

自動運転バス乗客の受容性向上に向けた 車載ロボットの提案

Proposal of In-Vehicle Robot for Enhancing Passenger Acceptability of Autonomous Buses

田中 貴紘¹ 金森 亮¹ 赤木康弘¹

Takahiro Tanaka¹, Ryo Kanamori¹ and Yasuhiro Akagi¹

¹名古屋大学 未来社会創造機構

¹Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

Abstract: 近年、バス交通において、利用者減少や運転手の確保が難しいなどの課題が増加し、自動運転カート/バスを活用する実証実験が全国で行われている。本研究では、車内に設置された小型ロボットが動作と音声により車両挙動を乗客に伝達することで、自動運転車に関する乗客の不安軽減を目的とする。発話優先制御機能を持つ車内ロボットシステムを実装し、実証実験を行ったところ、乗客の車両挙動に対する理解を促進し、不安感を軽減する効果が確認された。

1. はじめに

近年、高齢者による運転を控える傾向も強くなっており、バスなどの公共交通機関を充実させることが求められている。しかし、バス交通において、人口減少地域の利用者減少や高齢化などによる運転手の確保が難しいなど課題が増加している[1,2]。そのため、代替手段の一つとして自動運転バスやオンデマンド交通をはじめとする次世代の交通サービス MaaS (Mobility as a Service) が注目されている。自動運転バスは、運転手がいなくても自動で運転が行われるバスであり、GPS や LiDAR 等のセンサや高精度地図等を利用して無人走行を実現する。数十人が乗車可能なバスタイプから数人乗りのカートタイプなど、導入場所や目的に応じて利用される。

日本 3 大ニュータウンの 1 つである愛知県春日井市高蔵寺ニュータウン(NT)は、居住者人口が減少傾向にあり、2021 年では約 4.3 万人であった。うち 65 歳以上人口の割合は約 36% (市平均は約 26%) となり、さらなる上昇が予想されている。高蔵寺 NT は丘陵地を切り開いて造成されたため坂道が多く、買い物や通院、公共施設への移動時は自家用車の利用割合が高いため、運転免許返納後の将来の移動手段について不安を抱える住民も多い。現在、まちの再生計画が策定・更新され、モビリティサービスの実証実験が数多く実施されている。特に、石尾台地区内は坂道が多く、徒歩・自転車での移動が困難であるため、自宅付近から施設やバス停などに移動でき

るように、20km/h 未満の低速度での走行を前提に、住民 NPO による自家用有償旅客運送での地区内オンデマンド型自動運転サービスが実験を経て実装され運用されている。著者らは、当地区の住宅街での自動運転サービスを想定し、運行設計領域 (ODD : Operational Design Domain) の設定・更新手順の提案や ODD 外からの復帰における安全性確保技術の開発と実証を目的とした研究開発を進めている[3]。

自動運転バス実証実験における体験者の評価[4,5]では、自動走行の性能以外に、事故対応や車内治安、車両安全に関する関心が高い結果となった。自動運転車両に対する安心感を高めるには、車両挙動の分かり易さや乗客の理解促進が必要であり、また、車内治安のためには、車内監視の実施だけでなく、監視状態を受容性が高い形で乗客に伝え、不安全行動を抑制することも重要と考えられる。

そこで本研究では、車内に設置された小型ロボットの動作と音声を用いて車両挙動を乗客に伝達し、乗客の不安を軽減する円滑な運行支援を目的とする。公道での実証実験の結果、優先度を設けたアナウンスを車載ロボットにより実施することで、乗客の車両挙動に対する理解を促進し、不安感を軽減する効果が確認されたため、これを報告する。

2. 車載ロボットアナウンスシステム

2.1. 自動運転車両の構成

本節では、本研究で用いる自動運転車両とシステム構成の概要を述べる。図1に使用する低速自動運転車両[6]の構成を示す。自動運転車両は小回りが利くヤマハ・ランドカーに、LiDAR（レーザ照射にて地物・障害物等の距離を計測するセンサ）やカメラなどを設置し、3次元点群地図を用いて自律走行を実現している。本研究では、自動運転車両の中央に、市販のコミュニケーションロボット（RoBoHoN, シャープ株式会社）を回転台の上に載せ設置し、自動運転システム OS（ADENU, 株式会社エクセイド）と連動し乗客向けアナウンスを行う。



