

「戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）・
自動走行システム」

自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の
方向性に関する調査・検討における沖縄県での
バス自動運転における社会適応性に係る調査

平成 29 年 3 月 27 日

沖縄自動運転コンソーシアム

代表企業 先進モビリティ株式会社

まえがき

「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における沖縄県でのバス自動運転における社会適応性に係る調査」に関する受託業務を完了したので報告する。なお、本業務はSBドライブ株式会社と設立した沖縄自動運転コンソーシアムにて実施する。

本報告書は、内閣府の平成 28 年度科学技術イノベーション創造推進委託費による委託業務として、沖縄自動運転コンソーシアムが実施した平成 28 年度「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における沖縄県でのバス自動運転における社会適応性に係る調査」の成果を取りまとめたものです。

従って、本報告書の著作権は、内閣府に帰属しており、本報告書の全部又は一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの利用行為を行うときは、内閣府の承認手続きが必要です。

目次

第1章 実証実験の準備	1
1-1. RTK-GPSの測位精度の調査.....	1
1-1.1. LTE電界強度測定の実施.....	1
1-1.2. RTK-GPSの測位精度調査	3
第2章 自動走行バスシステムの製作・実証実験の実施	13
2-1. 自動走行バス実験車の改装.....	13
2-1.1. 車室外センサの搭載	13
2-1.2. 車室内センサ及び機器の搭載.....	15
2-2. 自動走行バスシステムの製作.....	16
2-2.1. 制御ハードシステムの製作	16
2-2.2. 制御システムのソフトウェア設計とパラメータ調査	22
第3章 自動走行バスの受容性調査.....	45
3-1. 自動走行バスの受容性調査.....	45
3-2. 次年度以降の実証実験場所候補の調査	59
第4章 まとめ	63

はじめに

本事業は、内閣府が関係省庁等と連携して進める「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・自動走行システム」の一環として行っている事業の一つで、路線バスへの自動走行システムの社会実装をめざし、路線バス型の自動走行実験車（以下自動走行バス実験車）を用いて、内閣府が指定する沖縄県内の一般公道での自動走行実証実験を実施するとともに、乗客および運行事業者を想定した車内でのサービス実装を行い、沖縄における自動走行バスの社会適応性等の調査を行ったので報告する。

第1章 実証実験の準備

あざまサンサンビーチ地区の一般道路にて自動走行実証実験を実施するための準備をおこなう。

1-1. RTK-GPS の測位精度の調査

1-1.1. LTE 電界強度測定の実施

3月の沖縄での実証実験では、計画当初より車線維持制御にRTK-GPSを利用する計画であった。制御に使用するGPSであるTrimble社製「BX935-INS」はRTK-GPSの状態、 $3\sigma=2.4$ [cm]の精度が保証されている。この精度において、車線維持制御が安定することが茨城県つくば市の産総研内のテストコースにおいて確認されている。「BX935-INS」は補正情報をLTEにより取得する方式であるため、事前に沖縄の実証実験の走行ルートについて、LTEの電界強度についての現地調査を実施した。

現地調査の結果、電界強度が走行ルート上の防砂林が存在する区間で低下することが確認された。図1-1.1-1は電界強度計測の結果より確認された走行予定ルート上の電界強度が -90 [dB]以下になる領域を示したものである。この領域には、図1-1.1-2に示す防砂林が内陸側に200～300m設置されていた。LTEの基地局がこの防砂林を境に内陸側に設置されており、防砂林傍の走行ルート上からは基地局のアンテナを目視出来ない環境にあった。



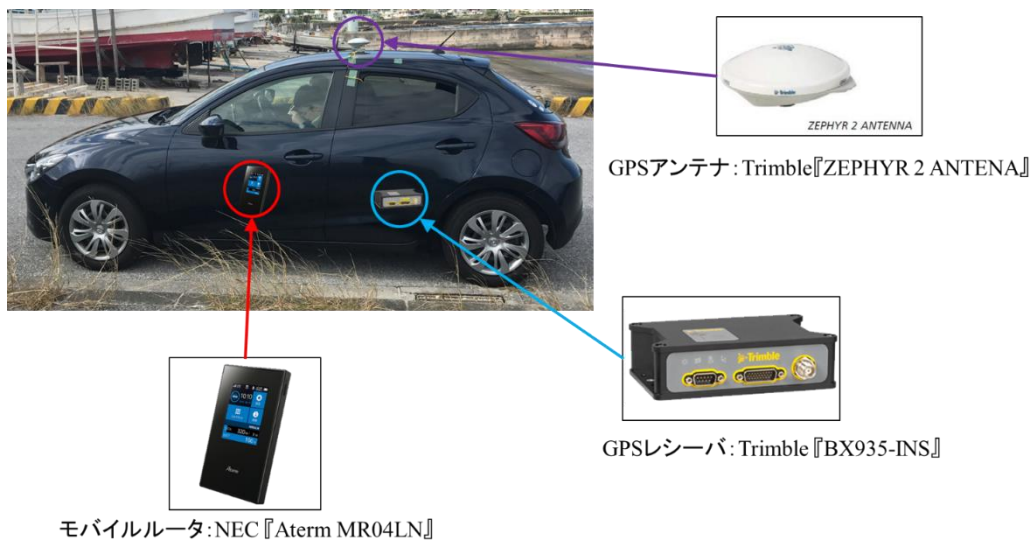
図 1-1.1-1 走行ルート上の電界強度低下領域



図 1-1.1-2 走行ルート内陸側の防砂林

1-1.2. RTK-GPS の測位精度調査

RTK-GPS の補正データを得るための LTE の電界強度が、防砂林がある区間で低下することが前項のように確認された。そこで、GPS を搭載した車両で走行ルートを行き、防砂林がある区間あるいはその他の区間での RTK 測位の有効性の検証実験を実施した。検証実験に使用した GPS システムを搭載した乗用車を図 1-1.2-1 に示す。GPS アンテナおよびレシーバには Trimble 社製『ZEPHYR 2 ANTENA』および『BX935-INS』、RTK-GPS の補正データを受信するためのモバイルルータには従来使用してきた NEC 社製「Aterm MR04LN」を使用した。GPS システムの接続方法を図 1-1.2-2 に示す。



8

図 1-1.2-1 実験車両と GPS の取り付け状況

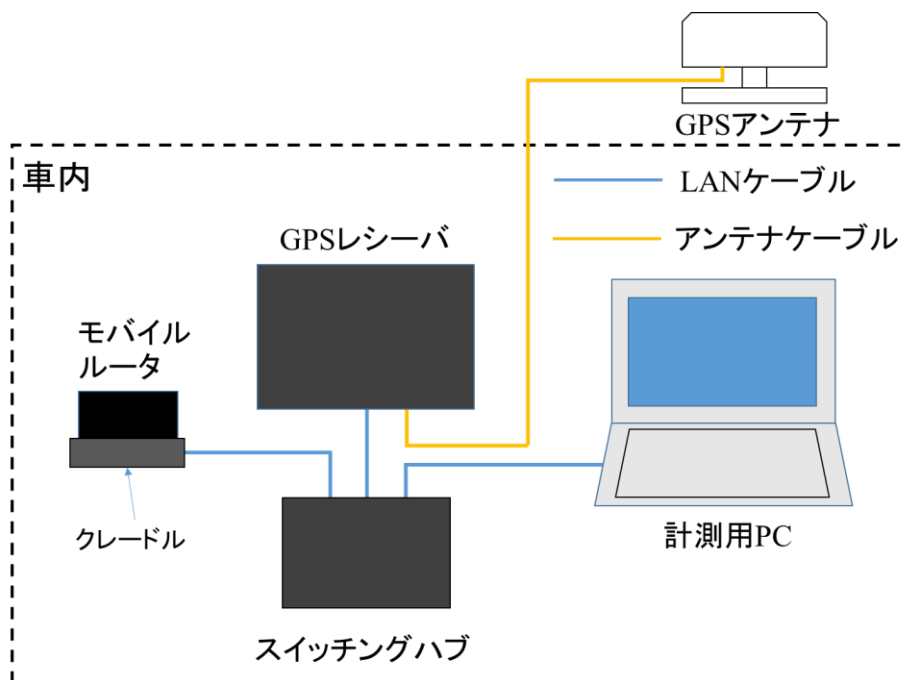


図 1-1.2-2 GPS システムの接続方法

上記の準備の下、走行ルートを往路と復路に分けて、それぞれ 3 回走行し測位モードを確認した。図 1-1.2-3、図 1-1.2-4、図 1-1.2-5、図 1-1.2-6 および図 1-1.2-7 はそれぞれ 1 回目の往路、1 回目の復路、2 回目の往路、2 回目の復路、3 回目の往路および 3 回目の復路の測位モードを示したものである。ここで、往路は北に向かうルート、復路は南に向かうルートとしている。1 回目の往路のみ測位モードが RTKGPS から DGPS あるいは単独測位に劣化している区間が確認できる。走行ルート中央付近の劣化は防砂林による電波の遮蔽の影響によるものと考えられる。それ以前の 2 箇所での測位モード劣化の原因は建物によって電波が遮られたことによるものと考えられる。一方で、測位モードが劣化する区間は最長でも 20[m]程度であった。この後に産総研テストコースにて『BX935-INS』に内蔵されている IMU によるデットレコニングでの車線維持性能を検証したところ、少なくとも 30 秒は車線を維持して走行できることが確認された。20[m]なら、10[km/h]でも 8 秒程度で通過できるので、車線維持制御上の問題にはならない結果であると考えられる。

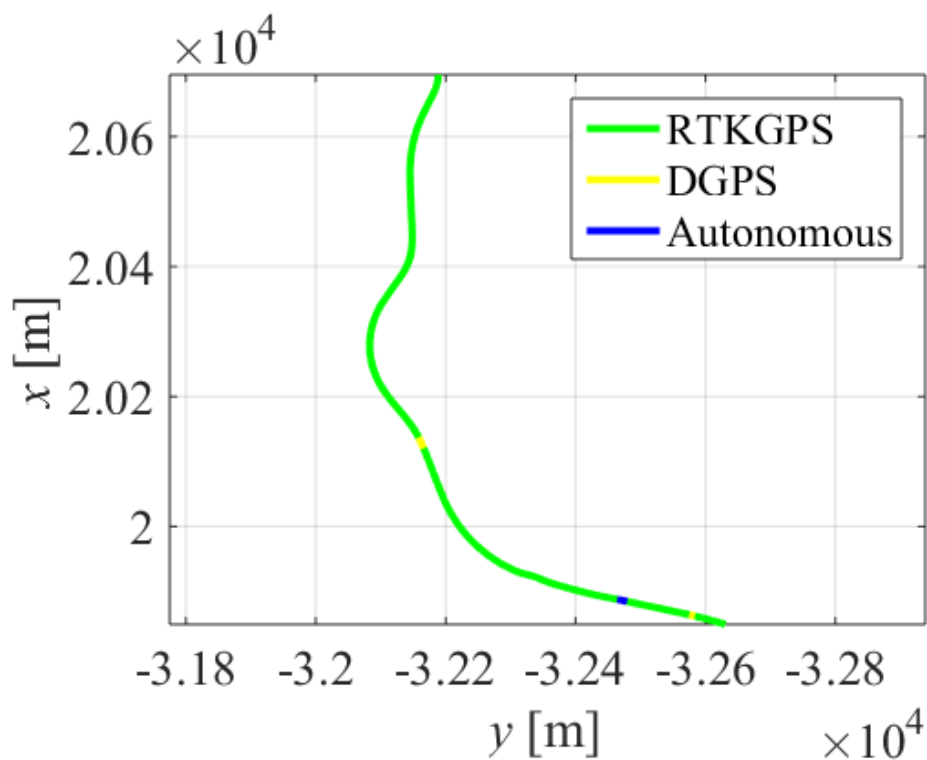


図 1-1.2-3 1 回目往路の GPS の測位モード

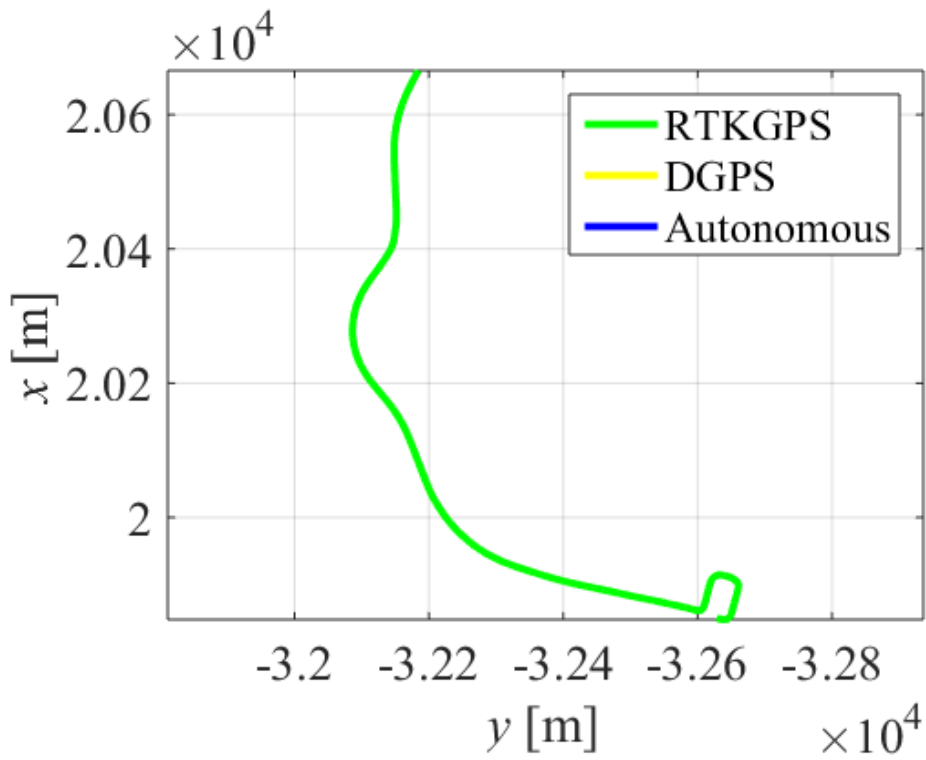


図 1-1.2-4 1 回目復路の GPS の測位モード

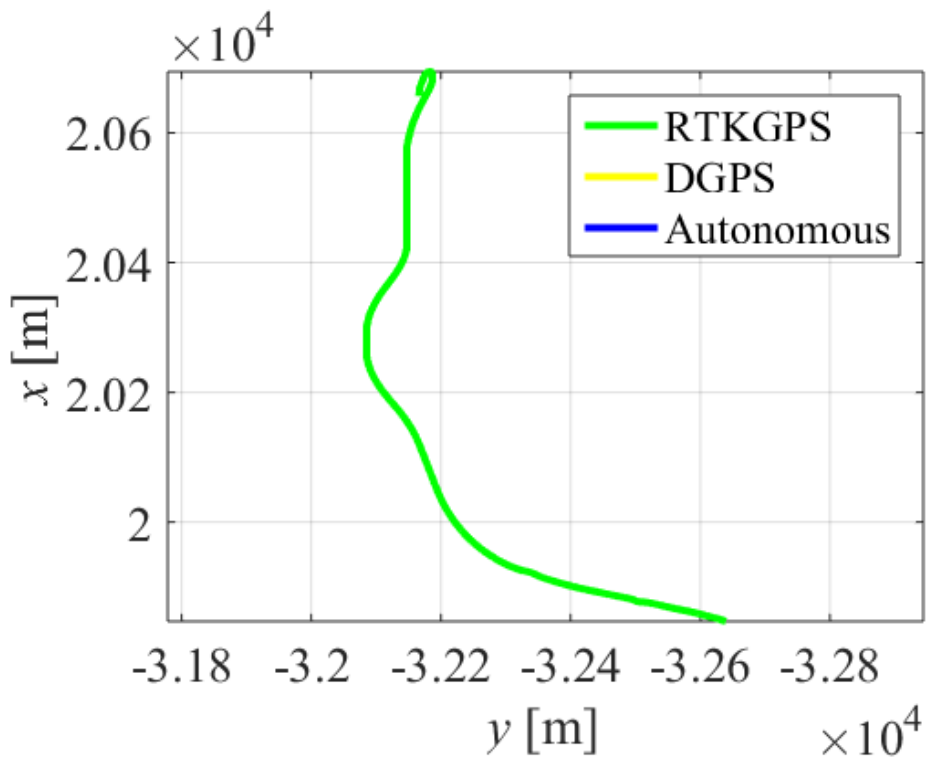


図 1-1.2-5 2 回目往路の GPS の測位モード

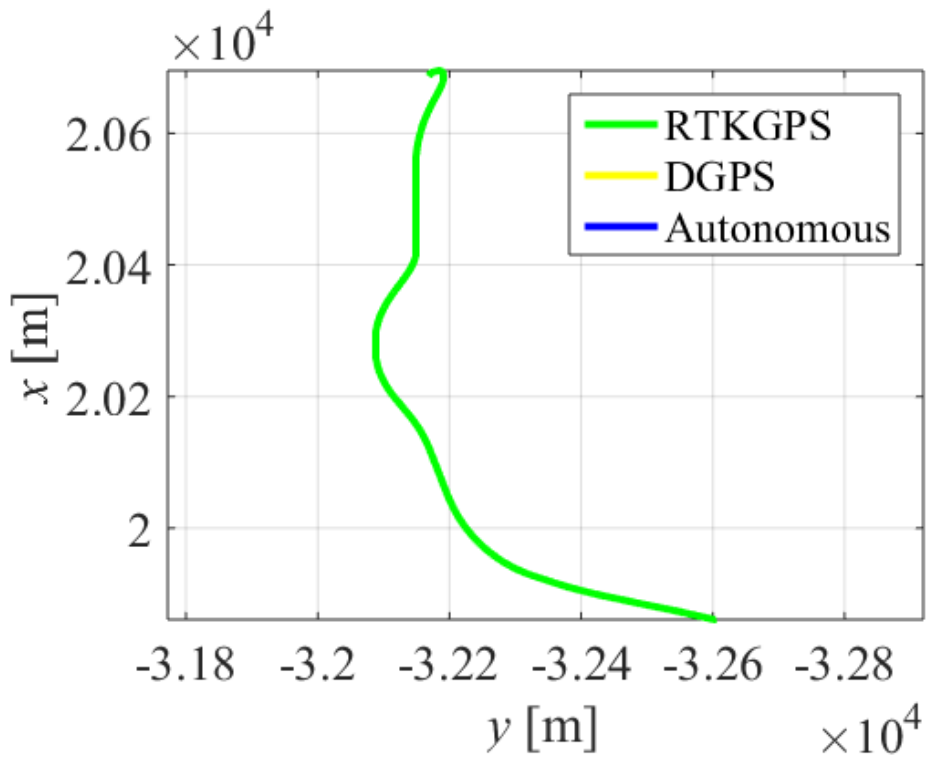


図 1-1.2-6 2回目復路の GPS の測位モード

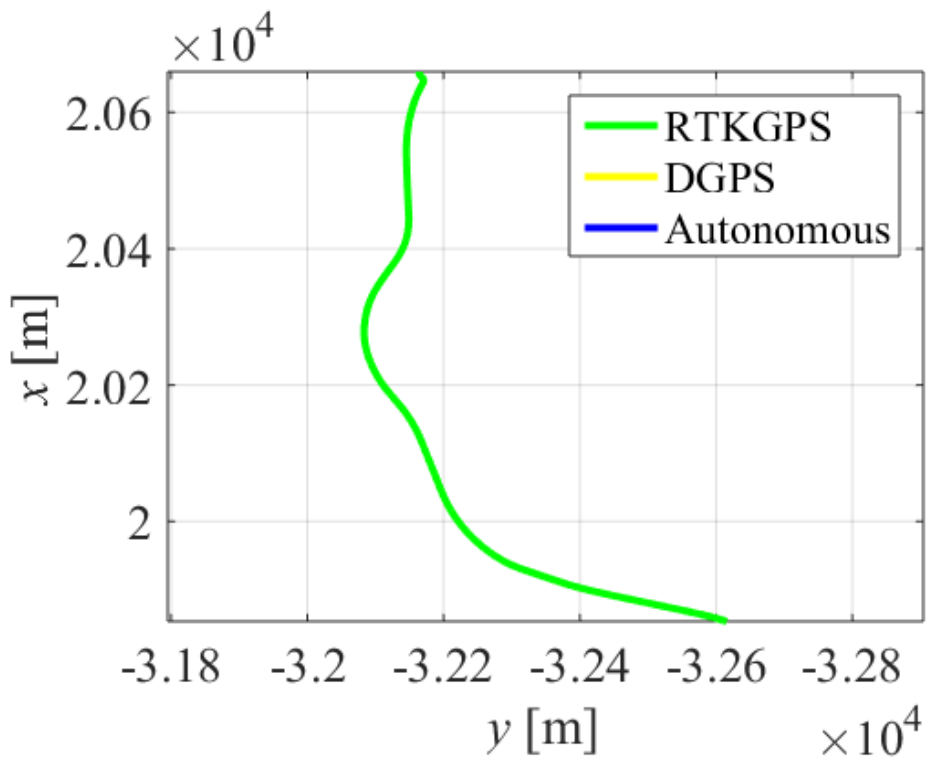


図 1-1.2-7 3回目往路の GPS の測位モード

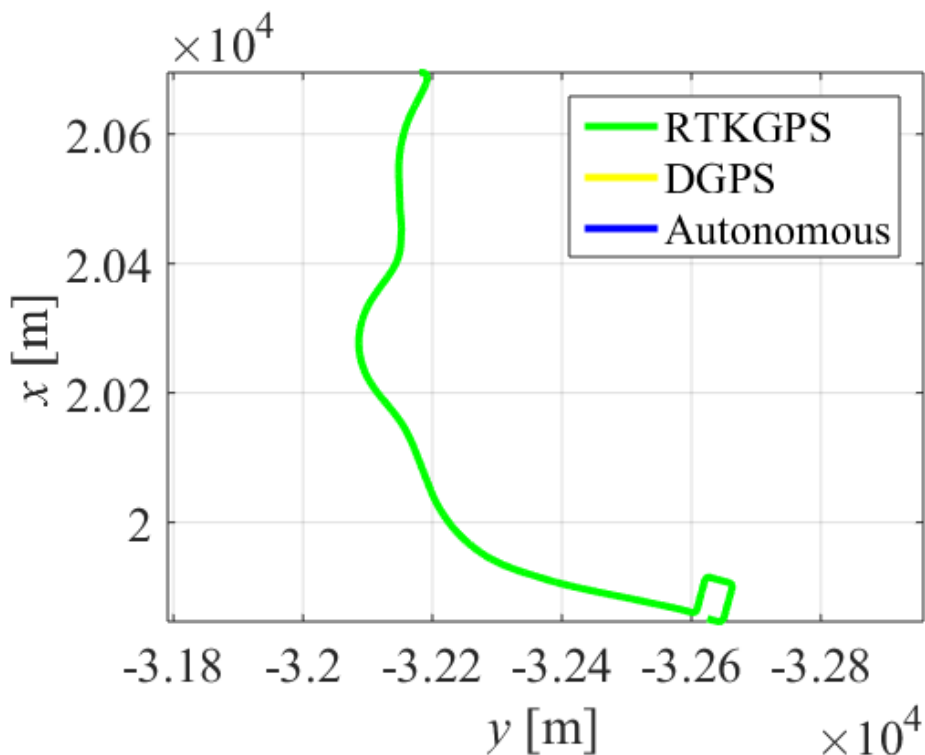


図 1-1. 2-8 3 回目復路の GPS の測位モード

しかしながら、より制御の信頼性を高めるために、電波の受信感度の改善と 1-1. 1-1 項の防砂林による影響を回避の理由から、補正データを受信するアンテナを車両の屋根に取り付ける対策をした。上記対策のために、モバイルルータには図 1-1. 2-9 に示す iR700B を使用した。iR700B は車載用に設計されておりかつ外部アンテナを使用可能なモバイルルータである。

図 1-1. 2-10~1-1. 2-19 は図 1-1. 2-1 および図 1-1. 2-2 のシステムにおいてモバイルルータのみを iR700B に変更して、走行ルートを 10 回往復したときの測位モードの結果を示したものである。10 回の耐久試験において、6 回目のみ図 1-1. 2-15 の赤い丸で示す往路の一部で瞬間的に RTK 補正が切れている。しかしながら、外部アンテナの使用により、従来よりもロバストな RTK-GPS の測位環境を実現することが出来ることが確認された。



