

氏名（本籍）	駒田 匡史（三重県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第568号
学位授与日付	令和2年3月25日
専攻	生産開発システム工学専攻
学位論文題目	路面状態の知覚に基づく振動系の共振制御による自動車の路面入力騒音の低減 (Road induced noise reduction for automobiles by controlling resonance of vibration system based on perception of road surface condition)
学位論文審査委員	(主査) 教授 上坂 裕之 (副査) 教授 山下 実 教授 松村 雄一

論文内容の要旨

モーターを動力源に用いる電気自動車や燃料電池車などの車内騒音にエンジン音は含まれず、従来の内燃機関を動力源とする車の車内騒音に対して路面入力騒音の比率が大きい。特に、低中車速では路面入力騒音が突出して聞こえるため、その低減が求められている。本研究では、車体に対する質量制約が厳しい状況を鑑み、タイヤとサスペンションから車体への伝達力で発生する路面有力騒音を、車体の共振をセミアクティブに制御することで低減する手法の開発を目的とする。このため、主に二つの検討を行った。車両の前方の路面画像からセミアクティブ制御に用いる参照信号（伝達力）を安価に推定する技術と、この参照信号を基にして、ボディの共振周波数を目標周波数へ配置し、さらにその共振応答を抑制する共振制御の基礎理論の構築である。特に、共振制御では、結合ばねによって多自由度結合された二つの振動系をボディと模して、この系の結合ばねのばね定数のみをリアルタイム制御するという計算負荷が小さい理論の構築を目指した。以下に得られた知見についてまとめる。

- (1) 共振周波数の配置方法として、カーネルコンプライアンス行列（二つの振動系の結合自由度における自己コンプライアンスと、結合ばねのコンプライアンスの和の行列）の零空間を張るベクトルの決定方法と、この零空間から共振配置に必要な結合ばね定数を求める式を導出した。初めに、共振の発生条件を明確にするため、二つの振動系の連成関係の情報を含むカーネルコンプライアンス行列を構成する列ベクトルの関係を幾何的に考察した。共振において、これらの列ベクトルが一つの超平面を張ることを確認し、共振の発生条件式を、カーネルコンプライアンス行列の零空間を張るベクトルの観点で導いた。そして、この零空間を張るベクトルをあらかじめ決定し、次にそれを満たす結合ばねを同定することで、繰り返し計算を行わずに共振周波数の配置と共振応答の抑制を行う理論を構築した。
- (2) 共振応答の抑制方法として、共振峰の発生を完全に抑えるための条件式を導いた。カーネルコンプライアンス行列をその固有値と固有ベクトルで表すと、共振応答は零固有値の逆数により定まる発散の程度と、固有ベクトルに入力領域と結合領域および結合領域と応答領域を結ぶ伝達関数行列を乗じた値の両方に依存する。そこで、後者の固有ベクトルと伝達関数行列の積を零にすることで共振応答を抑制する方法を開発した。この際、カーネルコンプライアンス行列の列空間に着目することで共振を理解する。この列空間は、共振点で超平面を構成することから、その補空間として零空間が発生するが、零空間を張るカーネルコンプライアンス行列の固有ベクトルと、入力領域と結合領域および結合領域と出力領域を結ぶ伝達関数行列の列空間の角度は、一般に直角にならない。本論では、ベクトル同士の積の大きさに寄与するこの角度を直角にすることで、共振応答を零にすることを示した。零空間を張るベクトルは、入力領域と結合領域および結合領域と出力領域を結ぶ伝達関数行列の列空間に直交するベクトルとして求まる。
- (3) これら二つの共振制御手法を、二つの振動系をはり要素とした解析モデルへ適用し、共振周波数の配置と共振応答の抑制が可能なことを確認した。さらに、結合ばね定数と共振周波数の配置可能範囲の事前解析が、結合ばねの設計に活用できることを示した。また、モード形状の考察を行

