

高度自動運転における力覚フィードバックを用いた操舵の共有に関する快適性の評価

倉持 拓明^{1,2,a)} 内海 章^{1,b)} 池田 徹志³ 加藤 弓子⁴ 長澤 勇⁵ 高橋 和彦⁶

概要：安全かつ快適な自動運転社会を実現するためには、完全自動運転に限らない多様な運転形態について検討することが求められる。本研究では、ドライバーの操舵量と車両挙動を直結させないことで危険操作に対する安全性を確保し、同時に力覚フィードバックによる適切な操舵への誘導を行う運転システムを提案し、シミュレータを用いた快適性の評価実験を行った。実験結果から、力覚フィードバックによるシステムからの明確な意思表示には安心感を高める傾向があり、強いフィードバックによる完全自動運転を模した運転形態とともに、適度な力覚フィードバックのもとでシステムと操舵を共有する運転形態が自動化の恩恵と移動における快適性の両立に有効である可能性が示された。

1. 緒論

1.1 研究背景

自動運転技術の発展は、ヒューマンエラーを要因とする交通事故の低減や、高齢者や過疎地域の移動手段の確保などの社会的課題の解決につながると期待されている [1]。その一方で、完全自動運転では搭乗するヒトと外界とのつながりが希薄になり、自動運転システムによる運転への不安や運転する楽しさの喪失によって、移動中のストレスの増加や移動に対する意欲の低下をもたらすおそれがある。

運転自動化の恩恵と自動車での移動における快適性を両立させることは大きな課題であるが、その解決策の一つとなりうるのが、自動運転システムによる監視と支援のもとでヒトが運転に関わる運転システムである。従来の運転支援システムと比べ、このような高度に自動化された運転システムではヒューマンエラーによる事故を防止できるほか、ドライバーは監視の義務がなくなり、気楽に運転に関与できるようになると期待される。しかし現在、ドライバーによる監視を必要としない高度な自動運転技術は商用化には至っておらず [2]、また先進運転支援システムや無人運転に比べ、高度自動運転におけるヒトとシステムの協調についてはまだ十分な議論が行われていない。そのため本研究で

は、このような運転形態が自動化の恩恵と移動における快適性の両立に有効であるか、試験的な検証を行う。

1.2 関連研究

走行の監視と車両の制御を自動運転システムが行う場合、車両を電子的に制御する Drive-by-Wire 技術を用いることで、自動運転システムがドライバーの危険な運転操作に対してインターフェースを介さず介入し、車両やドライバーの安全性を確保できるようになる。Drive-by-Wire 技術の一つである Throttle-by-Wire は、ペダル踏み間違い時加速抑制装置に応用され、安全性の向上に貢献している [3]。

自動運転システムが車両の制御に関して強い権限を持つ高度自動運転においては、ドライバーに対する情報呈示がより重要になる。情報呈示の手法の一つとして、近年触覚フィードバックが注目されており、特に操作インターフェースに対して自動化システムとヒトがともに力を加え制御を共有する Haptic Shared Control では、ヒトはシステムとの継続的な相互作用の中で制御に関与することができ、負担軽減やパフォーマンスの向上を望める [4]。完全手動運転、完全自動運転のいずれとも異なる運転形態を実現できるため、運転支援システムとして研究が行われている [5]、[6] ほか、自動運転車におけるドライバーとシステム間の運転権限の遷移に応用することも検討されている [7]。

1.3 研究目的

本研究では、自動運転社会における新たな運転形態の一つとして、自動運転システムの監視下でドライバーとシステムが協調的に運転操作を行う運転形態に着目し、これを

¹ 株式会社国際電気通信基礎技術研究所

² 同志社大学大学院理工学研究科

³ 広島市立大学情報科学研究科

⁴ 聖マリアンナ医科大学医学部

⁵ 株式会社 SUBARU

⁶ 同志社大学理工学部

a) kuramochi@atr.jp

b) utsumi@atr.jp

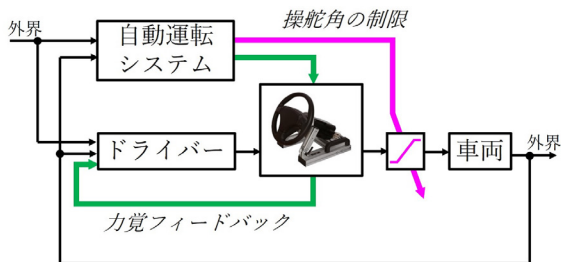


図 1 運転システムの概略図

実現するような運転システムにおける情報呈示の手法として、ステアリングホイールに対して自動運転システムからも操舵トルクを加える力覚フィードバックを検討する。運転シミュレータによる実験を通して、力覚フィードバックを用いた操舵の共有がドライバーの快適性に与える影響をアンケートと走行データをもとに評価する。

