

## 論文内容の要旨

論文題目 電動パワーステアリングを用いた操舵運転負荷軽減による安全向上の研究

氏名 遠藤 修司

本論文は、電動パワーステアリング(以下、EPS)を用いた操舵運転負荷軽減を身体的な負荷のみならず情報処理負荷を含め総括的に論じ、自動車の操舵運転安全向上に貢献するEPS機能を提案するものである。操舵運転負荷軽減は、事故回避技術と並び操舵運転の安全に貢献する重要な技術と位置付けられている。この様に情報処理負荷を含めた操舵運転負荷軽減は、自動車開発の中で操舵感開発と呼ばれ、長らくState of the artとして取り組まれてきた。操舵感は、運転者特性、道路特性および車輻特性が相互に影響しあう複雑な問題であるため主観的な評価が重視され、かつその実現では、車輻の基本特性、サスペンションおよびステアリングの相互作用を考慮する必要があり、設計が困難という問題がある。これら背景の結果、現在加速している自動車技術の電動化において期待される設計自由度を活かしたより高度なレベルでの安全貢献に対して、ステアリング技術の進化が遅れている。したがって、本論文では、次に示す3つのブレークスルーを行い、操舵運転負荷を軽減することにより安全に貢献するEPS機能を提案した。

1つ目は、運転者の操舵運転特性を特に操舵トルク情報の意味に着目し、手腕の運動制御とのアナロジーを用いて解析を行い、操舵運転負荷軽減をもたらす目標操舵特性を明らかにしたことである。

2つ目は、車輻、サスペンションおよびステアリング系との干渉問題を、EPS機能を用いて補償することを前提に単純化し、相互作用の影響を明らかにした。そして、EPS機能に外乱オブザーバを応用した干渉を緩和する機能により、目標操舵特性を実現する設計方法を導いたことである。

3つ目は、EPSモータがもたらすステアリング機能の動特性を補償し、提案するEPS機能を実現できるEPS設計技術を導いたことである。バッテリーからエネルギー供給を受け、コスト制約がある中で高出力、低トルクリップルを求めるトルクアクチュエータとしてモータを機能させるためには固有の設計問題が生じるためである。

上記した本論文の目的とブレークスルー課題に対し、以下に示す7つの章で論じ、操舵運転負荷を軽減し安全を向上するEPS機能を提案している。

第2章では、本論文の議論を進める上での基礎を示した。操舵運転負荷軽減による操舵運転安全の向上の検討課題を明らかにし、制御設計問題として検討可能にするフレームワークと基礎となる検討モデルを提示した。その結果、操舵運転負荷軽減が操舵運転の安全に果たす意味を明らかにすることで操舵運転負荷軽減を論じるフレームワークを示し、操舵運転負荷を評価する代用特性を提示した。そして、主観的な操舵感評価と代用特性の関係を明らかにし、操舵運転負荷軽減目標を検討する代用特性を明らかにした。また、その代用特性を再現するシミュレーションモデルを提示し、主観的に評価されてきた操舵特性の解析を可能にする環境を提示した。

第3章では、運転支援を議論するうえで必要になる運転者の操舵運転特性を明らかにした。まず、運転者による操舵運転は、人の手腕の運動制御とのアナロジーにより成されているという仮説をたて、運転者の操舵運転特性を解析し、運転者が手腕の運動制御とのアナロジーで操舵運転負荷が軽減できる条件を導いた。そして、導いた条件をEPS機能で実現し、目標軌道に対する追従性が向上することを実車実験で実証した。この結果、運転者の操舵運転特性を人の手腕の運動制御とのアナロジーで説明することは、妥当な仮説であることを示し、操舵運転負荷を軽減する条件を導いた。

第4章では、通常操舵運転における運転者負荷に対する車輻特性の影響を解析し、それをEPSによって補償する方法を提案した。まず、目的に対する望ましい操舵特性を、車輻挙動と操舵トルクのリサージュ波形を基に操舵周波数とヨーレート振幅の関係で示す方法を提示した。そして、操舵特性を再現するシミュレーションによってスタビリティファクタと後軸コーナリングコンプライアンスの影響により安定感を失う条件を明らかにした。次に、EPS機能を用いて、スタビリティファクタとコーナリングコンプライアンスの影響を補償し、運転者にとって安定感のある操舵しやすい車輻特性にする方法を提案した。更に、外乱オブザーバを用いてEPS制御

によって運転者が操舵トルク情報で車輛挙動を把握しやすい条件に補償する方法を導いた。以上の提案した EPS による補償によって操舵運転負荷が軽減できることをレーン変更運転実験で実証した。

