

博士論文審査報告書

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

2016年2月

近年、自動車の操作性と安全性の向上を目的とした運転アシストシステムの研究設計が進んでいる。従来研究において、ドライバはアシストシステムに応じて運転操作を変化させていること、およびアシストシステムはドライバの運転操作に適応する必要があることが指摘されている。そのため、アシストシステムの設計ではドライバの運転操作とアシストシステムの間には存在する相互作用を考慮することが重要となる。従来、アシストシステムの設計は、設計者の経験とテストドライバによる実車実験に基づいておこなわれてきたが、設計に要する期間とコスト、およびテストドライバの安全性に問題があることから、これらの改善につながるモデルベース設計が望まれている。モデルベース設計に必要な車両挙動を再現する数式モデルについては、運動方程式やシステム同定に基づいたモデルが従来提案されており、その妥当性は十分に検証されている。その一方、アシストシステム設計については、車両速度やアシストシステム導入によるドライバ運転操作の変化を陽に考慮したドライバモデルを活用している従来研究は少ないのが現状である。

以上の背景の下、本論文はコース追従を対象に、ドライバの運転操作とアシストシステムの相互作用を考慮したドライバモデルの構築手法とアシストシステムの設計手法について考察している。本論文では、モデルベースかつシステムマ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実現するために、ドライバとアシストシステムのそれぞれを車両制御系におけるコントローラと見なし制御工学の手法を適用することを試みている。この試みを実現するために、車両運動特性、ドライバ、およびアシストシステムのそれぞれが車両速度に強く依存することに着目し、これらに対して車両速度によってスケジューリングされる線形パラメータ依存システムとしての表現を与えている。そして、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ことを鑑み、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手法を提案している。提案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マティックに行うことが可能となるため、従来の実車実験に基づいた設計で要していた期間やコストの大幅な削減が期待される。以下、本論文の構成と概要を示す。

第1章では、従来提案されているドライバモデルとアシストシステムを概観し、次に本論文が提案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を述べている。

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たコース追従を目的とする車両運動制御系の概要と、そのモデル化について述べている。ドライバはコース追従において、微少時間後の車両位置を予測し、目標コースとの予測偏差が零となるようステアリングを操作していることが従来研究で明らかにされている。本論文のドライバモデルは予測モデルとステアリング操作モデルから構成されており、予測モデルで算出される予測偏

差が零となるようにステアリング操作モデルによってステアリングトルクを制御する。アシストシステムは、ドライバモデルと同様の予測モデルとアシストコントローラから構成されている。アシストシステムによってコース追従を支援するためには、ドライバの目標コースを知る必要がある。本論文では、従来研究で精度の高い目標コース推定手法が提案されていることを考慮して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している。アシストコントローラでは、予測モデルから与えられる予測偏差を零とするアシストトルクを決定している。

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構築やアシストシステム設計に直接用いることは困難である。そこで、本論文では、車両運動制御系をステアリング操作モデル、アシストコントローラ、および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から構成される制御系として表現している。非線形性を有する車両運動特性については、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捉え、線形性を有する平衡状態近傍の運動に着目している。そして、車両運動特性が車両速度に強く依存することを考慮し、車両運動特性を車両速度によってスケジューラされる線形パラメータ依存システムとして表現している。

第3章では、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の構築を試みている。車両速度に強く依存する車両運動特性の変化に対し、ドライバは車両運動制御系の動特性を一定に保つように適応していることが従来研究で明らかにされている。本章では閉ループ系の応答性指標である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している。構築に際しては、ステアリングトルクは人間であるドライバが出力することを鑑み、その最大値に上限が存在することが考慮されている。構築したステアリング操作モデルの妥当性は、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で検証されている。そこではシミュレーション結果を従来研究における実機実験結果と比較することにより、提案モデルが実際のドライバ運転操作を再現することが確認されている。

第4章では、ドライバのステアリング操作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している。従来研究において、ドライバのステアリング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の有無による車両挙動の変化は小さいことが知られている。これらの知見を鑑み、本論文ではドライバはアシストシステムの導入に対して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している。ステアリング操作モデルは、アシストシステムが導入された車両を対象に第3章と同様に一巡伝達関数のゲイン

交差周波数を一定に保つように構築している。一方アシストシステムは、ドライバとして与えられたステアリング操作モデルの運転負荷を低減するように設計している。ステアリング操作モデルとアシストシステムの相互作用については、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ことで対応している。具体的な構築と設計では、数値計算の負荷を考慮し、車両速度を固定するごとにステアリング操作モデルとアシストシステムを反復法で算出し、次に、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補間することで、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とアシストシステムを実現している。本章が提案する手法によって得られたステアリング操作モデルとアシストシステムの妥当性は、車両速度が変化するシングルレーンチェンジシミュレーションで検証されている。シミュレーションでは、アシストシステムの導入前後における車両挙動の変化が小さいこと、アシストシステムがドライバのステアリングトルクを軽減させていること、およびアシストシステムの目標コース推定に誤差が存在してもアシストシステムが機能することが確認されている。

第5章では、本論文が総括され、ドライバとアシストシステムの相互作用を考慮したモデルベースアシストシステム設計の有効性と今後の展望を述べている。

本論文は、レーンチェンジを対象に、モデルベース制御系設計の観点からドライバとアシストシステムの相互作用を考慮したアシストシステムの合理的な設計手法を新たに提案している。本論文では、従来設計者の経験とテストドライバによる実車実験に基づいておこなわれてきたアシストシステムの設計において、モデルに基づく合理的な設計手法が高い有用性を持つことが客観的に示されており、アシストシステム設計の発展に寄与するところが大きい。本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認められる。

2016年1月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	渡邊亮
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	内田健康
	早稲田大学教授	博士（工学）東京大学	村田昇
	早稲田大学教授	博士（医学）京都大学	井上真郷