

# 博士論文（要約）

運転者の状態と路面不整の推定に基づく  
力覚支援操舵

中村弘毅

本研究は、ハプティックガイダンスステアリングという運転支援システムによる運転精度向上を有効に活用すべく、運転者、および車両の状態を簡易な計測装置を用いて推定する手法を提案し、有効性を検討した。運転者の緊張状態とグリップ力の相関に着目し、ステアリングアドミタンスを用いて状態推定を行うことを提案し、動特性を考慮した独立成分分析法を利用して路面状態推定を行う手法を検討した。

支援システムでは主に運転者の視覚、聴覚、触覚（力覚）の3つの知覚に対する支援手法が開発されている。運転時に視覚が担う役割は大きく、そこへさらに視覚への支援を行うことで視覚に求められる要求が過剰になり支援システムが逆効果になる可能性が考えられる。また、聴覚への支援は断続的な情報になってしまうため、継続的な操舵への支援には不向きであるが、文献で議論されているような連続的なフィードバックが手動制御のタスクには必要不可欠である。それに対して力覚への支援はより直感的に従うことができ、かつ継続的な支援を実現できる。

このような背景からより安全な自動車交通を実現するために「運転者の状態と路面不整の推定に基づく力覚支援操舵」を提案し、その有効性を示すことを目的とする。力覚支援操舵とは、ハンドルにトルクを加えることによって運転者に進路の誘導を促したり、振動によって危険を知らせたりする運転支援システムの一つである。この力覚支援操舵システムを有効に機能させるためには運転者のアドミタンスを推定し、支援システムへの受容性を監視することが必要になると考えられる。また、操舵系はタイヤを介して路面と接しており、路面不整による振動はハンドルにも伝達されるため、運転操作に影響の大きいと考えられる走行中の路面不整を推定することも重要な要素であると考えられる。路面状態は運転操作に影響するだけでなく、ステアリングの振動源としてアドミタンス推定への影響も考えられる。先行研究では運転者のグリップ力は路面の粗さに応じて変化することが述べられており、路面からの振動レベルがわかることでアドミタンスの推定精度を向上させることが期待できる。また、別の報告では運転者の腕とステアリングの接続部分を機械的なインピーダンスとして近似し、インピーダンスを組み込んだ操舵支援を提案しており、アドミタンスを推定することでより効果的な力覚支援を実現できることが期待できる（図1）。

