

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289049

研究課題名(和文) ドライバの状態監視を行うハプティック・ステアリング・ガイダンス制御

研究課題名(英文) Haptic guidance control monitoring condition of a driver

研究代表者

中野 公彦 (Nakano, Kimihiko)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号：90325241

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：ハプティック・ステアリング・ガイダンスとは、ドライバがハンドル操作をしている際に、そのトルクよりも小さい操舵トルクをハンドルに与えることにより、操舵を誘導し、より安全で、滑らかな操舵を実現する運転支援システムである。ドライビングシミュレータを用いて、カーブを曲がる際にドライバがどこを見ているのかを計測し、その結果を基に制御器設計を行い、操舵のしやすさを評価した。また、ハプティックによる擾乱をドライバに与え、それに対する反応からドライバの状態監視を行うことを提案し、実験を通じて妥当性を評価した。効果的な運転支援とドライバの状態推定をおこなうことができるシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：Haptic steering guidance is a driver assist system providing tiny torque to the steering wheel to guide the driver to the target trajectory smoothly. The gazing point of the driver in the curve section was measured on the driving simulator and the results were utilized to design the controller. Then the easiness of the steering maneuver was examined. In addition, monitoring from the response of the driver to the haptic perturbation was proposed and its effectiveness was examined through the experiments. The assist system inducing the smooth steering and monitoring the driver has been achieved.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 交通機械制御 協調制御 力覚支援 状態推定

1. 研究開始当初の背景

(1) ハプティック・ステアリング・ガイダンスとは、制御システムが自動車のハンドルにドライバがハンドル操作をしている際に、そのトルクよりも小さい操舵トルクを発生させることにより、ドライバの操舵を誘導し、より安全で、滑らかな操舵を実現する運転支援システムである。制御システムが運転を支配する自動運転とは異なり、運転者と制御システムが協調してステアリングを操舵し自動車を操作するもので協調制御 (shared control) とも呼ばれ、通常は運転支援システムとしてカテゴライズされる。あくまでも運転主体はドライバであるため、できる限り安全であるべきだが、システムが全ての安全性を担保する必要はなく、現行の交通法規で十分に認められるものである。

(2) レーンキープアシスト等で実用化されつつあるが、制御ゲインの設計法などは確立されているとは言えず、またそれをういたドライバの状態監視も行われていない。

2. 研究の目的

(1) ドライバの感覚に合うハプティック・ステアリング・ガイダンスの制御器設計を行い、その効果をドライビングシミュレータ (以下 DS) 実験により検討し、実車実験で確認する。

(2) 与えられた操舵トルクに対するドライバの応答、力学的アームアドミッタンスを計測することにより、ドライバの状態監視も行うシステムを提案し、DS 実験により効果を評価する。

3. 研究の方法

(1) 力覚支援操舵における目標軌道と車両位置の差の検出点は、前方注視ドライバモデル (二次予測モデル) に基づいて決定する。図 1 に示すように、車両重心 $G(x_G, y_G)$ 、車両姿勢角 θ_G 、予見時間 τ 、走行速度 V から、式(1)、(2)より将来位置にあたる前方注視点 $P(x_P, y_P)$ 、式(3)より前方注視点での姿勢角 θ_P を算出する。

$$x_P = x_G + V \int_0^\tau \cos(\theta_G + \dot{\theta}_G t) dt \quad (1)$$

$$y_P = y_G + V \int_0^\tau \sin(\theta_G + \dot{\theta}_G t) dt \quad (2)$$

$$\theta_P = \theta_G + V \int_0^\tau \dot{\theta}_G t dt \quad (3)$$

アシストトルク指令値 u は、前方注視点 P での車両と目標軌道の横方向偏差 e_y 、車両姿勢角 θ_P と目標軌道の向きの偏差 e から PD 制御により式(4)で与えられる。なお、 a_1 から a_4 は係数ゲインである。これらの係数は、経験から、それぞれ、10、0.3、10、0.3 と決めた。

