

平成29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／大規模実証実験／次世代都市交通
／次世代都市交通システム正着制御に係る
センシング技術や制御技術の実用化」
報告書

平成30年3月30日

株式会社ジェイテクト

本報告書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務として、株式会社ジェイテクトが実施した「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／大規模実証実験／次世代都市交通／次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化」の平成 29 年度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、NEDO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、NEDOの承認手続きが必要です。

目次

はじめに.....	1
第1章 正着制御に関する課題調査.....	2
1.1 目的.....	2
1.2 試験車両・システム構成.....	2
1.2.1 試験車両.....	2
1.2.2 正着制御システム.....	3
1.2.3 操舵系システム.....	5
1.2.4 制動系システム.....	6
1.3 正着制御アルゴリズムの改善.....	8
1.3.1 制御ゲインの最適化.....	8
1.3.2 偏差確認位置の最適化.....	10
1.3.3 横偏差算出の最適化.....	12
1.3.4 操舵系のあそび補償.....	13
1.3.5 制動制御.....	15
1.3.6 正着時の幅寄せ量拡大.....	16
1.4 今後の課題.....	17
1.4.1 車両傾き角.....	17
1.4.2 乗り心地.....	17
1.4.3 エアディスクブレーキ搭載検討.....	18
第2章 インフラ整備の最小化に向けた課題調査.....	23
2.1 目的.....	23
2.2 側方カメラによる白線検出.....	23
2.2.1 センシングシステムの構成.....	23
2.2.2 誤差要因及び白線検出の高精度化.....	25
2.2.3 横変位量の検出精度及び車両傾き角.....	26
2.3 歩道縁石検出手法の検討.....	28
2.3.1 センシングシステムの構成.....	28
2.3.2 歩道縁石検出結果.....	29
2.3.3 白線検出と歩道縁石検出の統合化.....	30
2.4 イメージセンサの課題まとめ.....	32
2.5 LiDARによる歩道縁石検出手法の検討.....	33
2.5.1 LiDARの基本性能検証.....	33
2.5.2 測距性能評価方法.....	34
2.5.3 測距性能評価結果.....	35
2.5.4 LiDARの基本性能まとめ.....	38

第 3 章 乗用車と共用できる ECU 構造の検討	
3.1 目的	39
3.2 基本構成	39
3.3 まとめ	40
第 4 章 運転者の操作と自動制御の利点の両立に関する研究	41
4.1 目的	41
4.2 バス運転手による実車走行実験	42
4.2.1 実車走行実験	42
4.2.2 被験者	42
4.2.3 実験条件	43
4.2.4 走行実験結果	45
4.2.5 まとめ	48
4.3 シェアードコントロールの検討	49
4.3.1 シェアードコントロールに関する整理	49
4.3.2 シェアードコントロールのプロトタイプシステム	51
4.4 まとめ	55
第 5 章 まとめ	55

はじめに

事業の目的と実施内容について

本事業は、内閣府が関係省庁などと連携して進める「戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）・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、次世代都市交通システムとして位置づけられるART（Advanced Rapid Transit）バスの正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討を行ったものである。

平成28年度の「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・検討における次世代都市交通システム正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術に関する調査」において、操舵系の応答遅れの影響および快適な乗り心地を実現するための目標指標が示唆された。本事業では、これまでの成果を活かし、以下の4項目について検討・開発を行い、性能評価を実施したので報告する。

第1章では、大型バスの正着精度向上と加減速度およびジャークの抑制制御に関する調査・検討について報告する。路線バスとして使用されている大型バスに操舵制御、制動制御できるよう改造した実験車両において、操舵系の応答遅れの補償と制動装置との連携制御の評価を実施したので報告する。

第2章では、インフラ整備の最小化に向けた調査・検討について報告する。磁気マーカや固有の誘導線などを必要としない方策を検討し、試作評価した内容を報告する。

第3章では、操舵系制御器の実用化に向け、自動運転で必須となる機能安全対応技術や操舵・制動の統合連携制御を織り込んだ乗用車と共用可能な自動運転対応制御システムの検討を行ったので報告する。

第4章では、運転者の操作と自動制御の利点の両立に関する研究について報告する。正着に関する知見を得るために路線バスの運転者による実車実験を行い、その際の運転行動および車両情報を計測して、実現すべき目標機能やシェアードコントロールについて検討を行った。またシェアードコントロールの基本コンセプトを示すとともに、プロトタイプシステムを提案し、ドライビングシミュレータを用いて機能確認した結果を報告する。

第1章 正着制御に関する課題調査

1.1 目的

ART (Advanced Rapid Transit) バスの自動走行システムの実現に向けた課題の一つに、速達性実現がある。目標停車位置(バス停)に対し数センチオーダー(最終目標:40±20mm)での正着を実現する必要がある、その実現を目指し開発中の操舵・制動制御について報告する。本章の報告内容は、平成28年度「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・検討における次世代都市交通システム正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術に関する調査」[1](以下、平成28年度報告書)の第1章に記載した内容をベースに本年度開発した内容である。

1.2 試験車両・システム構成

本節では、本年度正着制御開発で使用した試験車両と、制御実現のため搭載したシステムについて示す。1.2.1項では、使用した試験車両について言及する。1.2.2項では、正着制御システム(上位制御部)、1.2.3項では操舵系システム、1.2.4項では制動系システムに関連するシステム構成・制御構成に言及する。

1.2.1 試験車両

試験車両は、単車バス(日野自動車株式会社保有、以下大型バス)を使用した。図1.2.1-1に、車両外観、表1.2.1-1に、試験車両主要諸元を示す。重量は、運転者1名乗車時の実測値である。



図 1.2.1-1 試験車両(大型バス)外観

表 1.2.1-1 試験車両(大型バス)主要諸元

ホイールベース (mm)	6,000
トレッド (mm)	フロント: 2,065、リヤ: 1,820
重量	前軸荷重: 3545kg, 後軸荷重: 6590kg

1.2.2 正着制御システム

本章で示す正着制御システムの調査研究において使用したシステム構成を示す。本章の正着制御では、車両前方に設置したカメラからの自車位置検出情報により実施した。

(i) 正着制御システム（上位制御部）の構成

図 1.2.2-1 に試験車両における正着制御システムの構成を示す。正着制御の演算は、上位制御部（dSPACE 社製 MicroAutoBox II^(※1)）で実施する。白線との距離算出の機能を有するカメラ (Mobileye 社製 ME560^(※2)) から、白線との距離情報を取得する。ジャイロセンサ (MEMSIC 社製 NAV440^(※3)) は車室内床面の車両重心位置に設置し、車両角度、角速度、加速度を取得する。また車輪パルス情報を取得し、上位制御部にて車速、走行距離を算出する。