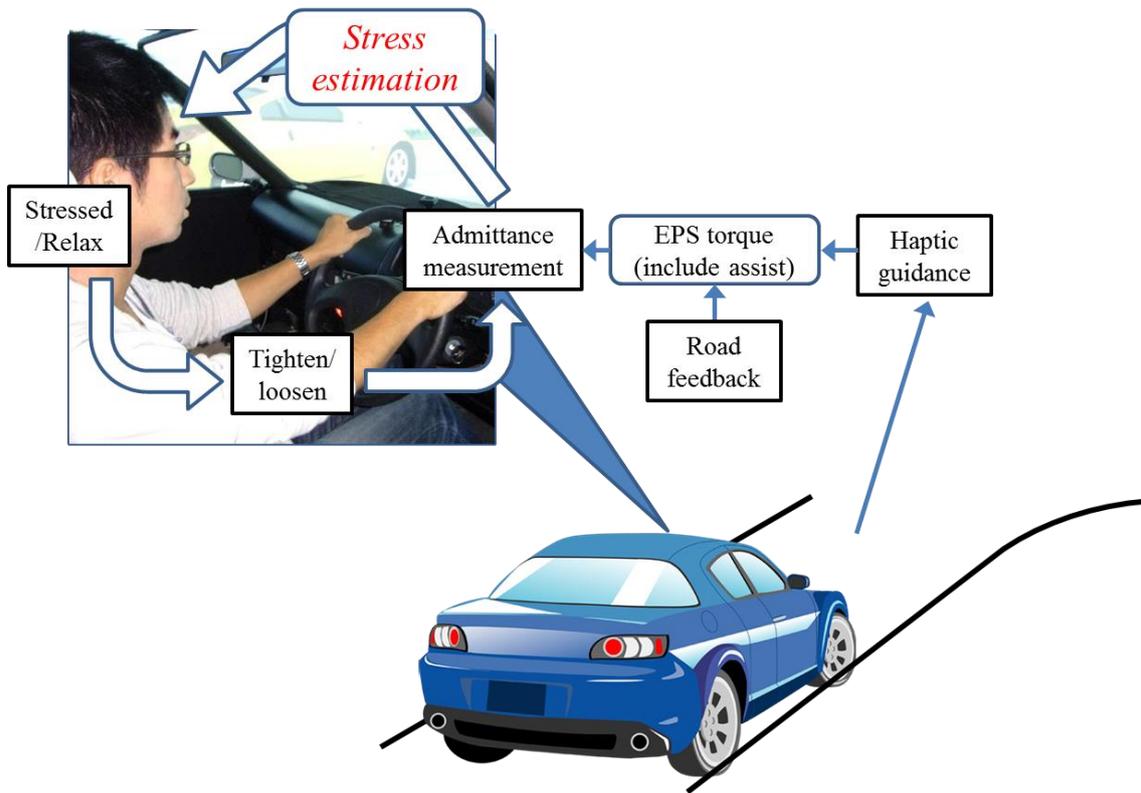


Fig.1 Concept of haptic guidance with driver's stress and road information estimation

第2章では実験環境および測定手法について述べる．本研究では主に2種類のドライビングシミュレータを用いた実験を行っており，また生体信号の計測を行うことで実験協力者の生理指標を客観的に評価している．

2つの動揺型ドライビングシミュレータは，6自由度の運動を可能にする動揺装置を持ち操舵機構はアクチュエータによって反力を模擬するステアバイワイヤシステムで，走行時の路面反力をリアルタイムに計算し，ステアリングにトルクをフィードバックしている．映像はそれぞれ前方140度と全周360度の視界を確保し，映像，交通シミュレータ，操舵の各パラメータはそれぞれホストコンピュータと通信している．ホストコンピュータには道路線形情報が組み込まれており，車両状態量と組み合わせることで横方向の偏差，および向きの偏差をステアリングに出力することが可能である．

筋電位計測は，各筋肉の筋収縮に伴う電気信号の流れを監視するもので，筋収縮力は電位振幅とほぼ比例関係にあるため任意の筋肉の活動状況を計測することができる．心電図の計測は心臓の収縮にともなって発生する電位変化を計測するもので，筋電位と同様の計測装置を利用して計測可能である．

実際の運転は様々な状況で行われ，必ずしも100%の集中力を維持できるわけではない．そこで実験中に注意力を分散させるPASATと呼ばれる音声課題を負荷して実験を行った．運転中のミスを目覚めさせることで，運転者の様々な状態に対して提案するハプティックガイダンスの有効性を評価した．

第3章では運転支援システムの一例としてハプティックガイダンスステアリングをドライビングシミュレータに導入し、運転挙動の評価を行った。4段階のアシスト（支援なし、弱、中、強）と音声課題の有無、計8つの条件で一般道の右左折、および制限速度50km/h程度の道路でのカーブを走行する実験を行った。10名中7名の被験者に対して低速走行時に走行軌跡のばらつきが有意に小さくなることを示し、通常走行時に運転精度の高い3名に対しては力覚支援の優位性は示せないものの、十分な運転精度を維持できていることを示した。高速区間を走行する際は、カーブへの進入時にはそれほど効果が得られず、一定曲率を曲がる区間では10名中8名に対して力覚支援によって有意にばらつきが下がることを示し、出口付近では半数に対して効果があった。今後、目標軌跡を検知する方法を改善することで入口、出口区間においてもより有効に機能させることが期待できる。力覚支援は被験者ごとに効果の得やすいゲインの強さが異なり、個人に合わせたゲインを設定することが必要であることを示した。より有効に機能している力覚支援の条件でより強いアシストトルクが発揮されているわけではなく、運転者自身の運転特性がアシストによって変化し、運転精度が向上することを示した。

