴、澤正明、田中智也、不破勝彦、LEGO Mindstorms NXT を用いた二輪型倒立ロボットの手動運転制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.38、2015、pp.22-24

田中智也、不破勝彦、LEGO Mindstorms EV3 を用いた二輪型倒立ロボットに関する研究、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.38、2015、pp.25-27

不破勝彦、山下翔平、榎本祐実、金子淳紀、計測不可能な入力の推定機能をもつ外乱抑制制御器を用いた振動制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.38、2015、pp.28-30

不破勝彦、糸瀬憲、安部僚馬、宇野裕貴、田中智也、LEGO Mindstorms NXT を用いた二輪型倒立ロボットの障害物回避制御、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.37、2014、pp.11-13

不破勝彦、田中智也、固有値問題に基づく最小次元デュアルオブザーバの設計と教育効果、計測自動制御学会中部支部教育工学論文集、査読有、Vol.37、2014、pp.42-44

〔学会発表〕(計 19 件)

不破勝彦、山口裕馬、成瀬俊康、岡田徹也、谷口卓由、手島大仁、零点を考慮した低次元外乱オブザーバによる振動制御、計測自動制御学会中部支部第 163 回教育工学研究会、2018 年 3 月 19 日、大同大学(愛知県)

不破勝彦、手島大仁、成清辰生、高域遮断フィルタを併合した最適レギュレータの閉ループ特性に関する一考察、平成 29 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2017 年 9 月 7 日、名古屋大学(愛知県)

不破勝彦、谷口卓由、成清辰生、原点への零点配置を考慮した外乱オブザーバの設計、平成 29 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2017 年 9 月 7 日、名古屋大学(愛知県)

谷口卓由、河井悠介、松本和也、不破勝彦、二輪型倒立ロボットの急停止制御、計測自動制御学会中部支部第 161 回教育工学研究会、2017 年 3 月 21 日、大同大学(愛知県)

佐藤晃浩、吉兼駿介、内藤悠介、不破勝彦、Diophantine 方程式による最小次元状態推定器の設計法と評価、計測自動制御学会中部支部第 161 回教育工学研究会、2017 年 3 月 21 日、大同大学(愛知県)

手島大仁、船坂勇太、加藤勇太、祖父江弘顕、不破勝彦、零点を考慮した外乱オブザーバによる振動制御、計測自動制御学会中部支部第 161 回教育工学研究会、2017 年 3 月 21 日、大同大学(愛知県)

不破勝彦、成清辰生、計測不可能な入力と状態変数の推定機能をもつハイゲインフィードバック系の安定化、電気学会制御研究会資料、2016 年 12 月 23 日、広島大学(広島県)

不破勝彦、成清辰生、ハイゲインフィードバック制御法による計測不可能な入力の推定器、平成 28 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2016 年 9 月 12 日、豊田工業高等専門学校(愛知県)

不破勝彦、手島大仁、成清辰生、3 次遅れ要素による高域遮断フィルタを併合した最適レギュレータ、平成 28 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2016 年 9 月 12 日、豊田工業高等専門学校(愛知県)

田中智也、不破勝彦、2 自由度積分型サーボ系を用いた倒立二輪ロボットの實現、計測自動制御学会中部支部第 159 回教育工学研究会、2016 年 3 月 19 日、大同大学(愛知県)

不破勝彦、黒田紘夢、近和哉、後藤敬太、鉄道車両を想定した振動制御の一考察、計測自動制御学会中部支部第 159 回教育工学研究会、2016 年 3 月 19 日、大同大学(愛知県)

不破勝彦、成清辰生、大羽達志、Hurwitz 行列を用いた Lyapunov 方程式の一解法、平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2015 年 9 月 28 日、名古屋工業大学(愛知県)

不破勝彦、田中智也、成清辰生、デュアルオブザーバを用いた強安定化制御系設計、平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2015 年 9 月 28 日、名古屋工業大学(愛知県)

不破勝彦、神野優綺、離散時間リアプノフ方程式の一解法、計測自動制御学会中部支部第 158 回教育工学研究会、2015 年 9 月 11 日、大同大学(愛知県)

矢子充、加藤大輝、澤正明、田中智也、不破勝彦、LEGO Mindstorms NXT を用いた二輪型倒立ロボットの遠隔手動操作、計測自動制御学会中部支部第 157 回教育工学研究

会、2015年3月16日、大同大学（愛知県）
田中智也、不破勝彦、LEGO Mindstorms
NXT を用いた二輪型倒立ロボットの遠隔手
動操作、計測自動制御学会中部支部第 157 回
教育工学研究会、2015年3月16日、大同大
学（愛知県）

不破勝彦、田中智也、成清辰生、デュアル
オブザーバを用いた強安定化制御に関す
る一考察、平成 26 年度電気・電子・情報関
係学会東海支部連合大会、2014年9月8日、
中京大学（愛知県）

不破勝彦、成清辰生、大羽達志、断線を
考慮した安定な零点配置制御系の一考察、平
成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支
部連合大会、2014年9月8日、中京大学（愛
知県）

不破勝彦、田中智也、固有値問題に基づ
く最小次元デュアルオブザーバの設計と教
育効果、計測自動制御学会中部支部第 156 回
教育工学研究会、2014年9月6日、大同大学
（愛知県）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://kenkyu.daido-it.ac.jp/Profiles/1/0000085/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

不破 勝彦 (FUWA KATSUHIKO)
大同大学・情報学部・教授
研究者番号：70324481

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

成清 辰生 (NARIKIYO TATSUO)
豊田工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：70231496
大羽 達志 (OOBA TATSUSHI)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90233254

(4) 研究協力者

()