第2章では提案する運転システムの構成について、第3章では快適性の評価実験について述べる。第4章で実験結果の考察を行い、第5章で論文を総括する。

2. 運転システムの構成

2.1 運転システムの概要

本研究では運転操作を操舵に限定して検討を行う。提案する運転システムの概略図を図1に示す。

この運転システムでは、自動運転システムは車両の安全な制御を目的とした操舵角の制限と、ドライバーに対する情報呈示・操作支援を目的とした力覚フィードバックの2つの機能を持ち、ドライバーは自動運転システムによる監視と支援のもとで継続的に運転に関与することができる。以下にそれぞれの機能の詳細を述べる。

2.2 操舵角の制限

ドライバーの運転への関与を認めながら高度自動運転システムとして車両を安全に制御するため、本システムでは車両の操舵が電子的に制御されるSteer-by-Wireを想定して、ドライバーによる車両の制御に制限を設け、限られた範囲でのみドライバーの操舵を車両に伝える。以下では簡単のため、直線道路における車線維持を想定して説明を行う。

本システムにおいて、ドライバーがステアリングホイールの操作を通じて入力した操舵角 θ_d と実際に車両の制御に用いられる操舵角 θ_v の関係は式(1)のように表される。

$$\theta_v = \begin{cases} \theta_r & (\theta_d > \theta_r) \\ \theta_l & (\theta_d < \theta_l) \\ \theta_d & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 θ_r 、 θ_l はドライバーの操舵が車両に伝わる角度域の左右の閾値であり、この角度域の広さを θ_{safe} とする(図2参照)。 θ_r 、 θ_l は、車線逸脱を防止しつつ柔軟にドライ

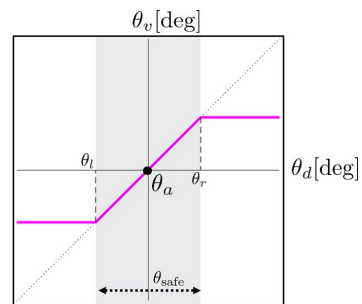


図 2 θ_d と θ_v の関係

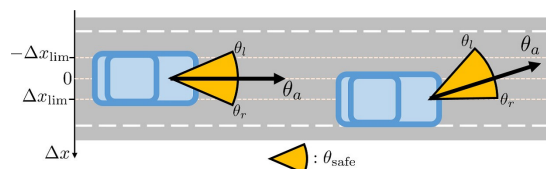


図 3 ドライバーの操舵が車両に伝わる角度域の変化

バーの操舵を伝えるため、車線中央の走行の維持を目標として自動運転システムが算出する操舵角 θ_a を基準に設定する。すなわち、車両が車線の境界線に近づき θ_a が車線中央側に向きを変えるにつれて、ドライバーの操舵が車両に伝わる角度域も車線中央側に回転させる(図3参照)。ここで、図中の Δx_{lim} は車線維持において許容できる車線中央からの誤差の最大値であり、この位置を超えないように θ_r 及び θ_l が設定される。車線中央からの誤差が Δx_{lim} の位置で道路に平行に走行している場合には $\theta_r = 0$ 、 $-\Delta x_{\text{lim}}$ では $\theta_l = 0$ となる。

このシステムでは θ_a の算出方法は問わないが、本研究ではシミュレータ上で経験的に構築した算出方法を用いており、車線幅(3.5m)や車両の横幅(1.8m)等を考慮して $\Delta x_{\text{lim}} = 0.75[\text{m}]$ 、 $\theta_{\text{safe}} = 4[\text{deg}]$ としている。