図1. 自動運転車両の構成（ゆっくりカート）

2.2 車内アナウンスの検討

車載ロボットは、自動運転システムが出力する制御に関するログを元に、音声と動作によって乗客に状況をアナウンスする。関連研究を元に検討を行った結果、車載ロボット設置による有用性を、1) 車両挙動の理解促進による安心感・信頼感の醸成、2)

表1. 自動運転バスの運転停止に関わる信号

| 停止理由 | 付加情報例 | |
|---------------------|---------------|-------------|
| 障害物 | 対象までの距離 | |
| 停止線 | 一時停止 | 対象までの距離 |
| | 赤信号 | 対象までの距離/残時間 |
| | 横断歩道 | 対象までの距離 |
| 停留所 | 対象までの距離 名称 | |
| システム異常 | 異常詳細の説明文章 | |
| サービス停止指示(緊急車両, 災害等) | 異常詳細の説明文章 | |

3) 乗客でない存在を設置することによる安心感・車内治安の維持向上（監視されていることをアンビエント提示）、4) 注視対象を設置することによる他の乗客の視線によるストレス低減、とした。特に 3)および 4)の効果は、擬人化された身体性のあるロボットが自律的に動作することで醸成されると期待される。

自動運転システム OS が出力する運転停止に関わ

表2 車両挙動の変更の事前通知および理由説明

| 交通場面 | 発話例 | |
|-------------|------------|--|
| 一時停止 交差点 | 接近通知 | 発：もうすぐ一時停止です 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 停止 | 発：一旦停止します 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 発車：直進, 右左折 | 発：発車します+右折/左折します 動：右左折時は進行方向 Yaw 回転 |
| 信号 交差点 | 接近通知 | 発：もうすぐ信号です 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 停止 | 発：信号のため停止します 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 発車：直進, 右左折 | 発：発車します+右折/左折します 動：右左折時は進行方向 Yaw 回転 |
| 横断 歩道 | 横断者通知 | 発：横断者がいます 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 停止 | 発：横断のため一旦停止します 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 発車 | 発：発車します 動：発話時に片手を上げて下げる |
| 停留 所 | 接近通知 | 発：まもなく次の停留所です 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 停止 | 発：お客様乗降のため停止します 動：後部座席側に 180 度 Yaw 回転 |
| | 発車 | 発：発車します 動：前方方向へ 180 度 Yaw 回転 |
| 障害 物 | 障害物通知 | 発：障害物を検知しました 動：障害物方向へ Yaw 回転 |
| | 停止 | 発：安全のため停止します 動：発話時に片手を上げて下げる |
| | 発車 | 発：発車します 動：発話時に片手を上げて下げる |

る情報は表1の通りであり、状況に応じて同時に複数個の信号が出力される。高蔵寺ニュータウンにおける自動運転バス走行記録を元に、車載ロボットによる案内を次の3カテゴリと定義した：①ODD復帰方法に関わる案内、②車両挙動の変更の事前通知および理由説明、③車両のセンシング状況に関する通知。①に関する案内は、別途検討されている運行設計領域設定・更新手順に基づき設計されるものであるため、本研究では②および③の案内について検討・実装を進める。特に③は車両挙動の変更を要しない交通状況に関するセンシング情報（例：対向車検知など）を対象とし、乗客が煩わしく感じず、かつ車両がセンシング出来ている状態を示すため、ロボットの動作・回転による表現を重視した。

表2に車両挙動の変更の事前通知および理由説明に関する車内アナウンスリストを示す。車両挙動は、主に交差点（一時停止交差点、信号交差点）や横断歩道、乗客の乗り降りが発生する停留所（路線バスのような停留所設備はない）、そして障害物（駐車車両など）が存在する場合を対象に定義を行った。センサが対象を検知した、もしくは地図データから接近を検知した場合の接近通知、対応のための車両停止とその後の発車に分けて発話・動作を定義した。停留所対応を除けば、ロボットは基本的に進行方向を向いており、左右回転と車両軌道が一致するように定義している。表3に車両センシング状況通知リストを示す。センシング状況の通知は、車両センサが対象物を検知している状態であることを乗客にイベントに伝えることで安心感を醸成することを目的としている。そのため、通知には主に動作・向きによる提示を行うよう定義した。