上位制御部で算出した目標操舵角、目標減速度をそれぞれ操舵アクチュエータ ECU、制動制御 ECU に指示する。

(※1) dSPACE GmbH の商標 (※2) Mobileye, Inc の商標 (※3) MEMSIC, Inc の商標

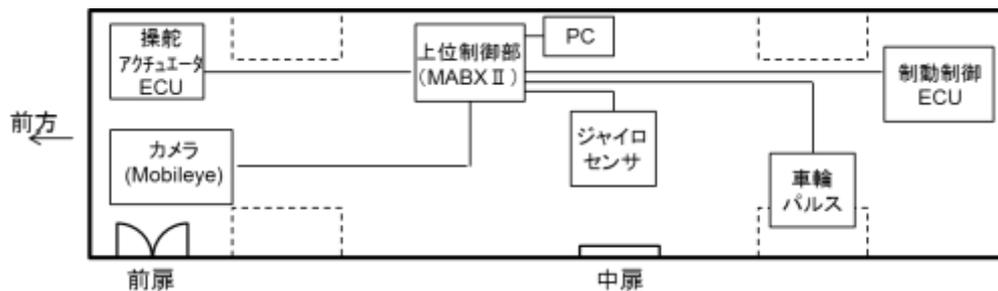


図 1.2.2-1 システム構成

(ii) 正着制御システム(上位制御部)の制御アルゴリズム

正着制御における目標操舵角の算出は、平成 28 年度報告書 1.2.1 項 (iii) と同様の手法を用いた。本制御では、仮想的に設けられた参照軌道上を走行する参照車両の軌跡（目標軌跡）を追従させる Path Following 制御[2]を用いている。図 1.2.2-2 に制御ブロック図を示す。目標軌跡は、走行距離に対する白線と車体（カメラ搭載位置）の横変位をテーブルデータとして持たせている。前方カメラより算出した白線と車体の距離を実車両横変位とし、目標軌跡と実車両横変位の差を横偏差 e_2 として算出する。実車両傾き角は、前方カメラより算出される傾き角を用い、目標傾き角と実車両傾き角の差を傾き角偏差 e_3 として算出する。本年度の操舵に関する開発は、横偏差 e_2 算出に関する方策、Path Following 制御のゲインに関する方策、Path Following 制御で算出した目標タイヤ転舵角から目標操舵角に換算する部分での方策であり、具体的には、1.3 節で示す。

正着制御における目標操減速度の算出方法については、1.2.4 項で示す。

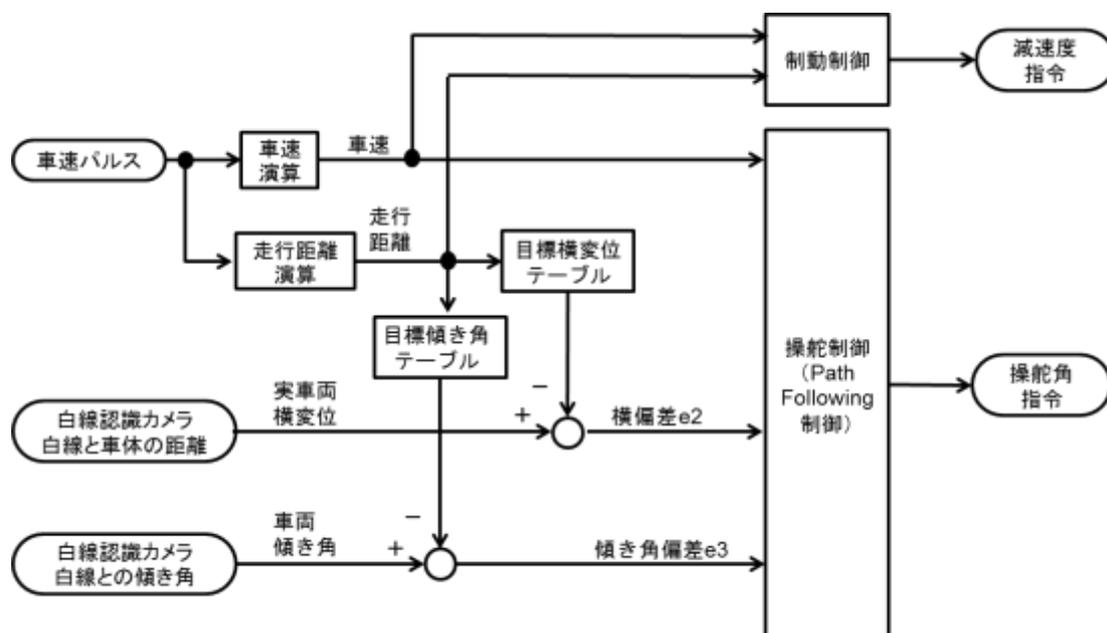


図 1.2.2-2 正着制御構成 (制御ブロック図)

1.2.3 操舵系システム

(i) 操舵系システム構成

平成 28 年度報告書 1.2.1 (ii) と同様、ステアリングコラムに操舵アクチュエータを取り付けた。図 1.2.3-1 に操舵系の構成概念図を示す。ステアリング機構はボールねじ式油圧パワーステアリングであり、ステアリングコラムからの入力が入力がピットマンアームの揺動運動となる。ピットマンアームは、ドラッグリンクを介し右輪ナックルアームに接続され、右輪がキングピン周りに転舵される。右輪はタイロッドを介して左輪と接続され、左輪が転舵される。また、タイヤ転舵角の代用特性として、タイロッド変位を取得した。平成 28 年度報告書 1.2.2 (ii) と同一の構成である。

