

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01558

研究課題名(和文) 手動運転車との混在を考慮した交通工学的視点での自動運転車の効率性・安全性評価

研究課題名(英文) Efficiency and Safe Evaluation of Automatic Driving Car from Viewpoint of Traffic Engineering Considering Mixture with Manually-operated Car

研究代表者

宇野 伸宏 (Uno, Nobuhiro)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：80232883

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では自動運転から運転者への権限移譲の影響を分析し、手動運転車との混在下において、自動運転車が交通流の安全性・効率性に及ぼす影響について分析する。個車追従挙動分析の結果、前方車両との相対速度変化にスムーズに反応する車両は、速度低下を低減する可能性がある。ドライビングシミュレータを用いた走行実験の結果より、自動運転下で運転者が行えるセカンドタスクの生産性の点で、レベル3自動運転走行時における権限委譲は、必ずしも影響を与えない。セカンドタスク有りの場合には、自動運転からの権限移譲の際に、ハンドルを握るまでの時間が短くなる一方、権限移譲後のブレーキ強度が強まる傾向が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動運転車の導入により、道路交通における安全面や混雑、あるいは、交通弱者の問題などの解決に繋がるもの期待があり、自動運転に期待する向きも大きい。その一方、交通工学的観点から見た自動運転車の効果については、必ずしも定見が示されていない。本研究では、自動運転と手動運転の切り替えの影響を実証的に分析しつつ、それを踏まえて自動運転車と手動運転車の混在状況下において、自動運転車が交通流の安全性・効率性に及ぼすポテンシャルについて分析を行う。これらの一連の研究成果は、交通工学的に望ましい自動運転のあり方について検討するための重要な基礎情報となり得る。

研究成果の概要(英文)：This study is aimed at analyzing the influence of take-over request to the human drives issued by the system of autonomous vehicle and the impact of autonomous vehicle upon both safety and efficiency of traffic flow under the mixed situation of manually driving vehicles and autonomous ones. According to the individual car-following analysis, a vehicle that can smoothly react toward the change in relative speed with the preceding vehicle is expected to mitigate the speed reduction of traffic flow. According to the in-laboratory experiment using driving simulator, the take-over request at level 3 of autonomous vehicle does not necessarily give any impact to the productivity of the second task which the drivers are allowed to do. Focusing on the comparative analysis between with and without second task, it is confirmed that the take-over request issued in the case of with-second task may lead to the decrease in time to steer but the increase in breaking strength.

研究分野：交通工学

キーワード：自動運転 交通流分析 車両挙動モデル 室内走行実験 運転者の反応 ドライビングシミュレータ Take-over Request

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

昨今の ICT および AI の進展を受けて、道路交通の分野でも大きな変革の期待が高まっている。すなわち、自動運転車の導入により、道路交通における安全面や混雑、あるいは、交通弱者の問題などの解決に繋がるとの期待である。道路交通における安全や混雑は、交通工学における長年にわたる主要課題であり、自動運転に期待する向きも大きい。その一方、交通工学的観点から見た自動運転車の効果については、必ずしも定見が示されていない。

自動運転車の効果を議論する上で、重要な要素は自動運転車の発展段階と普及率であると考えられる。また、各発展段階での自動運転車に期待される機能・性能という点も、その効果を評価する上で十分な情報が得られているわけではない。その一方、自動運転車の発展・普及のためには、その途中段階として、従来型の手動運転車両との混在環境、自動運転と手動運転の状況に応じた切り替えなど、道路上の交通の流れに大きな影響を及ぼす事象が含まれることとなる。換言すれば、自動運転車の普及および道路交通の問題解決への貢献は、この発展過程を交通の安全性や効率性の点で大きな悪影響無く、社会全体として正の効果を得る形で進捗できるかという点に依ると言っても過言ではない。

2. 研究の目的

本研究では前述の研究背景を踏まえて、自動運転と手動運転の切り替えの影響を実証的に分析しつつ、それを踏まえて自動運転車と手動運転車の混在状況下において、自動運転車が交通流の安全性・効率性に及ぼすポテンシャルについて分析を行う。具体的には、以下のサブテーマについて、研究を実施する。