なお、車線変更を行う際も θ_a を変更先車線へ向かうよう適切に算出することで、継続的に同様の操舵角制限を行うことが可能である。

2.3 力覚フィードバック

ドライバーに対する情報呈示と直接的な操舵支援を行うため、自動運転システムはステアリングホイールに対して継続的にトルクを加え、力覚フィードバックを行う。ステアリングホイールに加えるトルク τ は式(2)で求める。

$$\tau = \begin{cases} -K_1(\theta_r - \theta_a) - K_2(\theta_d - \theta_r) & (\theta_d > \theta_r) \\ -K_1(\theta_l - \theta_a) - K_2(\theta_d - \theta_l) & (\theta_d < \theta_l) \\ -K_1(\theta_d - \theta_a) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 K_1 はドライバーの操舵が車両に伝わる角度域内のフィードバック用のステアリングホイールのバネ剛性、 K_2 は角度域外でのバネ剛性である(図4参照)。

ドライバーの操作を妨げず、なおかつフィードバックを感じられる範囲で適切に剛性を設定することで、ドライ

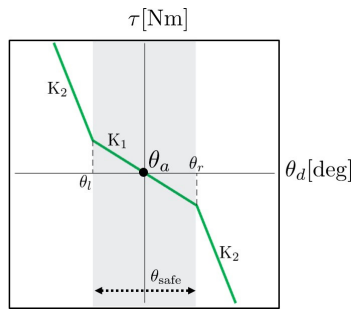


図 4 力覚フィードバック

バーはステアリングホイールの操作をシステムと共有し、システムとの相互作用の中で運転を行うことになる。また、 K_1 に対して K_2 を大きく設定し 2 段階のフィードバックを行うことで、操舵角の制限が行われることをより明確にドライバーに伝えることができる。

3. 快適性の評価実験

3.1 実験環境

実験では運転シミュレータとしてフォーラムエイト社製 UC-win/Road ver.12 を、ステアリングホイールとして SENSODRIVE 社製 SENSO-Wheel SD-LC を用いる。実験環境の概観を図 5 に示す。シミュレータの映像の描画には 65 インチのディスプレイ 3 台を用い、図 6 に示す位置及び角度で配置する。画面上には左右の後方確認を行えるようドアミラーを含むコックピットを表示する。

実験では 3 車線の高速道路を模した 10km のコースを使用し、自車両の走行速度は 100km/h、他車両は 50km/h もしくは 80km/h に設定する。走行中は基本的に車線維持を行うが、自車両が前走車に追いつくタイミングでドライバーもしくは自動運転システムが方向指示器を操作し、車線変更を行う。乗用車の他にバスやトラックなど、配置する他車両の車種や位置に変化を持たせるとともに、車線変更が必要な状況を設けることで、実験の参加者が運転システムを多面的に評価できるようにする。なお、走行開始地点から 2.5km までの区間には他車両は配置せず、運転システムの挙動を確認する区間とする。

3.2 実験手順

実験の参加者は、シミュレータへの習熟も兼ねた手動運転モード (M) での走行ののち、共通の操舵角制限を行う以下の 4 つの自動運転モードでの走行を行う。

- N：力覚フィードバックを行わないモード。
- S1：力覚フィードバックによる操舵共有モード。自動運転システムの操舵角 θ_a を目標値とする線形のフィードバックを行う。
- S2：力覚フィードバックによる操舵共有モード。ドライバーの操舵が伝わらない角度域に入ると剛性を強め、2 段階のフィードバックを行う。



図 5 実験環境

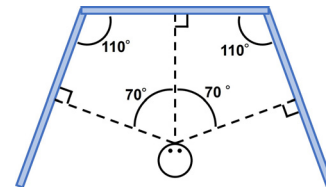


図 6 ディスプレイの配置

表 1 実験パターン

	M	N	S1	S2	F
操舵角の制限	なし	あり	あり	あり	あり
力覚フィードバック	なし	なし	あり	あり	あり
K_1 (K_2) [10^{-3} Nm/deg]	—	—	50	50 (100)	500

