

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11986

研究課題名（和文）自動車の遠隔操縦者の運転特性とインタフェースに関する研究

研究課題名（英文）Study on driving characteristics and interface of remote pilot of vehicle

研究代表者

杉町 敏之（Sugimachi, Toshiyuki）

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：60517001

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、通信遅れや体感の伴わない運転環境となる自動車の遠隔操縦者の運転特性と運転負荷を明らかにし、遠隔操縦者に対して有効な運転支援方法についてドライビングシミュレータ（DS）を用いて実証的に見出すことである。特に、実用化の進んでいる速度の20km/hだけでなく、都市の一般道路の走行を想定した50km/hの2条件の速度域を対象として、通信遅延を考慮した自動車の遠隔操縦者の運転特性と運転負荷についてDS実験結果から評価した。その結果、映像遅延が操舵操作の安定性および運転負荷に与える速度域ごとの影響と、その影響が大きくなる道路線形を明らかにし、遠隔操縦への有効な運転支援に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動運転による移動サービスのバックアップとして必要不可欠な自動車の遠隔操縦を対象とし、低速域だけでなく都市の一般道路の走行速度域に対して映像遅延と運転環境による運転特性への影響を明らかにした。また、これまで検討されていなかった運転負荷についても注目し、遠隔操縦者の運転負荷に関する影響も明らかにした。さらに、速度域ごとに通信遅延が与える影響と道路線形との関係についても実証的に明らかにした。本研究により遠隔操縦者に対する有効な運転支援を設計する上で重要な知見が得られ、学術的かつ社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the driving characteristics and load experienced by a remote pilot of a vehicle, influenced by communication delays and a lack of driving physical sensation, and to empirically identify effective driving support methods using a driving simulator (DS). In particular, we evaluated the driving characteristics and load of a remote pilot, taking into account communication delays, based on the results of DS experiments at two speed ranges: 20 km/h, representing practical use, and 50 km/h, representing typical driving on urban roads. As the result, the influence of the image delay on the stability of steering operation and the driving load in each speed range and the road alignment where the influence is large were clarified. These findings provide insights into effective driving support for remote control.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：遠隔操縦 運転特性 ドライビングシミュレータ 運転支援 自動運転 生体計測

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、自動運転技術による無人運転の実用化も進められており、無人運転車両を活用した新たな移動サービス (MaaS: Mobility as a Service) の研究開発が始まっている。無人運転車両では、自動車の運転に必要な認知・判断・操作が自動化されるが、複雑な実交通環境下において、あらゆる交通状況に対して無人運転車が正確な判断を行うことは現段階では困難である。そのため、無人運転車両を遠隔監視し、必要に応じて人が運転に介入して遠隔操縦により車両を運転させるシステムの研究開発が進められている。屋内の移動ロボットなどを対象とした遠隔操縦については多くの研究が行われている一方で、自動車の遠隔操縦についてはその数は比較的少ない。遠隔操縦者は体感情報が得られないだけでなく、運転操作を行う環境が一般の運転と大きく異なる。そのため、自動車の運転の延長として遠隔操縦の在り方を検討するのではなく、新たなモビリティに対する運転として考えることが重要である。そのため、遠隔操縦に求められる要件や運転支援などの検討には遠隔操縦者の運転特性を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、ドライビングシミュレータ (DS) を用いて、自動車の遠隔操縦者の運転特性を明らかにするとともに、遠隔操縦システムで有効な運転操作や情報提示に関する運転支援についての検討を実証的に実施することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、DS を用いて自動車の遠隔操縦環境を再現し、市街地における走行を想定して 20 km/h と 50 km/h の 2 条件の速度域に対する遠隔操縦者の運転特性に対する映像遅延の影響を DS 実験結果から評価する。また、遠隔操縦者の運転負荷について、心拍と発汗の生体計測とメンタルワークロード測定により評価する。本研究で構築した DS と接続した遠隔操縦システムの構成と遠隔操縦席を図 1 に示す。DS の動揺装置上の運転席に Web カメラを設置し、運転席前方の画像の取得を行う。遠隔操縦席では前景とサイドミラー映像と現在の走行速度が表示される。遠隔操縦者のインターフェースとしては、ステアリングコントローラが 1 台、アクセル・ブレーキペダルが 1 台設置されている。

