

学 位 論 文 の 要 旨

電動パワーステアリングにおける振動抑制制御の単純化と操舵力推定の高精度化に関する研究

(Study on Simplification of Vibration Suppression Control and High Accuracy of Steering Force Estimation in Electric Power Steering)

氏 名 阿部 己和 印

パワーステアリングシステムは、操舵力をアシストすることでドライバの負担を軽減することを目的として 1960 年代より採用され始めた。当時は、オイルポンプで駆動される油圧パワーステアリング(HPS : Hydraulic Power Steering)と呼ばれるシステムで操舵力のアシストを行っていた。しかし、ドライバの操舵に関わらず常にオイルポンプが駆動しているため、燃費悪化の原因となっていた。

そのため、現在の厳しい燃費規制に対応するため、モータで駆動される電動パワーステアリング(EPS : Electric Power Steering)と呼ばれるシステムが採用され、現在では生産されている自動車の半数以上に搭載されている。

本論文では、燃費規制対応に要する EPS 制御系に関する技術の発展に寄与できる研究成果について、以下に要約する。

● Chapter 1

本章では、研究背景として現状の EPS 制御の問題と研究目標について述べる。燃費向上に不可欠な EPS は 2 慣性系であるため、振動が生じやすく制御が難しい対象であり、振動を抑制するための複雑な制御が組み込まれている。そのため、適合に多くの時間が必要であるといった問題点がある。

そこで、本研究では、複雑な現状制御に置換できる単純かつ実用的な振動抑制制御を提案することを目標とする。

● Chapter 2

本章では、現在の EPS 制御の概要と問題について詳述し、さらにこの問題に対する研究の調査結果を記述する。

現状の EPS 制御は大きく 2 つに分類できる。1 つ目は EPS 本来の目的であるモータアシスト力の演算を行うモータアシスト演算部、2 つ目は 2 慣性系に起因する振動を抑制するための振動抑制制御部である。この振動抑制制御部は、機能の異なる多くの補償と多く

のテーブルにより構成され、前述したように適合には莫大な時間を要するという問題がある。

上記問題に対応するためのこれまでの研究について調査を行った結果、2000年ごろに集中的に研究が行われたが、現状制御に置換するのに十分な性能は得られていない。それにもかかわらず、その後は、ドライバの負荷低減および自動運転のための研究に移行している。従って、上記問題に対する研究課題は残されたままである。

● Chapter 3

本章では、実験に供した装置のシステム同定、すなわちモデル構造およびパラメータを求める方法を示す。モデル構造の導出では、まず、ハンドル、モータおよびタイヤのダイナミクスを示す三つ微分方程式を導出する。その後、タイヤ軸を基準軸としたギア比変換を行い、2慣性系に単純化する。

モデルパラメータに関しては、次の2つの過程の予測誤差法を用いてパラメータを決定している。1つ目の課程では、予測誤差法の局所解の問題を回避するため伝達関数モデルを利用して状態空間モデルの初期値を決めている。2つ目の課程では、バネ剛性やダンピング等の物理的なパラメータの推定を行っている。

● Chapter 4

4章では、現状の振動抑制制御に含まれている粘性および位相の各補償制御を順次理論的設計し単純化している。粘性補償制御については、まず、四つの状態量（操舵角、操舵角速度、モータ角、モータ角速度）の変動を制御する一般的な二次線形レギュレータを用いて設計した。しかし、状態量に操舵角およびモータ角が含まれている事に起因して、ハンドルが重くなるという問題が発生した。そこで、変動を抑制する状態量を二つ（操舵角速度およびモータ角速度）に絞り込んだレギュレータに変更した。その結果、ハンドルの重さが改善できた一方、操舵振動の問題がはっきりと現れた。

振動の原因は制御量であるモータ角と抑制したいトルクセンサ値に位相差に起因するものであることが明らかである。それゆえ、モデル変換を利用してトルクセンサ出力自体を抑制するようにコントローラを変更したが、モデル誤差のために振動を十分に抑制することはできなかった。

この対策として、モデル誤差に対するロバスト性を有するスライディングモード制御をレギュレータに適用し、振動を十分に抑制できることを検証した。

● Chapter 5

本章では、マーケットのニーズを考慮して供試装置を小型車両に変更し、残された慣性補償の理論的設計を行っている。4章で構築した理論に基づき設計したコントローラを新たな供試装置に適用した結果、4章と同様に低速から中速操舵時の振動を抑制できることを確認した。このことから、ロバスト性を有していることを示す。

最後に、高速操舵時に要求される慣性補償について設計を行う。具体的には、トルクセンサ値の変動とモータ慣性力の2つを制御量としたスライディングモード制御を用いたレギ

ユレータを設計する。その結果，低中速操舵のみならず高速操舵の場合でも十分な制振効果が得られる。

- Chapter 6

6 章では，操舵角とトルクセンサ値を用いてドライバの操舵力を推定可能なオブザーバを提案する。EPS はハンドルからタイヤまで接続されているため，ドライバの操舵力のみを計測することは困難である。そこで，ドライバの操舵力を未知入力と捉えた未知入力オブザーバを構築，設計する。これにより，外乱にかかわらず高精度にドライバの操舵力を推定することが可能となった。