(1) 画像データを活用した車両挙動のモデル化

交通集中渋滞が起きる可能性が高い箇所を対象に、特に追従挙動の分析・モデル化を交通流の画像観測データから抽出された車両軌跡データを用いて行う。交通の安定性、円滑性の観点から自動運転車が備えるべき車両挙動特性に関する基本的知見を得ることを目指す。

(2) 自動運転車と手動運転車の混在下における運転挙動に関する室内実験

自動運転の発展・普及過程においては、車両挙動特性の異なる自動運転車と手動運転車が混在して走行する可能性が想定される。加えて、レベル3の自動運転では運転者に対する権限移譲が生じる可能性もあり、特にセカンドタスクの実施が許容されている環境下で権限移譲時に運転操作面で安全性が損なわれる可能性も否定できない。そこで、ドライビングシミュレータを用いた模擬走行実験により、自動運転車と手動運転車の混在下における運転挙動について分析を行う。特に、権限移譲の発生とセカンドタスクの生産性、自動運転からの権限移譲時の運転操作面への影響、および、低速自動運転車両の追従下の影響について検証する。

これらの一連の研究成果は、交通工学的に望ましい自動運転のあり方について検討するための重要な基礎情報となり得る。

3. 研究の方法

(1) 画像データを用いた車両挙動のモデル化

本研究では、個車追従モデルを推定し、推定パラメータに基づくクラスタ分析により個車追従モデルを類型化した上で、速度低下と追従行動特性との関係についての分析を試みた。追従走行状態の定義として、「同一車線上を走行している車両の中で、状態1または2である車両」とする。状態1とは、「前方車両との車尾時間が3秒以内である車両」、状態2とは、「速度50 km/h以下で走行している車両で、速度60 km/h以下で走行している前方車両との車尾距離が50 m以下である車両」であり、この2つをあわせて抽出した車両走行軌跡を図-1に示す。

上記の条件下で、追従走行状態が終了するのは、

- ① 前方車両または追従車両が車線変更する場合
- ② 状態1または状態2でなくなる場合

のいずれかである。以降の分析のために前方車両及び追従車両が完全軌跡データであり、同一車両を

前方車両として追従走行状態にある時間が10秒以上続いた車両のデータを抽出した。5日間の合計台数が16592台であり、その中で上記の条件を満たした車両は14599台である。

式(1)で表される Helly モデル⁽¹⁾をベースとし、希望車頭距離 D_n を定数と仮定することで得られる線形の追従モデルを用いて、個車追従モデルを推定する。

$$\ddot{x}(t+T) = C_1[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + C_2[x_n(t) - x_{n+1}(t) - D_n(t)] \quad (1)$$

ここに、 $\ddot{x}_{n+1}(t+T)$: 追従車両の加速度(m/s²)、 $\dot{x}_n(t)$: 前方車両の速度(m/s)、

$\dot{x}_{n+1}(t)$: 追従車両の速度(m/s)、 $x_n(t)$: 前方車両の位置(m)、 $x_{n+1}(t)$: 追従車両の位置(m)、

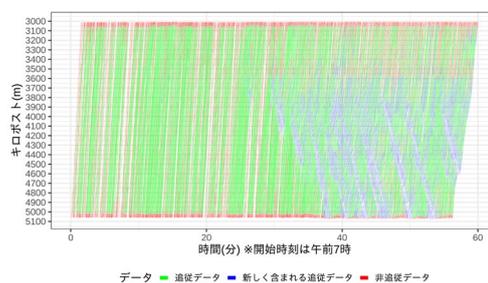


図-1 状態2により追従走行となるデータ

$D_n(t)$: 希望車頭距離(m), C_1, C_2 : 推定パラメータ, T : 反応時間(sec)

なお、モデルの推定を簡便に行うため、希望車頭距離 $D_n(t)$ を定数 D_n として扱う。

(2) 手動運転車混在環境下における運転挙動分析

①自動運転中のセカンドタスクの影響分析

自動運転車を社会実装するためには、一定のインフラ整備が必要であり、その正当性を評価するには、インフラ整備の便益を示す必要がある。そのひとつに移動時の時間損失の減少が挙げられる。現在の費用便益分析では、移動時の車内でセカンドタスクができるのであれば、移動時間は損失には含まないといった考え方ができるかもしれないが、セカンドタスクは必ずしも快適な環境でのタスクと同等の生産性になるとは限らない。そのような観点から、セカンドタスクの質の評価が不可欠となる。そこで、レベル3とレベル4の自動運転をドライビングシミュレータ (Driving Simulator, 以下、DS と略記) や実車を用いて模擬的に再現し、実験を行った。被験者には、再現した自動運転車に乗車した状態で、文字列記憶、動画記憶、テキスト入力の種類3のテストを実施してもらった。それらと同様のテストを室内でも実施してもらい、両者の成績にどの程度の差異があるかを計測した。