- F：強い力覚フィードバックによる完全自動運転を模したモード。ドライバーの操作はほぼ認められない。各パターンの設定を表 1 に示す。

パターンごとに前述のコースを走行したのち、アンケートへの回答を行う。なお順序効果を考慮し、4 つの自動運転モードの順序は参加者間で均等になるよう割り付ける。

実験前には操舵についてのみ体験と評価を行うことを明示し、自動運転中は任意のタイミングでステアリングホイールから手を離してよいことを伝える。

3.3 評価

3.3.1 主観的指標

主観的指標として以下の 4 項目を 9 段階のリッカート尺度 (図 7 参照) を用いて評価する。

- ドライバーの関与：ドライバーとして運転に関わることができると感じたか。
- 自動運転システムの関与：自動運転システムが運転に関わっていると感じたか。
- 安心感：走行は安心できるものだったか。
- 楽しさ：走行を楽しむことができたか。

ドライバーの関与及び自動運転システムの関与では、実験の参加者がドライバーと自動運転システムの間関係をどのように捉えたかを見る。また、安心感と楽しさという 2 つの面から快適性を評価する。なお、パターン M については手動運転であることを明示して走行するため、安心感と楽しさのみを回答する。

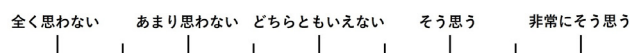


図 7 9 段階リッカート尺度

3.3.2 客観的指標

客観的指標として以下の 4 項目を走行データから算出する。

- τ_{rms} [Nm] : 操舵トルクの RMS (二乗平均平方根)。
- R_{reg} [%] : 操舵角制限の適用率。
- Δx_{rms} [m] : 車線中央からの誤差の RMS。
- SRR [s^{-1}] : ステアリングホイールの反転率。

τ_{rms} はステアリングホイール上で記録されたトルクであり、力覚フィードバックを行う場合のドライバーと自動運転システムの意図の衝突を見るために用いる。 R_{reg} は走行中に $\theta_v \neq \theta_d$ となっていた時間の割合であり、値が大きいかほどステアリングホイールと車両の操舵角にずれが生じた状態にあったことを意味する。

ドライバーとシステムの関係性を評価する上の 2 項目に対して、下の 2 項目では走行あるいは操作の質を評価する。 Δx_{rms} は車線変更中を除いたデータから算出し、値が小さいほど安全な走行であったことを意味する。SRR (Steering wheel Reversal Rate) は 1 秒間あたりにステアリングホイールが反転した回数を意味し、操作の質を評価する指標としてしばしば用いられる [6], [8]。

なお、各パターンの走行に習熟するまでの不安定な状態を取り除くため、いずれの評価指標も 3.0km 地点以降の記録を用いる。また、方向指示器が消灯している状態を車線維持、点灯している状態を車線変更とみなす。

4. 結果と考察

4.1 分析について

実験には日常的に自動車の運転を行っている 12 人が参加し、計 60 回の走行が記録された。このうち、自動運転システムが正常に機能せず衝突が発生した 1 件、及び前走車に対する過度な接近と減速が発生した 2 件を除く 57 回を有効な走行として扱う。

4 つの主観的指標の評価結果を図 8 から図 11 に示す。回答はリッカート尺度における「全く思わない」を 1、「非常にそう思う」を 9 として数値化している。結果の分析には Wilcoxon の符号順位検定 (両側検定, 有意水準 $\alpha = 0.05$) を用いる。

また、4 つの客観的指標の評価結果を図 12 から図 15 に示す。ここで、評価値は全参加者の走行の平均値であり、エラーバーは標準誤差を意味する。結果の分析には t 検定 (両側検定, 有意水準 $\alpha = 0.05$) を用いる。

本研究で立てた仮説は以下の通りである。

- (1) 力覚フィードバックを行わないモード (N) では、ドライバーが自動運転システムの意図を感じられないま

ま操舵角の制限が行われるため、不安や違和感を感じるおそれがある。ただし、自動運転システムの関与に否定的なドライバーには受け入れやすい。

- (2) 完全自動運転を模したモード (F) では、自動運転システムの関与が非常に明確であり、安全性の向上を最も望めるが、ドライバーの操作がほぼ認められないため、不安を感じるおそれがある。
- (3) 操舵共有モード (S1, S2) では、ドライバーは自動運転システムの関与を明確に感じながら、システムとの相互作用の中で運転に関与できる。そのため、運転に積極的なドライバー、消極的なドライバーいずれにも受け入れやすく、自動化の恩恵と快適性を両立できる。特に 2 段階のフィードバックを行う S2 では操舵角の制限を行う意図が明確になり、より協調的な運転になる。