$$u = a_1 e_y + a_2 \dot{e}_y + a_3 e_\theta + a_4 \dot{e}_\theta \quad (4)$$

予見時間によってトルク指令値が変わる。予見時間を実際のドライバのものに合わせる事が重要である。

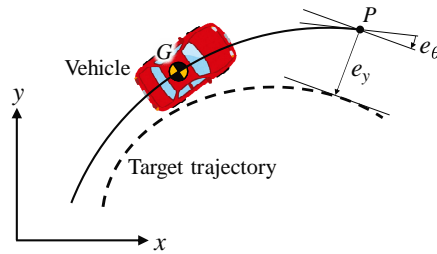


図1 前方注視ドライバモデル

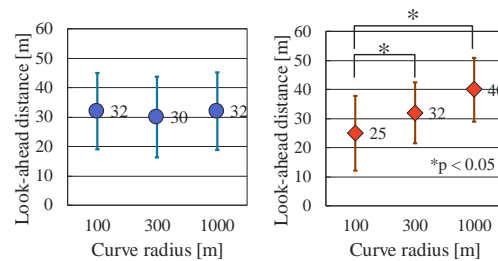
(2) ハンドルに操舵トルクが与えられる時、ドライバがハンドルを保持しているトルクによって、操舵角が変わってくる。与えられたトルク (外乱トルク) と、それにより動いた操舵角度の関係から、式(2)によって力学的アームアドミッタンス Ψ が求められる。

$$\Psi(f) = \frac{G_{d\theta}(f)}{G_{df}(f)} \quad (5)$$

ここで、 f は周波数、 $G_{d\theta}$ は外乱トルクと操舵角のクロススペクトルである。アドミッタンスの値が小さいほど、ドライバは強くハンドルを保持している。ドライバの覚醒度に応じて、アドミッタンスが変化すると思われる。

4. 研究成果

(1) 視線計測システムとドライビングシミュレータを利用して、前方注視点を求め、予見時間を推定することにした。曲線半径によって変化すると考えられたため、半径 100m、300m、1000m のカーブを走行中の前方注視点を求めた。図 2 に結果を示す。左カーブでは曲線半径に対して変化が見られなかったが、右カーブでは曲線半径が大きくなるにつれ前方注視距離が長くなる傾向となった。右カーブでは曲線半径に応じて前方注視距離が有意に長くなることを確認した ($p < 0.05$, $n=12$)。



(a)左カーブ (b)右カーブ

図2 前方注視点距離

右ハンドル車を模擬した DS を用いたが、同一の曲線半径であっても、右と左ではドライバからのカーブの見え方に差が生じると思われる。その結果、左右カーブで曲線半径に

対する前方注視距離の相関に差が生じたと考えられる．前方注視距離を車速 40km/h (11.1m/s) で除し，予見時間に換算した．半径 100m, 300m, 1000m の時に，それぞれ，2.1, 2.7, 3.6 秒となった．それぞれの予見時間を基に作成した力覚操舵支援制御器を，Near, Middle, Far と名付ける．

(2) 図 3 に示す単車線 幅員 3m の直線と曲線を組み合わせた道路で，実験協力者はハプティック・ガイダンス・コントロールの支援を受けながら，車速 40km/h で走行した．

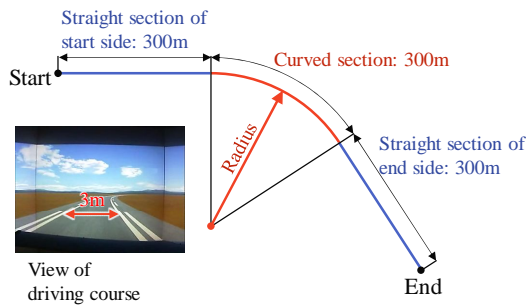


図 3 実験コース概要

運転方針の指標として式(6)で示される Mean Lateral Position (MLP), 運転精度の指標として式(7)で示される Standard Deviation of Lateral Position (SDLP), 車両安定性の指標として式(8)で表されるヨー角加速度の 2 乗積算値 Y_n を用いた．式(6)から(8)中の記号は，車両横方向偏差の平均値 d_{ave} , 車両横方向偏差 d_i , サンプル回数 i , サンプル総数 n , ヨー角加速度 $\dot{\gamma}$ である．

$$MLP = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (6)$$

$$SDLP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{ave})^2}{n}} \quad (7)$$

$$Y_n = \sum_{i=1}^n \dot{\gamma}^2 \quad (8)$$

図 4 に結果を示す．半径 100m では，MLP は支援法に関係なく，進入区間で目標軌道の外側，曲線区間で内側，脱出区間で外側と推移する一方，半径 300m, 1000m では，全区間で目標軌道の外側を推移しており，運転方針が曲線半径に応じて変化していたと言える．SDLP は同一の曲線半径においては，区間や支援法によらず，概ね同程度の値であった．曲線半径と支援法を要因とした二元配置分散分析を実施したところ全区間で曲線半径に主効果があり ($p < 0.05$)，各曲線半径間に差が認められた．曲線半径が運転に影響したことがわかる．