実路走行における通知の実現可能性に関しては、取得可能なセンサ情報やその精度など、技術的にはまだ実装上の困難を伴う発話も存在する。本研究で

表3. 車両のセンシング状況通知

| 交通場面 | | 動作例 |
|-----------------|------------|-----------------------|
| 対向物体 (車両他) | 接近 通知 | 物体方向にYaw回転し、その後正面に戻る |
| 交差点 (一時停、信号) | 停止中 | 左右方向にYaw回転(繰り返し) |
| 交差点 (自車優先) | 接近～ 通過中 | 交差点方向にYaw回転し、その後正面に戻る |
| 横断歩道 (横断者なし) | 接近～ 通過中 | 左右方向にYaw回転 |
| 障害物 (回避不必要) | 接近～ 通過中 | 左右方向にYaw回転 |

は、高蔵寺ニュータウンにおける走行経路に応じ、実現可能な機能を選択・実装して実験を実施した。

2.3 乗客向け車内ロボット案内システム

自動運転システムOSと連動して車内アナウンスを実現する、車内ロボット案内システムを試作した。構成を図2に示す。試作システムは、自動運転OSが出力する制御ログをTCP/IPにて取得し、得られた認識状況・車両挙動から、表2および表3に基づき定義された発話・動作を選択して、ロボット制御アプリを介しロボットに発話・動作を行わせる。同時に回転台の制御を行うことで、車内アナウンスを実現している。図3に車両に搭載した車内ロボットの様子を示す。ロボットは自動運転車両の運転席と客席の間に設置し、走行中に滑落したり乗客が手を触れたりしないよう配慮した。

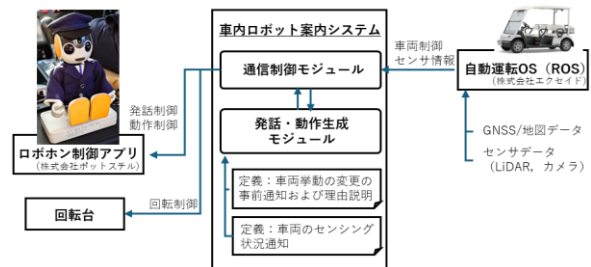


図2. 車載ロボットによる案内システムの構成



図3. 車載ロボットの設置

2.3.1 車載ロボットの効果検証実験 I

車載ロボットによる自動運転車乗客の不安感軽減効果を検証するため、高蔵寺NT石尾台地区にて、提案システムを搭載した自動運転車両による実験を行った[7]。高蔵寺NT石尾台地区でNPOにより運営されている自動運転車両（ゆっくりカート）に車内ロボット案内システム（図1）を搭載し、石尾台地区に

てあらかじめ設定したコースを走行させ評価を行った。実験には、地域住民を含む20代から70代の計16名が参加した。参加者には実験開始前に自動運転や車内ロボットに関する説明を行い、2名ずつ自動運転車両に乗車し、車内案内を体験した後、印象評価アンケートに回答させた。

印象評価アンケートは、設問1:自動運転バスの動きは分かりやすかった、設問2:自動運転バスの動きの説明は役立った、設問3:自動運転バスの動きは怖かった、設問4:車内ロボットの発言は理解できた、設問5:車内ロボットの発言のタイミングや速さは適切だった、設問6:車内ロボットを継続して使いたい、設問7:車内ロボットの発言は邪魔になった、設問8:車内ロボットがいた方が良い(車内ロボットがいない車両に乗ったことがある参加者のみ)の8項目に関する7段階評価(1:全く当てはまらない~7:よく当てはまる)とした。図4に主観評価結果を示す。評価の結果、車両挙動を説明する発話・動作により理解が促進されたことで、自動運転への怖さ・不安感を軽減したと考えられた。一方、発話タイミングや速さに関しては、回答者の75%が適切でないとして判断し平均評価3.1となった。特に発車と停止のタイミングが遅れるとの回答が多く、発話が連続する際の遅延が顕著との報告もあった。

車載ロボットによる案内システムは、自動運転OSから送られてくる情報を順番に「発話と動作」に変換して乗客に提示する。音声による情報提示は提示完了まで一定の時間(発話時間分)が必要となるため、OSのログ出力が連続した場合に、逐次処理による遅延が生じ、これが評価低下に繋がったと言える。また、現時点では、交差点停止時からの発進は、安全確認をしたドライバの判断により手動(発車ボタン押下)で行われている。この点も車両挙動に対し発話が遅れる原因の一つと考えられた。