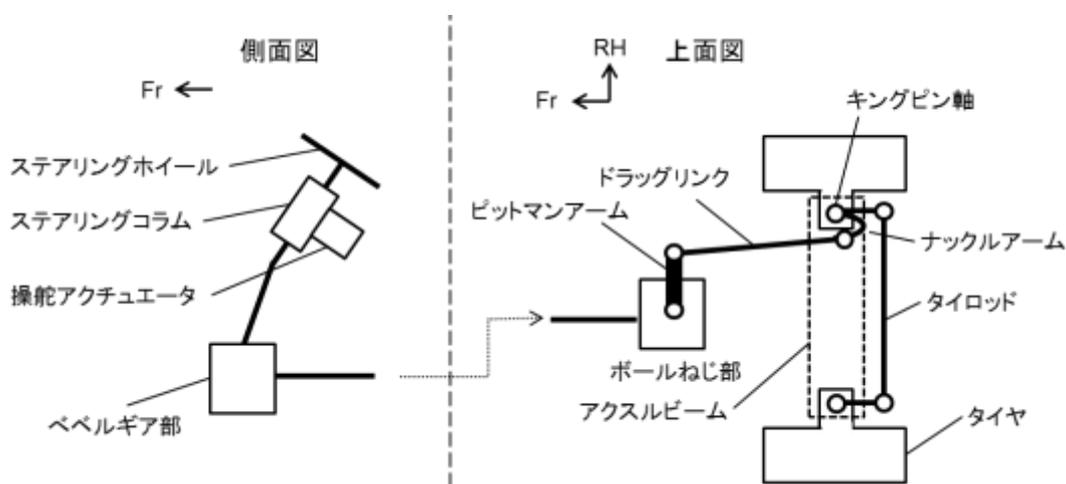


図 1.2.3-1 操舵系構成概念図

(ii) 操舵系システム制御構成

操舵系システムは、上位制御部で算出した目標操舵角の指令を受け、角度制御を行う。角度制御は一般的な PID 制御を用いた。

1.2.4 制動系システム

(i) 制動系システム構成

本試験車両には電子制御ブレーキシステム（WABCO 製 EBS^(※4)）が搭載されており、外部からの制御が可能である。図 1.2.4-1 に制動系システムの構成図を示す。

制動制御 ECU は、上位制御部からの減速度指令を受け、フロント車軸、リア車軸に必要なエア圧を算出し、制動制御ユニットに指令することで、必要な減速度を実現する。

(※4) WABCO Holding Inc.の商標

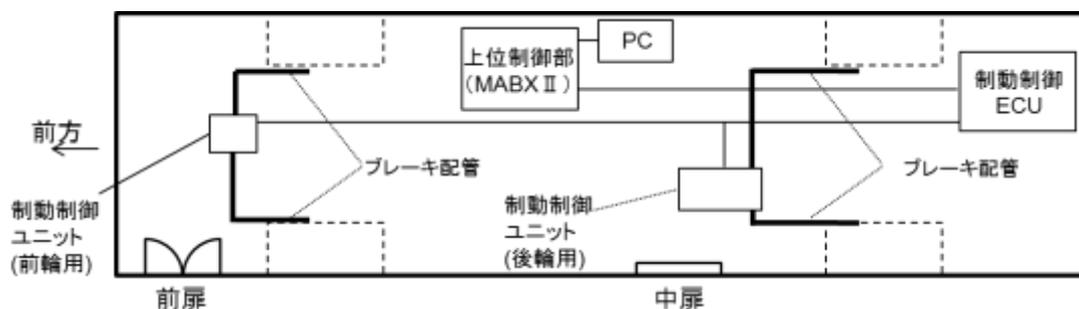


図 1.2.4-1 制動系構成図

(ii) 制動系システムの制御則

本制動制御ユニットは減速度の指令を受けて作動する。環境変化の影響などにより、減速度の指示値と実値に差があることが分かった。指示値と実値を比較すると(表 1.2.4-1)、減速度指示値-0.2 では実値/指示値が 0.98 に対し、減速度指示値-0.5 では実値/指示値が 1.27 となり、線形な変化ではないことが分かる。また実値には、ばらつきがあることも分かった。

表 1.2.4-1 減速度指示値と実値の比較（各 5 回平均）

指示値 [m/s ²]	実値 [m/s ²]	実値/指示値
-0.2	-0.198	0.98
-0.5	-0.636	1.27
-1	-1.25	1.25

上記影響を受けずに、高い停止位置精度を実現するための制御則を構築した。式 (1) に示す通り、走行距離 S に応じて目標停車想定位置 St を与え、その時の車速 v から必要な減速度を算出し、目標減速度として指示する手法である。

$$a = \frac{v^2}{2(St - S)} \quad (1)$$

ただし、 a ：減速度、 S ：走行距離、 St ：目標停車想定位置、 v ：車速

本手法により、実減速度が目標減速度と乖離、またはばらつく状況であっても、常に目標減速度を算出することで、目標減速度は常に走行状況に適した値となり、また連続的な値を得ることが出来るため、ジャークが大きくなることを防げると考える。

上記に加え、目標減速度に対する実値の乖離を抑制する為、目標減速度を補正した（式(2)）。表 1.2.4-1 に示すように、実値/指示値は目標減速度によって値が異なるため、補正值 x は加速度の関数とした。

$$a' = \frac{a}{x} \quad (2)$$

ただし、 a' ：減速度（補正後）、 x ：補正值

1.3 正着制御アルゴリズムの改善

1.3.1 制御ゲインの最適化

平成 28 年度報告書第 1 章での Path Following 制御（以下、従来の制御）では、正着時／正着以外走行時（直線走行時）にかかわらず、目標との横偏差の縮小に寄与する項の制御ゲイン（ k_2 ）は一律であった。しかし、一律のゲインでは、正着時と正着以外走行時のような、走行シチュエーションが異なる場合、どちらにも最適な挙動となる設定とすることが難しかった。一例として、直線走行条件で調整した制御ゲイン（ k_2 ）を用いて正着した際の車両挙動を図 1.3.1-1 に示す。この制御ゲイン設定では、正着時は目標に追従できていないことが分かる。

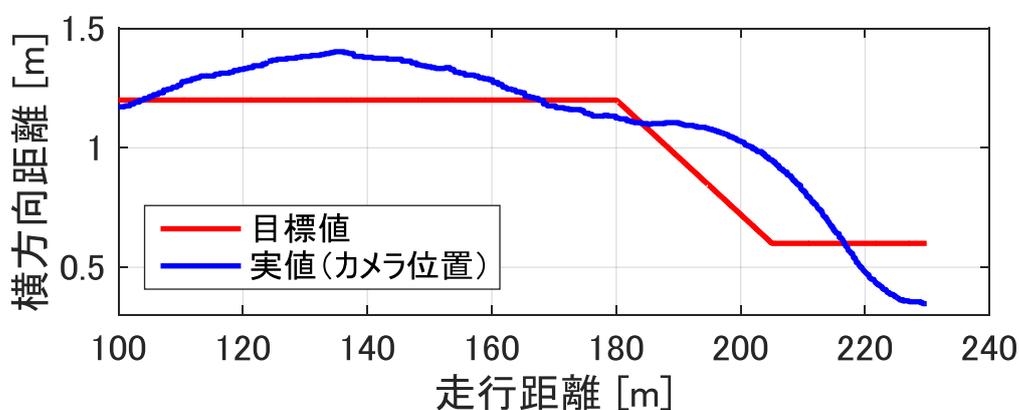


図 1.3.1-1 直線時に合わせたゲインでの挙動

そこで、制御ゲイン（ k_2 ）を「直線走行時」と「正着時」に分け、切替える制御とした。図 1.3.1-2 には、直線走行条件と正着条件のそれぞれで制御ゲインを調整し、切替えを行った際の車両挙動を示す。「直線走行時」、「正着時」共に、目標にある程度追従できており、それぞれのシチュエーションに合わせた最適な車両挙動の実現が可能となった。