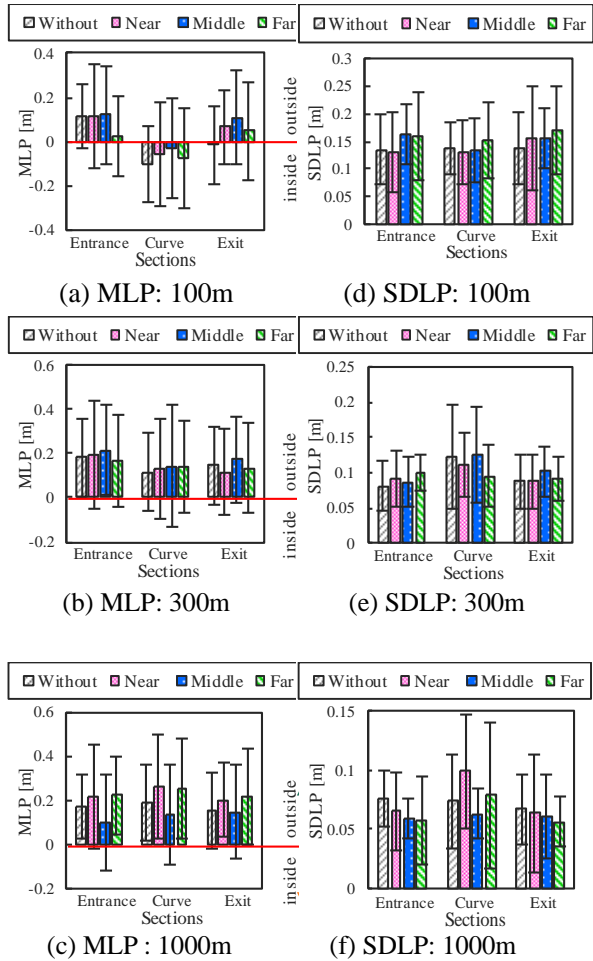
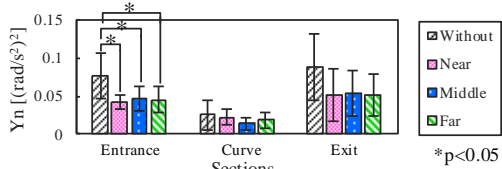


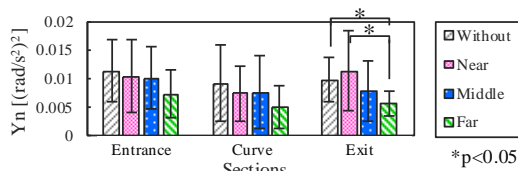
図 4 ハプティック・ガイダンス・コントロール下の MLP と SDLP

ヨー角加速度の 2 乗積算値平均値を図 5 に示す．半径 100m では進入，脱出区間で支援無しと比べ支援有りの 3 条件で減少している．また，300m, 1000m では進入，脱出区間において Far で最も小さく車両安定性が向上している．曲線半径と支援法を要因とした二元配置分散分析を実施したところ，100m では進入区間で支援無しと有りの間で有意差が認められた ($p < 0.05$)．また，300m では脱出区間で Far と Without, Near の間に有意差が認められた ($p < 0.05$)．

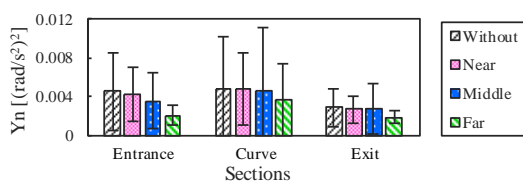
車線への追従を重視する運転方針の場合，支援の前方注視点をドライバーの前方注視点よりも先に設けることでより効果的な支援が行える可能性がある．



(a) A radius of 100m



(b) A radius of 300m



(c) A radius of 1000m

図5 ハプティック・ガイダンス・コントロール下のヨー角加速度の2乗積算値

(3) 小型電気自動車の操舵軸に電動モータを取り付けることにより、ハプティック・ガイダンス・コントロールを実車両で実現した(図6). 東京大学生産技術研究所千葉実験所構内路で、右折時にハプティック・ガイダンス・コントロール(フィードバックゲインの大きさにより、強い、中程度、弱い3種類の制御)を行った。強い制御器の方が横偏差は大きくなる傾向があり、強ければ良いものではないことがわかる(図7)。主観評価においても、効果を確認することができた。