4.2 考察

4.2.1 ドライバーと自動運転システムの関係

ドライバーの関与 (図 8) については参加者間で回答のばらつきが大きく、パターン間の明確な違いは見られなかった。この理由として、今回の実験では自動運転に対する期待や興味から、ステアリングホイールから手を離して走行を眺める参加者が多く、ステアリングホイールの操作

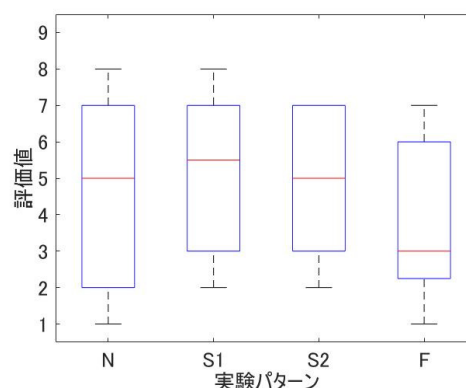


図 8 ドライバーの関与

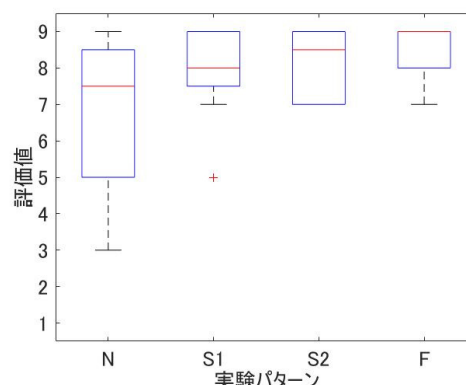


図 9 自動運転システムの関与

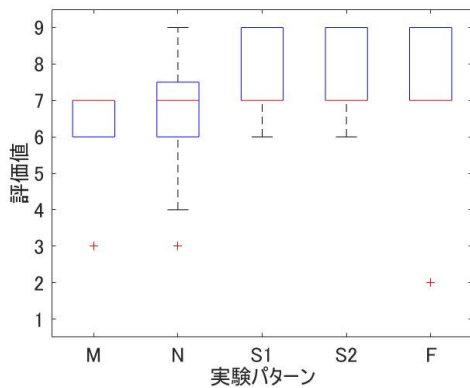


図 10 安心感

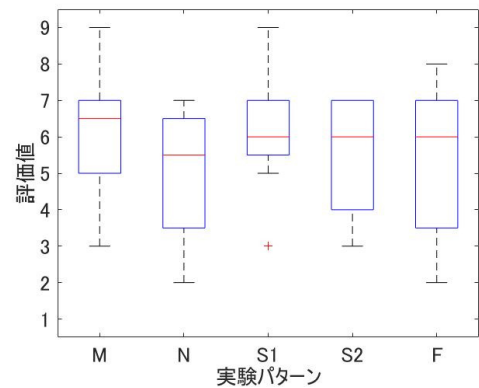


図 11 楽しさ

感の違いが重視されなかったことが考えられる。その中でも評価値が低い方に偏らなかったのは、車線維持ではドライバーとシステムの間で大きな意図の衝突が発生しにくいことや、車線変更のタイミングをドライバーが自由に決められることが影響した可能性がある。

また、自動運転システムの関与（図 9）については、自動運転モードのいずれでも評価値が高くなる傾向があった。これは、共通の操舵角制限によって、ドライバーが全く操作を行わない状況でも十分安全な走行が可能だったためだと考えられる。フィードバックありの 3 パターンに対して N では低い評価をする参加者もあり、ステアリングホイールに対する力覚フィードバックには自動運転システムの関与や意図を明確に伝える効果がある可能性が示された。