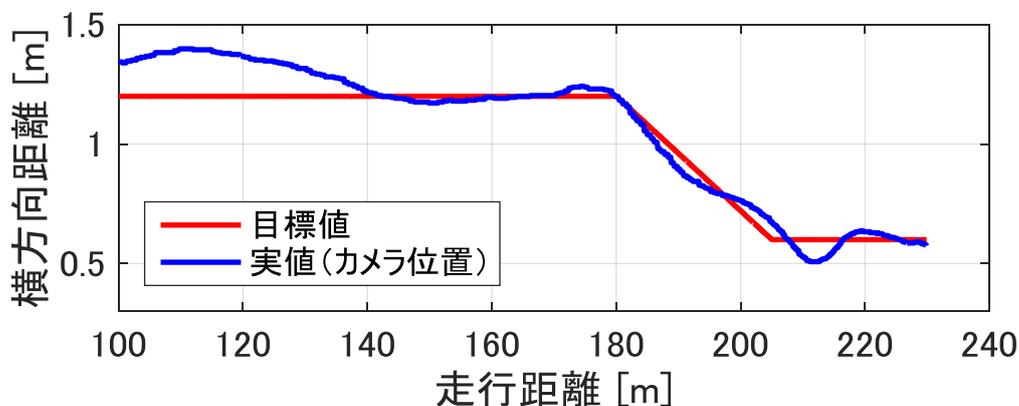


図 1.3.1-2 直線走行時と正着時でゲイン切替えした際の挙動

1.3.2 偏差確認位置の最適化

Path Following 制御における制御変数である横偏差は、車体前端（カメラ位置）での横偏差と車両姿勢角を元に、車両前方での値（以下、この位置を偏差確認位置とする）に変換した値を用いている。これは、車両の応答遅れの補償のために設定するものである。

従来の制御では、正着時／正着以外走行時にかかわらず、偏差確認位置は一律(4.3m 前方)であった。しかし、「直線走行時」と「正着時」では最適値は異なってくると考えられる。よって、走行シチュエーションや車速毎に最適な値を調査した。

まず、「直線走行時」における最適値を調査した。各車速に応じ最適値を定め、設定値の一例として、車速 30km/h 時の偏差確認位置は 15m とした。これにより、直線走行時の車両横方向の振幅を低減することができた。図 1.3.2-1 にその効果の一例を示す。

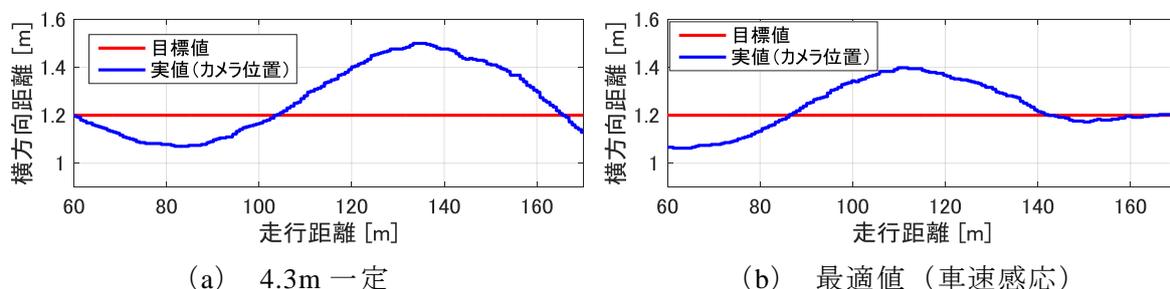


図 1.3.2-1 直線時の偏差確認位置違いによる挙動比較

次に、「正着時」の偏差確認位置について最適値を調査した。直線走行時と同様、車速感応で可変とした。結果、目標軌跡への追従性を向上させることができた。図 1.3.2-2 にその効果の一例を示す。

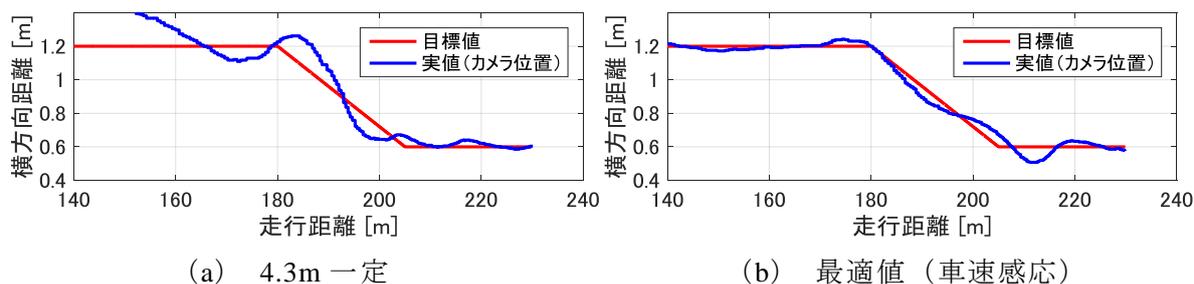


図 1.3.2-2 正着時の偏差確認位置違いによる挙動比較

以上の様に、各シチュエーションにおいて、最適な偏差確認位置を設定することにより、直線走行から正着までの目標追従性を向上させることができた。図 1.3.2-3 にその一例を示す。