図6 モータを取り付けた小型電気自動車と実験の様子

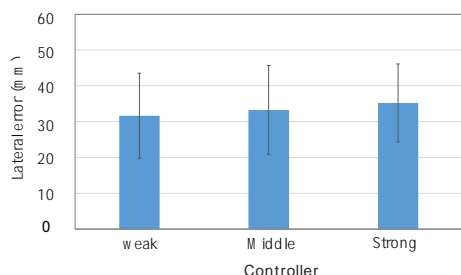


図7 実車実験での横偏差

(4) 実験協力者 10 名(21-25 歳)に対して、眠気を感じている時と感じていない時のアドミッタンスを計測した。実験前夜は睡眠時間を5時間以下にし、朝食はとらず、カフェインの摂取は控えるように指示を出し、昼食後に実験を行った。さらにDSで単調な運転をさせた後に、アドミッタンスを計測した。瞬きの時間と眠気尺度を用いたアンケート(Karolinska Sleepiness Scale)により眠気の評価を行い、眠気を感じていることを確かめた(図8, 9)。

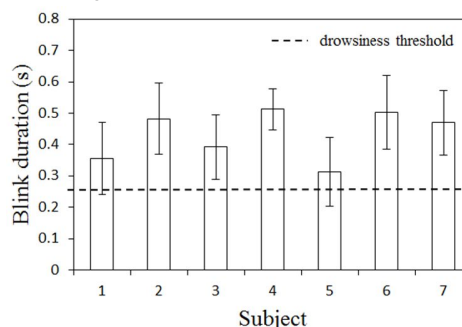


図8 まばたき時間(閾値以上で眠気を感じているみならず)

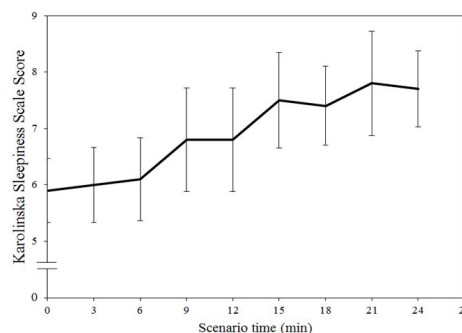


図9 眠気尺度(6で眠気の兆候, 7で軽度の眠気, 8で中度の眠気, 9で重度の眠気)

同じ実験協力者に覚醒状態で別の日に実験を行った時とのアドミッタンスを比較したものを図10に示す。眠気を感じている時は、3Hz以下のトルク外乱に対するアドミッタンスが大きくなっていることがわかる。ドライバの眠気を推定することができることを示している。

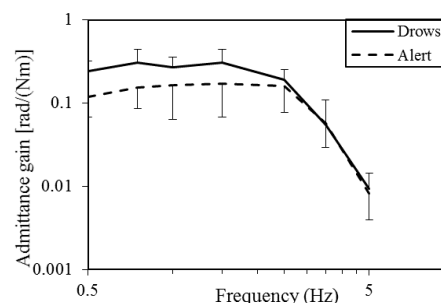


図10 アドミッタンス

(4) DS 実験により，運転時の前方注視点を計測し，求めた予見時間からハプティック・ガイダンス・コントロールの制御器設計を行った．予見時間を長めにした方が操舵は安定することがわかった．また，DS 実験により，力学的なドライバの腕のアドミタンスと眠気に相関があることを示し，ドライバの状態推定を行うことができることを示した．ハプティック・ガイダンス・コントロールが可能な小型電気自動車を作成し，実車実験によって効果があることを示した．

なお，本事業の実験は，全て，東京大学倫理審査専門委員会の承認を受けて実施された．

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Zheng Wang, Rencheng Zheng, Tsutomu Kaizuka, Keisuke Shimono, and Kimihiko Nakano, The Effect of a Haptic Guidance Steering System on Fatigue-Related Driver Behavior, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2017, DOI:10.1109/THMS.2017.2693230, 査読有

[学会発表](計16件)

中野公彦(発表者), 関正寛, 貝塚勉, 鄭仁成, 櫻井俊彰, 榎徹雄, 曲線路走行中の前方注視距離に基づく力覚支援操舵, 自動車技術会 2017 年春季大会学術講演会, 2017 年 5 月 26 日, パシフィコ横浜, 神奈川県, 横浜市

Kimihiko Nakano (発表者), Xin chu, Rencheng Zheng, Tsutomu kaizuka, Atsushi Ishihara, Motoaki Hibi, The effect of haptic guidance control on driving maneuver during time switching to manual from automated driving, 自動車技術会 2016 年秋季大会学術, 2016 年 10 月 19 日, 札幌コンベンションセンター, 北海道, 札幌市

Zheng Wang (発表者), Rencheng Zheng, Tsutomu Kaizuka, Keisuke Shimono, Kimihiko Nakano, Evaluation of Driver Steering Performance with Haptic Guidance under Passive Fatigued Situation, IEEE SMC 2016, Budapest, Hungary, 2016 年 10 月 9-12 日, ハンガリー, ブタペスト