図 1-1. 2-9 iR700B

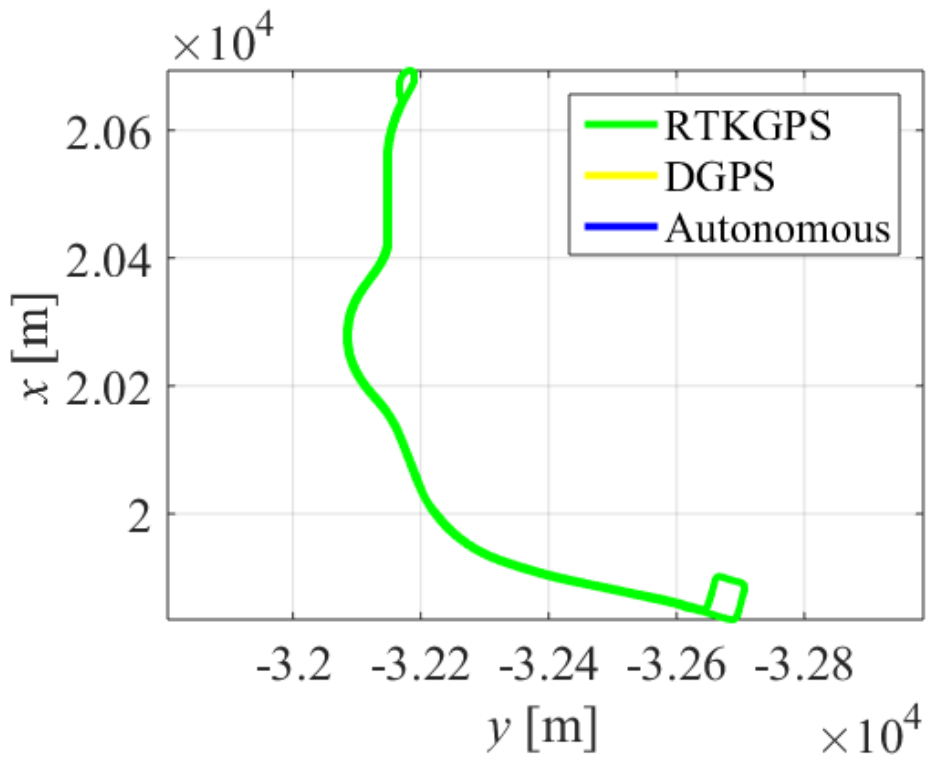


図 1-1. 2-10 1 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

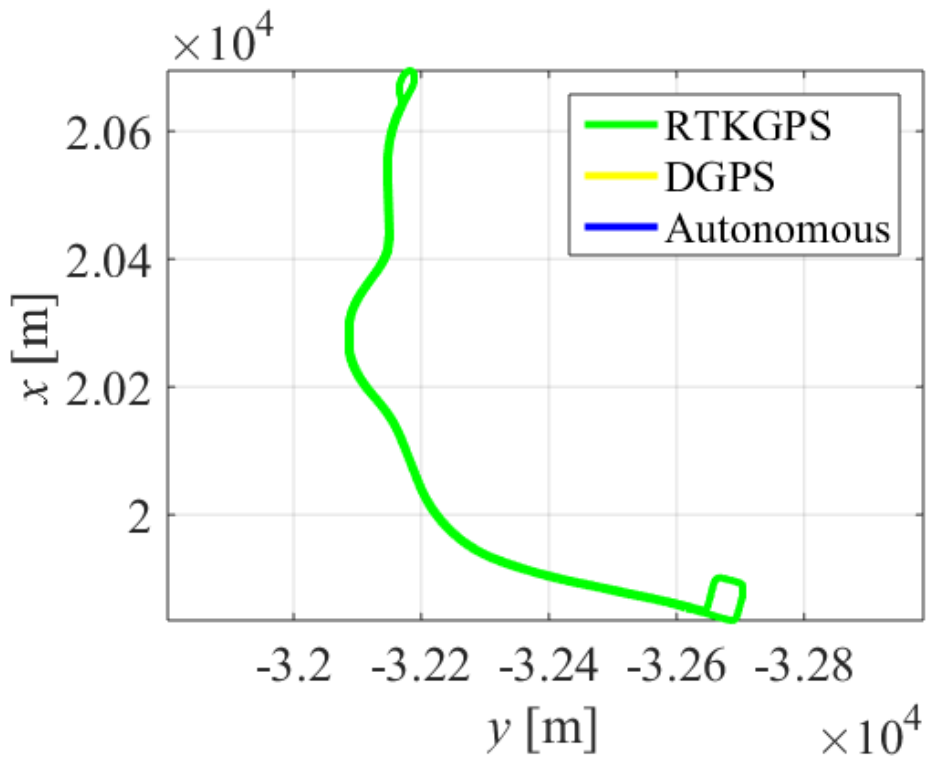


図 1-1. 2-11 2 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

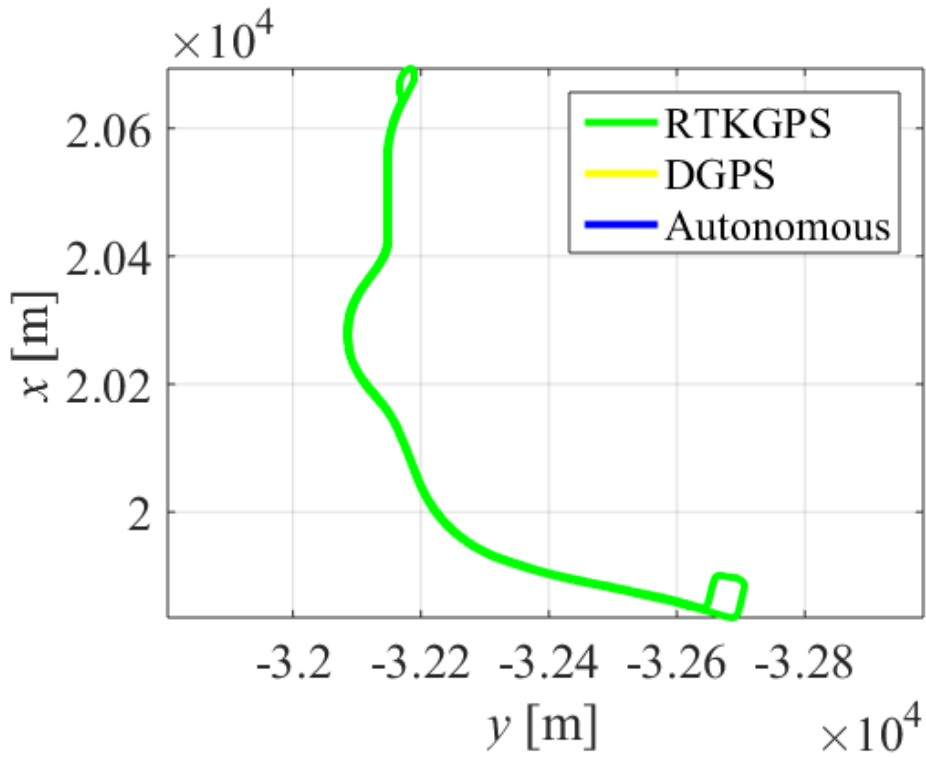


図 1-1. 2-12 3 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

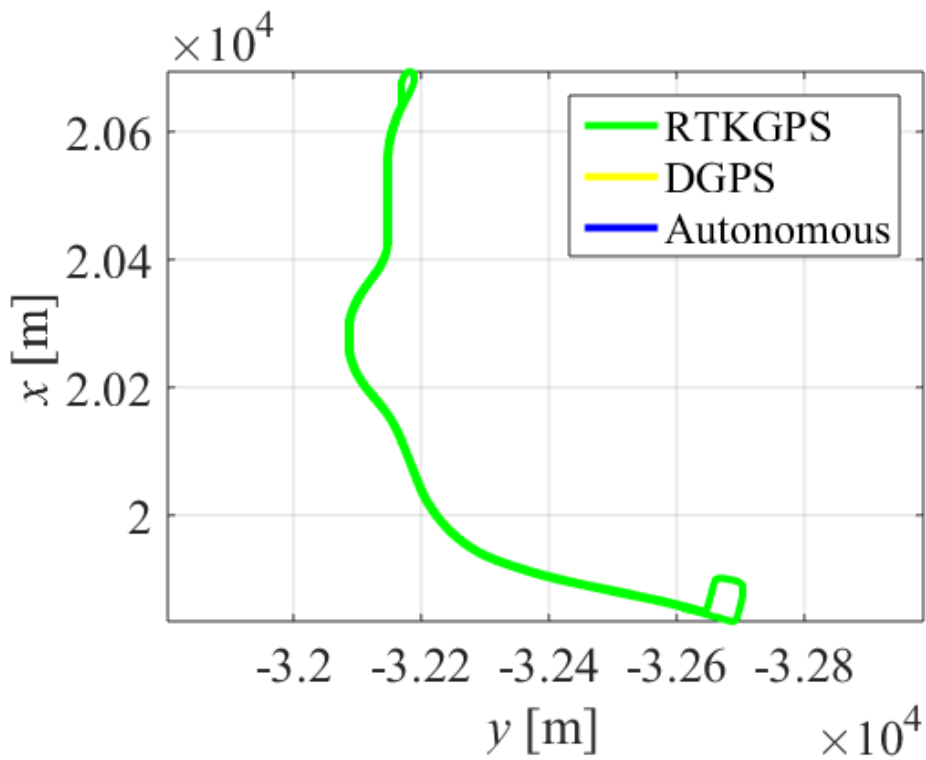


図 1-1. 2-13 4 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

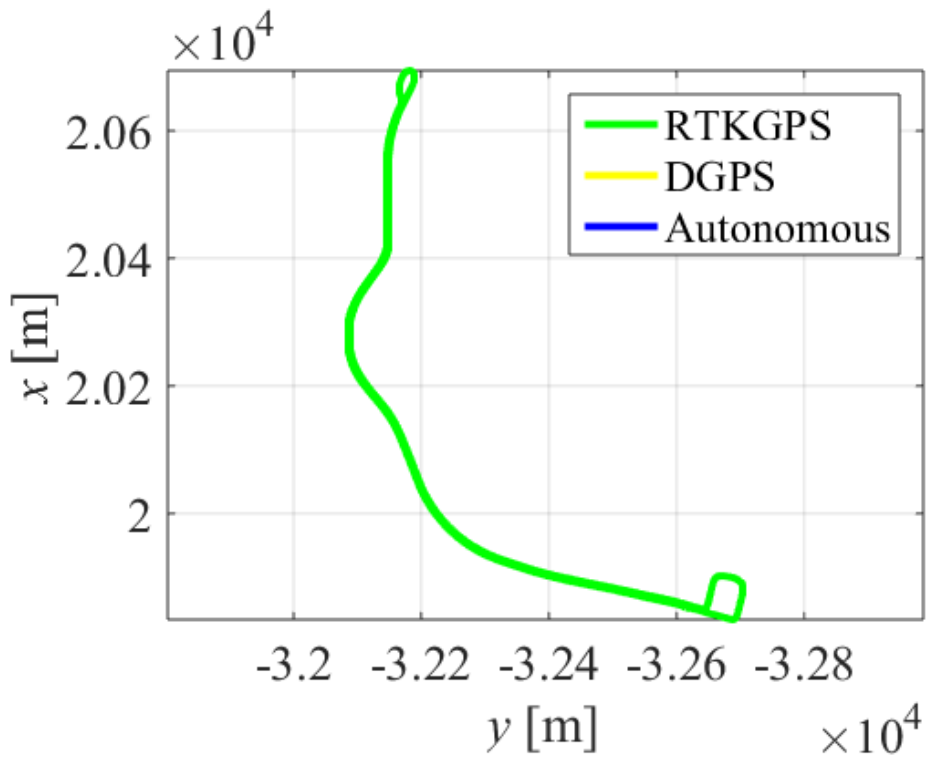


図 1-1. 2-14 5 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

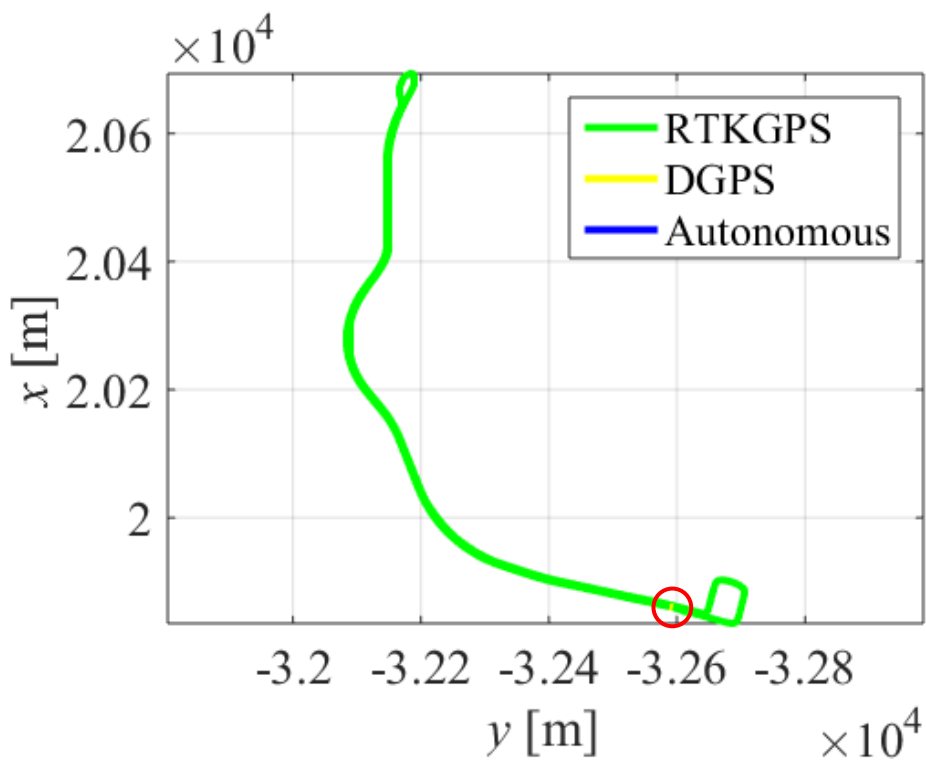


図 1-1. 2-15 6 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

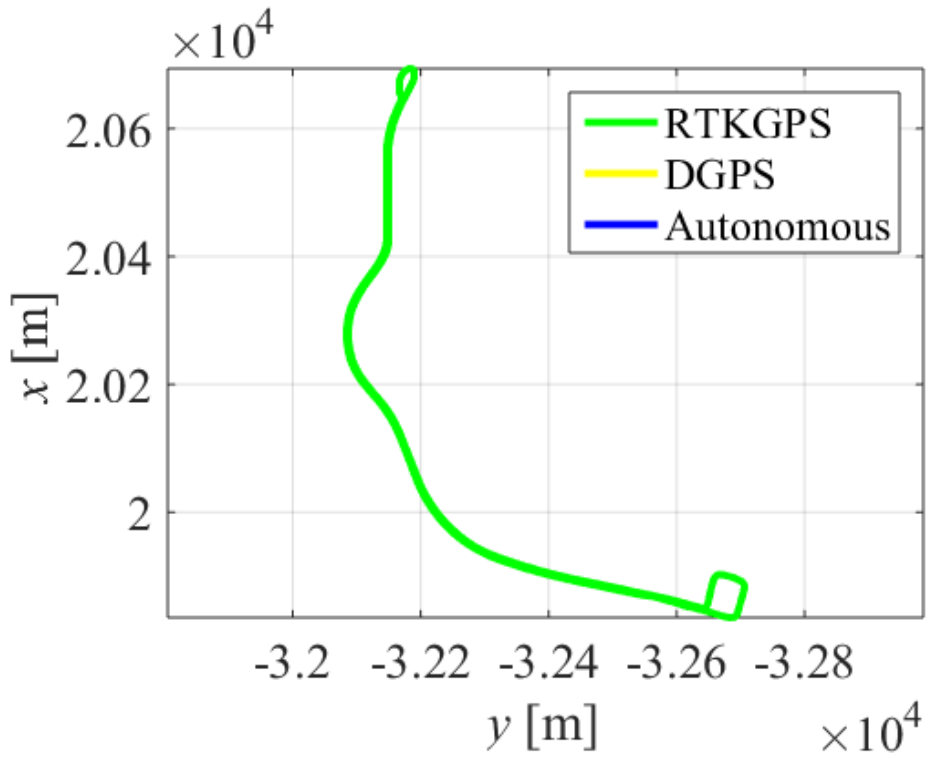


図 1-1. 2-16 7 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

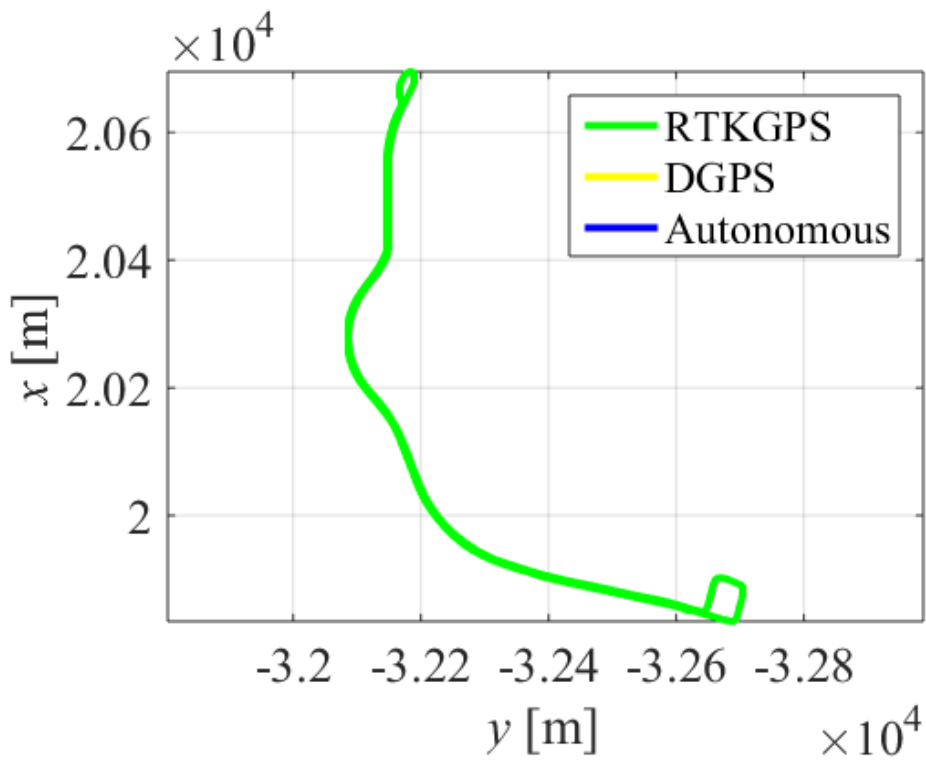


図 1-1. 2-17 8 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

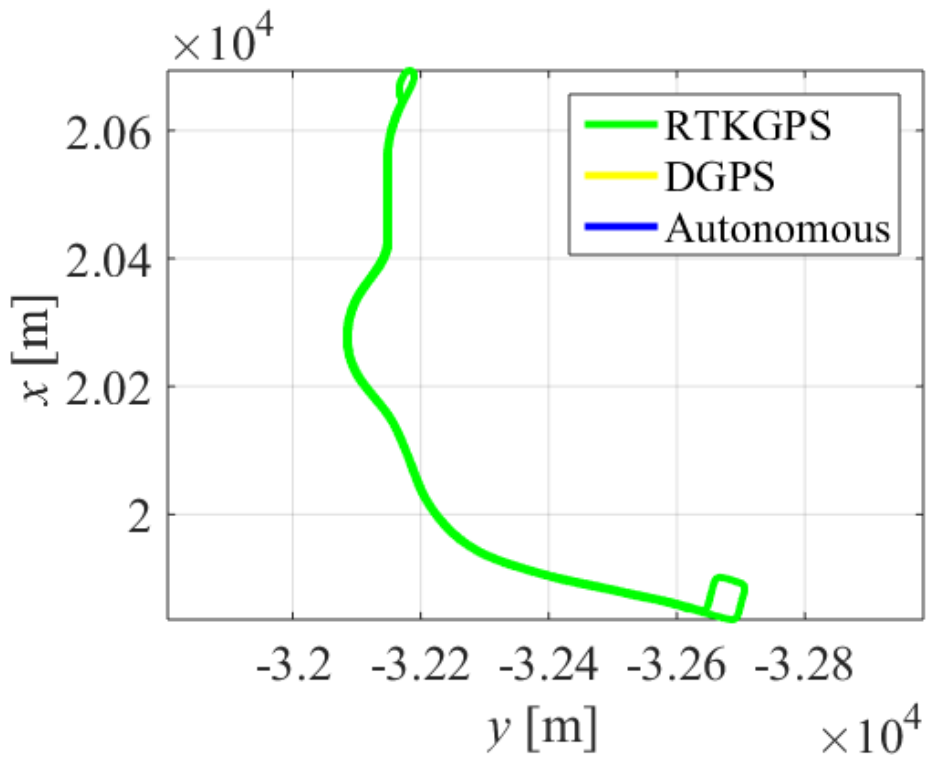


図 1-1.2-18 9 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

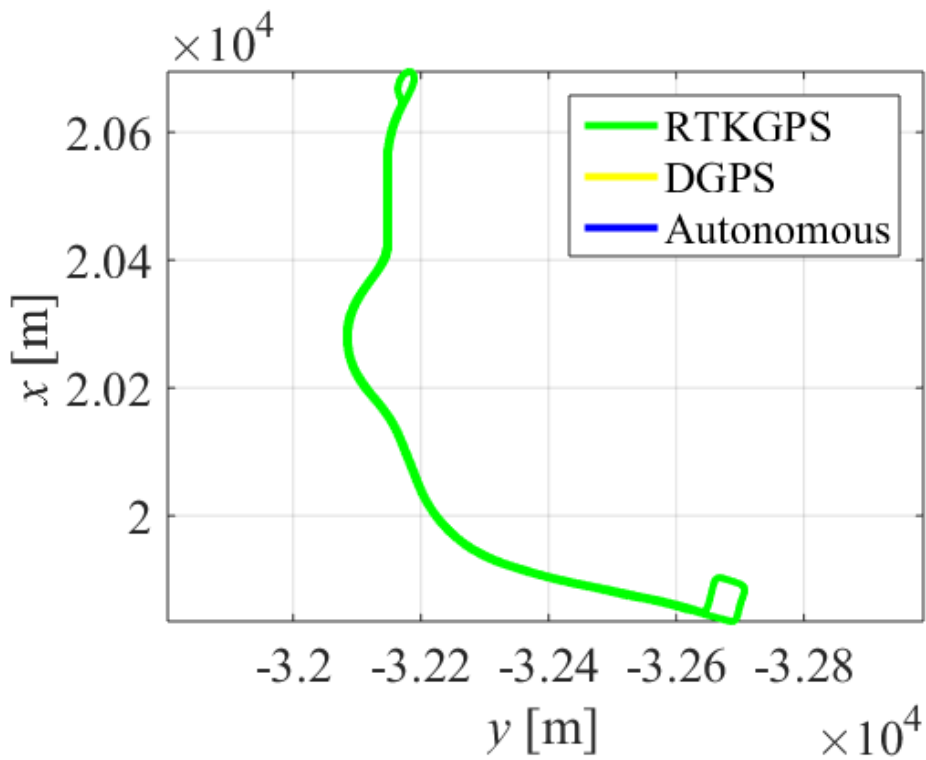


図 1-1.2-19 10 往復目の GPS の測位モード (外部アンテナ使用)

第2章 自動走行バスシステムの製作・実証実験の実施

2-1. 自動走行バス実験車の改装

先進モビリティ株式会社が保有する小型バス「日野リエッセ、路線型」(型式:PBRX6JFAA;原動機:ディーゼルエンジン)をベース車とし、自動運転バスに改造を実施した。実験ベース車からの主な改装項目は、車室内外のセンサの搭載、自動操舵コラムの交換、自動制御 ECU (AUTOBOX) 及び各制御機器の搭載がある。



図 2-1-1 実験車両外観図

出典:日野自動車株式会社 HP

https://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve_70rx.pdf

2-1.1. 車室外センサの搭載

自動運転システムに用いる車室外のセンサは、前方遠距離 LiDAR、前方近距離 LiDAR、ミリ波レーダ、RTK-GPS アンテナ、RTK-GPS 用無線モジュール、側後方監視 LiDAR (本年度の使用未実施) を有する。図 2-1.1-1 に取り付け様子を示す。

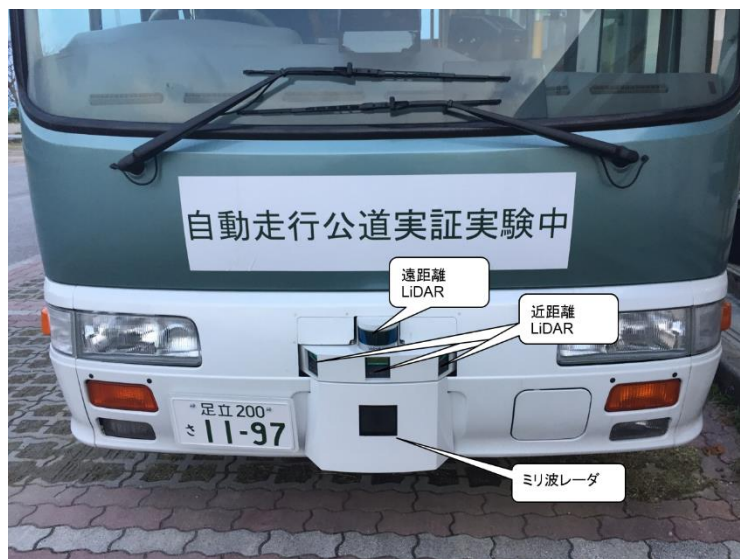


図 2-1.1-1 センサの取り付け①

車両前方のフロントグリル部に、センサの取り付け位置及び角度を決めたうえで、改造を行った。上から、遠距離LiDAR、近距離LiDARとミリ波レーダを搭載している。近距離LiDARの角度が60度であるため、水平に三個を並べることで、前方の前エリアに監視できる。