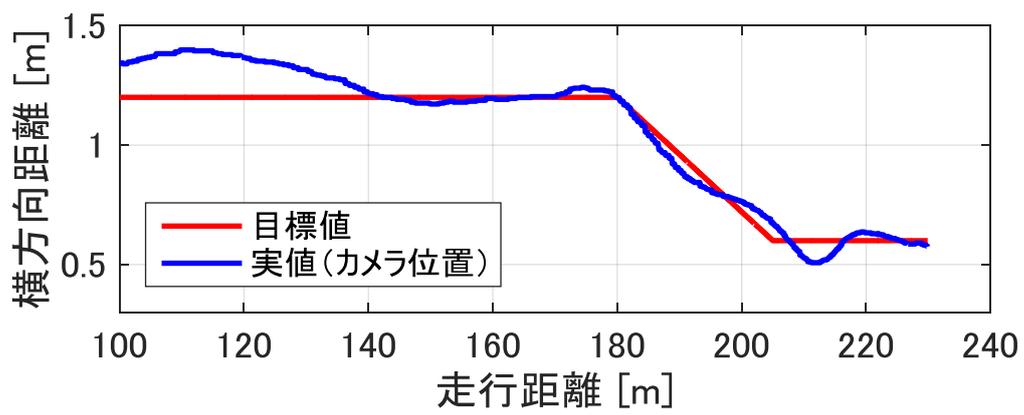


図 1.3.2-3 偏差確認位置の最適値設定による車両挙動

1.3.3 横偏差算出の最適化

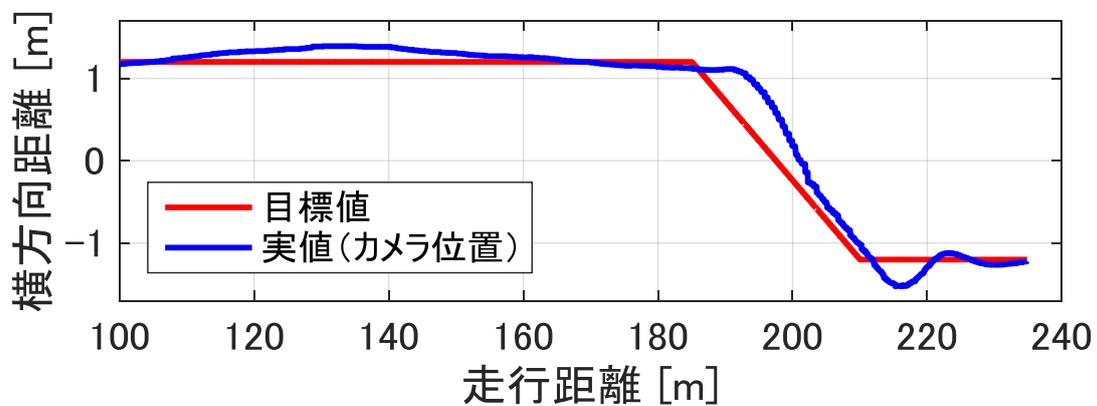
1.3.2 項 では、制御変数である横偏差について、車両前方の値に変換し、制御に用いていた。しかし、目標横位置（目標軌跡）については常に現在の走行距離（走行位置）における値を用いており、車両の応答遅れが大きかった。図 1.3.3-1 (a) に走行軌跡を、式 (1) に横偏差 e_2 の算出式を示す。

$$e_2 = Lt(D) - L(D + F) \quad (1)$$

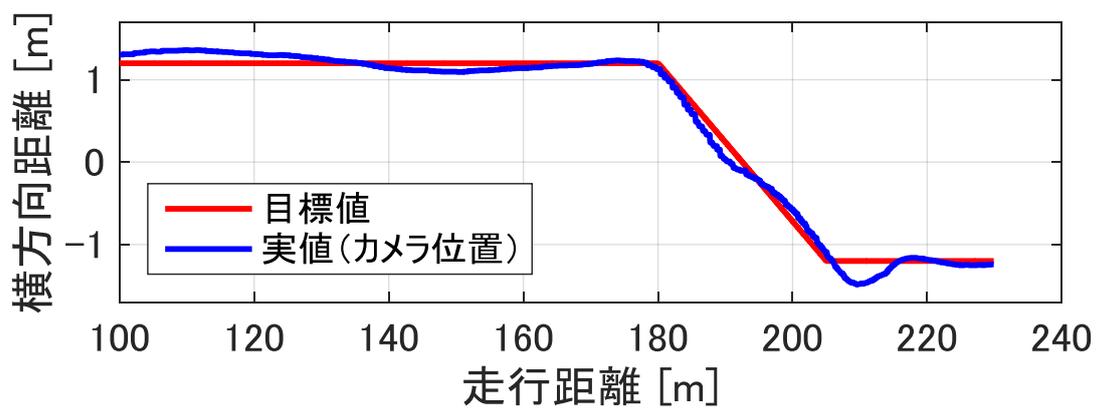
ただし、 e_2 : 横偏差、 Lt : 横方向位置（目標値）、 L : 横方向位置（実値）
 D : 走行距離、 F : 車体から偏差確認位置までの距離

車両の応答遅れを解消するため、横方向位置の目標値についても、横偏差と同様に車両前方（偏差確認位置）の値に変換するようにした。これにより、車両の応答遅れを低減でき、目標追従性が向上した。図 1.3.3-1 (b) に走行軌跡を、式 (2) に横偏差 e_2 の算出式を示す。

$$e_2 = Lt(D + F) - L(D + F) \quad (2)$$



(a) 目標への偏差確認位置追加無し



(b) 目標への偏差確認位置追加有り

図 1.3.3-1 目標横変位における偏差確認位置の効果

1.3.4 操舵系のあそび補償

操舵系（操舵角からタイヤ転舵角）までには、あそびがあり、特に大型車両では、乗用車に比べあそびが大きい傾向にある。その影響により車両挙動に遅れが発生し、制御性が悪くなっていることが懸念された。そこで、操舵系のあそびを補償する制御を検討し実装した。図 1.3.4-1 に、操舵角と転舵角の関係を示す。あそびの影響により、操舵角に比べ転舵角が遅れており、あそびの大きさは操舵角で 11deg 程度と推定した。