い、共振制御によって全系のモード形が加振点や評価点で節になることで、共振応答を抑制できるという新しい知見を得た。

- (4) 上述の共振制御に用いる参照信号を安価に推定するため、車載単眼カメラの路面画像を用い、深層学習を用いて路面入力騒音を推定する方法を開発した。推定精度を上げるために、低中周波数の路面入力騒音に寄与する特徴量を初めに抽出する。特徴量の抽出は、人が定義する HOG (Histogram of Oriented Gradients) 特徴量と、コンピュータが定義するオートエンコーダ特徴量、および、CNN (Convolutional Neural Network) 特徴量が有用であることを示した。
- (5) 上記(4)の手法を 8 種類の路面画像に適用し、深層学習を用いた路面入力騒音推定の可能性を検討した。騒音のピーク周波数とレベルの比較、および、平均二乗誤差平方根の定量比較を実施し、本手法の精度検証を行った。その結果から、本手法により路面入力騒音を良く推定できると判断した。また、画素データをそのまま深層学習に掛ける方法では、著しく推定精度が低下することを示した。

論文審査結果の要旨

本論文は、凹凸のある路面の上を走行する際に自動車の車内に生じる騒音（路面入力騒音）を、自動車への搭載が増えているカメラ画像などの各種センサー情報の分析に基づき、車体をセミアクティブに変形させ、そのことによって車体の共振特性を変化させることで低減させるという研究である。従来の共振制御の研究は、車体の共振特性を、なるべく多様な路面に対して共振しにくくさせるという事前設計に関するものか、車体に生じた共振による車内騒音をアクティブ制御で打ち消すものが大半である。前者の事前設計には、すべての路面に対する最適化が難しいという課題があり、後者のアクティブ制御には高コストであるという課題がある。これに対して、本論文では、路面に合わせてセミアクティブに車体の一部の剛性を変えるだけで、車体の共振特性を自在に制御する手法を提案しており、コスト面で有利なだけでなく、様々な路面へ適応する面での有用性を兼ね備えた路面入力騒音の低減法であるといえる。この実現のため、二種類の共振制御法を理論的に導くと共に、深層学習を利用した路面認識技術の開発も行い、これらを実験などで十分に検証し、その優位性を示している。

以上のように、本研究では、車載カメラで認知された路面画像から、車体に加わる外力を推定できる可能性があること、そして、この情報に基づき、車体の一部を想定した連続体型動吸振器の結合ばね特性を最適化することで、共振応答を自在に制御でき、自動車の路面入力騒音を低減できることを示した。その成果は学術的、工学的に有用であることから、学位論文に値するものと認められる。

最終試験結果の要旨

これまでの研究業績、単位習得状況、学位論文やその基礎となる査読付き論文（和文 3 編、英文 1 編）、国際会議講演論文（1 編）の内容、また令和 2 年 1 月 27 日に開催された公聴会での口頭試験の結果等を、学位審査委員会で慎重に検討した結果、提出された学位論文は完成された内容であり、最終試験に合格と判定した。

発表論文（論文名、著者、掲載誌名、巻号、ページ）

1. 結合ばねを介して連成する振動系の共振周波数の制御法, 駒田匡史, 松村雄一, 城戸一郎, 中津川英治, 尾崎広典, 日本機械学会論文集, 85 巻 871 号(2019), p.18-00260.
2. 結合ばねを介して連成する振動系の共振応答の抑制法, 駒田匡史, 松村雄一, 城戸一郎, 中津川英治, 日本機械学会論文集, 85 巻 879 号(2019) p.19-00171.
3. 深層学習による路面画像を用いた路面入力騒音の予測, 中村俊介, 駒田匡史, 松下光次郎, 松村雄一, 石崎啓祐, 自動車技術会論文集, 50 巻 5 号(2019), pp. 1421-1426.
4. Effects of the Feature Extraction from Road Surface Image for Road Induced Noise Prediction Using Artificial Intelligence, Shunsuke Nakamura, Masashi Komada, Yuichi Matsumura, Kojiro Matsushita and Keisuke Ishizaki, SAE Technical Paper, 2019-01-1565.
5. Real-time assignment method of resonance frequency by change of coupling stiffness for improving road induced noise, Masashi Komada, Yuichi Matsumura, Ichiro Kido, Eiji Nakatsugawa and Hironori Ozaki, Proceedings of ISMA2018, pp. 4283-4297.