②自動運転からの権限移譲時の影響分析

本研究では、DSを用いてレベル3の自動運転を想定した模擬走行実験を行い、自動運転から手動運転へのTOR (権限移譲要求, Take-Over Request) 発生時における運転行動及び視行動に対する影響を把握することを目的とする。具体的には交通量の多寡、自動運転時のセカンドタスクの有無、そして自動運転中の周辺の交通情報提供の違いが与える影響に着目する。本実験における検証仮説として、TOR が起こった際にブレーキやアクセル、ハンドル等の操作を初めて行うまでの反応時間に着目し、以下の3つの仮説を取り上げた。

仮説1: 交通量が多い場合、少ない場合に比べて権限移譲時の反応時間が短い。

仮説2: セカンドタスクが有る場合、無い場合に比べて権限移譲時の反応時間が長い。

仮説3: 交通量大・セカンドタスク有りの状況下で前方監視を促す情報提供をした場合、情報提供をしない場合に比べて、権限移譲時の反応時間が短い。

③低速自動運転車両の追従下の影響分析

本研究では、低速自動運転車両 (ゆっくり AVs と表記) が一般市街地を走行している際の後続車両への影響を分析する。具体的には、DSを用いてゆっくり AVs を追従する状況を再現し、いくつかの環境下における後続車両の挙動分析を行う。本研究では、ゆっくり AVs を追従する後続車両の追い越し行動に着目して以下のような仮説を立てて検証を行う。

【仮説1】前方を走行する車両の走行速度が小さいほど、追い越し行動が増加する。

【仮説2】前方の視界が開けているほど、追い越し行動が増加する。

【仮説3】対向車両の交通量が少ないほど、追い越し行動が増加する。

【仮説4】前方車両が追い越しを促す情報提供をすることで、追い越し行動が増加する。

4. 研究成果

(1) 画像データを用いた車両挙動のモデル化

Zen-Traffic data⁽²⁾を用いて、個車の追従挙動モデルを推定した結果、主に以下の知見を得ることができた。

・追従行動特性には多様性がある。さらに、速度が比較的高い状態でのみ走行した車両群、速度が比較的低い状態でも走行した車両群それぞれにおいても追従行動特性に多様性がある (表-1)。その中でも、速度が比較的低い状態で走行した車両群には、より多様な追従行動特性が見出された。

・希望車頭距離が小さく、前方車両との相対速度の変化に対して緩慢に反応する車両や、希望車頭距離が小さく、前方車両との相対速度の変化に対して鋭敏に反応する車両は速度低下を助長する可能性があり、前方車両との相対速度の変化に迅速に反応する車両は速度低下を低減する可能性がある。安定的かつ円滑な交通流の実現に向け貢献可能な自動運転車を想定する上で、速度低下を抑制できる追従特性に学ぶところは少ない。

表-1 各クラスターの各パラメータの平均値

クラスター	C_1 (1/s)	C_2 (1/s ²)	T (s)	D_n (m)	c
1	0.441	0.0136	0.93	20.3	0.410
2	0.529	0.0193	0.64	19.7	0.336
3	0.338	0.0104	1.13	27.3	0.380
4	0.412	0.0105	0.71	30.5	0.296
5	0.472	0.0616	0.78	24.0	0.365
6	0.380	0.0120	1.00	45.9	0.380

(2) 手動運転車混在環境下における運転挙動分析

①自動運転中のセカンドタスクの影響分析

自動運転のレベル 3 以降では運転者も運転のタスクから解放され、運転以外のタスク（セカンドタスク）に従事することが許容される。本研究では、自動運転車乗車時のセカンドタスクの生産性を、自動車（DS）乗車中に行うテストと室内で行うテストの成績を比較することで推計した。