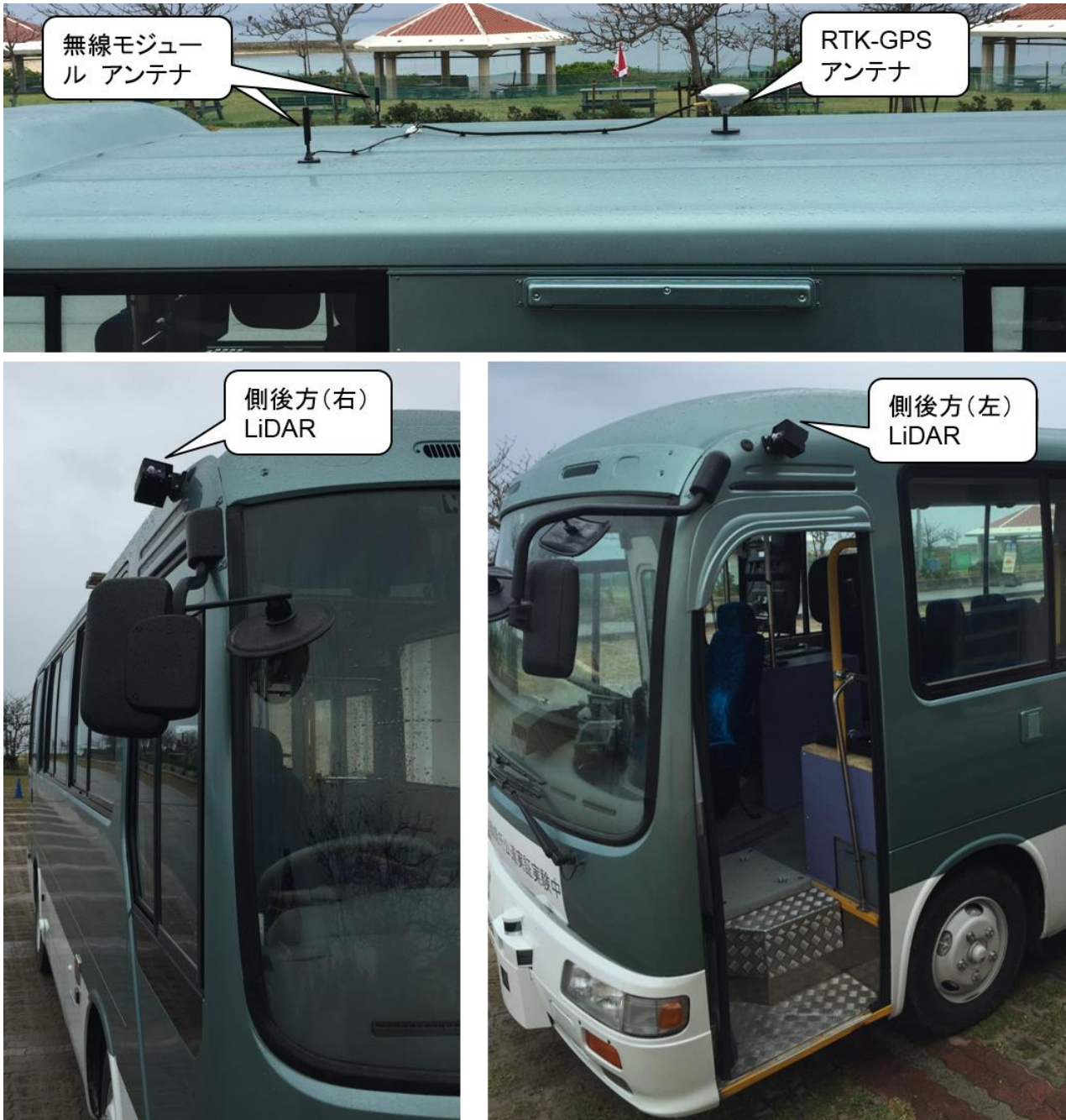


図 2-1. 1-2 センサの取り付け②

図 2-1. 1-2 に RTK-GPS アンテナ、RTK-GPS 用の無線モジュール及び側後方 LiDAR の取り付けを示す。車両の自己位置測定用の RTK-GPS アンテナ及び RTK-GPS 用の無線モジュールを車両のルーフ上に設置した。また、側後方の障害物を監視するために、車両前方の側面（両サイド）に LiDAR を取り付けした。これについては、今年度の使用は実施しない。次年度以降に制御に使用の予定である。

2-1.2 車室内センサ及び機器の搭載

自動運転システムの重要な構成であるステアリングを自動操舵コラムに変換した。車両のオリジナルステアリングを取り外して、自動操舵機能付きのコラムを交換し、自動運転 ECU (AUTOBOX) と自動操舵 ECU との通信により、自動操舵が可能となる。



図 2-1.2-1 自動操舵コラム

また、車室内のダッシュボードの上に、白線認識用カメラ及びディープラーニングによる障害物用カメラを遮光ケースに収納し、設置した。図 2-1.2-2 に取り付けを示す。

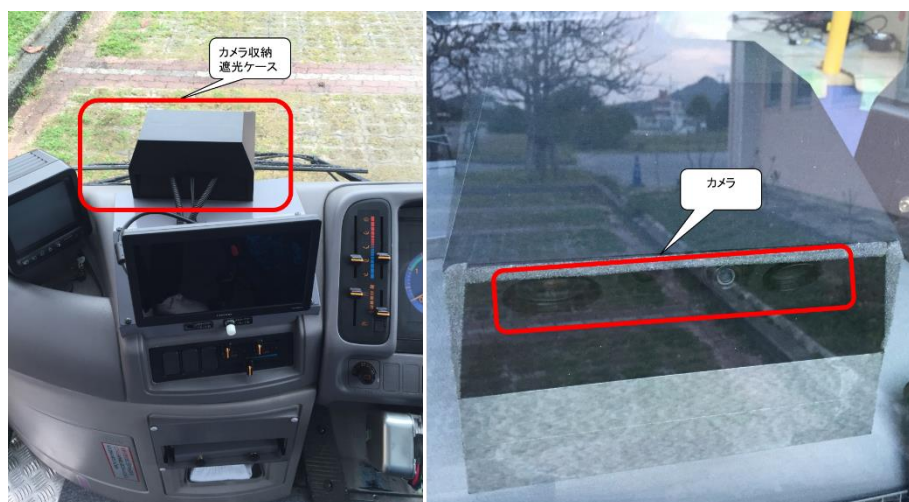


図 2-1.2-2 カメラの取り付け

2-2. 自動走行バスシステムの製作

2-2.1. 制御ハードシステムの製作

本事業で、自動運転バスに使用する制御ハードシステムは、制御 ECU (dSPACE 社の AUTOBOX)、を用いた制御部、車両情報とセンサ情報からなる入力部及び速度制御、自動操舵制御、サービス用車載 PC の通信と HMI からなる出力部により構成される。入力部に自動運転に必要な入力情報を処理し、制御部へする、制御部において、自動走行の操舵量及び速度制御量を算出し、自動制御のアクチュエータへ出力するという仕組みである。詳細は下記のように報告する。

① 制御システムの構成設計

制御システムの構成は図 2-2.1.①-1 に示すように設計した。

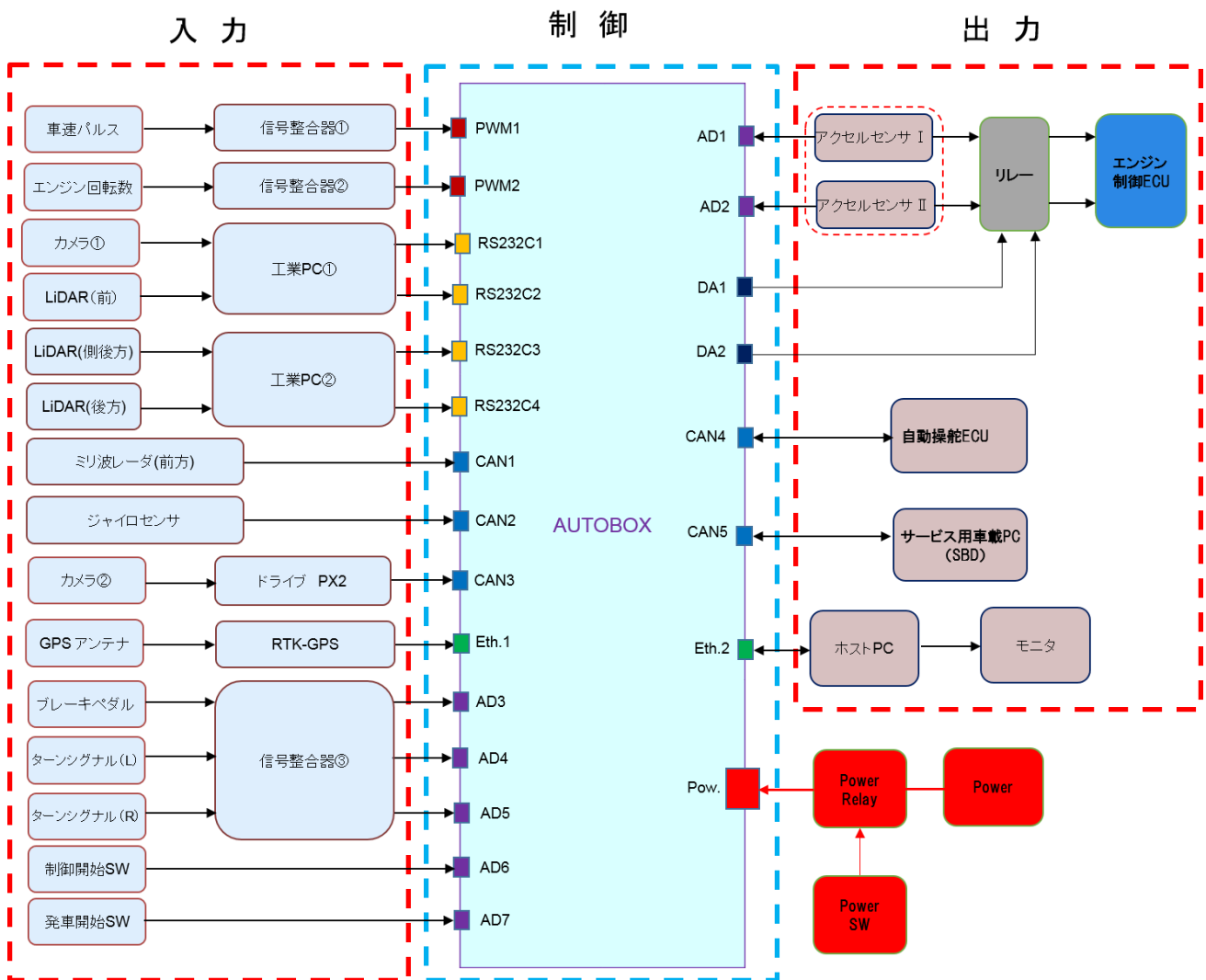


図 2-2.1. ①-1 制御システムの構成設計図

制御システムの制御部は dSPACE 社の AUTOBOX を用いる。AUTOBOX は処理の役割を担うプロセッサボード DS1007 及び必要の各 I/O ボードから構成される。

DS1007 は 2GHz で動作する QorIQ P5020 デュアルコアプロセッサを搭載されている。イーサネット I/O インターフェースを使用すると、TCP/IP または UDP/IP プロトコルを介してモデルへ直接リアルタイムにアクセスしたり、バイパス処理したりすることができる。DS1007 は、PHS 及び PHS++バス経由で複数の I/O ボードに直接接続が可能である、Real-Time interface 経由で、Matlab/Simulink から簡単にプログラミングができる。マルチプロセッサシステムの設定も専用の RTI-MP ブロックにて可能となる。ソルバーオプションやシミュレーション時間などのシミュレーションパラメータを変更するダイアログや C コードを生成するプログラムには、Simulink 環境から直接アクセスができる。従って、今回のシステムは、Matlab/Simulink において制御ソフトモデルを作成、Simulink から AUTOBOX の専用コードを生成し、DS1007 にプログラミングするという仕組みである。それから、DS1007 に Ethernet I/O インターフェースとして、イーサネットボードが 3 ポートを有し、それらにより、TCP/IP または UDP/IP プロトコルの通信が可能になる。本システムにおいては、1 ポートをホスト PC との通信、1 ポートを RGK-GPS の通信ポートとして用いる。

プロセッサボード DS1007 以外に、実験車に使用する I/O ボードは DS5001 (Digital Waveform Capture Board)、DS4302 (CAN Interface Board)、DS4201-S (RS232C 通信インターフェース)、DS2002 (高分解能 A/D ボード) と DS2103 (高速 D/A ボード) を含む。

DS5001 は、多くの HIL (Hardware-in-the-loop) シミュレーションとラピッドコントロールプロトタイプングで活用されている。ボードは 25ns の分解能でデジタル信号を取得できる 16 の入力チャンネルを備えている。各信号の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジとして取得するため、車速パルスとエンジン回転数等の PWM 信号の周波数、位相、デューティ比等のタイムスタンプと極性を取得することで、車速とエンジン回転数の検出ができる。

DS4302 は独立した 4 つの各チャンネルには独立した 3 つのトランシーバが備わっている。快適システムの電子制御などのタスクに必要なリアルタイム要件の厳しい高速トランシーバや耐障害性の高い低速トランシーバが搭載されている。また、車載ラピッドコントロールプロトタイプング分野にも活用され、SAEJ1939 規格にも対応可能となっている。本システムにおいて、ミリ波レーダとの通信、ジャイロセンサとの通信、ディーブレーニング (ドライブ PX2) による障害物検知との通信、自動操舵制御装置との通信及びサービス用車載 PC との通信に用いる。

DS4201-S は AUTOBOX と外部デバイス間のシリアル通信用 I/O ボードである。シリアル通信方式はボードにあるそれぞれのドライバー IC により設定できる。トランシーバの設置種類により、RS232C、RS422 と RS485 通信方式の変更ができる。本システムにおいては、主にカメラによる白線認識と前方 LiDAR の処理装置 (工業 PC①) との通信及び、側後方 LiDAR と後方 LiDAR の処理装置 (工業 PC②) との通信に用いる。

DS2002 と DS2103 はアナログ入力 (A/D) 及びアナログ出力 (D/A) の I/O ボードで、ラピッドコントロールプロトタイプングと HIL シミュレーションのアプリケーションで重要な要素となる。それぞれは独立した 32 チャンネル 32 チャンネルを有する。本システムにおいては、DS2002 に車両情報のブレーキペダル信号、ターンシグナル (L)、ターンシグナル (R)、アクセルペダル信号及び自動運転の制御信号 (制御開始 SW と発車開始 SW) を入力する。DS2103 より、アクセルへの制御信号を出力する。

Table2-2 . 1. ①-1 に本システムに用いる AUTOBOX の構成及び用途を示す。

表 2-2. 1. ①-1 AUTOBOX の構成

ボード名	用途	基本仕様・特長	簡易説明
DS1007	<ul style="list-style-type: none"> ・プロセッサ ・Ethernet I/O 	<ul style="list-style-type: none"> ・動作周波数 2GHz ・Simulink 完全サポート ・PHS バスで高速接続 ・最大 18 割り込み可 	<ul style="list-style-type: none"> ・ホスト PC ・GPS 受信
DS5001	<ul style="list-style-type: none"> ・ I/O デジタル信号 解析	<ul style="list-style-type: none"> ・時間分解能 25ns ・サンプルリングレート最大 40MHz ・パルス幅：25ns～53.68s ・パルスの周期・波数の取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・車速パルス ・エンジン回転数
DS4201S	<ul style="list-style-type: none"> ・ I/O RS23C 通信	<ul style="list-style-type: none"> ・RS232C、RS422、RS485 対応可 ・クロック周波数：最高 24MHz ・パリティビット：偶数・奇数・なし ・チャンネル×4 	<ul style="list-style-type: none"> ・画像、LiDAR (前) 処理装置の入力 ・LiDAR (後と側後方) の処理装置入力
DS4302	<ul style="list-style-type: none"> ・ I/O CAN 通信	<ul style="list-style-type: none"> ・コントロールプロトタイピング ・独立チャンネル×4 ・J1939 規格対応 	<ul style="list-style-type: none"> ・ミリ波レーダ ・ジャイロセンサ ・走行環境認識装置 ・自動操舵 ECU ・サービス用車載 PC
DS2002	<ul style="list-style-type: none"> ・ I/O A/D 通信	<ul style="list-style-type: none"> ・独立型 A/D × 32 ・16 ビット分解能 	<ul style="list-style-type: none"> ・制御指令 (制御開始、発車開始) ・車両情報 (ブレーキペダル信号、ターンシグナル (L)、ターンシグナル (R)、アクセルペダル信号)
DS2103	<ul style="list-style-type: none"> ・ I/O D/A 通信	<ul style="list-style-type: none"> ・D/A × 32 ・14 ビット分解能 	<ul style="list-style-type: none"> ・アクセル制御信号 ・HMI 等

図 2-2. 1. ①-2 に本システムの電源ラインを示す。車両の車載バッテリー (24V) をメイン電源として用いている。ヒューズ及びメインスイッチを設ける。メイン電源は車両のバッテリーボタンと連動している。また、そのメイン電源より、各装置に必要な電圧に応じて、24V/12V コンバータを用いて DC12V の電源を製作し、AUTOBOX、アクセル切り替えリレー、自動操舵 ECU、ミリ波レーダ、LiDAR、サービス用車載 PC 及びジャイロセンサに電力を供給する。また、24V/5V コンバータを用いて 5V 電源を製作し、信号整合器及び HMI モニターに電力を供給する。それから、実験段階では必要な 100V を DC/AC インバータを用いて製作した。実験用ホスト PC、RTK-GPS、センサの処理装置である工業 PC①と工業 PC②、ドライブ PX2 及

び各モニターに電力を供給する。本実験システムには、非常用ボタン（非常 SW）を設けている。非常用ボタンを押すことにより、自動走行制御モードが解除され、通常のドライバーによる手動運転に切り替えられる。

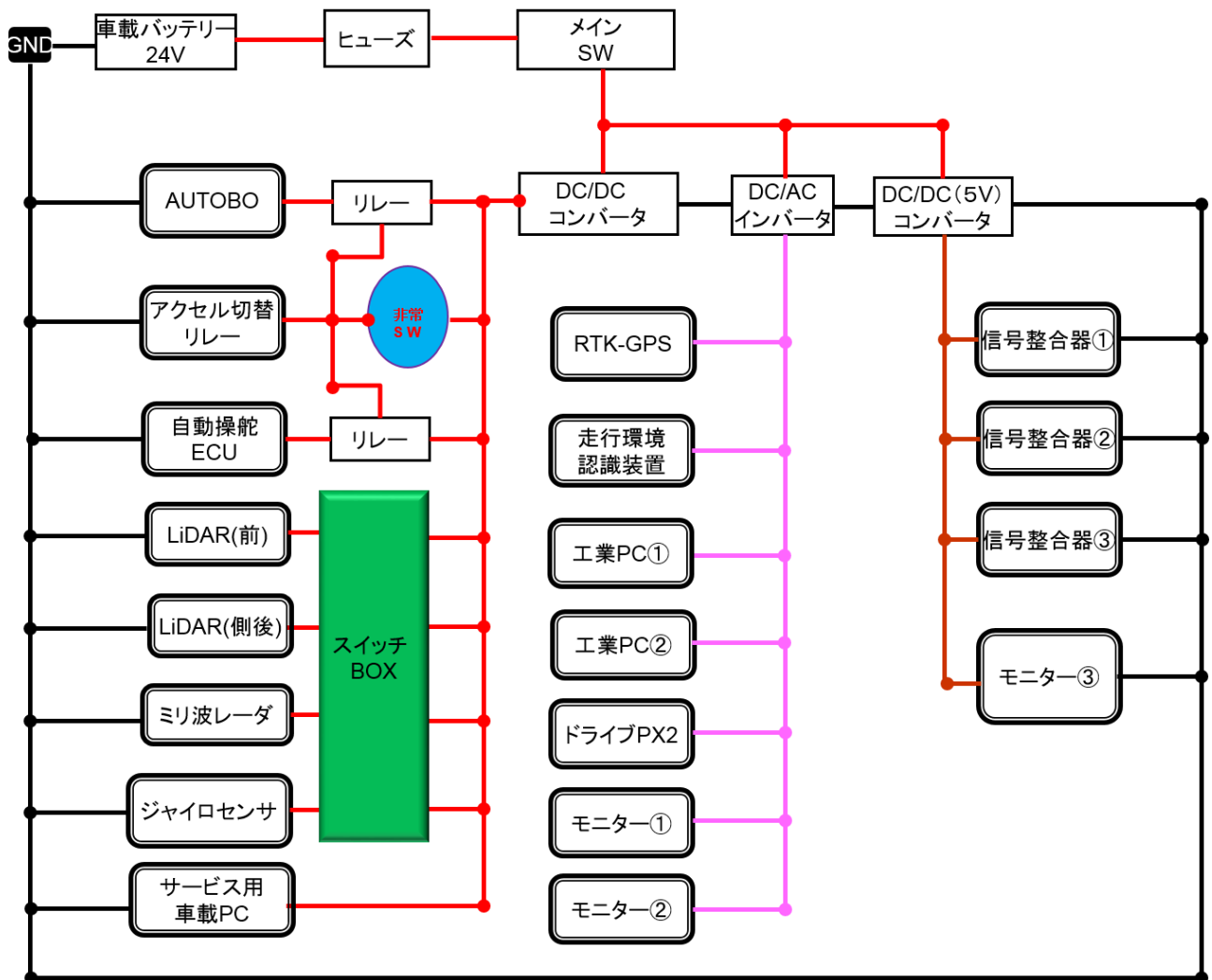


図 2-2. 1. ①-2 制御システムの電源ライン設計図

② モニター機器の設置

本実験システムでは、HMI (Human Machine Interface) と自動運転制御システムの操作については、操作スイッチと HMI モニター機器を設置している。

操作スイッチについては、図 2-2. 1. ①-3 に示すように、非常時用非常停止ボタンを設けている。また、自動運転システムを始動させる「制御開始 SW」と「発車開始 SW」を設けている。これは、実験段階における実験オペレーターの操作を介入する。それ以外に、「制御開始」と「発車開始」指令をサービスセンサーより、サービス用車載 PC へ発し、サービス用車載 PC から制御システム ECU (AUTOBOX) へその指令を送る。SW 信号と指令信号は OR 論理で構成される。

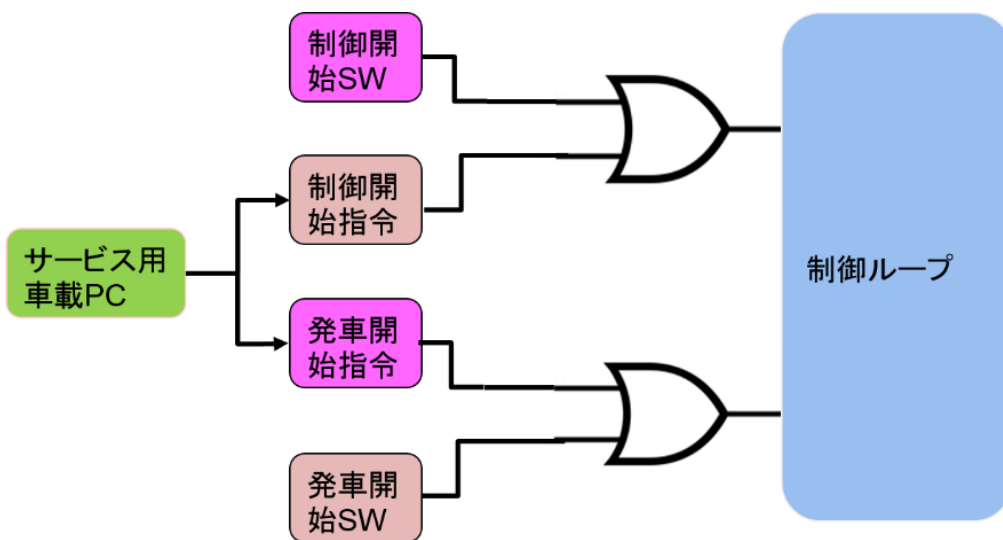


図 2-2. 1. ①-3 制御開始信号及び発車開始信号

また、本実験システムでは、HMI 機能を含め、モニターを 3 台設置している。運転席後方向けに、2 台 22 インチモニターを設置して、1 台は実験処理結果（自動運転状況、LiDAR に障害物検知、ディープラーニング結果、白線検知結果）や自動運転様子(ハンドル・運転席付近)をモニターリングする。もう一台はサービス用の社内案内をモニターリングする。また、運転席に実験ドライバー用 HMI 装置として、10 インチのモニターを設置している。図 2-2. 1. ①-4 に取り付けの様子を示す。



図 2-2. 1. ①-4 モニターの設置

2-2.2. 制御システムのソフトウェア設計とパラメータ調査

① 走行ルート上の目標軌跡テーブルの作成

車線維持制御では、車載の GPS から得られる緯度および経度から目標点を決定し、その目標点の情報からハンドル操作量を決定することで、バスを車線に追従させる。目標点は GPS で予め取得した走行ルート上の緯度および経度より、始点から一定距離ごとに生成する。今回、目標点の間隔を 5cm とした。車線維持制御に関わる目標点の情報は目標点の X および Y 座標、目標方位角、目標点における経路曲率ならびに始点から目標点まで目標軌跡の経路長である。ここでの目標軌跡とは図 2-2.2. ①-1 のように目標点を滑らか結んだ曲線を意味する。

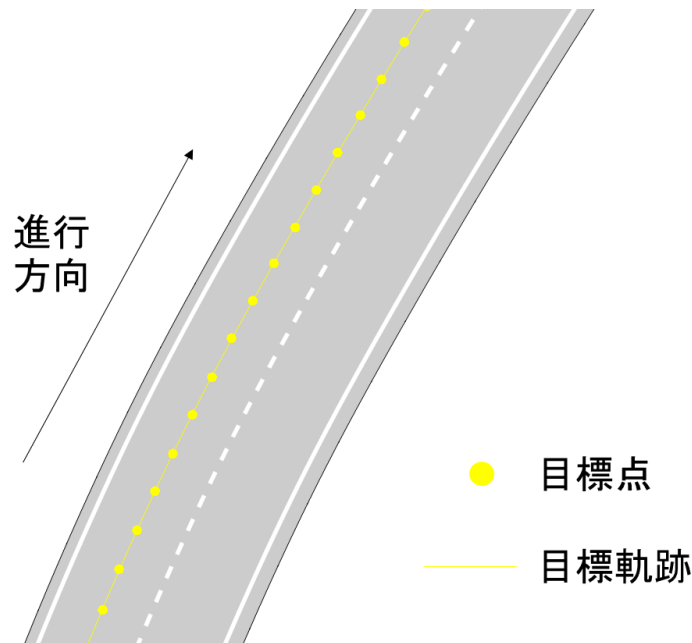


図 2-2.2. ①-1 目標軌跡と目標点

目標点の X および Y 座標は平成十四年国土交通省告示第九号で定められた平面直角座標系を一部変更することで算出される。告示で定める平面直角座標系は日本の 19 の区域に分割し、それぞれの区域で設けた座標系によって位置を定めるものである。ここで、X 軸および Y 軸はそれぞれ南北および東西方向で定義されており、正の向きは原点に対し、X 軸について北向き、Y 軸について東向きとなる。一方、後述する車線維持制御ソフト内では、Y 軸の正の向きを西向きとして扱うため、図 2-2.2. ①-2 のように平面直角座標系の Y 座標の符号を反転させたものを目標点の Y 座標としている。目標方位角は図 2-2.2. ①-2 に示すように目標点を始点とする北向きの半直線と目標点での進行方向の接線との成す角であり、北向きを基準に反時計回りに 0~360 [deg] の範囲で定義されている。目標軌跡の目標点における曲率の正負は図 2-2.2. ①-3 のように左回りのときが正、右回りのときが負となる。