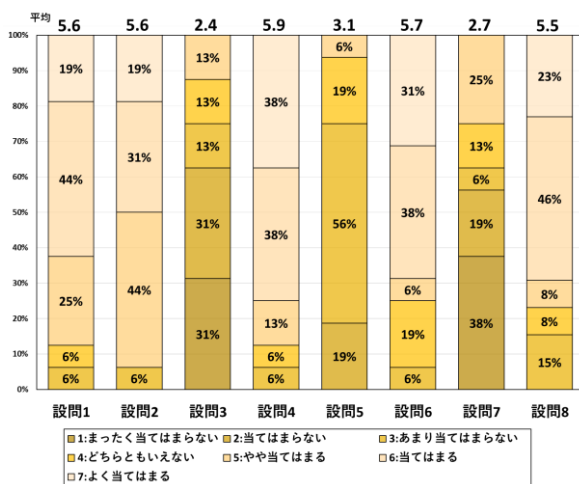


図4. 効果検証Iにおける主観評価結果

2.3.2 発話のカテゴリズと優先順位設定

前節で述べた通り、効果検証実験Iでは車載ロボットの発話による不安軽減効果が期待できる一方、発話が連続したり、車両の制御が変更されたりする際に、車両挙動よりも車載ロボットの発話内容が遅れることが指摘された。特に車両の発進と停止に対する発話の遅延(例:既に発車している状態で“発車します”の発話)は、乗客からの印象低下が大きく改善が必要であった。従来システムは、自動運転OSから送られてくる信号を、受信した順番に発話に変換して提示しており、これが遅延の主な原因であった。そこで、車載ロボットの発話に優先順位を設定し、より優先度が高い発話は、その前の発話に割り込んで通知することで、発話の遅延軽減を試みた。

そこで本研究では、車載ロボットの発話に3段階(低/中/高)の優先順位を設けた。最も高い優先順位には、乗客の印象にも影響を与えた車両の「発進」と「停止」に関する通知とした。中程度の優先順位には、他の車両挙動やセンシングに関わる発話(例:障害物や一時停止交差点など)とした。また、最も低い優先順位として、車両挙動とは無関係の情報通知を新たに設定した。これは自治体からの住民に対する広報や周辺店舗からのコマースなどを通知する発話カテゴリを想定しており、コミュニティバスとしての地域貢献を期待している。これに加え、発車と停止の発話を「~します」から「~しています」と修正し、遅延の印象低減を試みた。次章では、この発話優先順位による発話制御機構を実装した改良システムにて行った効果検証実験について述べる。

3. 効果検証実験II: 発話優先順位

車載ロボットによる自動運転車乗客の不安感軽減効果を検証するため、高蔵寺NT石尾台地区にて、発話優先順位を持つ改良システムを搭載した自動運転車両による実証実験を行った。

3.1 実験方法

実験は1章にて述べた高蔵寺NT石尾台地区でNPOにより運営されている自動運転車両(ゆっくりカート)に、提案システムを搭載して、石尾台地区にてあらかじめ設定したコースを走行させ評価を行った。図5に実験走行コースを示す。1周約10分程度の走行コース上には、一時停止交差点、無信号交差点、停留所(設定)が含まれ、比較的交通量の多い道路から住宅路までが含まれる。また、コース上の歩行者や駐車車両等などは統制を取っておらず道路状況は変化するため、“障害物検知”などは都度発

生した。図6に実験の様子を示す。なお、本実験では、表2における「一時停止交差点」「停留所」「障害物」の通知、表3における「障害物」の通知に関して、乗客へのアナウンスを行った。横断者検知や通知、交差車両等対向物体の通知などは、検出精度も検討し、通知の是非を含め今後も検討を進める予定である。

実験には、20代から80代までの35名（男性21名、女性14名）が参加した。また、日常的に石尾台地区にて自動運転車両を利用すると回答した参加者は14名であった。参加者には実験開始前に自動運転車両や車載ロボットに関する説明を行い、2名ずつ乗車し、走行コースの走行を1度体験した後、評価アンケートに回答させた。車載ロボットの印象評価アンケートは、設問1：バスの動きは分かりやすかった、設問2：動きの説明は役に立った、設問3：バスの動きは怖かった、設問4：ロボットの発言は理解できた、設問5：ロボットの発言タイミングは適切だった、設問6：ロボットを継続して使いたい、設問7：ロボットの発言は邪魔になった、設問8：ロボットの