高速道路での自動運転レベル 3 を再現した実験では、DS でのテストにやりづらさを感じた人が過半数を占めていたものの、DS でのテストの成績と室内でのテストの成績に有意差は存在しなかった（図-2）。このことから、レベル 3 の自動運転走行時における権限委譲は、必ずしもセカンドタスク生産性に影響を与えないということが示唆された。

一般道路での自動運転レベル 4 を再現した実験では、車内で行った文字列記憶の成績が、室内でのテストと比較して有意に低下していた。その中でも、車両の揺れや加減速の影響を受けた自覚のある被験者に成績の低下が認められた。このことから、車両が頻繁に速度・ハンドル制御を行う場合では、セカンドタスク生産性が変動する可能性があることが示唆された。

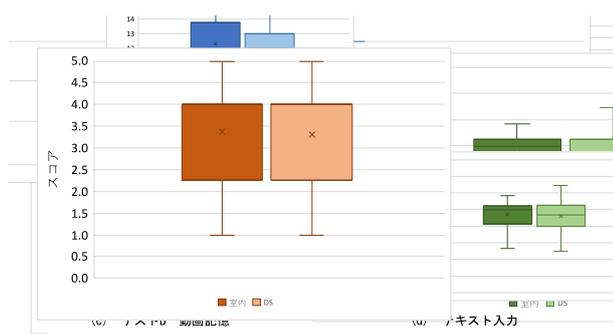


図-2 レベル 3 の実験結果

②自動運転からの権限移譲時の影響分析

本研究では、交通量、セカンドタスク、自動運転中の情報提供が、自動運転からドライバによる手動運転への権限移譲要求（TOR）時の運転行動及び視行動に与える影響に着目した。

主な知見として、セカンドタスク無しの場合に比べ、有りの場合にハンドルを握るまでの時間（TTS:Time-to-Steer）が短くなることが明らかになった（図-3）。しかし、反応時間が短くなるとともに権限移譲後のブレーキ強度が強まる傾向が確認され、本実験においては反応時間が長い場合に緩やかなブレーキ操作によって安全に権限移譲に対応している可能性が示唆された。

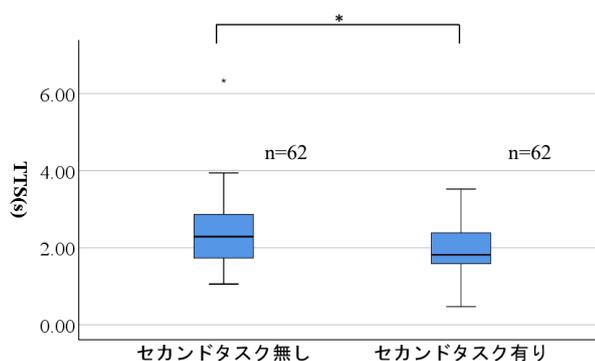


図-3 セカンドタスクの有無と TTS

また、交通量大、セカンドタスク有り、情報提供無しシナリオにおける観測結果に基づき、クラスタ分析を用いて被験者を 3 つに分類し、情報提供有無による運転行動及び視行動面での変化について検証した。その結果、映像注視時間割合が大きい被験者の中でも過敏なブレーキ操作を行っていた層には情報提供が効果的に働き、周囲への注視を増やし落ち着いたブレーキ操作に変化させる可能性があることが分かった。

③低速自動運転車両の追従下の影響分析

本研究では、DS 実験で得られたデータに基づいて低速自動運転車両を追従する後続車両の挙動について分析を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 前方を走行するゆっくり AVs の速度が小さいほど、追い越し行動は増加する。特に走行速度がおよそ 30 km/h を超えると、追い越し発生割合は大きく減少する（図-4）。すなわち、速度が 30 km/h を下回らないように走行させることで追い越しを抑制し、ゆっくり AVs の安全な導入を実現できる。しかし、グリーンソローモビリティを想定した 20 km/h 程度での市街地における走行は、追い越しを発生させる要因ともなり得る。

