

博士論文概要

論文題目

ドライバ操作とアシストシステム間の
相互作用を考慮した
ステアリング操作モデルの構築と
アシストシステムの設計

Construction of Steering Operation Model
and Design of Assist System
in Consideration of Interaction between
Driver Operation and Assist System

申請者

清水	駿
Shun	SHIMIZU

電気・情報生命専攻 アドバンス制御研究

2015年12月

近年、交通事故件数の削減が求められており、ドライバ運転の安全性と利便性の向上を目的としたアシストシステムの研究が進んでいる。そこでは、ドライバの運転操作はアシストシステムにより変化すること、およびアシストシステムはドライバの運転操作に適應する必要があることが指摘されている。ドライバの運転操作とアシストシステムの間には相互作用が存在するため、この相互作用を鑑みたアシストシステムの設計と評価が重要となる。従来は実車実験に基づいた運転操作の解析およびアシストシステムの設計が行われていたが、時間、コスト、およびテストドライバの安全性に問題があることから、これらを改善できるモデルベースでの設計が望まれている。従来研究では、モデルベースでの設計に必要な車両挙動を再現する数式モデルとして運動方程式やシステム同定を用いたモデルが提案されており、その妥当性について検証がなされている。一方、ドライバの運転操作は車両速度やアシストシステム導入により変化することが知られているが、従来提案されているドライバモデルでは、これらの変化が陽に考慮されていない。アシストシステムが運転操作を阻害することを防ぐためには、運転操作の変化にアシストシステムが適應する必要があるため、従来のドライバモデルを用いてアシストシステムをモデルベースで設計することは困難である。

上述の課題を鑑みて、本論文ではドライバモデルをコントローラとみなし、制御工学の手法を用いたモデルベースかつシステムティックなドライバモデルの構築とアシストシステムの設計を試みる。まず、車両モデル、ドライバモデル、およびアシストシステムの車両速度に依存した変化を、車両速度を外部入力とみなし、外部入力により特性が変化するゲインスケジューリング手法を用いて表現する。ドライバモデルの構築とアシストシステムの設計では、アシストシステムの導入による運転操作の変化、および運転操作へのアシストシステムの適應を考慮する。相互作用が存在するドライバモデルの構築とアシストシステムの設計を同時に行うことは困難であるため、反復法を用いてドライバモデルとアシストシステムを収束するまで交互に算出する。本論文が提案する手法ではドライバモデルの構築とアシストシステムの設計をモデルベースでシステムティックに行うことが可能となるため、従来の実車実験による制御系設計や評価に必要なコストや時間の大幅な削減が期待される。

本論文ではレーンチェンジを目的としたコース追従と速度追従を実現するドライバモデルの構築、およびコース追従支援を実現するアシストシステムの設計を試みる。以下、本論文の構成と各章の概要を示す。

第1章では本研究の背景として先行研究で提案されている様々なドライバモデルとその構築例、およびアシストシステムの設計例を示す。次にドライバモデルの活用方法について述べ、最後に本論文で採用するモデルベースでのドライバモデル構築手法とアシストシステム設計手法の特徴、および本論文の構成を述べる。

第2章では、ドライバ、アシストシステム、および車両から構成される車両運

動制御系と、そのモデル化について述べる。ドライバは運転操作を行う際、視覚情報から車両の未来位置を予測し、目標コースとのずれを修正するためにアクセルとハンドルを適切に操作していると考えられる。従来研究では、この人間の予測動作を表現するために、車両の微小時間後の位置を予測するモデルが提案されている。本稿におけるドライバのモデルはこの位置予測モデルを備え、得られた予測位置と目標コースの距離（予測偏差）を零にするようにステアリング操作を行うことでコースへの追従を図るものとする。また、ドライバモデルの車両速度制御では、現在の車両速度と目標速度の偏差を零にするようにアクセル/ブレーキトルクを決定するものとする。一方、アシストシステムはコース追従支援を実現するためにドライバが持つ目標コースを知る必要がある。従来研究では、ドライバの視覚情報や車両位置情報を用いてレーンチェンジにおけるドライバの目標コースを推定する手法が提案されていることから、レーンチェンジにおける目標コースは既知であると仮定し、アシストシステムにドライバモデルと同様の目標コースを入力する。そして、ドライバモデルと同様にアシストシステムは位置予測モデルと目標コースから予測偏差を算出し、これを零にするアシストトルクを決定するものとする。

上述した車両運動制御系は複雑な構造を持つことから、モデルベースでのドライバモデルの構築やアシストシステムの設計に直接用いることは困難である。そこで、車両運動制御系を、ドライバのステアリング操作を再現するステアリング操作モデル、ステアリング操作を支援するアシストコントローラ、ステアリングトルクとアシストトルクから予測偏差を算出する車両運動特性の3つのシステムから構成されるフィードバック制御系として表現する。車両運動特性のモデルは一般に非線形システムとなるが、目標コースである車線に対して平行に等速で直線運動している状態を平衡状態と仮定することで、平衡状態近傍の運動を線形システムとして捉えることが出来る。また、車両運動特性は車両速度に強く依存することが知られているため、車両速度をスケジューリングパラメータとする線形パラメータ依存(LPV)システムとして車両運動特性を表現する。まず、等価二輪車両モデルを用いてステアリングに加わるトルクから車両旋回速度までの運動方程式を導出し、次に平衡状態近傍における車両旋回速度から予測偏差までの伝達式を導出する。最後に、得られた二つの式に基づいて状態方程式を構築することで車両運動特性をLPVシステムとして表現する。