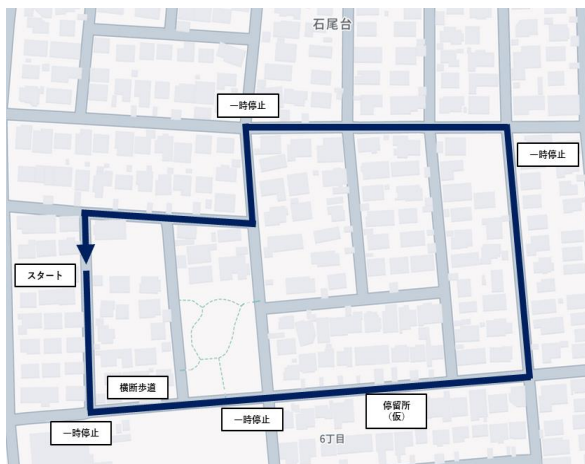


図5. 実験走行コースの概要

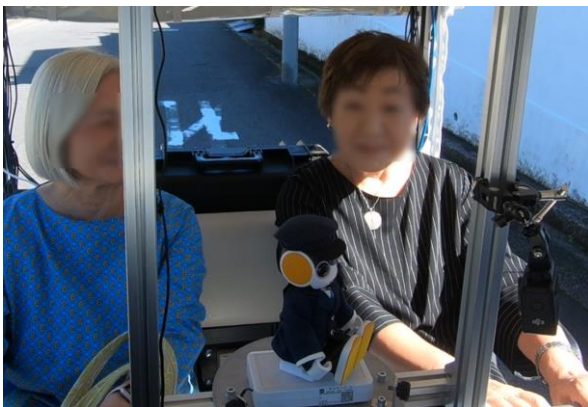


図6. 実験の様子

話す速さは適切だった、設問9：ロボットがいた方が良かった（従来車両に乗ったことがある参加者のみ）の9項目に関する7段階評価（1：全く当てはまらない～7：よく当てはまる）と自由回答による内観報告とした。

3.2 実験結果

図7に設問1から9までの各主観評価項目の平均値と各評価値の比率を示す。設問9は自動運転車両の利用経験がある参加者（住民）14名の回答である。また、図8に各主観評価平均値の住民と非住民の結果の比較を示す。“設問1：車両の動きは分かりやすかった”の評価は平均6.4となり、体験者全員が分かりやすかったと評価した。ロボットの説明で車両挙動が理解できたとの回答であった。“設問2：説明が役に立った”は平均6.4，“設問4の発言が理解できた”は平均6.5となり、同様に全員が良いと評価した。“設問3：バスの動きは怖かったか”の評価は平均2.0と低い評価となり、全体の89%が怖くないと回答した。“設問5：発言タイミングは適切だった”の評価は平均5.9となり、86%が適切との回答であっ