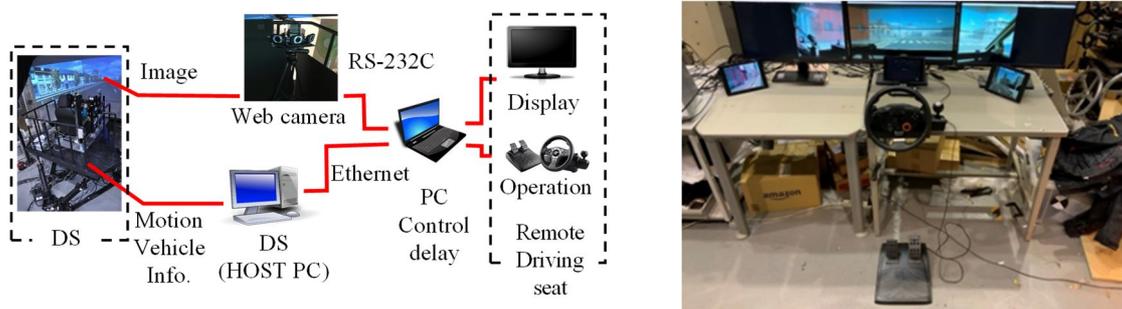


図 1 Remote control simulator and remote driving seat

DS を用いた評価実験では、実験参加者は普通自動車の運転免許を所持している 20 代から 40 代の男性 10 名 (平均年齢 40.8 歳、標準偏差 6.14) が実験に参加し、インフォームドコンセントを得た上で実験を実施した。なお、本実験内容については、東京都市大学の倫理審査委員会において審議され承認 (2021-h06) を受けている。実験コースは図 2(a)の長さ L の直線、半径 50 m の左カーブ、長さ L の直線、半径 50 m の右カーブの組み合わせが図 2(b)のように 4 つ連

続する線形とした．実験コースのカーブの半径については市街地での走行を想定し，道路構
法で設計速度 40 km/h において最低限確保すべき半径と定められている 50 m に設定した．表 1
に示すように目標速度と映像遅延の有無を実験条件とした．

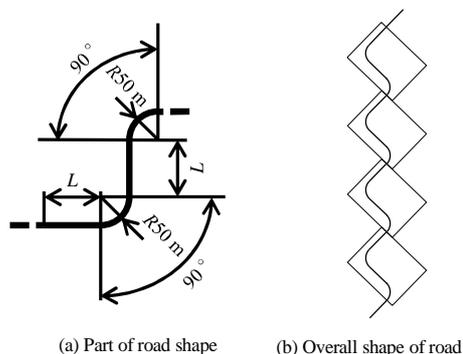


図 2 Test course

表 1 Experimental conditions

Condition	Delay time of image [ms]	Target speed [km/h]	L [m]
1	0	20	120
2	200	20	120
3	0	50	300
4	200	50	300

4. 研究成果

評価指標の解析では，評価区間として左カーブ前の直線区間を L1，左カーブ区間を L2，左カーブ前の直線区間を L3，右カーブ前の直線区間を R1，右カーブ区間を R2，右カーブ後の直線区間を R3 と定義した．左右カーブ前後の直線の区間長は L/2 とし，左右カーブの区間長は 80 m とした．SE と SDS，SDLP については全区間を評価区間とし，心拍と発汗については安静状態後の L2 と R2 を評価区間とした．評価指標による映像遅延の影響の評価における有意差については，Wilcoxon の符号順位検定を用いた．

(1) ステアリングエントロピー

ステアリングエントロピー (Steering Entropy: SE) は操舵の滑らかさを示す指標である．実験参加者の走行結果から算出した SE について，目標速度が 20 km/h の結果を図 3，目標速度が 50 km/h の結果を図 4 に示す．図 3 より目標速度が 20 km/h の場合，映像遅延が伴う条件で SE のばらつきが大きくなるが，有意差は生じなかった．図 4 より目標速度が 50 km/h の場合，全区間において映像遅延が伴う条件でばらつきは小さくなり，中央値は増加し，R3 で SE の中央値が有意に約 4% 増加した ($p < .05$)．目標速度 20 km/h と比べて 50 km/h では SE が増加し，映像遅延の影響により運転負荷が高まる傾向がある．

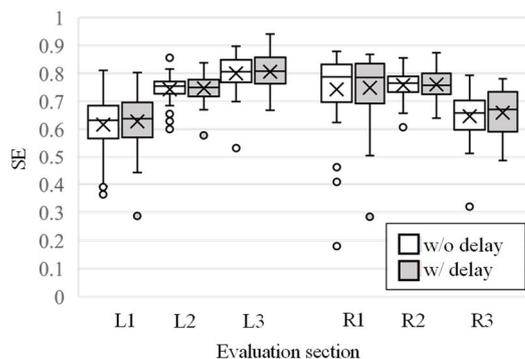


図 3 Experimental results of SE (20 km/h)