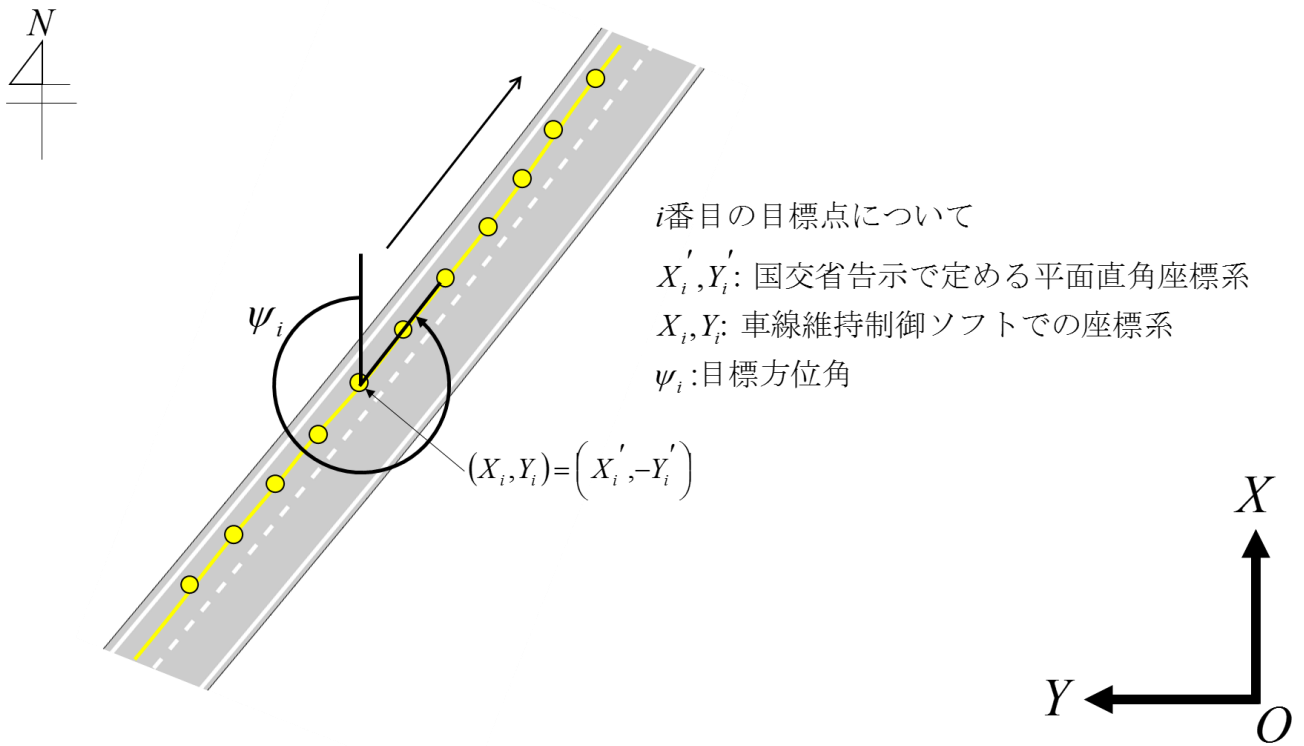


図 2-2. 2. ①-2 目標点の X、Y 座標および目標方位角の定義

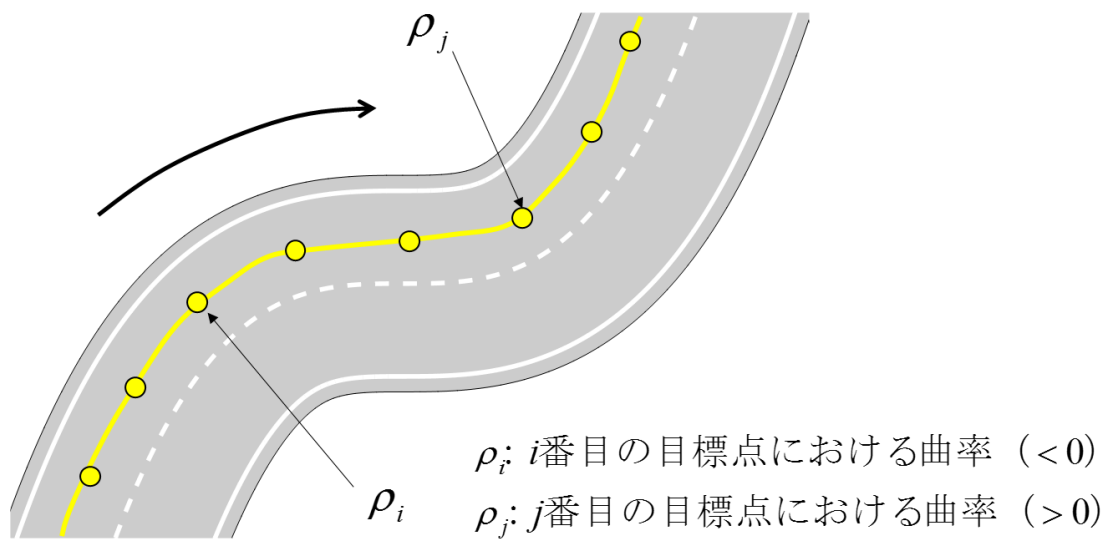


図 2-2. 2. ①-3 曲率の符号の定義

目標軌跡の生成手順を図 2-2. 2. ①-4 に示す。目標軌跡生成にあたり、最初に走行ルートに GPS を載せた車両で走行し、走行ルートの各測位点の緯度および経度を取得する。取得した測位点の緯度および経度を X および Y 座標に変換した後、測位誤差の影響を緩和するために平滑化する。次に測位点間の距離を計算して始点から各測位点までの経路長を近似的に計算する。測位点の X および Y 座標を経路長について関数化し、5cm ごとに目標点の X および Y 座標を生成する。さらに X および Y 座標の一階の微分係数および二階の微分係数より、各目標点の目標方位角および経路曲率を計算する。

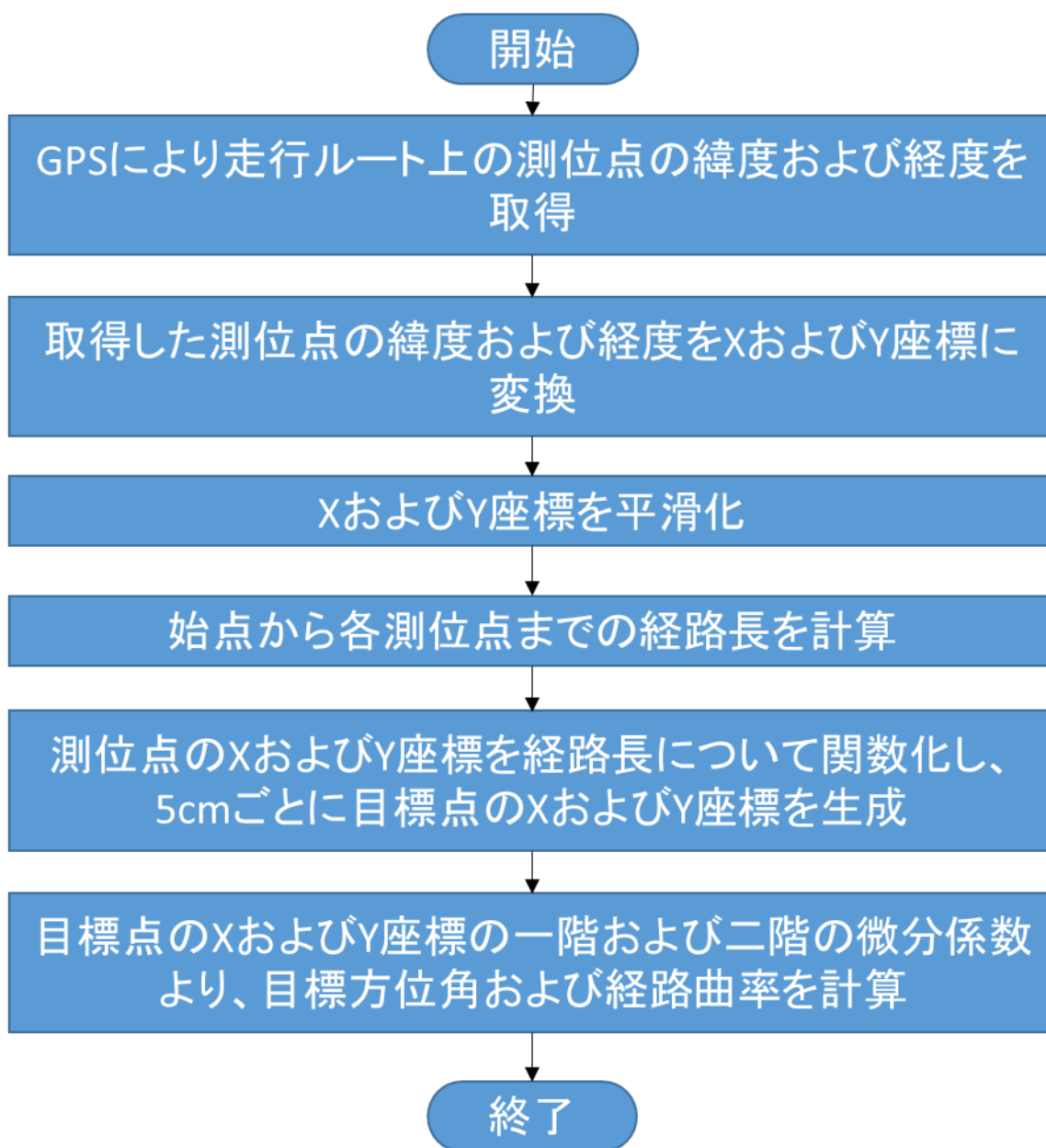


図 2-2. 2. ①-4 目標軌跡の生成手順

目標軌跡が生成された後、各目標点は始点から通過する順番に番号が付され、その情報は表 2-2. 2. ①-1 の形式でテーブル化される。ここで、mapID、 X_r 、 Y_r 、 θ_r 、 ρ_r および L_r はそれぞれ各目標点についての番号、X座標、Y座標、目標方位角、経路曲率、経路長であり、N は目標点の総数である。実際の制御ソフトに読み込ませるテーブルはこの表の右列にさらに各目標点の速度制御、レーンチェンジおよび正着制御に関する情報が追加される。

表 2-2. 2. ①-1 目標軌跡テーブルの形式

mapID	X_r	Y_r	θ_r	ρ_r	L_r
1	X_1	Y_1	θ_1	ρ_1	L_1
2	X_2	Y_2	θ_2	ρ_2	L_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	X_N	Y_N	θ_N	ρ_N	L_N

あざまサンサンビーチ付近にある本プロジェクトの走行ルート目標軌跡を図 2-2.2. ①-4 の方法で作成した。その結果を図 2-2.2. ①-5 に示す。

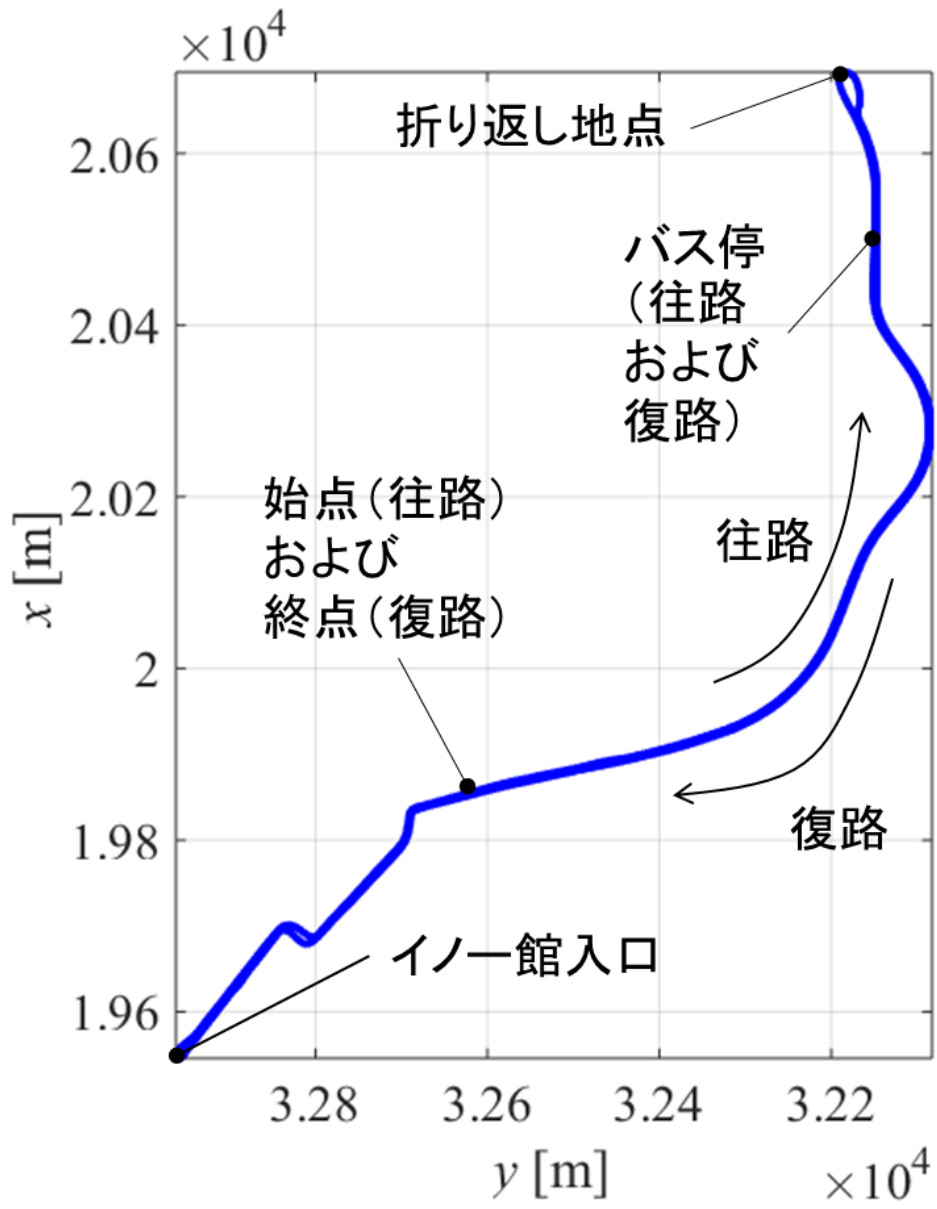


図 2-2.2-5 GPS データより作成した走行ルートの目標軌跡

図 2-2. 2. ①-4 の方法で得られた目標方位角を図 2-2. 2. ①-6 に示す。同図において、横軸は経路長、縦軸は目標方位角である。

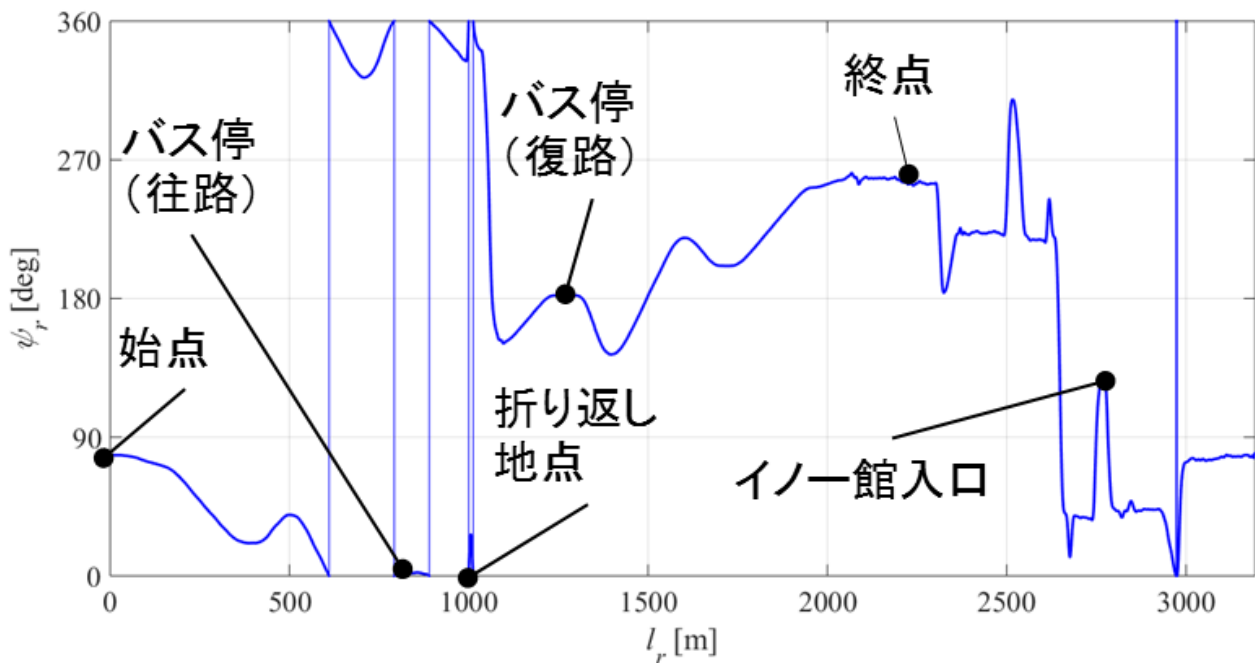


図 2-2. 2. ①-6 走行ルート of 目標方位角

図 2-2. 2. ①-4 の方法で得られた経路曲率を図 2-2. 2. ①-7 に示す。同図において、横軸は経路長、縦軸は経路曲率である。

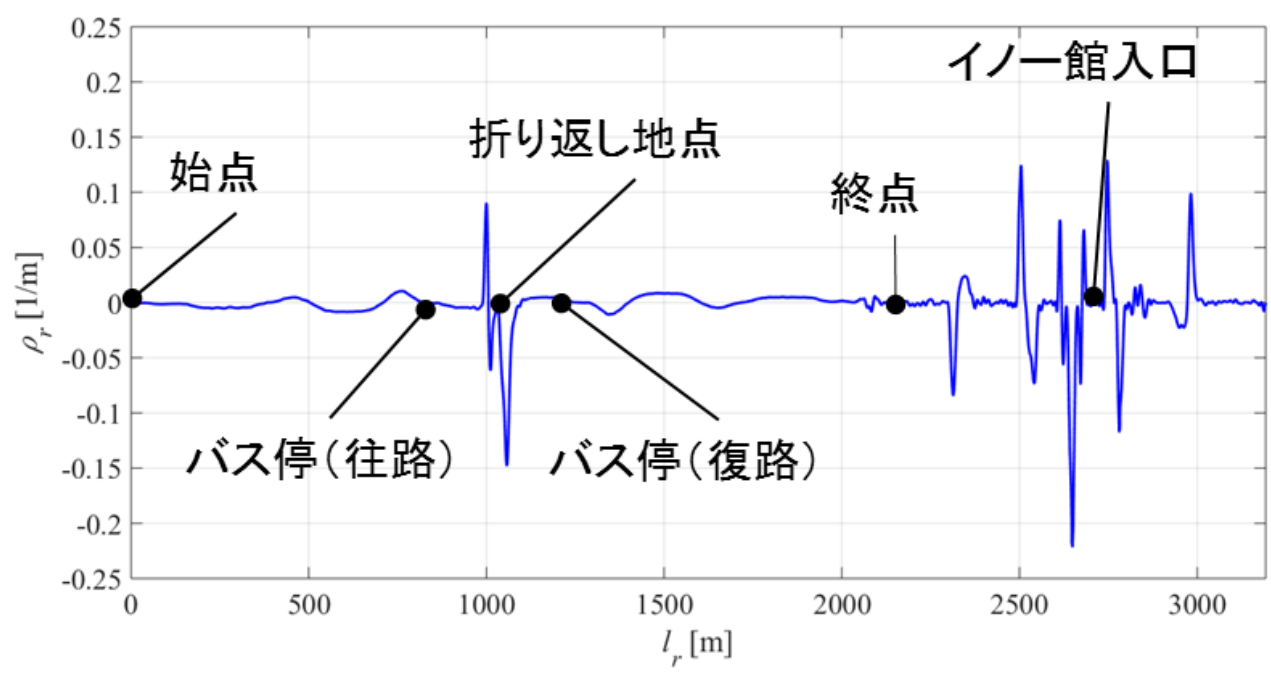


図 2-2. 2. ①-7 走行ルート of 経路曲率

② 車線維持制御ソフトのパラメータ調査

○制御パラメータ

操舵制御では、車両運動の詳細モデルを基に設計された操舵制御モデルを用いる。操舵制御モデルでは、車両運動モデルとして下図に示すような等価二輪モデルを用いる。ここで、横すべり角は実測できないため、ヨーレートセンサなどから推定する必要があるが、この値は誤差を含み制御性能に悪影響を与えるため、この値を用いる必要がなくなるという利点がある。そのため、操舵制御においては、横すべりなしの等価二輪モデルを用いる。

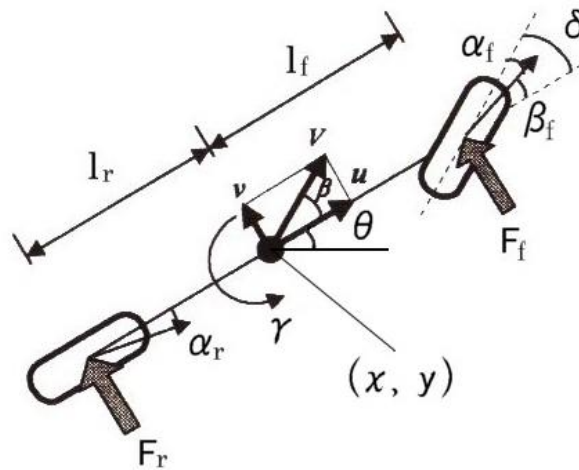


図 2-2.2. ②-1 等価二輪モデル

等価二輪モデルの横すべり角とヨーレートに関する車両ダイナミクスは次式のように表される。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \gamma \\ \beta \end{bmatrix} + B\delta \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{JV} (K_f l_f^2 + K_r l_r^2) & -\frac{2}{J} (K_f l_f - K_r l_r) \\ -\frac{2}{MV^2} (K_f l_f - K_r l_r) - 1 & -\frac{2}{MV} (K_f + K_r) \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{J} K_f l_f \\ \frac{2K_f}{MV} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 V は進行速度、 M は車両質量、 β は横滑り角、 γ は重心回りのヨーレート、 F_f と F_r は前後輪にかかるタイヤの横力、 l_f と l_r はとは重心から前後輪軸までの距離、 J は重心回りの慣性モーメント、 K_f と K_r は前後輪のコーナリングパワーである。

操舵制御系は、Path Following 制御の概念に従っている。Path Following 制御とは、仮想的に設けられた参照軌道上を走行する参照車両の描く軌跡を実車両に追従させる制御である。これは緊急時などにも対応するため、操舵制御系と速度制御系を分離するためである。参照車両の車両モデルを等価二輪モデルとすると、下図のように参照車両から実車両を見たときの絶対座標及び偏向角として e_1 , e_2 , e_3 を定義すると次式のようになる。但し、添字の r が付いているものが参照車両における各種の変数を表す。

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r + \beta_r) & \sin(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ -\sin(\theta_r + \beta_r) & \cos(\theta_r + \beta_r) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ (\theta + \beta) - (\theta_r + \beta_r) \end{bmatrix} \quad (3)$$

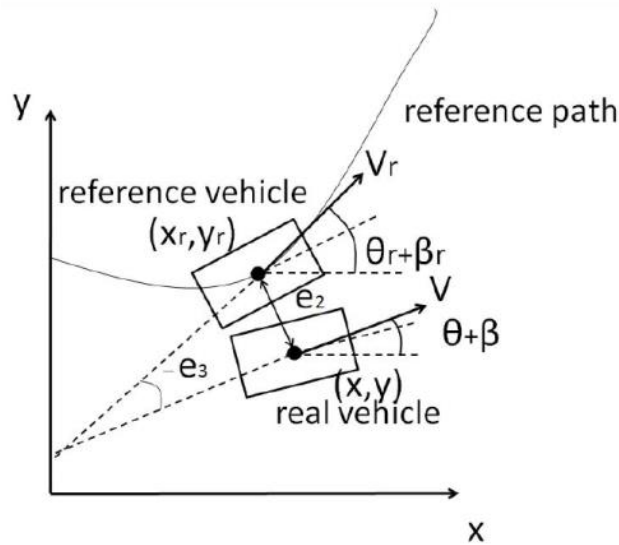


図 2-2.2. ②-2 Path Following 制御

また、 e_1 , e_2 , e_3 の時間微分は次式のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos e_3 - V_r + e_2 \omega_r \\ V \sin e_3 - e_1 \omega_r \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