- Chapter 7

7 章では，1 から 6 章までで得られた知見をまとめ本論文の結論とする。

Study on Simplification of Vibration Suppression Control and High Accuracy of Steering Force Estimation in Electric Power Steering

Tomokazu Abe

So as to reduce the driver's load by assisting the steer torque, power steering system began to be adopted since 1960s. At the beginning, the system driven by oil pump whose name is HPS was adopted to assist the steer torque. However, this system caused the deterioration of fuel consumption, because the oil pump was always working on regardless of the driver's steer.

Therefore, so as to meet the present stringent fuel economy regulation, the system driven by the motor whose name is EPS has been begun to adopt. And now, the number of vehicle with EPS has already been more than half of the total number of the present vehicle.

This paper describes the research products which can contribute to develop the EPS control necessary for fuel economy improvement. And the summary of each chapter is described below.

- Chapter 1

In this chapter, the problem of current EPS control and this research objective are shown as a background. EPS is the control object which is difficult to manipulate, because it is two inertia resonance which causes the vibration. So, the complicated vibration suppression control is included in EPS control. As a result, there is a problem that it takes a huge amount of time to calibrate the controller.

Therefore, this research target is to propose the simplified and practical vibration suppression control which is possible to replace with a current control.

- Chapter 2

In this chapter, the overview and problem of current EPS control are described in detail. And furthermore, the literature investigation results regarding to overcome the above problem are shown.

The current EPS control can be classified into two parts. The first one is the fundamental part of EPS and the assist torque is calculated. The second is the part to suppress the vibration comes from two inertia resonance systems. This vibration suppression control consists of the many compensations which have the different functions and a lot of tables. So, the current EPS control has a problem that it takes a huge amount of time to calibrate, as described before.

The literatures regarding to overcome the above problems were investigated. Certainly, such a research was intensively performed around 2000, there is no literature to show that it has enough performance to replace with the current control. Nevertheless, the main theme for EPS control has already moved into the automatic driving etc. Therefore, it is considered that the research to overcome the above problems is not sufficient.

- Chapter 3

This chapter shows the system identification, that is the way how the model structure and model parameters are decided. Regarding to the model structure, at first, the three derivative equations are derived, showing the dynamics of steering, motor and tire. And then, these three equations are simplified into two equations by converting the gear ratios refer to the tire axis.

Regarding to the model parameters decision, the prediction error method consisting of two steps is adopted. In the first step, so as to prevent from the local solution of prediction error method, the initial values of state space model are estimated by using the transfer function model. And in the second step, the physical parameters (stiffness, damping coefficient) are estimated by converting the model.

- Chapter 4

In this chapter, the viscosity and phase compensation are theoretically designed and simplified, which are the components of current vibration suppression control.

Regarding to the viscosity compensation, at first, the controller which regulates the four variables (steering angle, steering angular velocity, motor angle and motor angular velocity) was designed by using linear quadratic regulator (LQR). However, the problem occurred that the steer torque became heavy because steering angle and motor angle are included as regulating variables. Therefore, the LQR which regulates only two variables (steering angular velocity and motor angular velocity) was redesigned.

As a result, the steer torque was improved, on the other hand the problem of steering vibration appeared clearly. It was apparent that this vibration was caused by the phase difference between the motor angle and torque sensor output which should be suppressed. Therefore, the controller was changed so as to suppress the torque sensor output itself by utilizing the model conversion. However, the vibration could not be sufficiently suppressed because of the model error.

As this countermeasure, the sliding mode control which has the robustness to the model error is applied to the regulator. As a result, it was confirmed that the vibration could be sufficiently suppressed.

- Chapter 5

In this chapter, considering the market demand, the test vehicle is changed to the micro vehicle. And the remained inertial compensation is designed theoretically.

To confirm the performance of the controller designed in chapter 4, the same controller was applied to the micro vehicle. As a result, it was confirmed that the vibration could be suppressed in case of both of low and middle speed steering. And this shows the robustness of this controller.

Finally, the inertial compensation is designed theoretically. Specifically, the regulator based on SMC whose control variables were two (torque sensor output and motor angular acceleration) is

designed. As a result, the sufficient effect of vibration suppression is obtained in case of not only low and middle speed steering but also high speed steering.

- Chapter 6

This chapter proposes the observer which is possible to estimate the driver's steer torque accurately by using the steer angle and torque sensor output. It is difficult to measure the steer torque, because the steering and tire is connected in EPS. Therefore, the observer which is treating the steer torque as an un-known input is designed. As a result, the steer torque could be estimated accurately.

- Chapter 7

In this chapter, the knowledge obtained in chapters 1 to 6 is summarized as a conclusion.