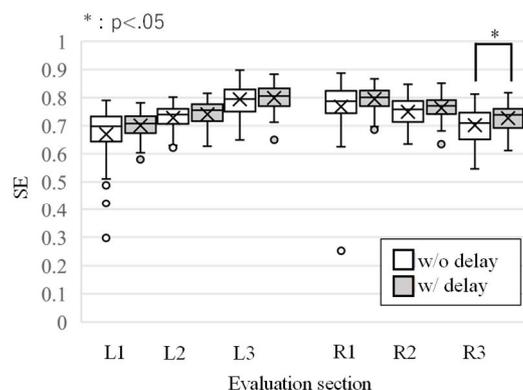


図 4 Experimental results of SE (50 km/h)

(2) 操舵角の標準偏差

操舵角の標準偏差 (Standard deviation of steering angle: SDS) は，操舵操作の安定性を表す指標である．実験参加者の走行結果から算出した SDS について，目標速度が 20 km/h の結果を図 5，目標速度が 50 km/h の結果を図 6 に示す．図 5 より目標速度が 20 km/h の場合，映像遅延が伴う条件では L1 で SDS の中央値が有意に約 10% 増加した ($p < .05$)．左カーブの映像遅延が伴う条件で中央値とばらつきが大きくなり，L2 と L3 で特にばらつきが大きくなる結果となった．映像遅延が左カーブで影響したのは，前方映像が右ハンドルの運転席からの視点であるため，運転席から離れている車両の左側の境界に関する認知における違いが影響した可能性が考えられる．図 6 より目標速度が 50 km/h の場合，映像遅延が伴う条件では L3 で SDS の中央値が有意に約

33%増加し ($p < .01$), R3 で有意に約 25%増加した ($p < .05$). また, 50 km/h では全区間において映像遅延が伴う条件で SDS のばらつきが大きくなり, 左右カーブで顕著にばらつきが大きくなった. そのため, 50 km/h の速度域では, 左右カーブとカーブ後の直線において, 映像遅延が操舵安定性に影響することが確認できる.

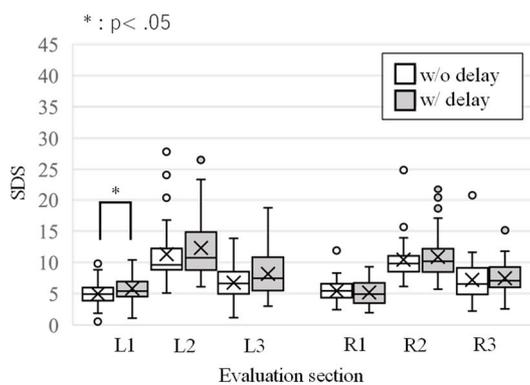


図 5 Experimental results of SDS (20 km/h)

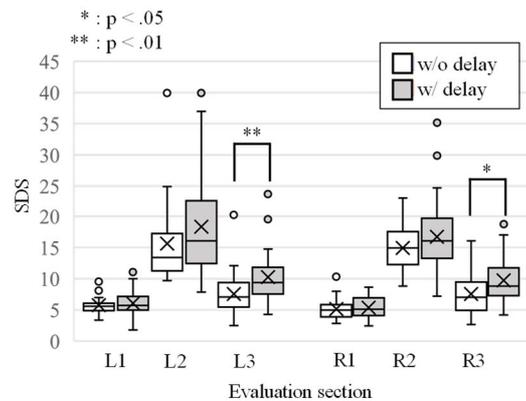


図 6 Experimental results of SDS (50 km/h)

(3) 横偏差の標準偏差

運転特性の評価のための指標として, 車両の横方向のふらつきを表す道路中心からの逸脱度 (横偏差) の標準偏差 (Standard Deviation of Lateral Position : SDLP) を用いる. 実験参加者の走行結果から算出した SDLP について, 目標速度が 20 km/h の結果を図 7, 目標速度が 50 km/h の結果を図 8 に示す. 図 7 より目標速度が 20 km/h の場合, 映像遅延について顕著な差は確認されなかった. 一方, 図 8 より目標速度が 50 km/h の場合, 映像遅延が伴う条件では SDLP の中央値が L2 で約 30%, R3 で約 18% 有意に増加し ($p < .05$), R2 でも増加する傾向がある ($p < .1$). また, L2 と R2 の映像遅延が伴う条件でばらつきが大きくなるとともに中央値が増加している. そのため, 50 km/h の速度域では, 左右カーブに対して映像遅延が運転精度に影響することが確認できることから映像遅延がカーブにおける運転精度に影響すると考えられる.