参照車両が実車両の走行速度に合わせて常に並走しているとすると、誤差微分方程式は次式のようになる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \sin e_3 \\ \omega - \omega_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで K_2 と K_3 を正の定数として次式のようなコントローラを導入する。但し、 $\omega_r = \dot{\theta}_r + \dot{\beta}_r$ である。このコントローラを導入した時の制御系の安定性はリアプノフの安定性理論により保証される。

$$\omega_c = \omega_r - K_2 e_2 V_r - K_3 \sin e_3 \quad (6)$$

実車両に対して ω_r を直接入力することはできないため、等価二輪モデルの式を用いて次式のような舵角入力へと変換し、制御入力とする。

$$\delta_c = \frac{MV}{2K_f} \left[\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta + \omega_r - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \right] \quad (7)$$

式(7)の ω_r がフィードフォワード制御項となる。フィードフォワード制御量となる正着のための操舵角度を δ_r とすると、式(7)は次式のように表すことができる。

$$\delta_c = \frac{MV}{2K_f} \left[\frac{2(K_f l_f - K_r l_r)}{MV^2} \gamma + \frac{2(K_f + K_r)}{MV} \beta - K_2 e_2 V - K_3 \sin e_3 \right] + \delta_r \quad (8)$$

○制御パラメータの調整

安定的な操舵で車線を維持できるよう、式(6)中のフィードバックゲイン、 K_2 、 K_3 を調整する。なお、今回は、下図に示すような自動運転コースのうち、ゆるやかな曲線部の連続である Section1 と Section2、左折やUターンが入る Section3 に分けて評価する。

Section1 においてゲイン調整した結果と、最終的なゲインにより Section1、2、3 を走行した結果を下記に示す。なお、ID は 0.05m 間隔に設置している。

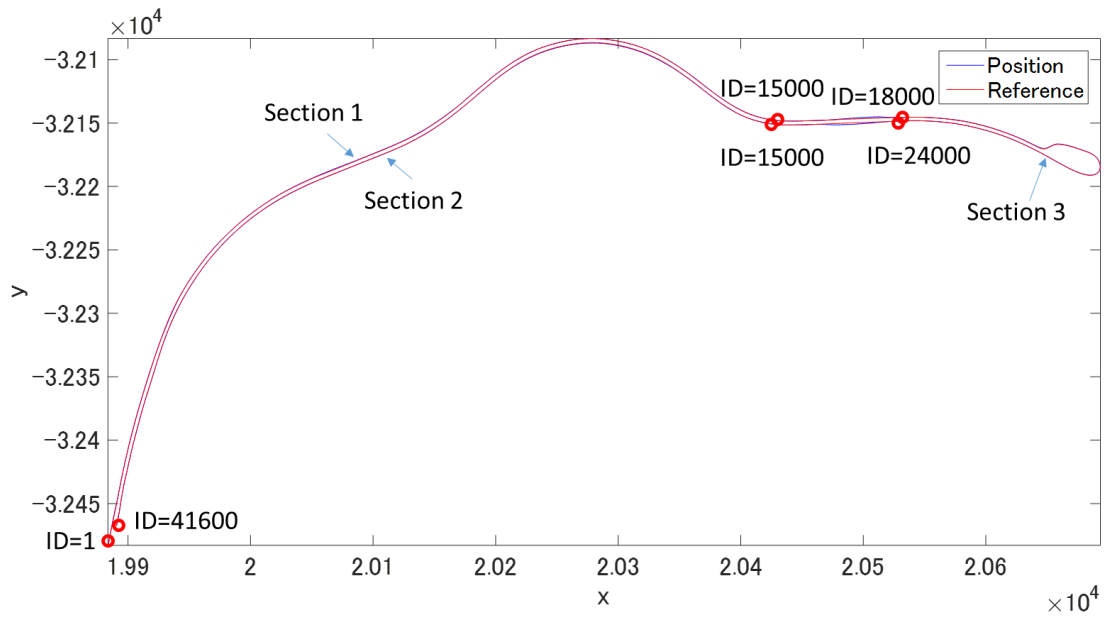
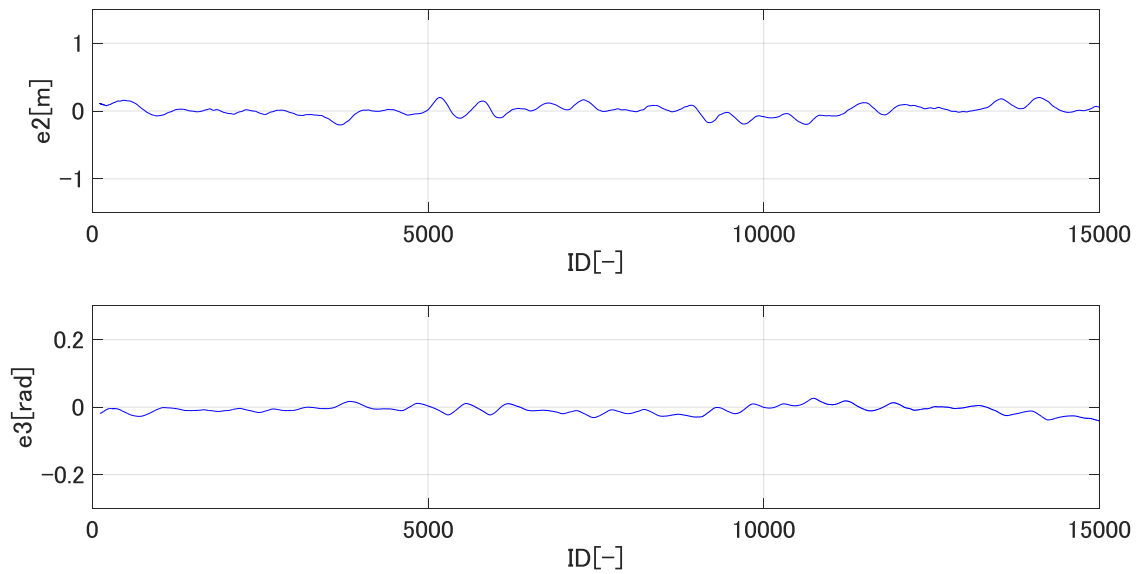


図 2-2. 2. ②-3 目標軌跡と評価区間

A. K_2 、 K_3 が大きいとき

ゲインが高いため、指示操舵角度が不安定になり、比較的大きな振動が続いてしまう。

<Section 1>



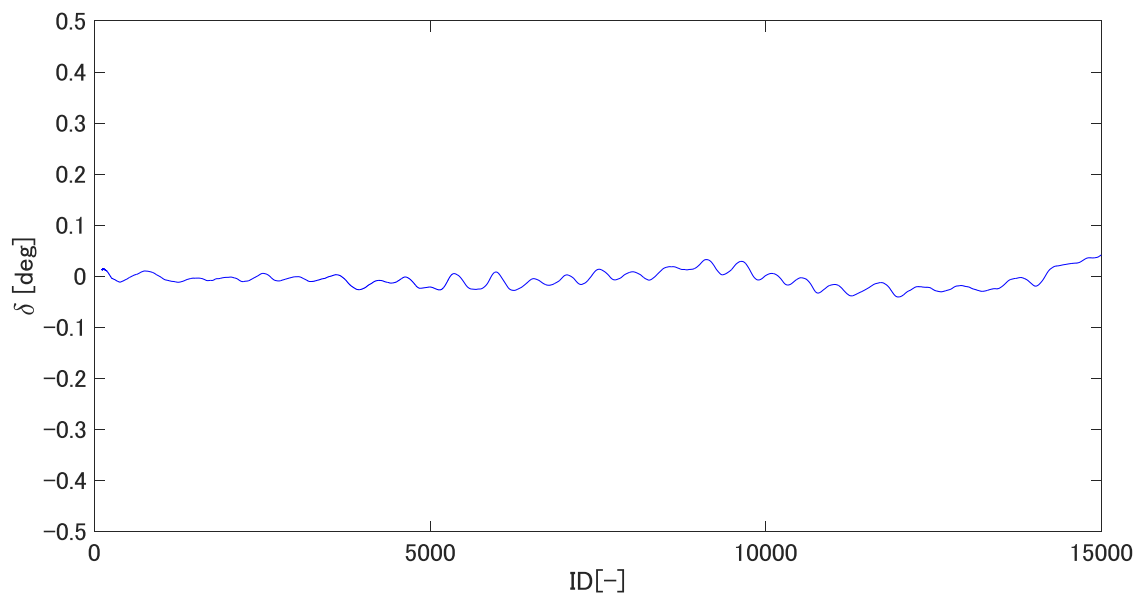
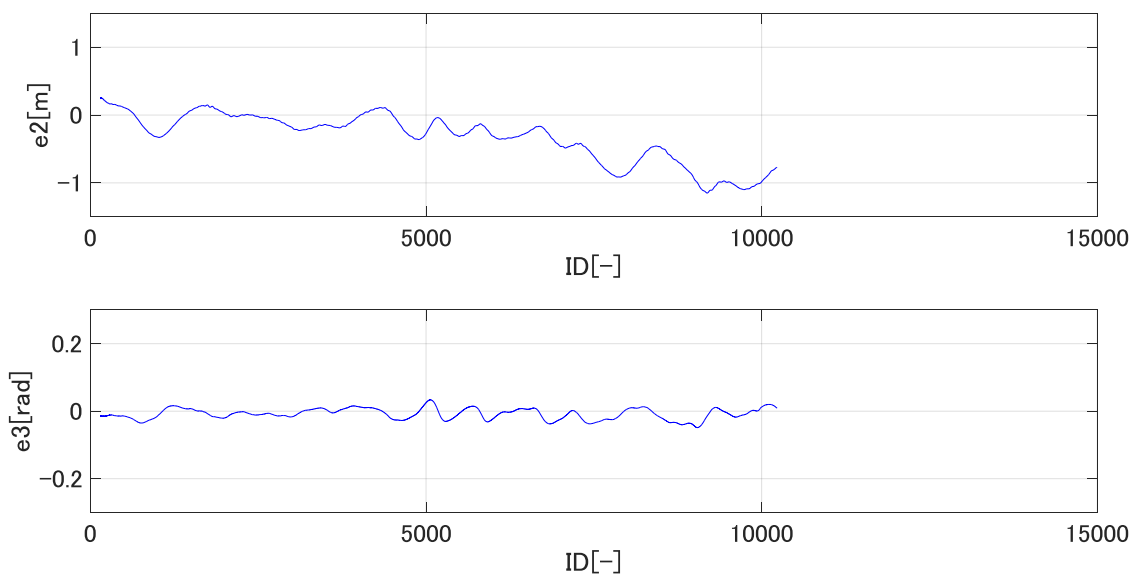


図 2-2. 2. ②-4 横偏差、ヨー角偏差、タイヤ指示操舵角度 (K2, K3 大、Section1)

B. K2、K3 が小さいとき

ゲインが大きいときに比べて振動は小さいが、偏差が大きく、隣車線へのはみ出しが起こったため、ハンドルのオーバーライドにより強制的に自動運転終了。

<Section 1>



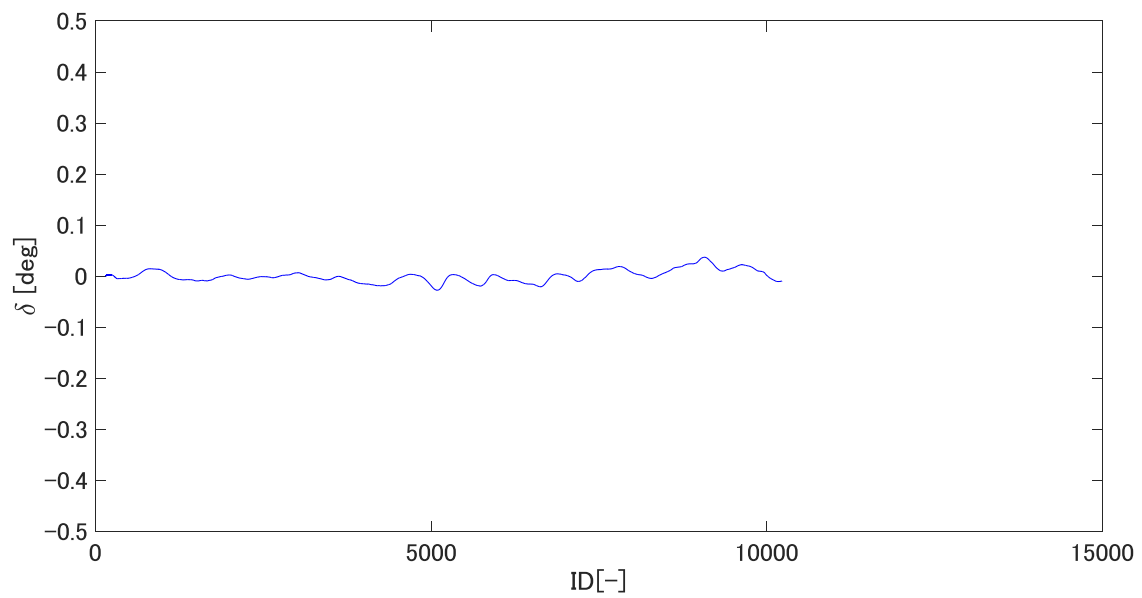
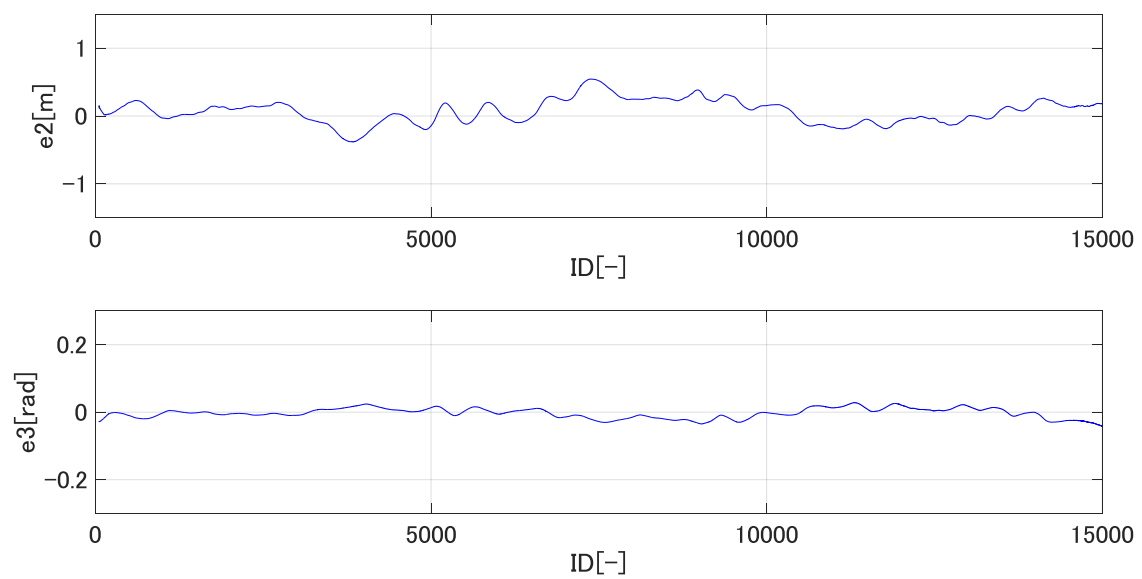


図 2-2. 2. ②-5 横偏差、ヨー角偏差、タイヤ指示操舵角度 (K2, K3 小、Section1)

C. K2、K3 調整後

<Section 1>

やや振動は起きるもののおさまりやすく、車線から大きく逸脱することもない。



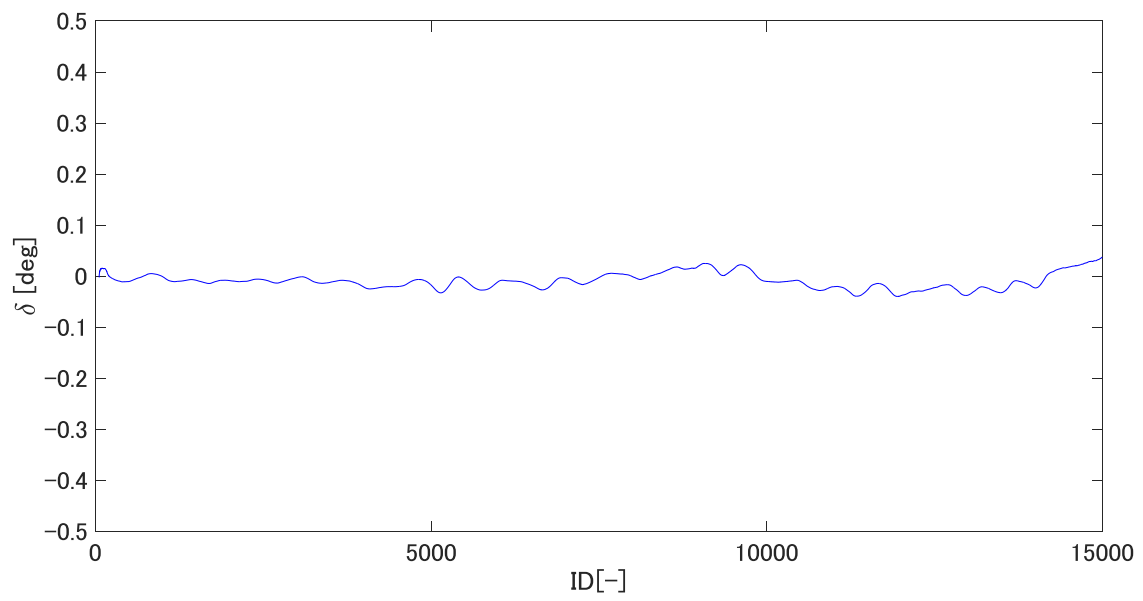
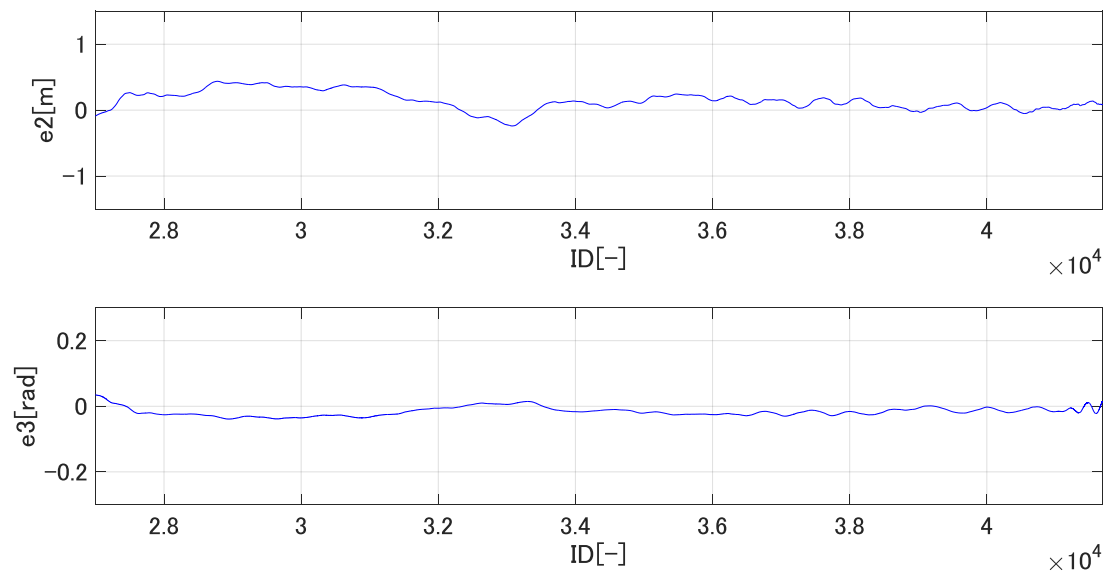


図 2-2. 2. ②-6 横偏差、ヨー角偏差、タイヤ指示操舵角度 (K2, K3 大、Section1)

<Section 2>



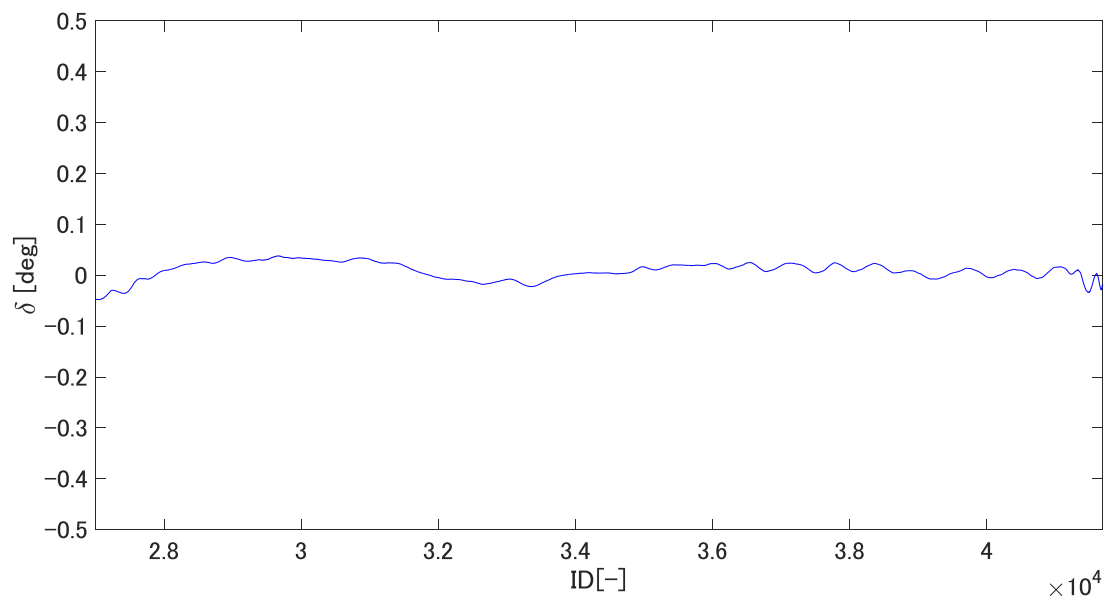
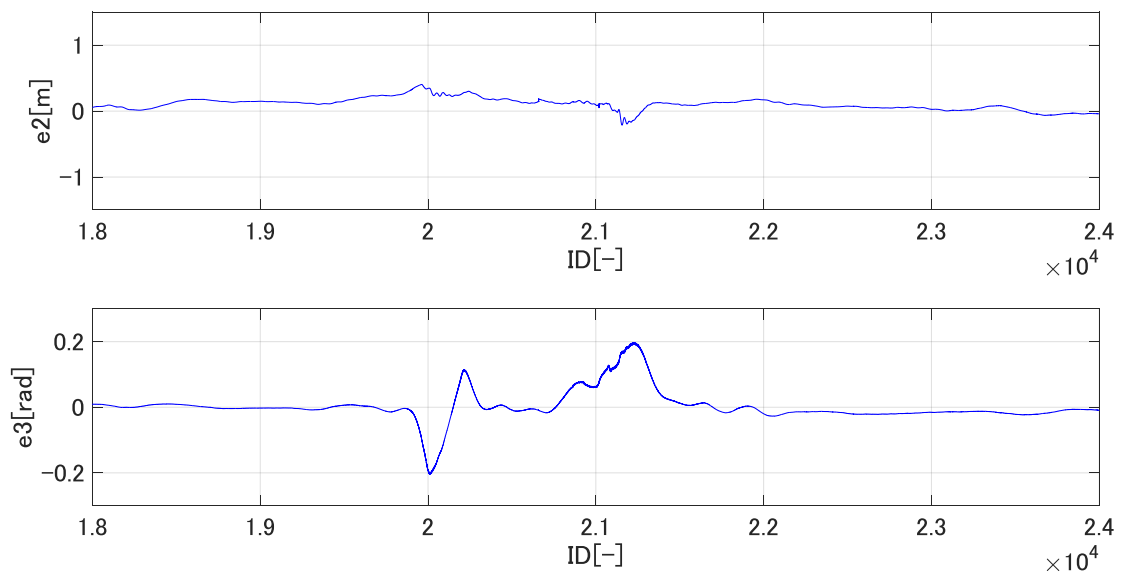


図 2-2. 2. ②-7 横偏差、ヨー角偏差、タイヤ指示操舵角度 (K2, K3 大、Section2)