第3章では、ドライバのステアリング操作をコントローラとみなし、車両速度をスケジューリングパラメータとするステアリング操作モデルを構築する。車両とドライバの関係は、機械の特性変化に対してシステム全体の特性を一定に保つように人間が自らの操作を調整するマン・マシン系の一種とみなすことが可能で、従来研究では車両速度に依存する車両運動の特性変化に対してドライバは車両運動システムの動特性を一定に保つように適応していることが示されている。本章

では閉ループ系の応答性を表す一巡伝達関数のゲイン交差周波数に着目し、車両速度が変化してもゲイン交差周波数を一定に保つステアリング操作モデルをループ整形の考え方に基づいて構築する。そこで、ステアリング操作モデルの構築に用いる車両運動制御系を含んだ一般化プラントを構成する。制御入力であるドライバのステアリングトルクは人間が出力するため、その最大出力には上限が存在する。そこで、一般化プラントには感度関数および相補感度関数に対する重みに加え、制御入力のピークを制限する重みを導入する。また、数値計算ではパラメータ依存線形行列不等式を用いて、車両速度変化に対応するスケジューリングステアリング操作モデルを算出する。最後に、シングルレーンチェンジおよびダブルレーンチェンジを行う数値シミュレーションを実施し、得られたシミュレーション結果と従来研究より得られた実機実験結果を比較することで、構築したステアリング操作モデルの妥当性を確認する。

第4章ではドライバとアシストシステムの相互作用を考慮したステアリング操作モデルの構築とアシストシステムの設計について考察する。従来研究より、ドライバの運転操作はアシストシステムにより変化すること、および大きな横風外乱がない場合においてアシストシステムの有無による車両挙動の変化が小さいことが知られている。これらの結果を鑑み、ドライバの運転操作はアシストシステムの導入による車両運動制御系の特性変化が小さくなるように適応すると仮定する。そこで第3章と同様に、アシストシステム導入に対して一巡伝達関数のゲイン交差周波数を一定に保つステアリング操作モデルを構築し、アシストシステムはドライバの運転負荷を低減するように設計する。ここで、ステアリング操作モデルとアシストシステムには相互作用が存在し、両者の同時設計が困難であることから、反復法を用いてステアリング操作モデルの構築とアシストシステムの設計を収束するまで交互に行う。その際、数値計算の負荷を考慮し、車両速度を固定するごとに線形行列不等式を用いてステアリング操作モデルとアシストシステムを算出する。次に、車両速度ごとに得られたステアリング操作モデルとアシストシステムを、多項式補間によって車両速度をスケジューリングパラメータとするスケジューリングステアリング操作モデルおよびスケジューリングアシストシステムとして実現する。最後に、最終的に得られたステアリング操作モデルとアシストシステムを用いて、車両速度を変化させるシングルレーンチェンジシミュレーションを行う。シミュレーション結果よりアシストシステムの導入前後における車両挙動の変化は小さいこと、ステアリング操作モデルはアシストシステムに適応していること、およびアシストシステムはドライバのステアリングトルクを軽減させていることを確認する。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果と今後の課題について述べる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 清水 駿 印

(2015年 12月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文 (査読有)	○清水駿, 渡辺亮, 車両速度変化に対応するステアリング操作モデルの構築 -スケジューリング $H\infty$ ループ整形によるアプローチ-, 計測自動制御学会論文集, 第51巻第11号, (2015), p. 763/768
講演 (査読有)	○Shun SHIMIZU, Ryo WATANABE, Design of Steering Operation Model Scheduled by Vehicle Velocity for Lane Change -Approach via $H\infty$ Loop Shaping-, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Tokyo, Japan, p. 471/474, (2014) ○Shun SHIMIZU, Ryo WATANABE, Design of Assist System which Considers Interaction with Steering Operation, IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Aichi, Japan, (2015), (Accepted)
(査読無)	清水駿, 渡辺亮, コース追従を実現するドライバーモデルの作成 -ゲインスケジューリングとスイッチングPIDコントローラによるアプローチ-, 第12回計測自動制御学会制御部門大会, p0083, (2012), 奈良県 清水駿, 渡辺亮, コース追従を実現するドライバーモデル -スケジューリングドライバーモデルとスイッチングドライバーモデルの比較-, 第41回制御理論シンポジウム, p. 271/276, (2012), 神奈川県 清水駿, 渡辺亮, ドライバーモデルのシステムティックな構築 -ゲインスケジューリング手法に基づくアプローチ-, 自動車技術会2013年秋季大会, No. 146-13, p. 1/6, (2013), 愛知県 清水駿, 渡辺亮, スケジューリング PID ステアリング操作モデルの安定性解析, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, p. 0928/0931, (2013), 兵庫県 清水駿, 渡辺亮, スケジューリング $H\infty$ 制御理論に基づくステアリング操作モデルの設計, 自動車技術会2014年春季大会, No. 12-14, p. 1/4, (2014), 神奈川県 清水駿, 渡辺亮, ステアリング操作特性の変動を考慮したアシストシステムの設計, 自動車技術会2015年春季大会, No. 45-15, p. 1107/1110, (2015), 神奈川県