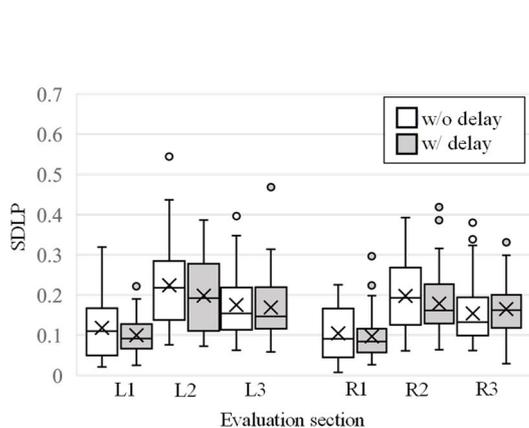


図 7 Experimental results of SDLP (20 km/h)

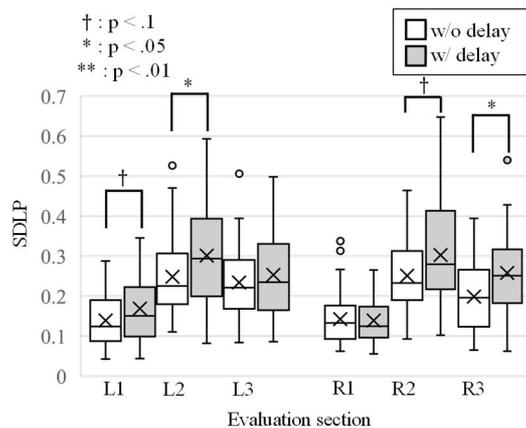


図 8 Experimental results of SDLP (50 km/h)

(4) 心拍変動の時間間隔と発汗量

精神的負荷の評価に関する指標として, 心拍変動の時間間隔 (R wave -R wave Interval : RRI) と手掌の発汗量を用いる. 発汗量としては, 安静時の状態をベースラインとして, 変動の平均値を用いる. RRI について, 図 9(a)のように目標速度が 20 km/h の条件では, 映像遅延の有無に対して有意な差は確認できなかった. この要因としては, 走行速度がカーブ設計速度の 40 km/h を

下回るため、映像遅延の影響が小さかったことが考えられる。目標速度が 50 km/h の条件では、図 9(b)のように映像遅延による有意な差は確認できず、RRI は 20 km/h と比べて小さい傾向であった。この要因としては、走行速度がカーブ設計速度の 40 km/h を上回るため、映像遅延の有無によらず、走行難易度によって緊張状態にあったと考えられる。発汗量については、図 10(a)のように目標速度が 20 km/h の条件では、映像遅延時に左カーブで発汗量の中央値が増加する傾向が確認できる。そのため、映像遅延の影響により左カーブで遠隔操縦者に対する精神的な負荷が高まる傾向が示唆される。目標速度が 50 km/h の条件では、図 10(b)のように映像遅延時に左右カーブで中央値が増加している。この要因としては、RRI と同様に映像遅延が無い条件においても走行速度がカーブ設計速度の 40 km/h を上回るため、走行難易度によって緊張状態にあったと考えられる。