<Section 3>



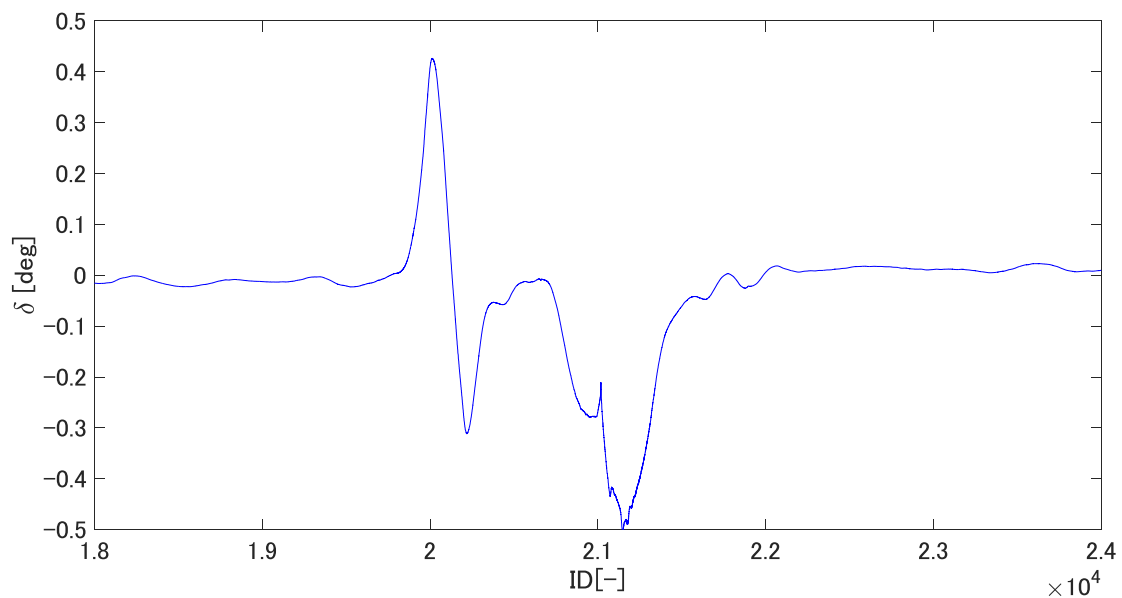
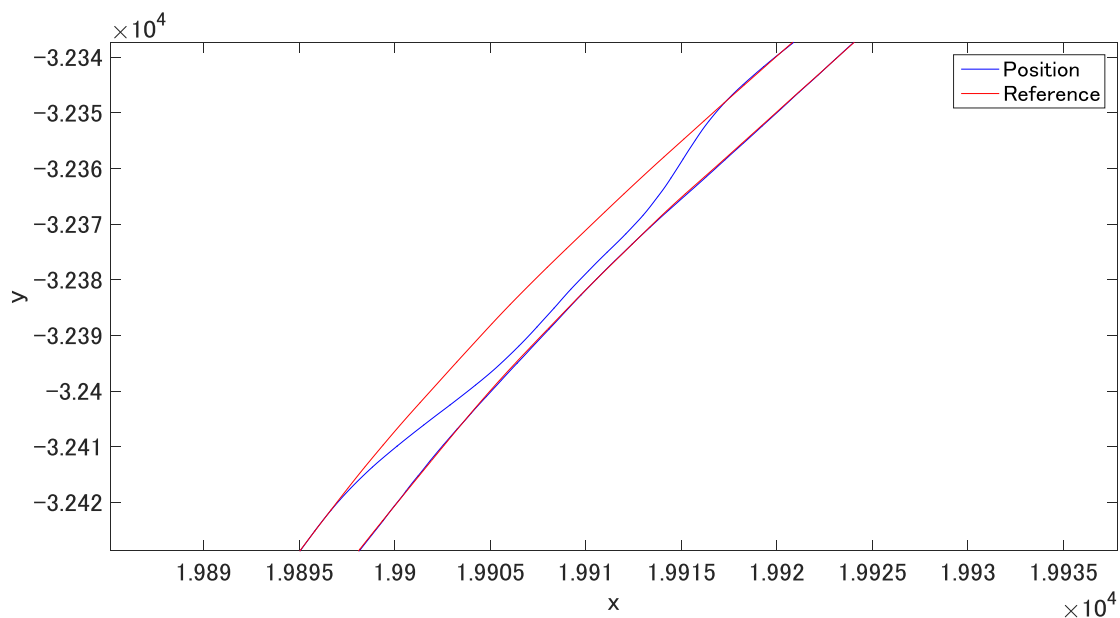


図 2-2. 2. ②-8 横偏差、ヨー角偏差、タイヤ指示操舵角度 (K2, K3 大、Section3)

③ 車線変更制御ソフト設計とパラメータ調整

車線変更時は、本来の目標軌跡に対して新しい車線変更用の軌跡を足しこむ形で生成し、コントローラを使ってそれに追従するように制御する。その際、目標軌跡、目標ヨー角、曲率が連続的になるように注意して設計する。また、コントローラは車線維持制御と同様のものを使用し、パラメータも同一とした。

以下に、車線変更時の実際の走行軌跡、およびタイヤ指示操舵角度を示す。



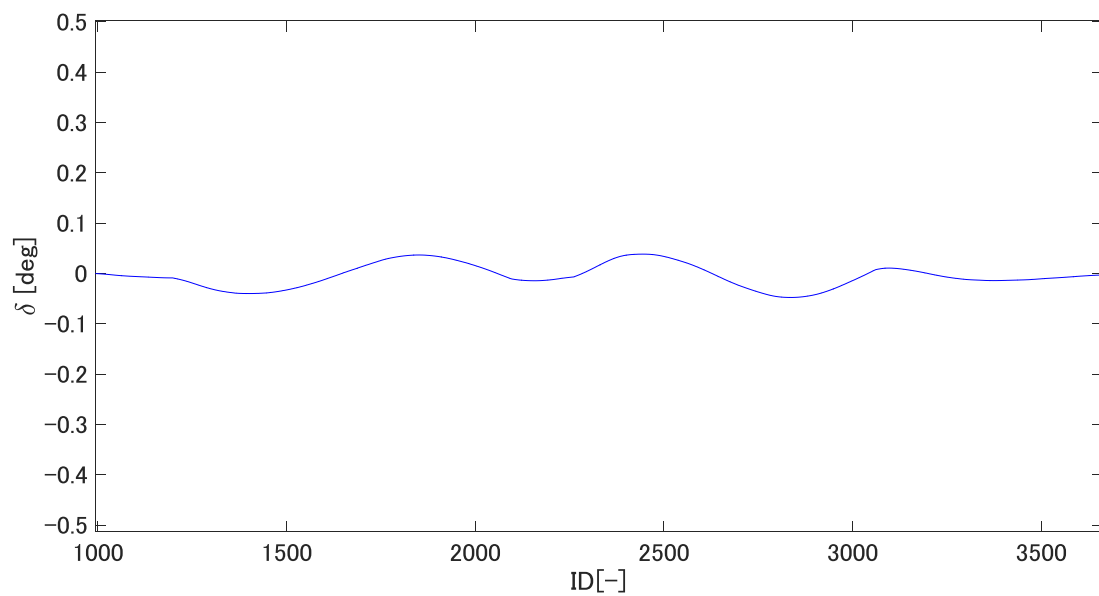
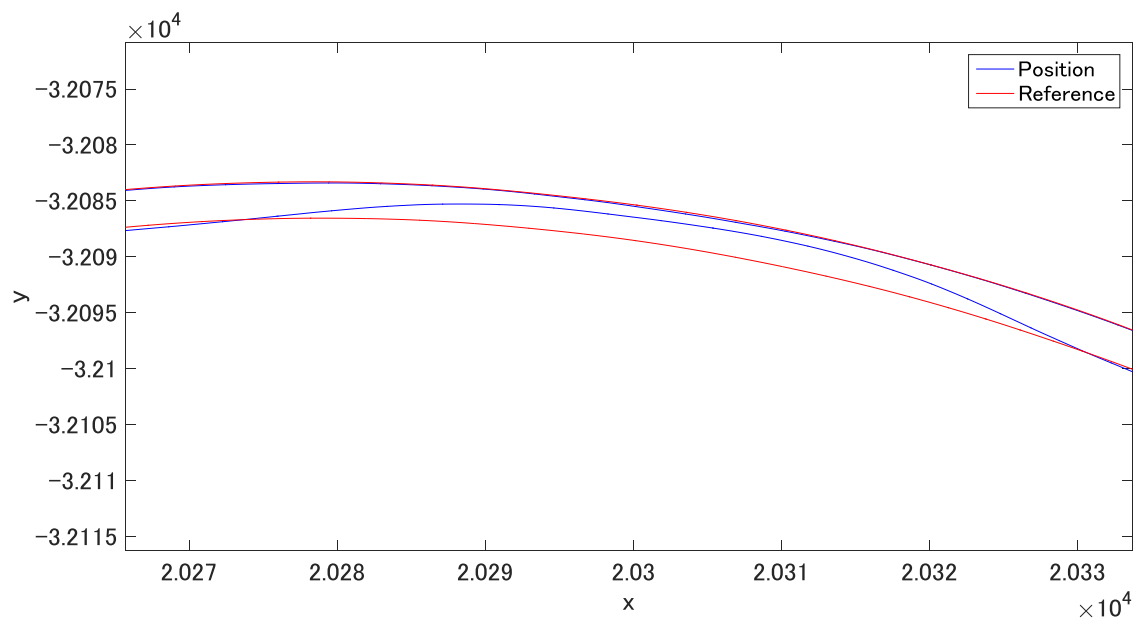


図 2-2. 2. ③-1 曲率の小さい区間における車線変更時の軌跡とタイヤ指示操舵角度



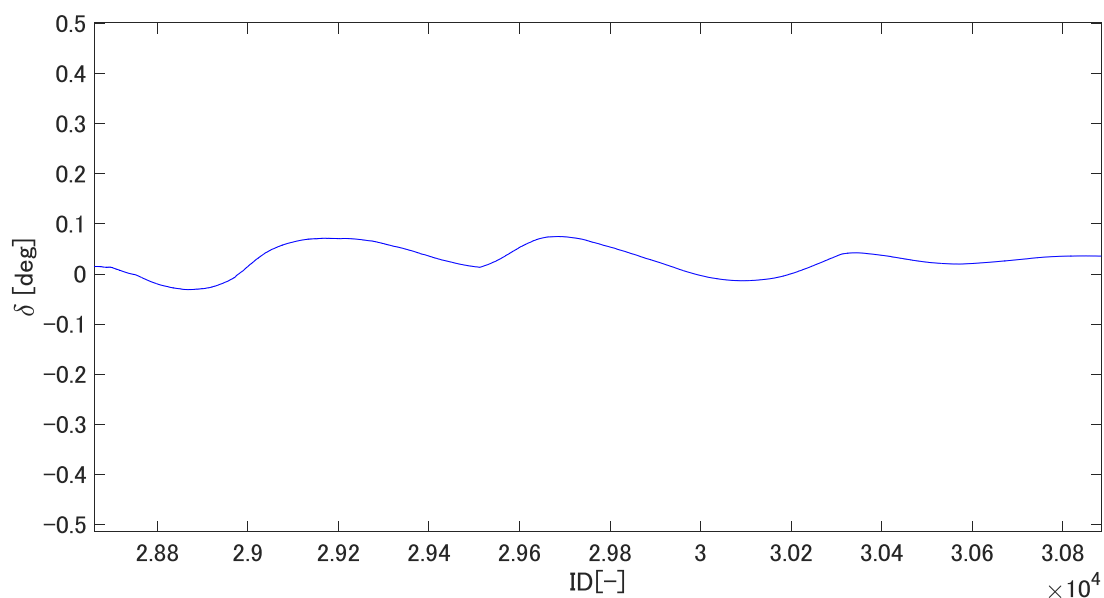


図 2-2. 2. ③-2 曲率の比較的大きい区間における車線変更時の軌跡とタイヤ指示操舵角度

④ 正着制御ソフトのパラメータ調査

✓ 正着の概要

本件におけるバス停への正着制御イメージを図 2-2. 2. ④-1 に示す。

バス停形態としては直線型やバスベイ型およびクサビ型があるが、本件においては縁石のある歩道が設備されている路線であれば道路工事等が必要無く、一般的にも多く採用されている直線型を対象として正着制御を実施した。

本線を車線維持制御によって自動走行している状態から、バス停付近（約 40m 手前）で正着制御に切り替え、約 1m の横方向距離（車体～縁石）を寄せてバス停に停車することとした。なお、バス停は実証実験コースの直線と見なせる区間（往路および復路それぞれ 1 ヶ所）に仮想的に設置した（図 2-2. 2. ④-2）。

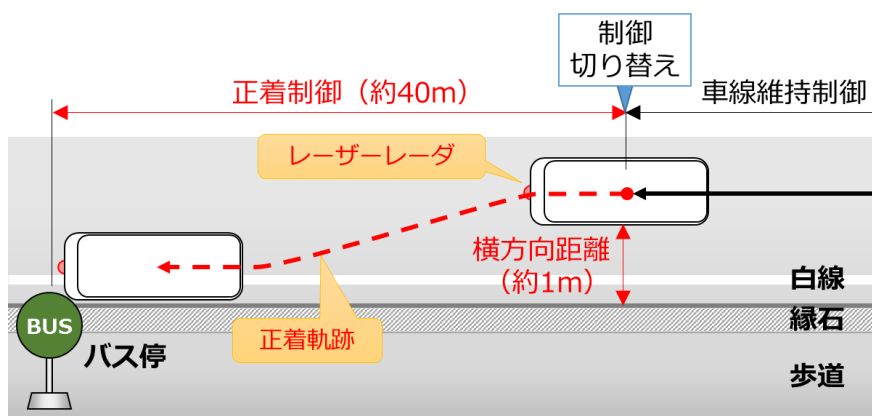


図 2-2. 2. ④-1 バス停への正着イメージ

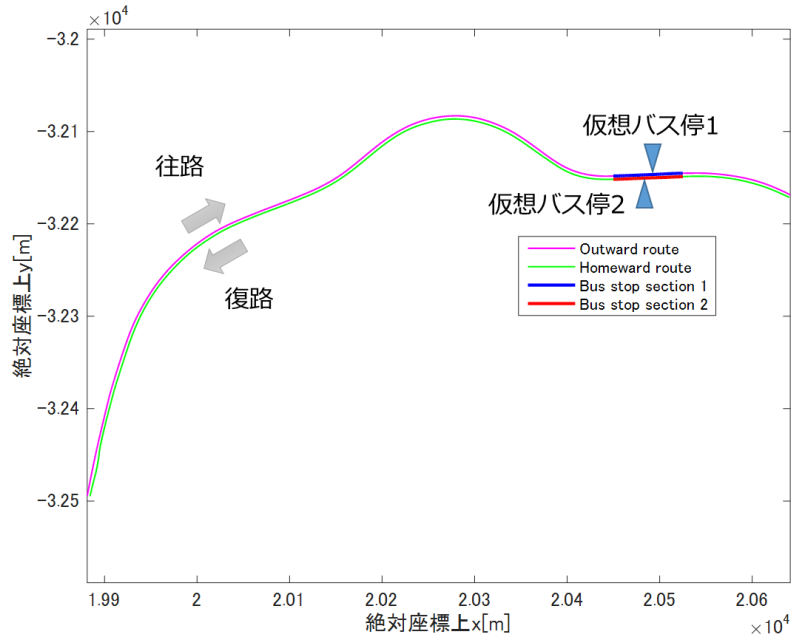


図 2-2. 2. ④-2 仮想バス停位置

✓ 正着制御のシステム構成

正着制御のシステムフローを図 2-2. 2. ④-3 に示す。

正着制御への切り替えは、本線（規定コース）の車線維持制御による走行中から、正着開始点情報およびウインカー信号を開始条件とし、車両制御状態をシームレスに移行できるようにシステムを構築した。なお、ウインカー操作は現段階では手動だが、制御システム側からドライバー用ディスプレイにウインカー要求を表示し、それに応じてドライバーがウインカーを操作することとした。

正着制御においては、制御開始時点の車体と縁石の距離、停車までの距離に応じて正着制御開始からの累積走行距離に対応する軌跡情報（すなわち、累積走行距離毎の目標隙間量、目標ヨー角）を瞬時に生成できるようにシステムを構築した。

制御中はレーザーレーダ出力（縁石までの距離および車体角度）により車両状態を監視しての操舵FB制御を行った。

なお、正着区間の手前がカーブであること、現段階ではブレーキが自動化されていないことを考慮し、正着開始時の速度を約 15km/h に抑え、制御開始とともに加速を停止し、正着目標地点近傍まではエンジブレキによる減速のみとした。また、正着目標地点（仮想バス停）ではドライバーによるブレーキ操作で停車することとした。

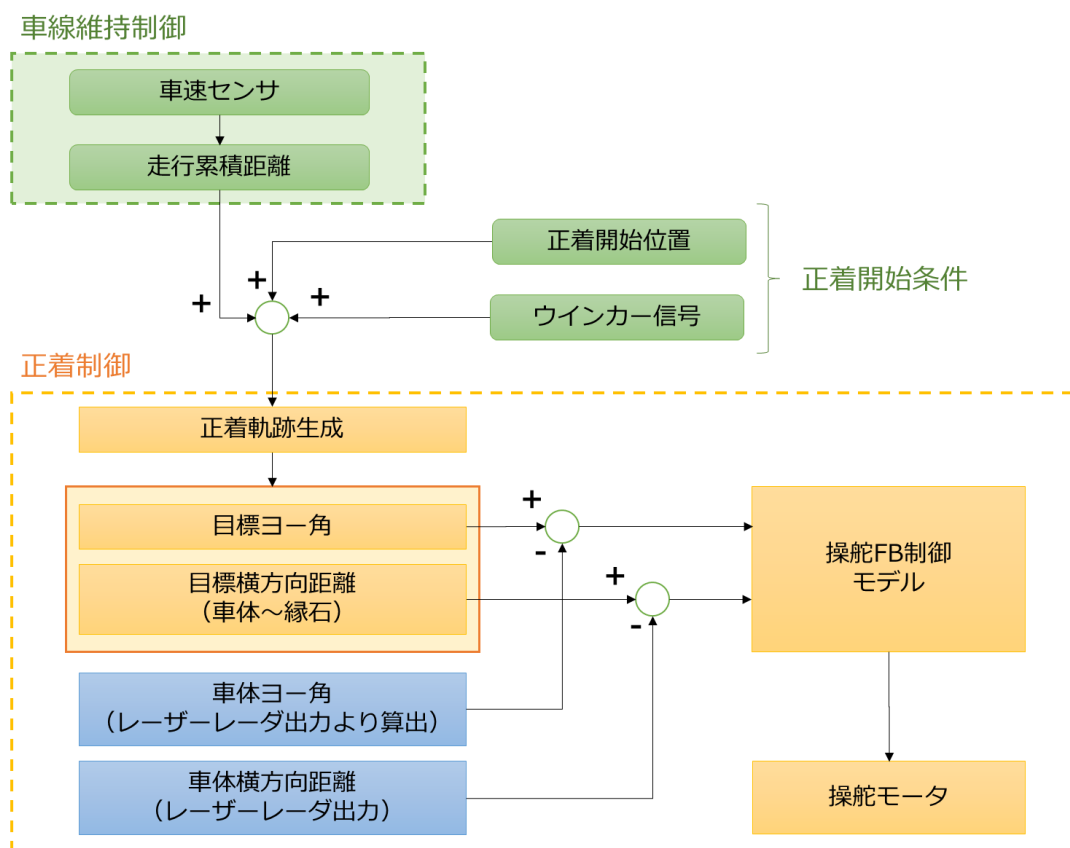


図 2-2. 2. ④-3 正着制御のシステムフロー

✓ パラメータ調整と正着精度評価

前述の通り、正着制御においては制御開始からの累積走行距離に対応する目標隙間量（車体と縁石の距離）、目標ヨー角（車体と縁石の成す角度）を生成している。これらを参照しながら、レーザーレーダによる縁石検出処理結果を瞬時の車両状態として操舵FB制御を行った。なお、操舵FB制御は、以下の式で表現されるパスフォロイング制御アルゴリズムを用いた。

$$\delta_c = \frac{K_f l_f - K_r l_r}{K_f v} \gamma + \frac{Mv}{2K_f} \omega_c$$

$$\omega_c = -K_2 e_2 v_r - K_3 \sin e_3$$

ここで、 ω_c はFB制御部で e_2 は縁石と車両間の横方向偏差量、 e_3 は車両と縁石の接線角偏差を表し、 K_2 および K_3 は入力偏差 e_2 、 e_3 それぞれに対するFBゲインを示す。また、ヨーレート γ に対する補正項は車両運動モデルから導出されたもので、発生しているヨーレートをゼロにするための修正操舵角であり、制御安定性を向上させるものである。なお、 M は車両重量、 v は車両速度を示す。

FB制御ゲイン K_2 および K_3 は、正着制御においては以下の観点で調整を図った。

- ・ 乗り心地および感受性を考慮し、急激な挙動変化無くスムーズに縁石側に接近すること。

- ・縁石に寄り過ぎることなく、直進安定性が保たれていること。

正着完了時の様子を図 2-2.2. ④-4 に示す。また、その際の縁石と後部ドアステップとの隙間量（正着距離）および車両挙動履歴の一例を図 2-2.2. ④-5、図 2-2.2. ④-6 に示す。正着距離は 4cm を目標とし、往路、復路各 12 回（合計 24 回）分を評価した。なお、実験は乗員 2~4 名で実施したものであり、正着距離は停車時のレーザーレーダの検出した縁石との距離とした。

その結果、正着距離は平均 4.0cm（標準偏差 1.47）、最大 7.2cm（平均+3.2cm）、最小 1.6cm（-2.4cm）となることを確認した。また、縁石と接触するケースは確認できなかった。



図 2-2.2. ④-4 (a) 正着完了時の様子（前後）



図 2-2.2. ④-4 (b) 正着完了時の様子（側方および仮想バス停、正着隙間）

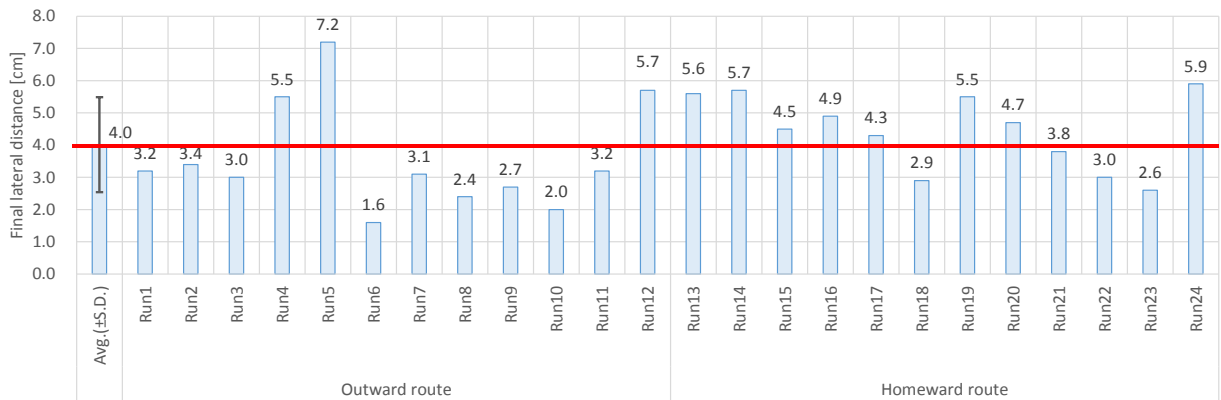


図 2-2.2. ④-5 正着距離の評価

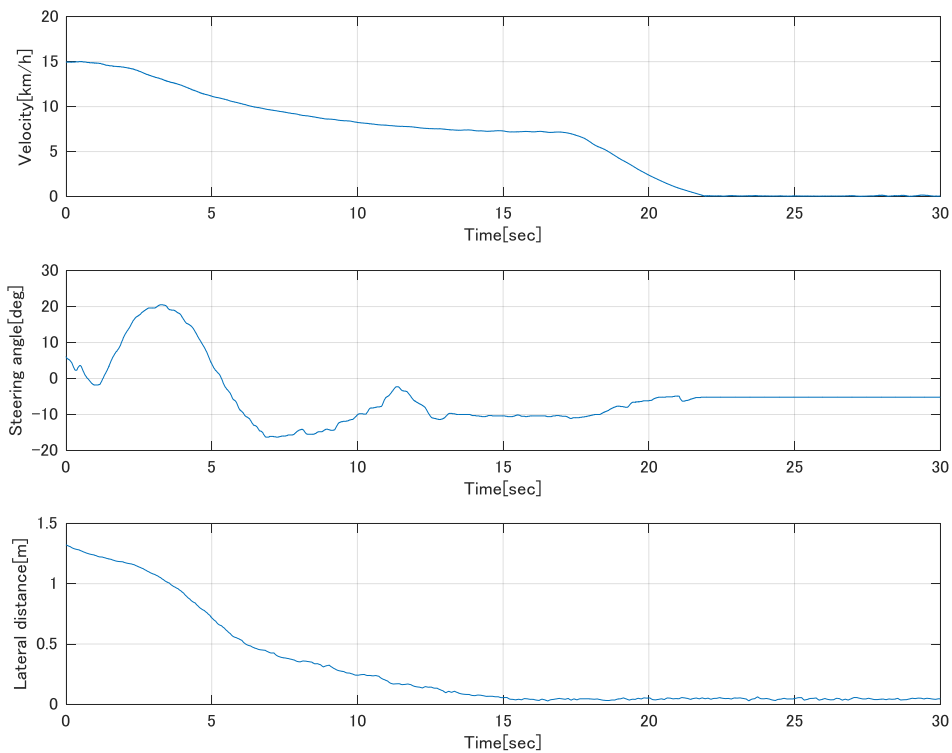


図 2-2.2. ④-6 正着制御時の車両挙動履歴

⑤ 課題と今後の展望

前述の評価結果において、往路と復路で分けて見た場合、復路は往路に比べて正着距離が大きい傾向となっている。これは、道路の傾き等が影響していることが考えられ、制御モデルに道路情報を正確に反映することで一層の精度向上とロバスト性が期待できる可能性が考えられる。また、往路復路それぞれの集団で見てもバラツキが大きくなっているが、ドライバーによるブレーキ操作といった因子が考えられ、ブレーキも自動化して減速制御することで改善が望める点と考えられる。

⑥ 障害物車線内判定ソフトの設計

完全な自動運転では車線内の障害物の有無をソフト側で判断する必要がある。本プロジェクトではそのプロトタイプとして、LiDARによる障害物検出と目標軌跡を利用した障害物認識ソフトを設計した。以下、LiDARの障害物検出手法、目標軌跡を利用した障害物の車線内判定についてそれぞれ説明する。

(a) LiDARによる障害物検出

LiDARはレーザーセンサにより周囲の物体の距離を検出できる装置である。LiDARによって、周囲の物体は距離情報を有する点群データとして、認識される。認識された物体はクラスタリング処理によって、塊毎に切り分けられる。各塊に関して、点群の分布に基づいて塊を囲う矩形として、向きと大きさを算出する。図2-2.2.⑤-1に示す前方障害物より、LiDARによって障害物検出した結果を図2-2.2.⑤-2に示す。