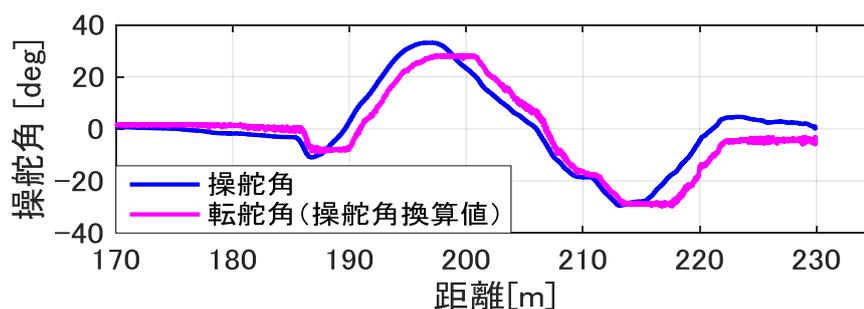
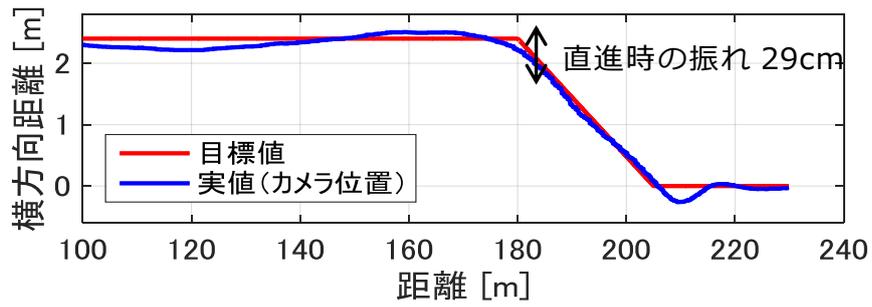
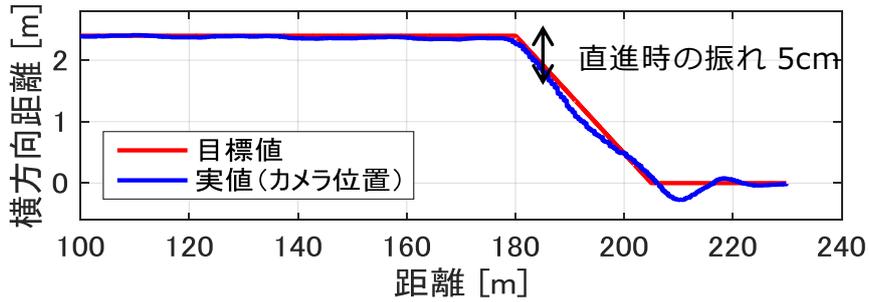


図 1.3.4-1 操舵角と転舵角の関係

上記の関係より、操舵系のあそびを考慮した操舵角指令値を与えるようにした。具体的には、操舵角指令値の方向が反転した際に、反転後の指令値にあそび量を加えるという制御とした。図 1.3.4-2 に、あそび補償有無による車両挙動の違いを示す。特に直線走行時において顕著な効果がみられ、直線走行時の車両横方向の振幅を低減することができた。



(a) あそび補償無し



(b) あそび補償有り

図 1.3.4-2 操舵系あそびを考慮した制御による効果

さらに、表 1.3.4-1 に示すように、操舵系あそびを考慮することにより正着結果が良好となっており、操舵系あそび補償制御の有効性が確認できた。

表 1.3.4-1 操舵系あそび補償有無による正着結果

	操舵系あそび考慮	
	無(N=15)	有(N=23)
OK (前中扉とも)	30%	73%
NG (片扉NG含む)	70%	27%

※幅寄せ量 2.4m 時、OK 条件：目標 $\pm 20\text{mm}$

しかし、現状のあそび補償制御では、ハンドルがあそび分だけすばやく動く挙動が頻繁に起こり、運転者への違和感が出てしまう。今後の課題として、改善を進める必要がある。

1.3.5 制動制御

制動制御では、現時点の车速と停止目標位置から目標減速度を算出し、アクチュエータに指令を与えた。減速度については、減速区間を前半／後半に分け、前半： 0.5m/s^2 程度、後半： 0.2m/s^2 程度とした。これは、減速区間後半の減速度を弱めることで、停車直前の減速度の急増を防ぐことを目的とした。図 1.3.5-1 に、制動制御時の挙動を示す。

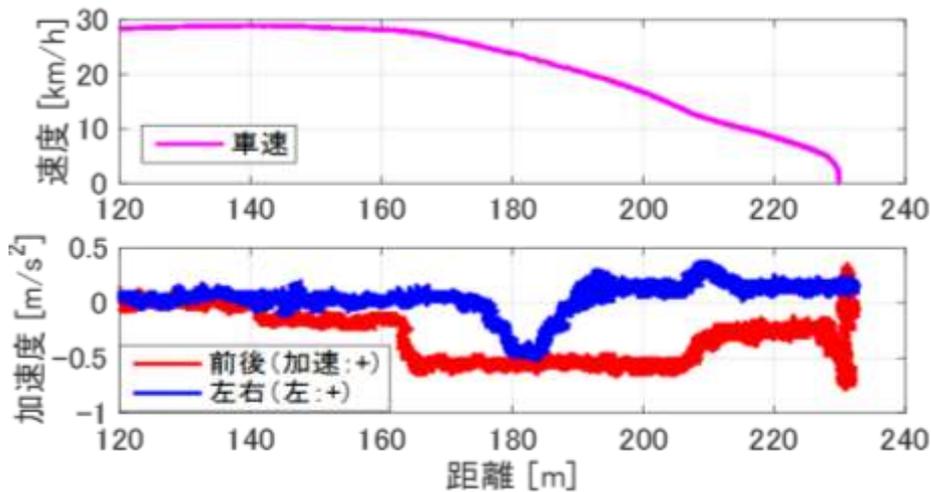


図 1.3.5-1 制動制御時の挙動

また、図 1.3.5-2 に停車前後位置分布を示す。停車位置精度は目標範囲である $\pm 50\text{cm}$ 以内に十分収まっていることを確認した。

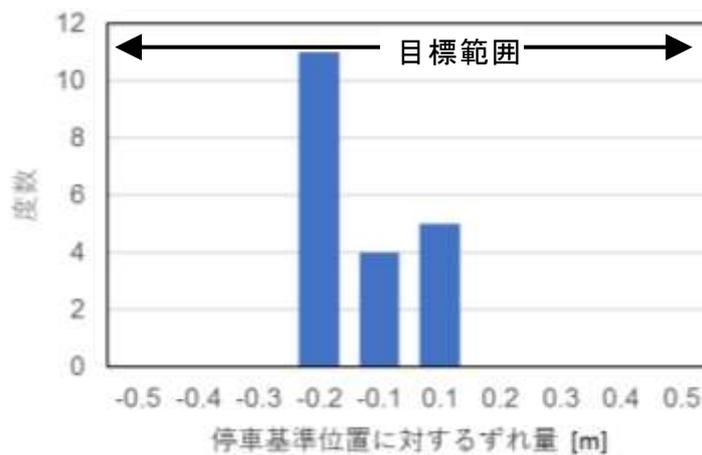
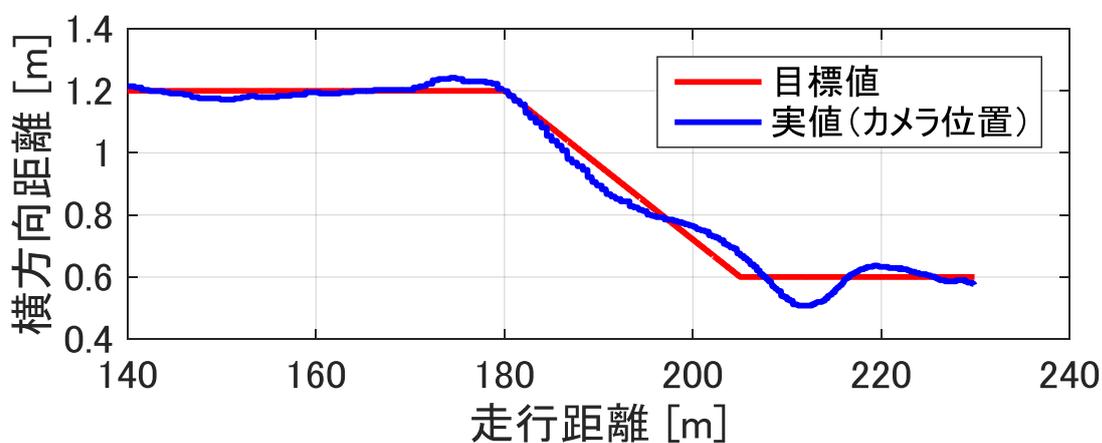