これに関連して、操舵トルク（図 12）については S2 と F の間で車線維持、車線変更いずれでも有意差 ($p < 0.05$) が見られたことから、わずかな誤差でも強いフィードバックを行う F では、ステアリングホイールの操作に関してドライバーとシステム間でより大きな意図の衝突が発生していたと考えられる。また、S1 では車線変更時に操舵トルクが大きくなったのに対して、S2 ではそれが見られなかった。これは、2 段階のフィードバックを行う場合、ドライバーの操舵が伝わる角度域の境界で跳ね返るような操作感があり、意図の衝突が発生しやすい車線変更時にはより強く自動運転システムの操舵角に誘導する効果があったためだと考えられる。

4.3 自動化の恩恵

操舵角制限の適用率（図 13）は N, S1 と S2, F のそれぞれの間で有意差 ($p < 10^{-5}$) が確認され、フィードバックが強くなるほど値が小さくなる結果となった。これは、フィードバックによってステアリングホイールの操作を直接的に支援することで、より自動運転システムの操舵角に近い操舵が行われたことを示している。この結果は車線中央からの誤差 Δx （図 14）にも共通している。

SRR（図 15）については、車線維持に関してフィード

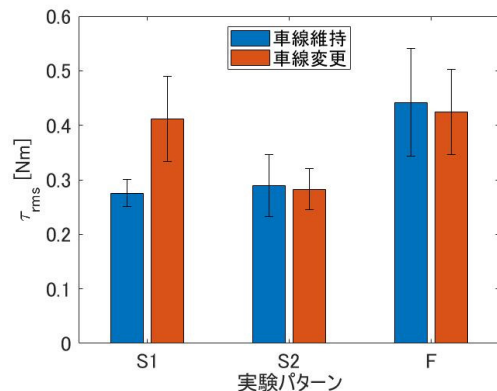


図 12 操舵トルクの RMS

バックありの 3 パターンと M との間に有意差 ($p < 0.01$) が確認され、フィードバックには手動運転時よりも滑らかな操舵になるよう支援する効果があることが確認された。なお、F における車線変更時の SRR が高くなっているが、これは本実験で用いた θ_a の算出方法では細かな操舵角の調整を行いながら車線変更が実施されるためだと考えられる。

F では強いフィードバックによってステアリングホイールの操作そのものが制限されるため、操舵角の制限はほぼ行われず、また車線中央からの誤差についても特に小さくなっており、最も安全な走行だったと言える。

4.4 快適性

安心感（図 10）に関しては、自動運転システムの関与について高い評価値が得られたフィードバックありの 3 パターンについて、M と S1 の比較で有意差 ($p < 0.05$) が確認されるなど、手動運転よりも安心感が高まる傾向が示された。ドライバーが運転に消極的な状況では、自動運転システムの関与が明確になることで安心感が高まったと考えられる。