図 2-2.2. ⑤-1 LiDAR 前方の障害物

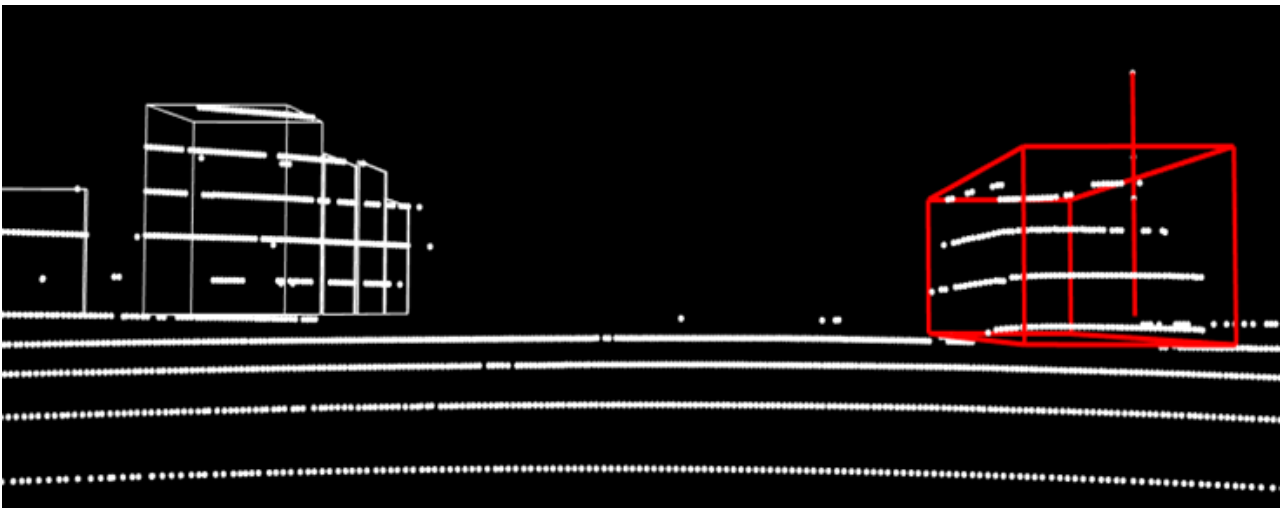


図 2-2.2. ⑤-2 LiDAR のデータより検出された障害物

(b) 目標軌跡を利用した障害物の車線内判定

LiDAR で検出した障害物について、車両の絶対座標と方位角を元に矩形の頂点及び重心の計 5 点の相対座標を絶対座に変換し、目標軌跡を元に車線内判定を行うアルゴリズムを作成した。そのアルゴリズムは以下のとおりである。

1. 自車の GPS より出力される絶対座標および方位角、LiDAR から出力される障害物の矩形の各頂点までの相対座標より、矩形の頂点および重心点の絶対座標を計算する。
 2. LiDAR で計測した障害物各頂点および重心点までの前方距離より目標点を参照する。
 3. 各目標点の車線幅内にその目標点を参照した障害物の頂点あるいは重心点が存在するか計算する。
 3. 2 において一つの目標点あるいは重心点でも車線内にあれば、障害物が車線内にあると判断する。
- 上記のアルゴリズムによる車線内判定の結果の例を図 2-2. 2. ⑤-3 に示す。

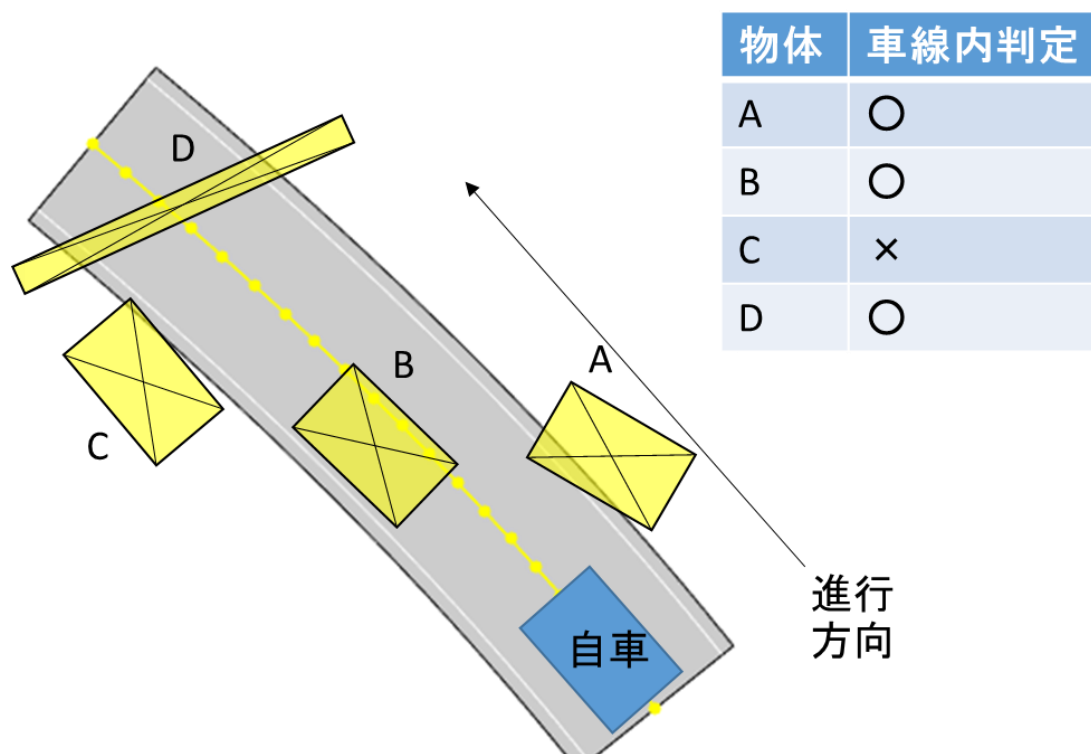


図 2-2. 2. ⑤-3 車線内判定の結果の例

このソフトの使用による車線内の障害物の未検知は現在までのところ確認されていない。一方、車線外でも車線に近いところに障害物が存在するときには、しばしば車線内存在すると判定されることがある。この原因は障害物の絶対座標算出の際に使用する GPS 内蔵の IMU が出力する方位角の誤差が主要な要因であると考えられるが、未検証である。今後、センサの誤差も考慮したよりロバストな判定ソフトの構築に取り組む予定である。

第3章 自動走行バスの受容性調査

あざまサンサンビーチでの自動走行バス試乗会を通じて自動走行バスの受容性評価を実施した。具体的には、現地交通事業者ヒアリング、試乗モニターの募集、ヒアリングをもとに調査設計書の作成、試乗後アンケート票・ヒアリングシートの作成、試乗会の実施である。

3-1. 自動走行バスの受容性調査

あざまサンサンビーチでの自動走行バス試乗会を通じて自動走行バスの受容性評価を実施した。全体作業フローは以下に示すとおりである。具体的には、現地交通事業者ヒアリング、試乗モニターの募集、ヒアリングをもとに調査設計書の作成、試乗後アンケート票・ヒアリングシートの作成、試乗会の実施である。

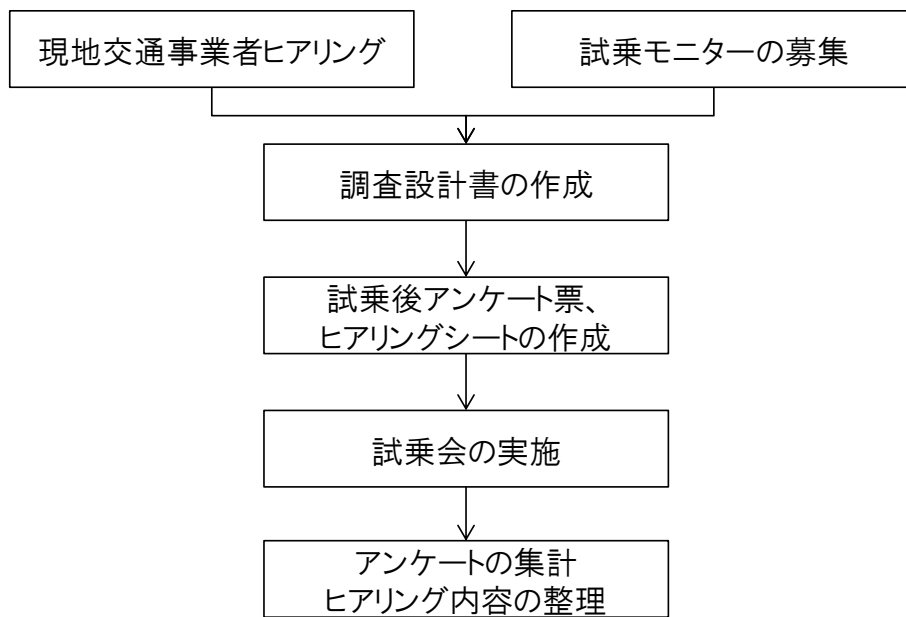


図 3-1-1 全体作業フロー

試乗会では、公道を走る自動走行バス（車線維持制御機能、車線変更制御機能、自動正着機能、車内サービスに係るシステム等を搭載）に、周辺地域住民等にモニターとして試乗いただき、その後アンケートとヒアリングを実施することで自動走行バスの受容性を調査した。

3-1.1. 車内サービスに係る運行管理システムの実装

本実証事業で自動走行バスに搭載した運行管理システムは下記に示すとおりである。

① 車両情報伝達システム

バス車両の動きなどを乗客に伝達するシステムである。具体的には人型のコミュニケーションロボットを運転席付近に乗客に向けて設置し、発車時の乗客への周知、次に停車するバス停の名前等を乗客に伝えるものである。なお、本事業ではソフトバンクロボティクス株式会社の協

力を得て、同社が販売している Pepper をコミュニケーションロボットとして活用した。

② 乗客みまもりシステム

バス車内の前方上方部に車内状況を確認できるようにカメラを1台設置し、車両外の遠隔地から車内状況の確認等を実施するためのシステムである。

③ 車両状況みまもりシステム

現在の車両の状況を車両外の遠隔地から確認するためのシステムである。車両から取得する情報は走行速度、エンジン回転数、位置情報、車両機器のステータス（正常、異常）等である。

サービス系のシステム構成イメージ図を図 3-1.1.-1 に示す。

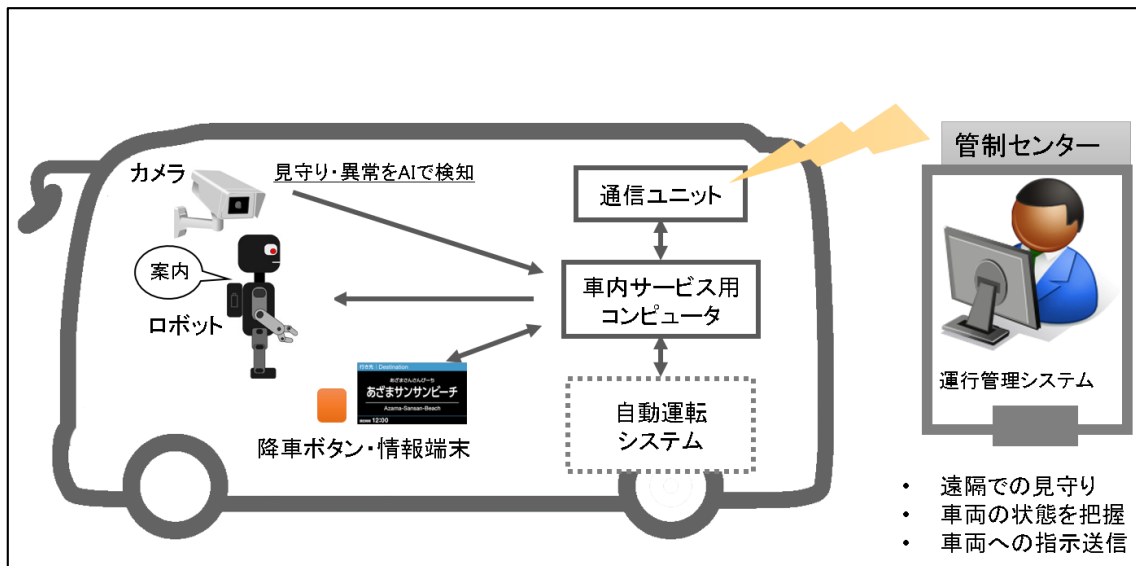


図 3-1.1.-1 サービス系システム構成イメージ

3-1.2. 自動走行試乗会の実施

① 試乗会日程

下記日程で試乗会を実施した。当日は海の館イノーで自動走行技術及び車内サービスに係るシステムの説明を行った後、実際に自動走行バスに試乗してもらい、車線維持制御機能、車線変更制御機能、自動正着機能、車内サービスに係るシステム等を体験してもらった。なお、自動走行バスに試乗してもらった際には遵守事項及び免責事項に係る同意書にモニター全員より署名を取得した。

表 3-1.2.①-1 試乗会日程

日時	<ul style="list-style-type: none"> 3月24日（金） 10:00~11:30、13:00~14:30 3月25日（土） 10:00~11:30、13:00~14:30
場所	海の館イノー～あざまサンサンビーチ周辺道路
実施内容	<ul style="list-style-type: none"> 車線維持制御機能、車線変更制御機能、自動正着機能、車内サービスロボット、遠隔監視システム等を搭載した自動運転バスの試乗 試乗後のアンケート、ヒアリング



図 3-1.2.①-1 自動走行バス試乗前の説明会

② 試乗モニター

調査対象者は沖縄県内の交通事業者、自動車関連事業者、リゾート施設関係者の29人である。とりわけ交通事業者の方々には、運転技術や運行管理の観点からの意見を聞くことができた。また、自動車関連事業者、リゾート施設関係者の方々からは販売にあたっての観点や観光事業での活用を想定した際の意見を聞くなど、幅広く自動運転バスについての受容性を調査した

3-1.3. 自動走行バスの受容性調査

① 調査概要

「乗客として自動運転バスに乗車し、自動運転技術を体験して降車する」という一連の流れを体験することで、自動運転バス及びその技術に対する心理的障壁が変化すると仮定した。自動走行バス試乗前は自動運転に懐疑的なモニターの心境が、自動走行バス試乗後には自動運転に対する印象が安心へと変化すると仮定し、それが何に起因したものなのかをアンケート・ヒアリングで調査した。予想されるモニターの心理状態変化のフローを図 3-1.3.①-1 に示す。



図 3-1.3.①-1 自動運転バス体験フローと予想される心理状態の変化

また、車両情報伝達システム（車内サービスロボット）、乗客みまもりシステム及び車両状況みまもりシステムを自動走行バスに設置することで、通常のバスであれば運転手が行う行先案内等を車内サービスロボットが乗客へ伝達し、乗客のみまもり等を乗客みまもりシステムや車両状況みまもりシステムを通じて遠隔より実施することで、運転手や運行管理者の業務が軽減されることは予想されるが、一方、代替が難しい業務についても試乗者にアンケート・ヒアリングを実施することで明確にした。図 3-1.3.①-2 に現在の運行形態と自動走行バス導入時における比較イメージ図を示す。

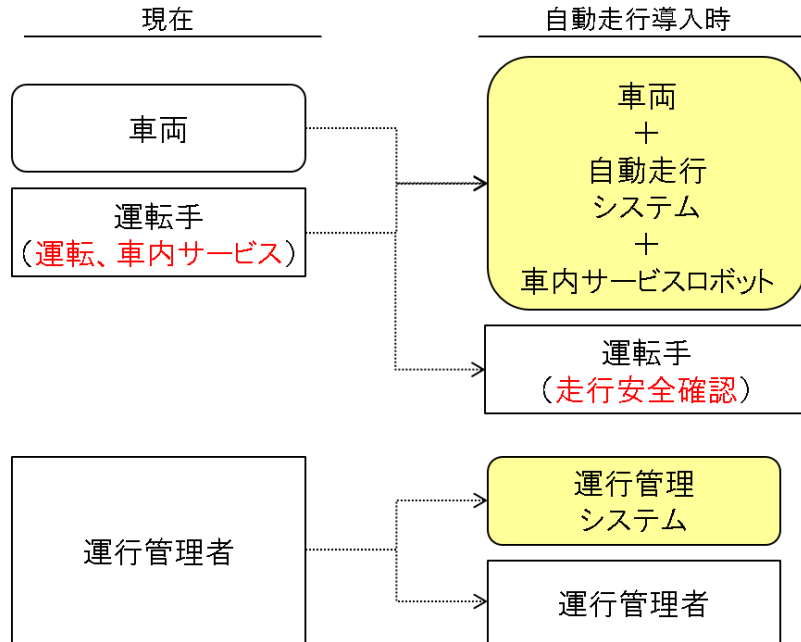


図 3-1.3.①-2 運行に関わる人・システム（現在と自動走行導入時）

② アンケート結果

以下に実施したアンケートの結果内容を記す。今回モニターとして協力してくれた対象者は 29 人である。性別の内訳は男性 28 人、女性 1 人となっている。年齢別では 40 代が 8 人と最も多かった。参加者属性としては交通事業者が 22 人と最も多く、リゾート当施設関係者が最も少ない結果となっている。モニターの属性を図 3-1.3.②-1 に示す。

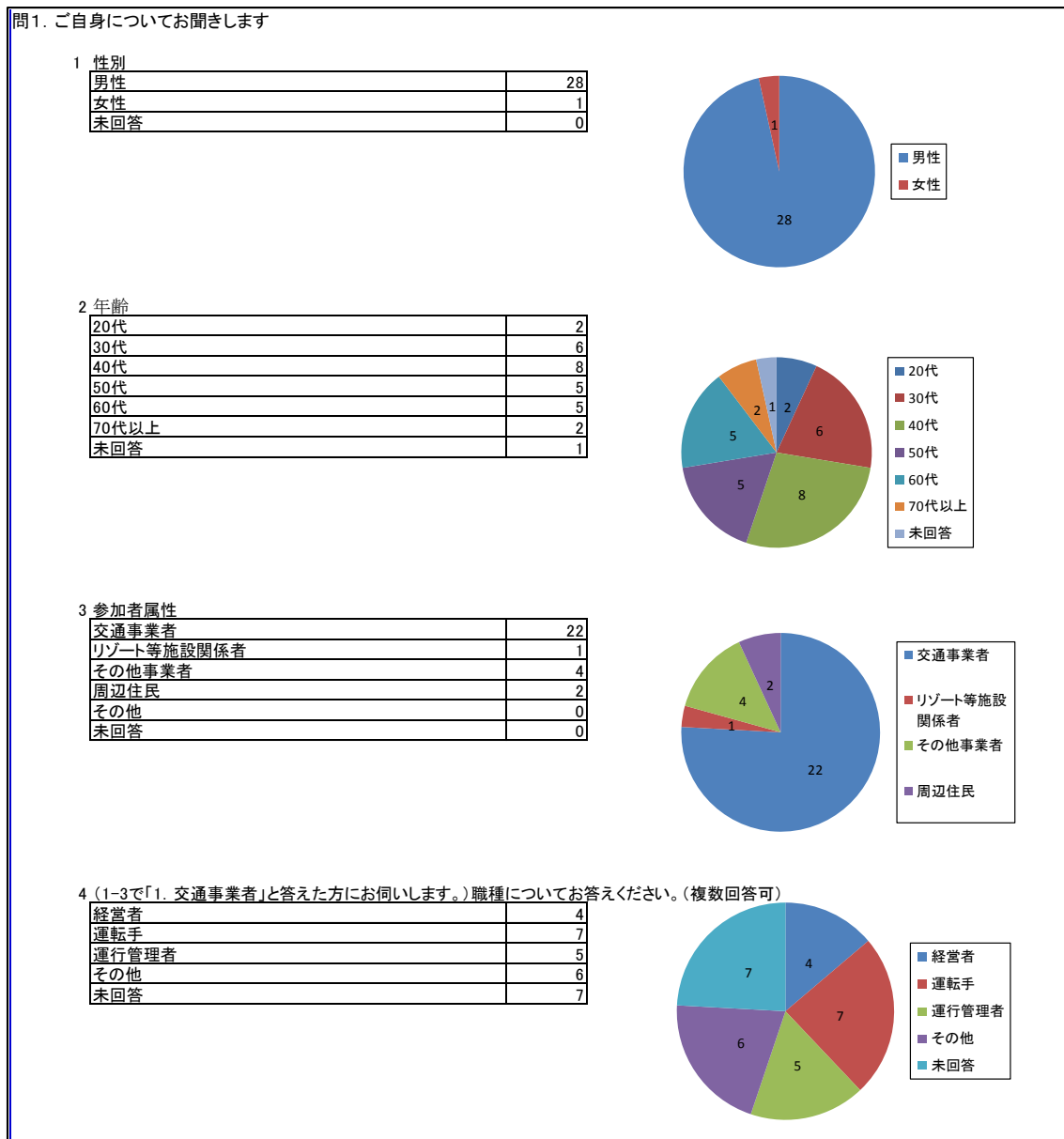


図 3-1.3.②-1 モニターの属性

図 3-1.3.②-2 に自動運転等に対する関心度や技術レベルの理解度について記す。自動運転に対して興味を持ち、常日頃から情報を集めているモニター数は 9 人、「自動運転に関する情報を見かけることがあり知っている」と回答したモニター数は 18 人となっており、総じて関心があることがうかがえる。一方で自動運転に係る技術レベルについては最も多い回答は「完全無人で特定の場所のみ走行可能と思っていた」と「運転手の補助レベルだと思っていた」がそれぞれ 8 人ずつ回答している。

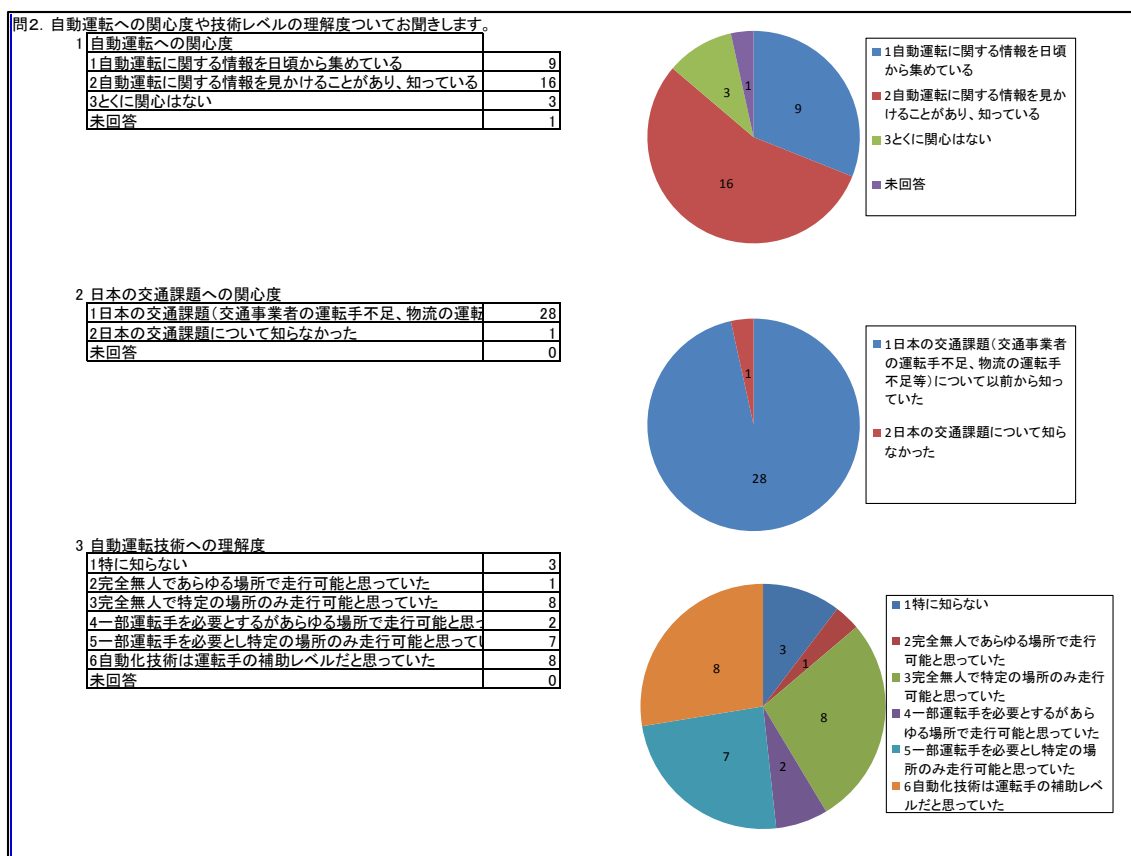


図 3-1.3.②-2 自動運転等に対する関心度

図 3-1.3.②-3 に自動運転バスの自動運転技術に係る試乗前後の心境の変化等を記す。

まず、自動での加速と運転手による加速の比較であるが、「変わらなかった」と回答したモニター数は 19 人、「不安だった」と回答したモニター数は 10 人となっている。

自動で車線を維持する技術については 29 人中 23 人が試乗前は「懐疑的で不安だった」と回答しており、自動での加速よりも不安に感じていたことがわかる。一方、試乗後は 29 人中 28 人が「信頼できる技術であり安心を覚えた」と回答している。

自動で車線を変更する技術については、29 人中 25 人が試乗前は「懐疑的で不安だった」と回答しているが、試乗後は 24 人が「信頼できる技術であり安心を覚えた」と回答している。

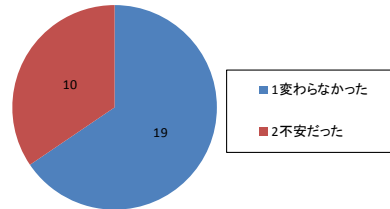
車線維持技術及び車線変更技術について、試乗後は「信頼できる技術であり安心を覚えた」と回答しているモニターが過半数の結果となっているが、無人バスを想定した場合「車掌など車内に人がほしいと思う」と回答した人数は 21 人となっている。

自動でバス停に正着する技術に関しては、22 人が「懐疑的で不安だった」と回答しているが、試乗後は 24 人が「信頼できる技術であり安心を覚えた」と回答している。また、「自動正着後、バスと歩道の距離は乗降しやすい距離となっていたか」という質問には 25 人が「乗降しやすい十分な距離」であったと回答している。