図 1.3.5-2 正着後の停車前後位置分布 (全 20 回)

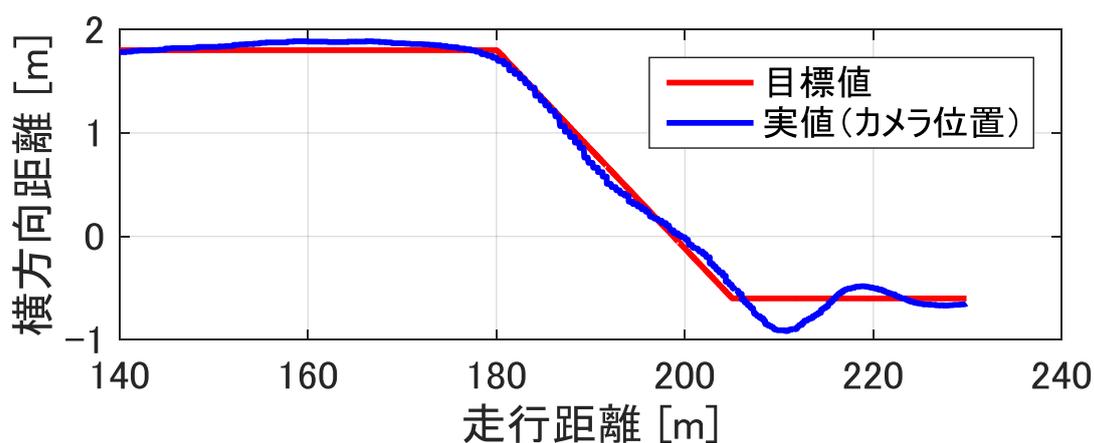
1.3.6 正着時の幅寄せ量拡大

これまで、正着時の幅寄せ量を 0.6m とし試験を実施してきた。しかし、実環境においては、さらに大きな幅寄せ量が求められる可能性がある。そこで、幅寄せ量を拡大した正着制御を行い、正着動作の確認を行った。幅寄せ量は、別プロジェクトにおける正着軌跡（幅寄せ区間 35m、幅寄せ量 3.6m）を参考に、幅寄せ時の車両傾き角を同様とするため、「幅寄せ区間 25m、幅寄せ量 2.4m」とした。なお、2.4m は一般的な車線幅とほぼ同程度である。

図 1.3.6-1 に、幅寄せ量を 0.6m、2.4m とした際の正着動作を示す。どちらも、最終的に目標値に追従し、正着可能であることが確認できた。



(a) 幅寄せ量 0.6m 時



(b) 幅寄せ量 2.4m 時

図 1.3.6-1 幅寄せ量拡大時の正着動作

1.4 今後の課題

1.4.1 車両傾き角

現在の制御においては、カメラ（Mobileye）の出力値を制御対象（白線との横変位，傾き角）としている。しかし、カメラ取付角度などの影響により、傾き角はカメラの出力値と実値で 0.26deg 程度のズレが生じており、このズレの解消が、正着精度向上に寄与する可能性があると考えられる。今後、制御対象の確度向上を検討する必要がある。

1.4.2 乗り心地

1.3.5 項 で示した通り、現状の制動制御においては、減速制御は機能実現できている。しかし、図 1.3.6-2 の加速度分布を見ると、幅寄せ時に前後・左右加速度の合計が増加傾向にあり、乗り心地については改善が必要と考える。今後、最大加速度、ジャークを考慮した操舵と制動の協調制御の構築が必要である。さらに、このような協調制御を実現する為に、ディスクブレーキの搭載が必要と考えられる。詳細については次項にて示す。

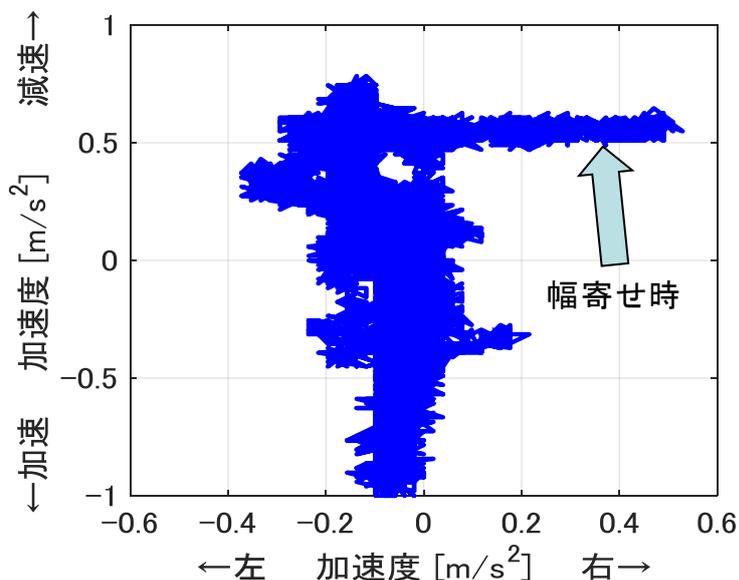


図 1.3.6-2 正着時の前後方向・左右方向加速度分布

1.4.3 エアディスクブレーキ搭載検討

(1) エアディスクブレーキ (ADB) 搭載検討の目的

本報告書記載の試験車両はドラムブレーキを使用しているが、ドラムブレーキは低速域において自己サーボ効果によりブレーキが効き過ぎる場合があることが知られている。この現象は停止位置精度及び停止時の減速度変動に大きな影響を与える事となり、停止位置精度の低下及び減速度変動の増加という悪影響を発生させる可能性がある。それに対してディスクブレーキは自己サーボ効果は無く、ブレーキ圧力に応じたより安定した減速度を実現する事が可能であり、さらに放熱性と速乾性に優れブレーキ頻度に影響を受けにくいより安定した減速度の実現が可能である。