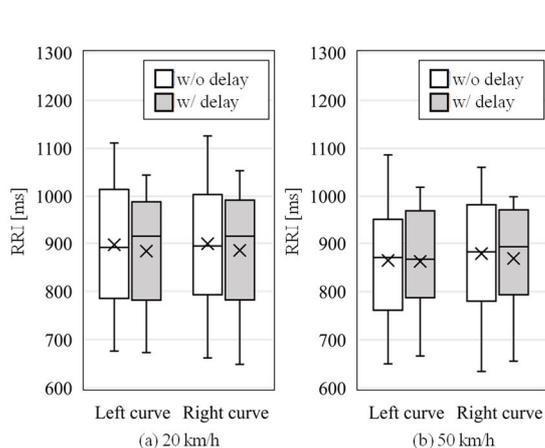


図 9 Experimental results of RRI

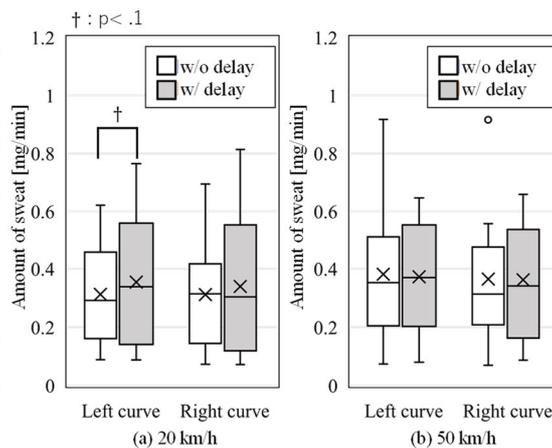


図 10 Experimental results of sweat

(5) メンタルワークロード

運転負荷に関する主観的評価の指標として、メンタルワークロード (Workload of Mental: WM) を用いる。WM の算出には日本語版 NASA-TLX を用いる。WM については図 11 に示すように目標速度が 50 km/h の条件については映像遅延が伴う条件で WM の中央値が有意に 7%増加した ($p < .05$)。そのため、映像遅延が 50 km/h の速度域では遠隔操縦者の精神的な負荷の増加につながる事が確認できる。

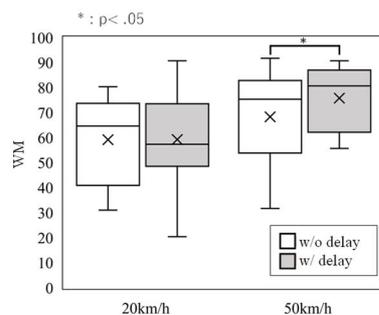


図 11 Experimental results of MW

(6) まとめ

50 km/h の速度域の遠隔操縦では、映像遅延が操舵操作の安定性および運転操作および運転負荷に影響することが示された。低速域 (20km/h) ではその影響が示されなかったため、車速域により遠隔操縦者に対して運転支援や運転負荷低減のための適切な支援に関する検討が重要となる。50km/h の速度域に対する遠隔操縦に対する運転支援としては、その影響が大きく示された左右カーブやカーブの出口において道路線形に対する認知の支援や操舵支援を行うことにより、映像遅延による影響を低減できる可能性がある。ヘッドマウントディスプレイ(HMD)は、通常のディスプレイと比べて周囲の環境の映像を立体的かつ視野角をより広範囲に表示でき、ユーザの頭の動きに合わせて映像を変化できる。そのため、HMD を用いて線形情報などを遠隔操縦者の視点に合わせて必要に応じて動的に切り替えて表示するといった支援が考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 杉町 敏之、石川 晃太郎、郭 鐘聲、須田 義大、櫻井 俊彰、榎 徹雄	4. 巻 54
2. 論文標題 自動車の遠隔操縦者の運転特性とインタフェースに関する研究（第3報）	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1191 ~ 1197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11351/jsaeronbun.54.1191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石川晃太郎、吉川拓実、杉町敏之、櫻井俊彰、榎徹雄、郭鐘聲、須田義大
2. 発表標題 カーブ走行時の自動車の遠隔操縦者の運転特性に関する研究
3. 学会等名 第58回日本交通科学学会学術講演会講演集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川晃太郎、杉町敏之、櫻井俊彰、榎徹雄、郭鐘聲、須田義大
2. 発表標題 生理的特徴を用いた遠隔操縦者の運転特性に関する研究
3. 学会等名 第20回ITS シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平塚旭、青木椋、小宮大輝、石川晃太郎、小谷祐貴、杉町敏之、櫻井俊彰、榎徹雄、郭鐘聲、須田義大
2. 発表標題 自動車の遠隔操縦における運転特性と視覚支援に関する研究
3. 学会等名 自動車技術会 関東支部2022年度学術研究講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 晃太郎, 吉川 拓実, 杉町 敏之, 櫻井 俊彰, 槇 徹雄, 郭 鐘聲, 須田 義大
2. 発表標題 カーブ走行時の自動車の遠隔操縦者の運転特性に関する研究
3. 学会等名 第58回日本交通科学学会・学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉町敏之, 石川晃太郎, 郭鐘聲, 須田義大, 櫻井俊彰, 槇徹雄
2. 発表標題 自動車の遠隔操縦者の運転特性とインタフェースに関する研究(第3報)
3. 学会等名 自動車技術会 2023年 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平塚旭, 杉町敏之, 櫻井俊彰, 槇徹雄, 郭鐘聲, 須田義大
2. 発表標題 高速域を対象とする自動車の遠隔操縦における操縦者の運転特性の評価
3. 学会等名 日本機械学会 第32回交通・物流部門大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	郭 鐘聲 (Gwak Jongseong) (20826078)	拓殖大学・工学部・准教授 (32638)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	須田 義大 (Suda Yoshihiro) (80183052)	東京大学・生産技術研究所・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関