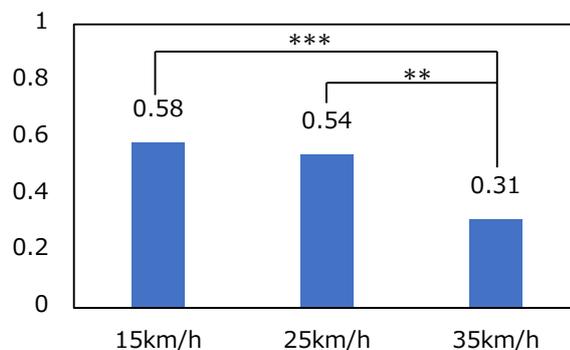


図-4 ゆっくり AVs 走行速度別の追越し発生割合

- ・前方を走行するゆっくり AVs が追い越しを促す情報提供をしても、追い越し行動に影響は見られなかった。これは同一の被験者で繰り返し実験を行ったため、情報を視認する前から追い越しを考えており、情報提供が有意義に働いていない可能性も考えられる。今後ゆっくり AVs が普及し、広く認知された際には、情報提供をする必要がないとの捉え方もでき得る。

<引用文献>

- (1) Helly, W.: Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow, Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow, Research Laboratories, General Motors, pp. 207-238, 1959.
- (2) 阪神高速道路株式会社, <https://zen-traffic-data.net/>, 閲覧日時 2023年6月9日19時02分

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 中神 勇人, 宇野 伸宏, 中村 俊之, 亀岡 弘之, 山本 浩司, 山本 隆, 丹羽 航洋,	4. 巻 6,4
2. 論文標題 車群と車線利用に着目した高速道路三車線区間における速度低下に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.6.4_A_28	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 松本 美紀, 宇野 伸宏, 中村 俊之, SCHMOECKER Jan-Dirk	4. 巻 6,2
2. 論文標題 模擬走行実験による自動運転からドライバーへの権限移譲時の影響に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.6.2_A_113	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 松ヶ谷 玲弥, 塩見 康博, シン ジャン, 糸島 史浩, 甲斐 穂高	4. 巻 6,2
2. 論文標題 個別車両データを用いた都市間高速道路における交通流特性の経年変化に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.6.2_A_121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中井 良輔, 中村 俊之, 和田 沙織, 森川 高行	4. 巻 7,4
2. 論文標題 低速自動運転車両走行時の追従下におけるドライバーの挙動分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14954/jste.7.4_A_40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 玉井魁人, 宇野伸宏	4. 巻 77
2. 論文標題 連続車両軌跡データを用いた個車追従モデルの推定と車両挙動多様性の分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 1_675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejipm.77.5_1_675	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	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 3件)

1. 発表者名 Mimura, M. and Kurauchi, F.
2. 発表標題 Simulation Analysis on Traffic Control of Urban Expressway by Flexible Toll configuration
3. 学会等名 24th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Lai, Y., Schmoecker, J.-D. and Yamada
2. 発表標題 Marginal increasing pricing to mitigate the negative impacts of autonomous vehicles
3. 学会等名 9th Int. Symposium on Travel Demand Management, Edinburgh, U.K. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mariko Nakai and Yasuhiro Shiomi
2. 発表標題 Dynamic calibration of microscopic traffic simulation at sags
3. 学会等名 24th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中神勇人, 宇野伸宏, 中村俊之 他3名
2. 発表標題 画像観測を用いた高速道路三車線区間における非渋滞領域での速度低下に関する研究
3. 学会等名 019年度 土木学会関西支部 年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松ヶ谷 玲弥, 塩見 康博
2. 発表標題 交通流バルスデータを用いた車頭時間分布の経年変化分析
3. 学会等名 2019年度 土木学会関西支部 年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小倉永都, 塩見康博, 中村俊之, 和田沙織(
2. 発表標題 自動運転車乗車時のセカンドタスク生産性に関する研究
3. 学会等名 第 19 回 ITS シンポジウム 2021
4. 発表年 2021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	倉内 文孝 (Kurauchi Fumitaka) (10263104)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	

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	中村 俊之 (Nakamura Toshiyuki) (10419062)	名古屋大学・未来社会創造機構・特任准教授 (13901)	
研究分担者	木村 優介 (Kimura Yusuke) (20713556)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	塩見 康博 (Shiomi Yasuhiro) (40422993)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	
研究分担者	S c h m o e c k e r J . D . (Schmoecker Jan-Dirk) (70467017)	京都大学・工学研究科・准教授 (14301)	

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