今回、楽しさについては運転する楽しさに限らず、景色を眺める等の移動する楽しさも含めて回答を求めた。楽しさ（図 11）に関してパターン間で明確な差が現れなかった

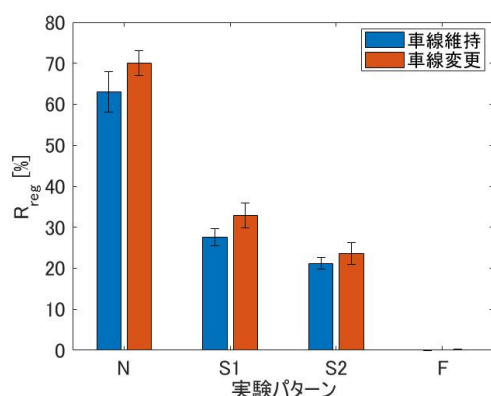


図 13 操舵角制限の適用率

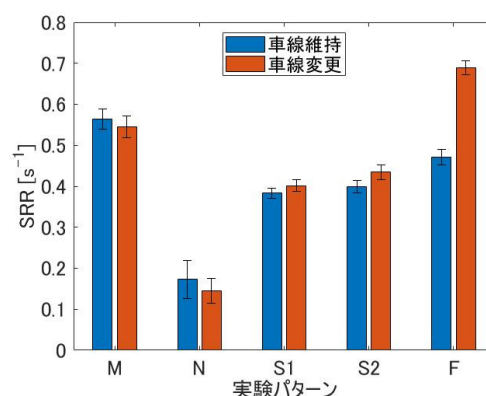


図 15 ステアリングホイールの反転率

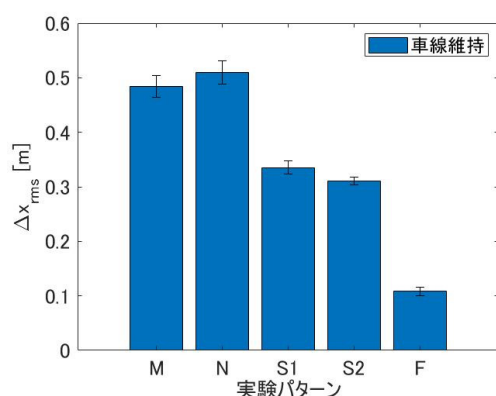


図 14 車線中央からの誤差の RMS

のは、要求する愉しさに個人差が大きかったためだと考えられる。

完全自動運転を模したモードである F は最も安全な走行だったが、ステアリングホイールの小刻みな振動に不安を感じ、安心感について非常に低い評価をする参加者がいたほか、愉しさに関しても回答のばらつきが大きくなった。これに対して、操舵共有モードでも F には及ばないながらも安全性が向上し、安心感や愉しさを感じることができたことから、完全自動運転とは異なるアプローチで自動化の恩恵と快適性を両立させる運転形態としての可能性が示された。

このほか、実験中や実験後には、「自分がウィンカーを出すタイミングで自動運転のウィンカーが出て安心した」、「ハンドルを切るタイミングにずれがあると気持ち悪い」など、自動運転システムによる操作のタイミングについて言及したコメントも多く得られた。よりドライバーに受け入れられる運転システムを構築するためには、ドライバーが望むタイミングに合わせて操作を行うように自動運転システムをドライバーに適応させていくことも重要になると考えられる。

5. 結論

本研究では、安全かつ快適な高度自動運転システムとし

て、ドライバーの操舵量と車両挙動を直結させないことで危険操作に対する安全性を確保し、同時に力覚フィードバックによる適切な操舵への誘導を行う運転システムを提案し、日常的なドライバーを対象に快適性の評価実験を行った。実験結果から、力覚フィードバックによる自動運転システムからの明確な意思表示には安心感を高める傾向があり、強いフィードバックによる完全自動運転を模した運転形態とともに、適度な力覚フィードバックのもとでシステムと操舵を共有する運転形態が自動化の恩恵と移動における快適性の両立に有効である可能性が示された。今後はより多くのドライバーによる検証や、フィードバックの強さや操作のタイミングに関して柔軟にドライバーに適応する運転システムへと応用していくことが求められる。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP16H02862 の助成を受けて行ったものです。

参考文献

- [1] 菅沼直樹：自動車の自動運転技術の動向と開発実例，電子情報通信学会誌，Vol. 98, No. 1, pp. 48–53 (2015).
- [2] 須田義大，青木啓二：自動運転技術の開発動向と技術課題，情報管理，Vol. 57, No. 11, pp. 809–817 (2015).
- [3] 谷口礼史：高齢運転者事故対策としての先進安全自動車の普及促進，安全工学，Vol. 56, No. 3, pp. 159–165 (2017).
- [4] Abbink, D. A., Mulder, M. and Boer, E. R.: Haptic shared control: smoothly shifting control authority?, *Cognition, Technology & Work*, Vol. 14, No. 1, pp. 19–28 (2012).
- [5] Mulder, M., Abbink, D. A. and Boer, E. R.: Sharing Control with Haptics: Seamless Driver Support from Manual to Automatic Control, *Human Factors*, Vol. 54, No. 5, pp. 786–798 (2012).
- [6] Mars, F., Deroo, M. and Hoc, J. M.: Analysis of Human-Machine Cooperation When Driving with Different Degrees of Haptic Shared Control, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 7, No. 3, pp. 324–333 (2014).
- [7] Wada, T., et. al : Authority Transfer Method from Automated to Manual Driving via Haptic Shared Control, *IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC2016)*, pp. 31–35 (2016).
- [8] Markkula, G. and Engström, J.: A Steering Wheel Reversal Rate Metric for Assessing Effects of Visual and Cognitive Secondary Task Load, *13th ITS World Congress*, pp. 31–35 (2006).