問3. 試乗していただいた自動運転バスの自動運転技術についてお伺いします。

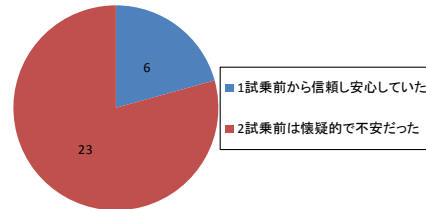
1 自動での加速と運転手の運転の比較

1 変わらなかった	19
2 不安だった	10
未回答	0



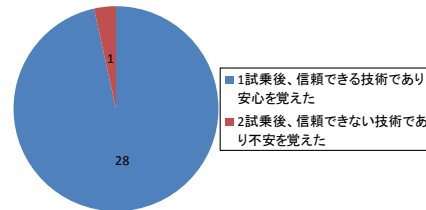
2 自動で車線を維持する技術について、試乗前どのように思っていたか

1 試乗前から信頼し安心していた	6
2 試乗前は懐疑的で不安だった	23
未回答	0



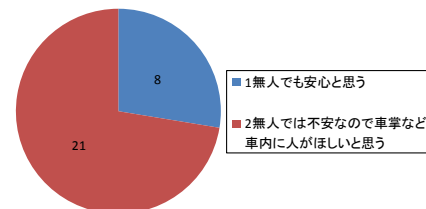
3 自動で車線を維持する技術について、試乗後どのように思ったか

1 試乗後、信頼できる技術であり安心を覚えた	28
2 試乗後、信頼できない技術であり不安を覚えた	1
未回答	0



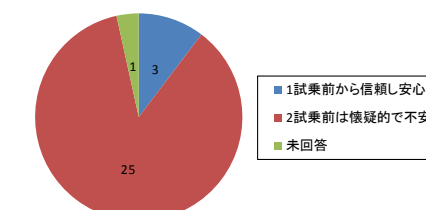
4 無人の自動運転バスを想定した場合、車線に合わせた走行の自動化についてどのように思うか

1 無人でも安心と思う	8
2 無人では不安なので車掌など車内に人がほしいと思う	21
未回答	0



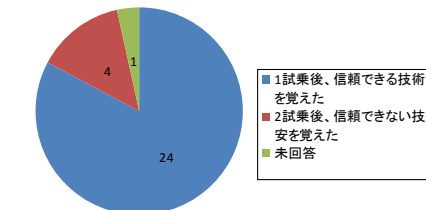
5 自動で車線を変更する技術について、試乗前どのように思っていたか

1 試乗前から信頼し安心していた	3
2 試乗前は懐疑的で不安だった	25
未回答	1



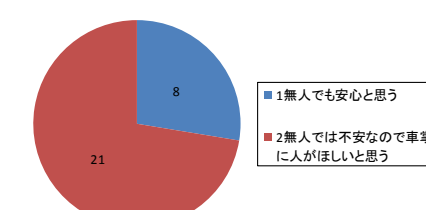
6 自動で車線を変更する技術について、試乗後どのように思ったか

1 試乗後、信頼できる技術であり安心を覚えた	24
2 試乗後、信頼できない技術であり不安を覚えた	4
未回答	1



7 無人の自動運転バスを想定した場合、車線変更(障害物回避)の自動化についてどのように思うか

1 無人でも安心と思う	8
2 無人では不安なので車掌など車内に人がほしいと思う	21
未回答	0



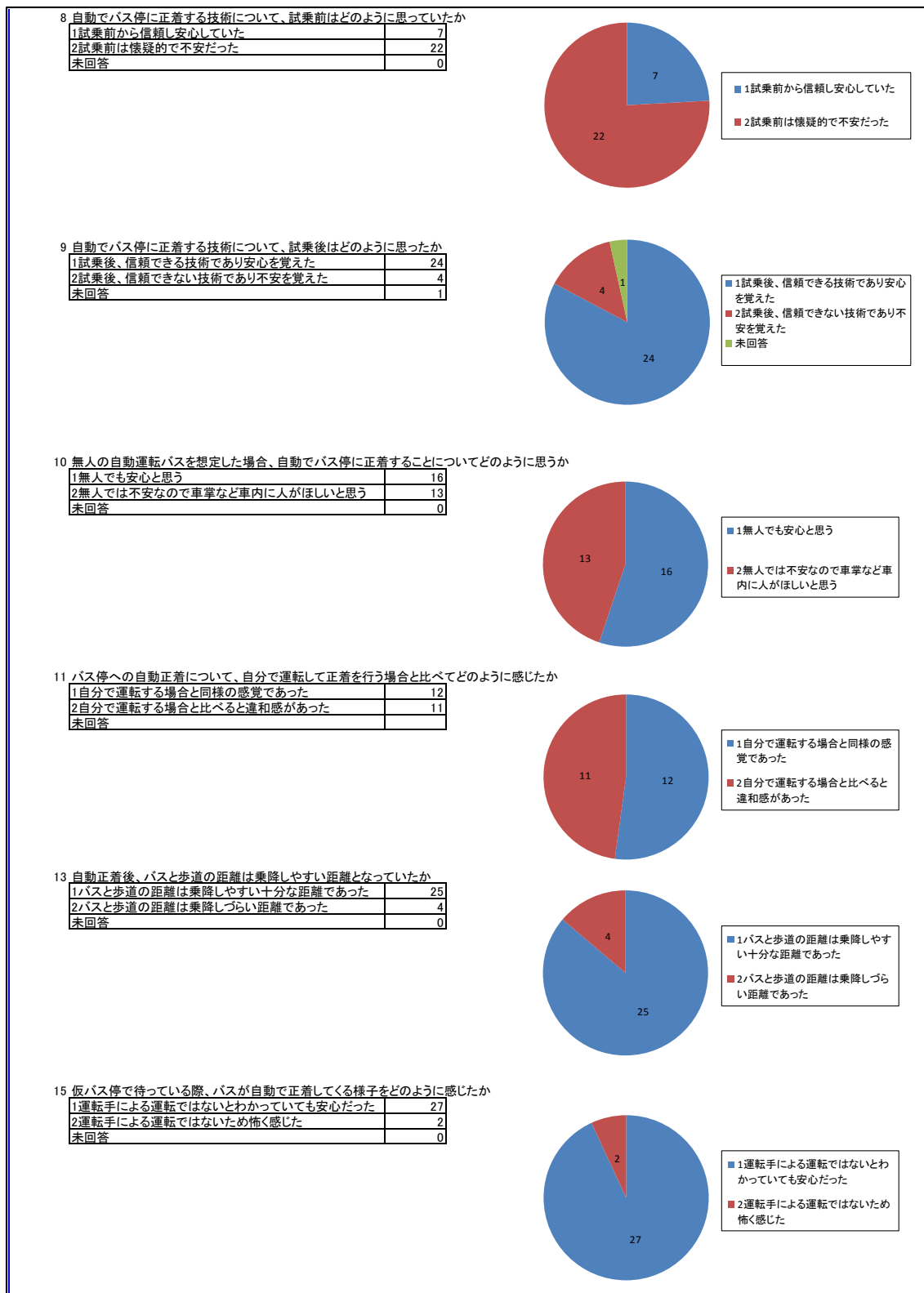


図 3-1.3.②-3 自動運転バスの自動運転技術に係る試乗前後の心境の変化等

図 3-1.3.②-4 にて自動運転バスに搭載していた車内サービス関連システムについてのアンケート内容と回答結果を示す。

コミュニケーションロボットを活用した車両情報伝達システムについて「十分に伝えられるものであった」と回答している人数が14人、「一部不十分であった」と回答している人数が11人、「不十分であった」と回答している人数が1人であった。「一部不十分であった」と回答している理由は「後方の座席まで聞こえない」、「聴覚障害者への配慮が必要」というものである。「運転手が担っていた車内対応はロボットにより代替可能であったか」という質問に対しては14人が「代替可能であった」と回答し、15人が「代替できないものもあった」と回答している。「代替できないもの」として考えられる項目として「非常時の対応」を15人のモニターが回答している。

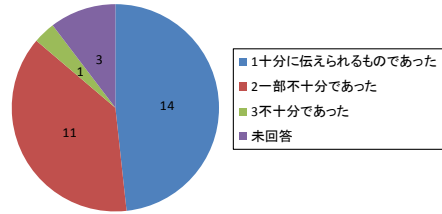
乗客みまもりシステムについては「利用できる、利用したいと思った」と回答したモニター数は26人となっている。なお、無人を想定した場合に乗客みまもりシステムで対応が難しいと思われる事については、運賃收受、車内トラブル、突然席を立つ人への対応等があげられている。

車両状況みまもりシステムについては「車両状況と走行状況を十分に把握することが可能である」と回答した人数が16人、「十分に把握することは難しい」と回答した人数は5人である。「エンジントラブルやブレーキトラブル等の情報の伝達がうまくいくのか?」という意見があった。

問4. 試乗していただいた自動運転バスの車内サービスについてお伺いします。

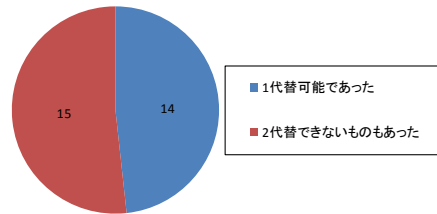
1 ロボットの車内案内について、乗客に車両の運行状況などの情報を十分に伝えられるものであったか

1十分に伝えられるものであった	14
2一部不十分であった	11
3不十分であった	1
未回答	3



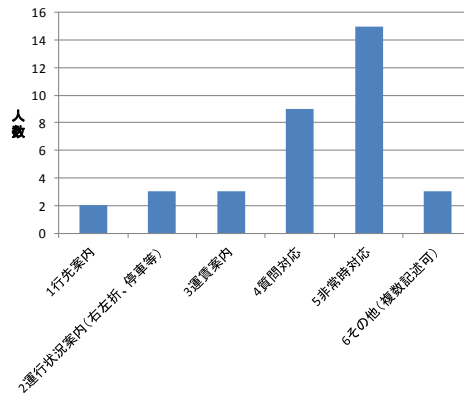
2 自動運転バスを想定した場合、運転手が担っていた車内対応はロボットにより代替可能であったか

1代替可能であった	14
2代替できないものもあった	15
未回答	0



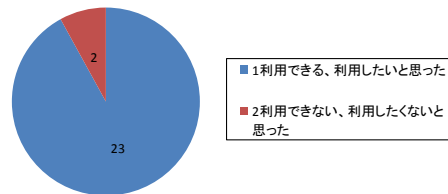
3 (4-2で2と答えた方にお伺いします。)代替できないと考えられるものにはどのようなものがあったか

1行先案内	2
2運行状況案内(右左折、停車等)	3
3運賃案内	3
4質問対応	9
5非常時対応	15
6その他(複数記述可)	3



4 乗客みまもりシステムについて、乗客のみまもりに利用できる、利用したいと思ったか

1利用できる、利用したいと思った	23
2利用できない、利用したくないと思った	2



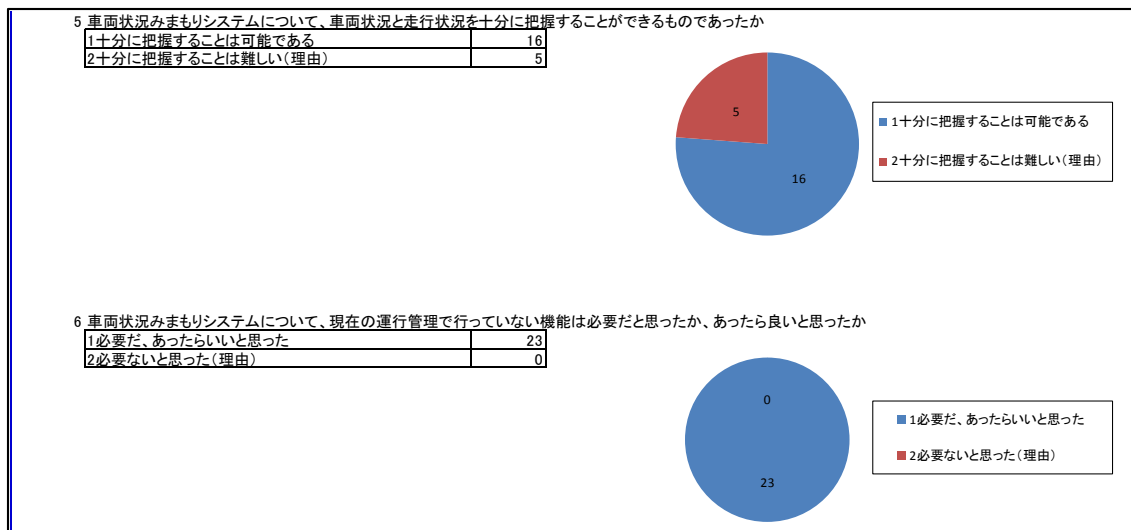


図 3-1.3.②-4 自動運転バスに搭載していた車内サービス関連システムについて

③ ヒアリング結果

上記のアンケートだけでなく、1度の試乗会でおおよそ20分程度のヒアリングも実施した。以下にそれぞれの項目に関するヒアリング内容をまとめたものを記載していく。

(a) 車線維持制御機能について

質問事項	モニターからの回答
自動車線維持を不安に感じたことはなかったか。どこに不安を感じたか。	・周りの車との距離感が近く感じた。
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	・イレギュラーな落下物への対応必要。 ・車の割り込みに対応できないと厳しい。 ・歩道などの情報も把握が必要。

(b) 車線変更制御機能について

質問事項	モニターからの回答
車線変更する際、不安に感じたことはなかったか。どこに不安を感じたか。	・車線変更してから戻るタイミングが早い気がした。ぶつかるのではと思った。 ・車線変更時の動きが少し急すぎた。
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	・駐車車両が停まっているだけでなく、急に発進するときもあるので対応が必要。 ・急な動きには対処できるのか。飛び出しなどへの対応は急になると思う。

(c) バス停への正着制御機能について

質問事項	モニターからの回答
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	<ul style="list-style-type: none">・バス停に一般車両が路駐しているときはどうなるのか気になる。現状、実態は路駐が多くある。・車内が大きく揺れた時の車内事故が心配である。速度の減速から正着までGを与えないように出来ると良い。・バス停はまっすぐの縁石のところばかりではない。そのような場所で実用化できるのか気になる。
その他意見等	<ul style="list-style-type: none">・車内で席をたって移動する乗客の対応策も必要になる。

(d) 車両状況伝達システムについて

質問事項	モニターからの回答
従来は運転手が担っていた仕事を乗客応答システムで代替可能であったか	<ul style="list-style-type: none">・ロボットの声はなじみない声だったので聞き取れない。また、目的地までどのくらい時間がかかるのか聞けたらよい。・目的地を運転手に伝えて降りるところを教えて欲しいとっておくと、運転手は教えてくれる。ロボットにもそこまでやってほしい。
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	<ul style="list-style-type: none">・中国などの海外の方が乗ってくる。中国語で言われても良く分からないため対応できない。これが対応できると良い。・運賃収受の対応ができないと実用化のイメージがわからない。・加速する時、減速する時等、車両の状況をもっと案内する必要があると感じた。
その他意見等	<ul style="list-style-type: none">・バスが遅れる等の情報を乗客にロボットが伝えられるようにできるとよい。

(e) 乗客みまもりシステムについて

質問事項	モニターからの回答
あったらいいなと思う機能はあるか	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急時の対応については、無人となれば最寄りの警察等との連携体制を整えてほしい。 ・乗客とリアルタイムで通話できる機能。
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	<ul style="list-style-type: none"> ・運賃収受をどう行うかが課題。

(f) 車両状況みまもりシステムについて

質問事項	モニターからの回答
実用化にあたり問題となる点があるとしたら何か	<ul style="list-style-type: none"> ・車内の温度があるとよい。これが見える形であれば運行管理側としてはよい。暑さ、寒さがみえるようにしてもらえるとよい。自分の感覚と客の感覚と違いがあるので、快適な温度を示せると便利である。 ・機器のバグなどがあったらどうするのか。メンテナンスも含めた整備が気になる。
その他意見等	<ul style="list-style-type: none"> ・外部から接触されたときに確認できる技術があるとよい。 ・個人が保有しているスマホの健康情報などが車両と連携して乗客の健康にも注意できるようになるとよい。

④ 社会受容性についてのまとめ

今回実施した受容性調査を通じて図 3-1.3.①-1 で示す心理状態の変化に近い形で搭乗者の自動運転技術に対する信頼感が発生していることがわかった。今回の実験では運転席に運転手が座っているにも関わらず、自動で走るバスに対して多くのモニターは試乗前に不安を感じていた。しかし、自動走行バスに試乗いただき、自動走行システムによる加速、車線維持、車線変更、バス亭への正着制御技術などを体験していただいた後は「信頼できる技術であり安心を覚えた」と多くのモニターが回答している。しかし、100%のモニターが「安心を覚えた」という回答ではないため、今後は試乗者全員が安心感を持ってもらえるように技術を向上させていくとともに、社会における自動運転の認知度や受容性を高める活動が必要になると考える。

車内サービスに係るシステムについては、今回の実証実験でモニターから非常に貴重な意見をいただくことができた。無人で走る自動走行バスを想定した場合、総じて多い意見だったのが非常時対応の必要性である。今後、車内サービスに係るシステムは、精度の向上はもちろんの事であるが、運賃収受等、どのようにして確実に実施するか、そのための仕組みづくりが重要な課題であると認識した。

3-2. 次年度以降の実証実験場所候補の調査

(1) 調査の概要

次年度以降の沖縄実証実験候補地について、2016年度は本島南城市にて実証実験が実施されたため、2017年度以降の実証実験候補地として沖縄県の離島に関し調査をおこなった。調査対象の離島は石垣島、宮古島、久米島、波照間島、多良間島である。調査にあたっては、道路線形や交通状況、実験路線距離およびバス利用者の有無を中心に文献とインターネット等にて調査をおこなったが、石垣島と宮古島については現地調査をおこなった。

(2) 調査結果

各離島における調査結果を表3-2.3-1および表3-2.3-2にしめす。

表 3-2.3-1 調査結果 1

項目		石垣島		宮古島
現地調査		実施日03/21		実施日03/21
想定 走行ルート		北方面 国道390号	南方面 国道390号 および県道79号	県道190号線 県道202号線 県道235号線
道路	道路幾何構造 (車線数、交差点、信号)	国道仕様 信号なし 無信号交差点	国道仕様 信号あり、交差点あり	信号あり、交差点あり
	道路構造ほか (白線工、舗装種別、路肩、歩道)	白線あり 一部歩道あり	白線あり 歩道あり	白線あり 一部歩道あり
	道路施設 (橋梁、トンネルなど)	なし	なし	なし
既存バス路線		あり		あり
交通	バス停	標識のみ	バスベイあり/屋根付き	空港 観光地
	乗り合い旅客自動車 運送事業者	14		8
	交通拠点など	空港 観光地	空港 役場 観光地 フェリーターミナル	空港 リゾートホテル 観光地、ドイツ村
需要予想		観光、北部地区 需要は低い	都市部 需要は高い	観光中心 需要普通、シフト転換予測困難
予測利用者		一部旅行者	住民 旅行者	一部旅行者 ホテル関係者
評価		×	◎	△

表 3-2.3-2 調査結果 2

項目		久米島	波照間島	多良間島
現地調査		WEB等	WEB等	WEB等
想定 走行ルート		県道89号線		県道205号線
道路	道路幾何構造 (車線数、交差点、信号)	一部あり	要調査	一部あり
	道路構造ほか (白線工、舗装種別、路肩、歩道)	白線有	要調査	要調査
	道路施設 (橋梁、トンネルなど)	なし	なし	なし
交通	既存バス路線	あり	有償バスあり (乗り合い小型バス)	要調査
	バス停	バスベイなし	要調査	要調査
	乗り合い旅客自動車 運送事業者	4	2	3
	交通拠点	空港 役場	空港なし 港 観光地	空港 港
需要予想		需要は普通 シフト予測困難	需要は少ない シフト予測困難	需要は少ない シフト予測困難
予測利用者		住民	住民 一部旅行者	住民
評価		△	×	△

調査の結果、実証実験候補地として、石垣島の石垣空港と石垣市街地間の公道 390 号沿線が利用者数や道路整備状況等で最も実験候補地としてふさわしいと思われる。

(3) 石垣島の詳細調査

空港にアクセスできる国道 390 号線を中心に、空港から北に向かうルート（北ルート）と空港から石垣市街地・石垣フェリーターミナルルート（南ルート）の 2 ルートの詳細調査を実施した。調査したルートを図 3-2.3-1 にしめす。

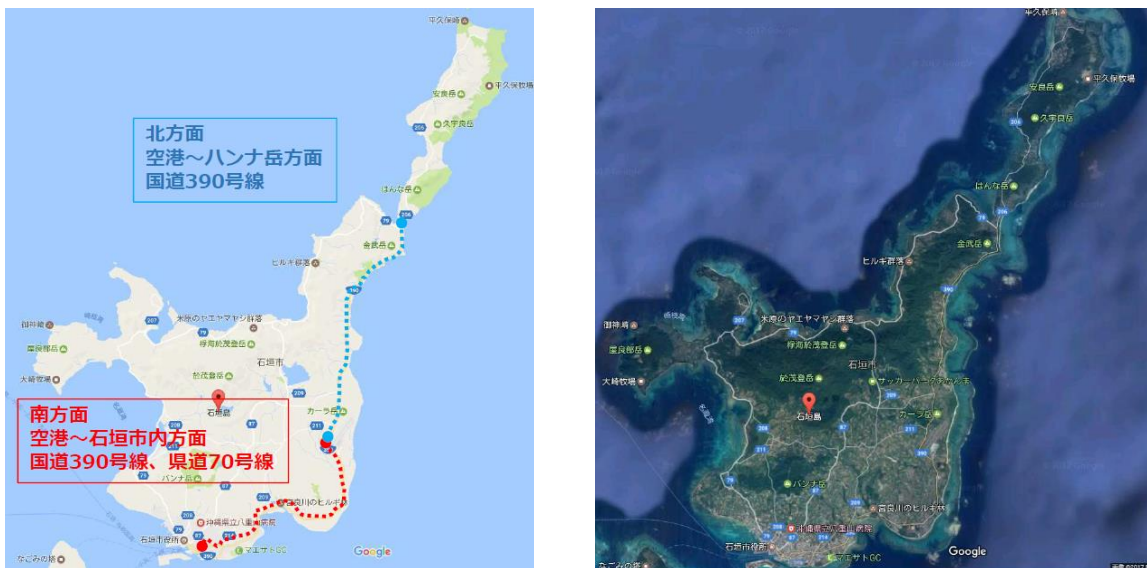


図 3-2.3-1 石垣島調査ルート

この結果、実証実験ルートとしては石垣空港から石垣市街地・フェリーターミナル間のルートが次年度の実証実験場所としてふさわしいと考えられるが、市街地中心を走行する必要があるため、この間の自動運転は難しいと思われるため、部分的に手動運転での走行をおこなう必要があると考えられる。

以下に石垣空港—石垣市街地ルート（南ルート）の優れている点をまとめる。

走行環境面として優れている点

- ① 本推奨ルートは、空港から石垣市に向かうルートであり、多くの利用者が見込まれるとともに、潜在ニーズの掘り起こしが期待される。
- ② 路線バスが通っており、住民（高齢者など）だけでなく旅行者にも親しみがある。
- ③ 国道仕様で歩道が設置されており、歩車分離が確保でき、安全性が高い。
- ④ 車道の維持管理状況（舗装状況、道路附属施設等）が非常に良い。
- ⑤ 白線も明確になっている。
- ⑥ バス停留所は、屋根付きで切欠きがあり、一般交通への影響が少ないルートとして、人々が最先端の技術を身近で見、体験できる交通施設となり得る可能性が高い。
- ⑦ 景観的にも、次世代交通導入にふさわしい環境となっている。
- ⑧ 石垣島のさらなる観光資源として、日本全体に発信することができる。

又技術的面でふさわしい点

- ① 走行ルート路線の舗装状況が非常に良好である。
- ② 歩道設置されており、歩車分離が確保でき、安全性が高い。
- ③ フェリーターミナル、空港ともに十分な土地（発着場所としての）を確保できる。
- ④ フェリーターミナル、空港とも、自動走行車両の正着可能な距離を確保できる。
- ⑤ 現状の「自動走行技術」で路線の70%程度以上の自動走行化は可能
- ⑥ 石垣市内の交通、交差点付近は、運転手による操舵を行う
- ⑦ 実際的なモーダルシフトの円滑性の確認の検証ができる。

参考に北ルートと南ルートの主要場所の写真を図3-2.3-2にします。



石垣空港



石垣空港—国道390号線分岐点



南ルート：市街地前



南ルート市街地



南ルート市街地



南ルート フェリーターミナル



北ルート 1



北ルート 2

図 3-2. 3-2 石垣島実証実験候補ルート

第4章 まとめ

「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における沖縄県でのバス自動運転における社会適応性に係る調査」を実施し、現時点での自動運転バスの一般公道での制御性、およびサービスの有用性を確認した。

今回の自動運転バスの制御技術は大きく分けて、高精度なRTK-GPSにより自己位置を把握しながら、事前に定めた目標の軌跡に追従させる車線維持制御、LiDARにより検出した距離に従って障害物を自動回避する車線変更制御、同じくLiDARにより検出した縁石までの距離に従って縁石にバスを近づける正着制御の3つに分類され、いずれにおいても、道路の傾きや凹凸が連続的に変化する一般公道において、精度高く安定的に制御できることが実証された。

また、車両情報伝達サービスやみまもりシステムといったサービス面においても、車両との連携が取れており、乗客や運行者にとって有用なシステムであることを確認できた。

試乗会を通して、上記車両の制御性とサービスが、乗客にとって満足できるものであり、試乗前のイメージと異なり、自動運転に対する受容性を広げることのできるシステムであることを確認できたため、大変有意義な実証実験となった。