Joly Antonin (発表者), Zheng Rencheng, Nakano Kimihiko, A Scaling Method for Real-Time Monitoring of Mechanical Arm Admittance, 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, DOI 10.11019/SMC.2015.274, Hongkong, 2015 年 10 月 11 日, 香港, 中国

Antonin Joly (発表者), Zheng Rencheng, Kimihiko Nakano, Effect of drowsiness on mechanical arm admittance and

consequences on driving performances, 22nd ITS World Congress, No. 2454, 2015 年 10 月 4-9 日, フランス, ボルドー

関正寛(発表者), 中野公彦, 榎野慧亮, 貝塚勉, 石原敦, 櫻井俊彰, 榎徹雄, 前方注視点位置をフィードバックする力覚支援操舵制御の目標軌道追従性能, 第 14 回「運動と振動の制御」シンポジウム USB 論文集, No.15-11, 2015 年 6 月 22-24 日, 宇都宮大学, 栃木県, 宇都宮市

Nakano Kimihiko (発表者), Zheng Rencheng, Takahashi Tatsuo, Isihara Atsushi, Recognition Testing for Lane Change Assist by Haptic Guidance, 14th ITS Asia Pacific Forum, Nanjing, China, 2015 年 4 月 27-29 日, 中国, 南京

高橋樹生(発表者), 中野公彦, 鄭仁成, 大堀真敬, 瀬川雅也, 石原敦, 車線変更支援のための力覚指示操舵トルクの有効性評価, 日本機械学会第 23 回交通・物流部門大会講演論文集, No.14-65, pp.127-130, 2014 年 12 月 2 日, 東京大学, 東京都, 目黒区

高橋樹生(発表者), 中野公彦, 鄭仁成, 大堀真敬, 瀬川雅也, 石原敦, 力覚指示と軌道誘導による車線変更支援, 第 12 回 ITS シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 東北大学, 宮城県, 仙台市

オントナジョリ(発表者), 中野公彦, 鄭仁成, 楊波, 眠気がドライバのステアリングアドミタンスに与える影響, 第 12 回 ITS シンポジウム 2014, 2014 年 12 月 5 日, 東北大学, 宮城県, 仙台市

Joly Antonin (発表者), Nakano Kimihiko, Zheng Rencheng, Variations in Driver's Mechanical Admittance Facing Distracting Tasks, 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1967-1972, 2014 年 10 月 5-8 日, 米国, サンディエゴ

Joly Antonin (発表者), Nakano Kimihiko, Zheng Rencheng, Relationship between Gripping Force and Mechanical Arm Admittance of a Driver under Perturbations, 12th International Symposium on Advanced Vehicle Control, pp. 57-62, 2014 年 9 月 22 日, 東京農工大学, 東京都, 小金井市

高橋樹生(発表者), 中野公彦, 鄭仁成, 大堀真敬, 中村弘毅, 瀬川雅也, 石原敦, ハプティック・ガイダンスによる車線変更支援, 自動車技術会学術講演会, No.33-14, pp.7-10, 2014 年 5 月 22 日, パシフィコ横浜, 神奈川県, 横浜市

高橋樹生(発表者), 中野公彦, 鄭仁成, 大堀真敬, 中村弘毅, 瀬川雅也, 力覚操舵制御による進路誘導, 日本機械学会第 22 回交通・物流部門大会, No.13-63, pp.277-280, 2013 年 12 月 12 日, 東京大学, 東京都, 目黒区

中村弘毅(発表者), 高橋樹生, 中野公彦,

高木隆史, 鄭仁成, 大堀真敬, 中野史郎,
速度適応型ハプティックガイダンスによる
曲線通過精度の検討, 第13回「運動と
振動の制御」シンポジウムUSB論文集,
No.13-18, 2013年8月27-30日, 九州
産業大学, 福岡県, 福岡市
中村弘毅(発表者), 中野公彦, 高木隆史,
鄭仁成, 大堀真敬, 高橋樹生, 中野史郎,
ハプティックガイダンスステアリングに
対する運転者の操舵挙動変化, 自動車技
術会学術講演会, No.93-13, pp.11-16,
2013年5月22日, パシフィコ横浜, 神
奈川県, 横浜市

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.knakanolab.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中野 公彦 (NAKANO Kimihiko)

東京大学・大学院情報学環・准教授

研究者番号: 90325241

(2) 研究分担者

中村 弘毅 (NAKAMURA Hiroki)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号: 50710141