第 5 章では、EPS 機構が有する操舵性能に対する負の影響が克服されたことを前提に、目標軌道に追従する操舵運転をヨーレート振幅により、オンセンター領域、オフセンター領域、オフセンター領域の外側の領域の三つの操舵場面に分類し、各操舵場面の操舵特性に対するステアリング機構特性の影響を明らかにし、望ましい操舵特性を実現する EPS 制御設計法を提案した。その結果、目標軌道に追従する操舵運転の操舵特性を論じる上で、ヨーレート振幅により、オンセンター領域、オフセンター領域、オフセンター領域の外側の領域に分けて論じることの有効性を示した。オンセンター領域の操舵では、手腕をリラックスしてハンドルを把持した場合、スティックスリップが発生し操舵負担が増すという問題を明らかにし、スティックスリップの影響を補償する EPS 制御を提案し、その効果を示した。オフセンター領域では操舵運転負担軽減に対し、クーロン摩擦力がセルフアライニングトルクの関数で増加するという摩擦特性の重要性を明らかにし、EPS による補償制御により擬似的に与える方法を提案し、その効果を示した。オフセンター領域の外側の領域では、パワーアシスト特性ゲインを大きくして操舵角に対する横加速度ゲインを上げるものの有効性を示し、かつこの領域で求められるタイヤの路面グリップ状態の認識に貢献するパワーアシスト特性の関数条件を明らかにした。

第 6 章では、前輪タイヤに働く外乱力の管理目標を、運転者の操舵運転能力を考慮して示し、各外乱管理目標に対して外乱オブザーバを応用した外乱力感度設計方法を提案した。その結果、サスペンション前後方向の共振点を励起する外乱力が働いた場合、路面カントがもたらす操舵トルクオフセットを受ける直進走行時の場合およびタイヤグリップを失った場合での操舵運転負荷を軽減する EPS 機能を用いた補償方法を提案し、その効果を実車実験で示した。次に、フリーコントロールでのヨーレート安定性に対する車輛系とステアリング系が干渉することによる影響を明らかにし、EPS を用いた SAT 補償により非干渉化する方法を提案した。この結果を用いて、横風やバンプステアが起こす外乱力のヨーレートへの影響に対し、運転者の修正操舵制御を容易にする EPS を用いた補償設計方法を提案した。

第 7 章では、これまで論じてきた操舵運転負荷軽減に貢献する EPS 機能を実現するための EPS アクチュエータ設計技術について示した。まず、操舵運転負荷低減のための EPS 機能を実現する EPS 機構特性の課題を明らかにし、それを補償する EPS 制御設計法を導き、操舵運転負荷低減のための EPS 機能を実現する EPS 制御系の構造設計を提案した。また、EPS 用トルクアクチュエータとしてのモータ要求特性を明らかにし、その設計技術を提案した。さらに、操舵運転負荷を低減する EPS 機能に必要な絶対舵角情報を検出する技術を提案した。

第 8 章では、本論文で提案する操舵運転負荷を軽減する EPS 機能の操舵運転安全に対する効果を実車実験及びシミュレーションで示した。検証は、本論文で論じた操舵場面、すなわち、目標軌道に対する操舵運転とヨーレートの変化率に対する操舵運転に対し、実車走行試験を行い、操舵運転負荷と操舵運転安全に対し提案する EPS 機能が貢献できることを示した。さらに、本論文の応用例を示すべく、将来の自動車として期待される EV 車の車輛特性が操舵運転負荷に与える影響を解析し、それを補償する EPS 機能を提案した。

最後に第 9 章で、本論文の成果をまとめるとともに、本論文で示した操舵運転負荷軽減による安全向上の検討方法が将来のステアリング技術や自動車技術の変化に対しても有効であることを述べた。

本論文は、筆者がこれまで取り組んできた EPS 開発経験を用いて操舵運転安全に対するステアリングの役割、それを検討するフレームワークおよび設計方法の一般化に取り組んだものである。このため、提案した操舵運転安全の検討方法やフレームワークは、電動パワーステアリングを採用している現在の自動車の安全向上はもとより、次代のステアリングとして期待されるステアバイワイヤや可変ギア比機構を採用する将来の自動車に対しても応用可能なものと考えられる。また、本論文で取り組んだ車輛特性やステアリング特性の操舵運転負荷に対する影響の解析手法は、電気自動車やタウンモビリティといった現在に対し異なる車輛特性を持つ自動車の操舵運転安全を考えるうえでも有効であると考えられる。その一例として EV 車に対する解析例を第 8 章で示した。

以上より、本論文の成果は、現在の自動車の操舵運転安全に貢献することとどまらず、将来の自動車に対する操舵運転安全向上の一助になると考えられる。