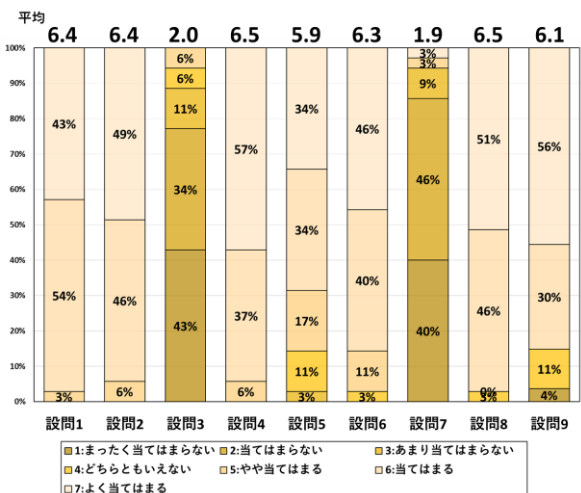


図7. 効果検証IIにおける主観評価結果

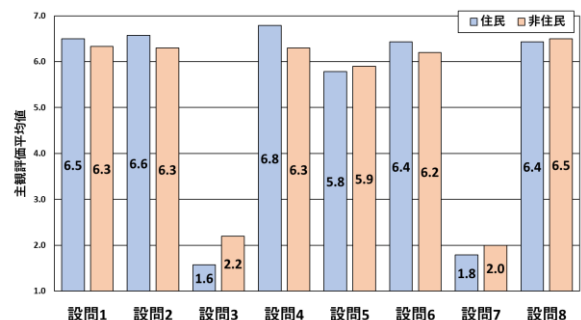


図8. 主観評価の比較：住民と非住民

た。これは前回の実験時の平均評価 3.1 から大きく改善する結果であった。完全に遅延がない訳ではないが、気にならない程度との回答であった。“設問 6: 継続して使いたい”は平均 6.3, “設問 8: 話す速さは適切だった”も平均 6.5 と高い評価が得られ、回答者の殆どが良いとの評価であった。“設問 7: 発言は邪魔になったか”も 1.9 と低い結果であり、車載ロボットの発話を好意的に受け止められていた。また、地域住民のみを対象に行った“設問 9: ロボットが居た方が良い”に対しても平均 6.1 となり、回答者の 85%が良いと回答した。主観評価結果を、回答者が石尾台住民（自動運転車両の利用経験あり）と非住民とに分けて比較すると、住民の評価の方が若干高い評価であったが、自動運転車両に対する慣れやニーズの強さの違いと推測される。

4. 考察

実験の結果、車内ロボットによる自動運転車両の挙動説明は、乗客の自動運転に対する理解を促進し、不安感を減少する効果があることが確認された。特に、実験 I と比較し、発話の遅延に関する評価は 3.1 から 5.9 と大きく改善され、発話優先度による割り込み処理の効果が確認された。また、本実験での全評価項目の評点が実験 I の結果より上回っていることから、遅延の改善が車掌ロボットの印象全体を引き上げた可能性も示唆された。日常的に自動運転カートを利用している住民による評価の方が非住民よりも高いことから、自動運転やロボットの物珍しさよりも、実際の有用性を評価したとも考えられる。「遅い」と評価された発話タイミングは、本実験にて大きく改善された。しかし、自動運転 OS とオペレータ操作の二つが発話対象となる状態は変わらず、今後も発話制御上の課題となると考えられる。

前実験では参加者から言及されなかった「ロボットの向き」について、本実験後に、前方ではなく乗客の方を見ていて欲しいと回答する参加者が複数見られた。ロボットは車両挙動を分かり易くするため、車両の向きと一致させ前方を向かせたが、発話は乗客の方に向けて行って欲しいとのニーズがあることも分かった。これに加え、ロボットを乗客側に向けてすることで、(ロボットの仕様上スピーカが前方に設置されているため)乗客が感じる発話音量をより大きくすることができ、高齢者の音量を上げて欲しいとのニーズにも対応できると考えられる。

今回試験的に導入した、自動運転車両の挙動に無関係の発話（自治体からの連絡など）に関しては、参加者から好意的なコメントが多く得られた。地域の催しや商業施設の情報、町内ニュース、天気予報

などのニーズがあり、自動運転バスを継続的に運営するための活用が期待される。

5. おわりに

本研究では、車内に設置された小型ロボットの動作と音声を用いて自動運転車両の挙動を乗客に伝達することで、乗客の不安を軽減する車内ロボット案内システムを提案し、提案システムを搭載した自動運転カートによる公道実証実験を行った。実験の結果、車内ロボットによるアナウンスが乗客の自動運転車両の挙動に対する不安感を軽減し、また、発話優先順位に基づく割り込み処理により、ロボットの発話遅延を解消する可能性を示した。今後は、他地域での実験や非自動運転車両での活用などが考えられる。

謝辞

本研究の一部は、知の拠点あいち重点研究プロジェクト IV 期プロジェクト DX「自動運転サービスを実現する安全性確保技術の開発と実証～市街地での信頼ある自動運転サービス実現に向けて～」の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 国土交通省：第 2 回都市交通における自動運転技術の活用方策に関する検討会，2022。
- [2] 経済産業省，国土交通省：自動運転レベル 4 等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト，<https://www.road-to-the-l4.go.jp/>
- [3] 知の拠点あいち重点研究プロジェクト IV 期プロジェクト DX，自動運転サービスを実現する安全性確保技術の開発と実証～市街地での信頼ある自動運転サービス実現に向けて～，2024。
- [4] S.Nordhoff, J. de Winter, W Payre, B. van Arem and R.Happee: What impressions do users have after a ride in an automated shuttle? An interview study, *Transportation Research Part F* 63, pp252-269, 2019.
- [5] 自動運転バス調査委員会 2019 年 8 月芝公園レポート,2019.
- [6] 金森亮：ニュータウン再生におけるモビリティブランド：高蔵寺ニュータウンでの取り組み，都市計画 = *City planning review* / 日本都市計画学会編，70 (6), pp.68-71, 2021.
- [7] 田中貴紘，金森亮，赤木康弘：自動運転カートにおける車内ロボットを用いたアナウンス効果の検討，第 70 回土木計画学研究発表会・秋大会，2024。