

2023年 1月 5日

機械工学専攻	学籍番号	第 209102 号	指導教員	内山 直樹
氏名	小杉 信彦			高木 賢太郎

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	非線形摩擦を有する自動車用ワイパシステムの安定性解析と制御系設計
---------	----------------------------------

(要旨 1,200 字程度)

自動車用ワイパはフロントガラス上を往復することで水滴や汚れを除去し、運転者の視界を確保する重要な保安部品の一つである。ワイパが目標の反転位置を行き過ぎるオーバーランや、非線形摩擦により発生するびびり振動と反転後の動き出し遅れは、視界不良や騒音、ワイパ破損の原因となる。従来は機械設計により問題対策してきたが、昨今のフロントガラス拡大に伴うワイパの長尺化や軽量化要求により対策が困難になっている。このような背景からワイパにおける制御技術の重要性は高まっている。本論文では、運転者へ安全・快適な視界を提供することを目的として、前述したワイパの問題であるオーバーランおよび、非線形摩擦により発生するびびり振動と動き出し遅れを低減する制御技術を提案している。

オーバーラン低減の先行研究として、オーバーランを評価関数とするワイパ動作軌道の最適化が研究されている。昨今の排出ガスや燃費に関する規制強化に伴う自動車の省エネルギー要求を踏まえ、本論文では先行研究を拡張し、オーバーランと電流の両方を考慮した多目的最適化を提案している。ワイパ動作軌道の調整変数とオーバーランおよび電流の関係を示す応答曲面を実験的に生成し、オーバーランと電流を目的関数として動作軌道を最適化している。

びびり振動低減の先行研究として拡張カルマンフィルタと状態フィードバックを用いたびびり制振制御法が提案されているが、ラバーの摩擦変動や状態推定誤差といった摂動の影響が明らかではなく、自動車の視界と安全を確保する保安部品であるワイパ制御技術としてはロバスト性が課題となっていた。本論文では、びびり制振制御系のロバスト安定性を解析し、評価している。解析にあたり、ラバー劣化に伴う摩擦変動と推定器の状態推定誤差を摂動と定義し、摩擦の非線形性を含むシステムをルーリエ系とみなしてスモールゲイン定理を適用した。また、安定性解析の結果とワイパモデルのシミュレーション結果を比較し、安定性解析の妥当性を示している。

摩擦補償の代表的手法として、摩擦モデルを用いたフィードフォワード補償や制御対象の線形モデルを用いた外乱オブザーバなどが挙げられる。マイコンの処理性能に制約のあるワイパなど産業分野への応用を考慮すると、できるだけ計算量の少ない摩擦補償手法が望ましい。本論文ではPI制御の積分符号反転を利用した簡便かつ適応的な摩擦補償法のワイパへの応用を検討している。制御入力と非線形摩擦の作用箇所が異なるワイパにおいて、積分項の符号反転による摩擦補償が可能なことを数学的な解析にて確認し、シミュレーションと実験により摩擦補償の効果を検証している。

Date of Submission (month day, year) : January 5, 2023

Department of Mechanical Engineering	Student ID Number D209102	Supervisors Naoki Uchiyama Kentaro Takagi
Applicant's name Nobuhiko Kosugi		

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Stability Analysis and Control System Design of Automotive Wiper Systems with Nonlinear Friction
-----------------	---

Approx. 800 words

Automotive wiper systems are one of the most important safety components, which move back and forth over the windshield to remove water droplets and dirt to ensure the driver's visibility. The overrun, a phenomenon in which the wiper misses the target reversal position, and the chatter vibration and delay after wiper reversal caused by nonlinear friction can cause poor visibility, noise, and wiper breakage. These problems were conventionally dealt with by mechanical design. However, the recent demand for longer and lighter wipers due to the expansion of windshield glass makes it difficult to solve them. Therefore, control technology for wipers is becoming more and more important. This paper proposes control methods to reduce overrun, chattering vibration and delay after reversal caused by nonlinear friction, in order to provide safe and comfortable visibility to the driver under all conditions.

As a previous study of overrun reduction, the optimization of wiper motion trajectories using an evaluation function for the overrun was studied. Considering the demand for energy saving of automobiles due to the recent tightening of regulations on emissions and fuel consumption, this paper extends the previous study and proposes a multi-objective optimization that considers both the overrun and the current. We generate response surfaces experimentally that show the relationship between the adjustment variables of the wiper motion trajectory, overrun, and current. Using the generated response surfaces, we optimized the motion trajectory with the overrun and the current as objective functions.

As previous studies on reducing chattering vibration, vibration control using EKF and state FB was proposed. However, in these studies, the effects of perturbations such as variations in rubber friction and state estimation errors are not clear, and the robustness of the control is an issue. This paper analyzes the robust stability of the control system in order to evaluate the robustness of the chatter vibration control. In the analysis, the change of friction due to rubber degradation and the error of state estimation by the estimator are defined as perturbations, and the small gain theorem is applied by assuming that the system to be a Lu're system with nonlinearities in friction. Furthermore, we compared the results of the stability analysis with the simulation results of the wiper model to validate the stability analysis.

As typical friction compensation methods, feedforward compensation using a friction model and disturbance observer using a linear model were studied. Considering industrial applications such as wipers, where microcontroller processing performance is limited, it is desirable to use friction compensation methods with as little computational complexity as possible. In this paper, we study simple and adaptive friction compensation using integral sign reversal of the linear PI control for the wiper to establish friction compensation suitable for the wiper products. Through mathematical analysis, we confirm that the friction compensation by sign reversal of an integral term is feasible for the wiper where the control input and nonlinear friction act on different points, and verify the effectiveness of the friction compensation through simulation and experiment.