第4章では簡易な計測装置を用いて運転者の緊張状態を推定するための指標として、ステアリングを握るグリップ力、ステアリング周辺のアドミタンスに着目し、それらの指標を用いて運転者の緊張状態を遠隔的に推定する手法を提案した。交通流に対する運転者の緊張度を推定するため乗用車のEPSを利用したドライバの状態監視手法を提案し、DS実験によりその有効性を示した。ステアリングを握るグリップ力の強弱が緊張度の大小に相関があることから、走行中の運転者 - ステアリング間のアドミタンスを推定し、遠隔的にドライバの緊張状態を推定する手法を提案した。路面反力を模擬し、反力を発生させられるステアリング機構を搭載したドライビングシミュレータを用いて実験を行い、高速道路への進入路、および走行中の追い越しの場면을例にアドミタンスの推定結果の妥当性を調べた。推定精度に関しては今後検討の余地があるが、緊張度の高い場面でよりアドミタンスが低下するという傾向がみられた。

第5章では動特性を考慮したICAによる振動解析手法を用いて路面状態の推定を行った。また、独立成分の順序を固定する手法と路面不整の絶対値を決定する手法を組み込み、数値解析をとおして提案手法による振動源の推定性能を検討しその有効性を示した。車体前後の上下加速度、およびその2階積分(変位)、1階積分値(速度)、1階微分値、2階微分値の計10系列の観測信号を求め、FastICAによって信号の分離を行い、基準走行時の混成行列、復元行列、スケールを利用して独立成分の順序、および絶対値を決定できることを示した。また、前後輪への入力時間差を利用して路面不整の推定性能を向上させることを示した。本手法は運動方程式の次数を既知としているが車両のそれぞれの諸元は未知のまま信号源の分離を行った。

第6章に本研究の結論をまとめた。本研究は、ハプティックガイダンスステアリングという運転支援システムによる運転精度向上を有効に活用すべく、運転者、および車両の状態を簡易な計測装置を用いて推定する手法を提案し、有効性を検討した。運転者の緊張状態とグリップ力の相関に着目し、ステアリングアドミタンスを用いて状態推定を行うことを提案し、動特性を考慮した独立成分分析法を利用して路面状態推定を行う手法を検討した。得られた知見を以下にまと

める.

1) ハプティックガイダンスステアリングをドライビングシミュレータに導入し、低速走行時に走行軌跡のばらつきが有意に小さくなることを示した。また高速区間を走行する際は、カーブへの進入時にはそれほど効果が得られず、一定曲率を曲がる区間では力覚支援によって有意にばらつきが下がることを示し、出口付近では半数に対して効果があった。

力覚支援は被験者ごとに効果の得やすいゲインの強さが異なり、個々人に合わせたゲインを設定することが必要であることを示した。

2) 走行中の運転者 - ステアリング間のアドミタンスを推定し、遠隔的にドライバの緊張状態を推定する手法を提案した。高速道路への進入路、および走行中の追い越しの場면을例にアドミタンスの推定結果の妥当性を示した。

3) 車体前後の上下加速度、およびその2階積分(変位)、1階積分値(速度)、1階微分値、2階微分値の計10系列の観測信号を求め、FastICAによって信号の分離を行い、基準走行時の混成行列、復元行列、スケールを利用して独立成分の順序、および絶対値を決定できることを示した。それにより、車体で計測した加速度信号から路面不整の推定が可能であることを示した。

これらの知見をもとに、走行中の運転者の緊張状態と路面状態を監視しながら、それらの状態に適応するハプティックガイダンスステアリングシステムの実現が期待できる。