正着制御時のさらなる停止位置精度の向上及び減速度変動の低減を実現する為、ADB の搭載を検討する事を目的とする。

(2) 検討必要項目

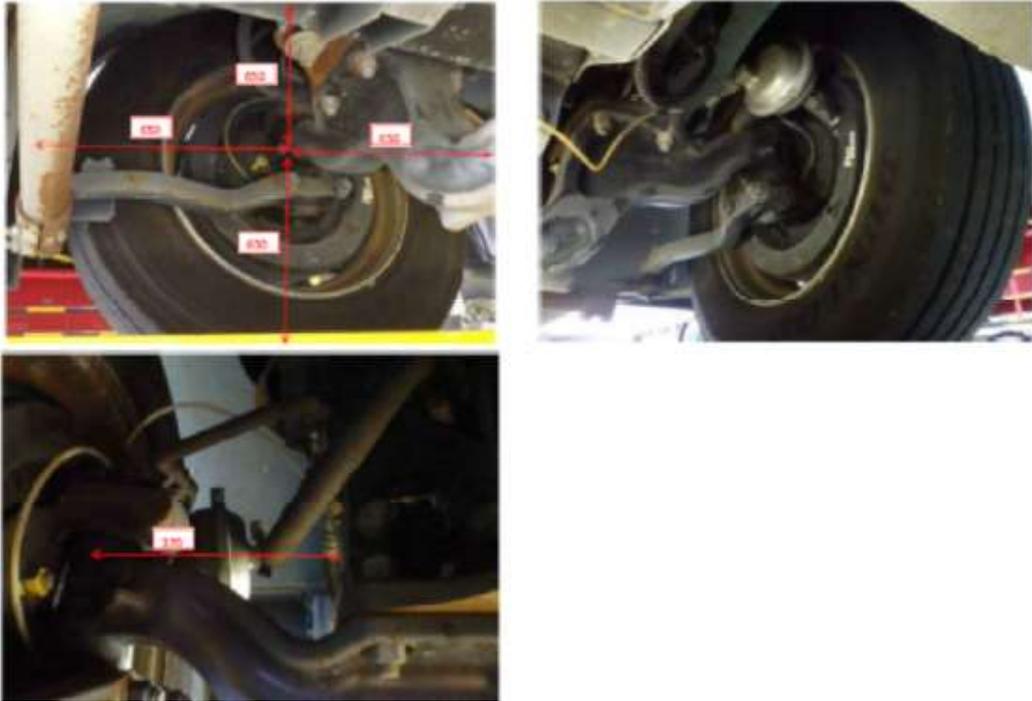
- ・試験車両での ADB 搭載スペース確認
- ・試験車両アクスル (ドラム用) への ADB 搭載可否検討
- ・代替え案検討 (上記 2 項目検討結果 NG の場合、ディスクブレーキ用アクスルの採用)
- ・試験車両への最適 ADB の選定

(3) 具体的検討

1) 試験車両での ADB 搭載検討

試験車両への ADB 装着可否を検討するため、実車両の確認を行った。図 1.4.3-1、図 1.4.3-2 に、前軸、後軸それぞれにおける ADB 搭載検討写真を示す。試験車両はウエッジドラム及びエアサスコンポーネントを搭載しており、平成 28 年度報告書 3.4 節にて記載した車両の S カムドラム及びエアサスコンポーネントよりスペースがあり、ブレーキチャンバの搭載位置は ADB 搭載時と類似していることが解った。しかし、試験車両のアクスルはドラムブレーキハブ用に設計されており、ADB 搭載時に必要なローター及びハブの装着が困難であることがわかった。図 1.4.3-3 にドラムブレーキと ADB のアクスルの違いを示す。ADB 搭載のためには、対象アクスルに合わせて専用の ADB ハブの開発が必要であるが、ADB ハブの専用開発は現実的ではなく、アクスルとセットでの交換を検討する必要がある。

以上より、アクスルへのブレーキ装着においてドラムブレーキと ADB では取付け構造が異なり、試験車両アクスルへの ADB 装着は困難であると判断した。



(a) 左前軸



(b) 右前軸

図 1.4.3-1 前軸側 ADB 搭載検討



(a) 左後軸



(b) 右後軸

図 1.4.3-2 後軸側 ADB 搭載検討

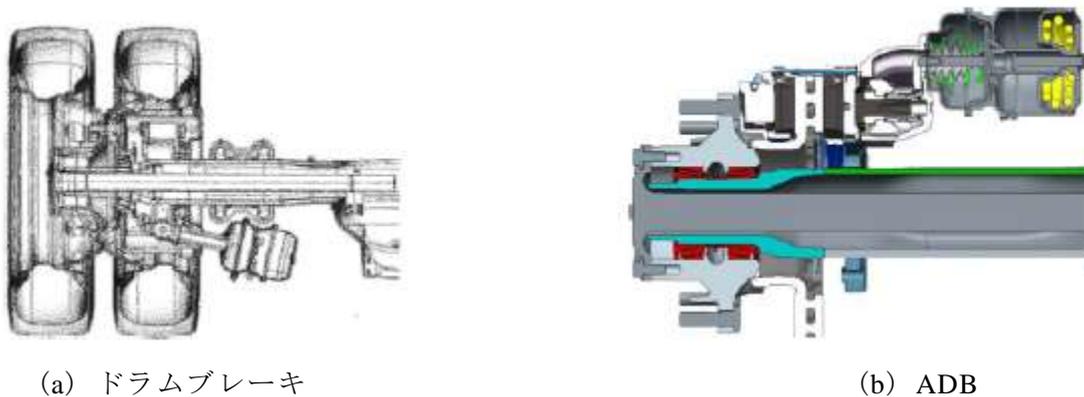


図 1.4.3-3 ドラムブレーキと ADB のアクスルの違い

2) 欧州 ADB アクスルを使用した ADB 搭載代案検討

来年度の実証実験及び成果体験会に向け、本報告書記載の試験車両とは別に、新たな車両（以下、新規車両）を準備する予定である。そこでこの新規車両に対し、欧州 ADB アクスルを使つての ADB 装着可否を検討した。

a. 前軸

欧州 ADB フロントアクスルに WABCO 製システム ADB を搭載することは比較的容易に出来ると見込まれ、新規車両への搭載可否を検討し、最適なアクスルを選定した。図 1.4.3-4 に前軸搭載検討図を、図 1.4.3-5 に新規車両と欧州 ADB アクスルの比較図を示す。

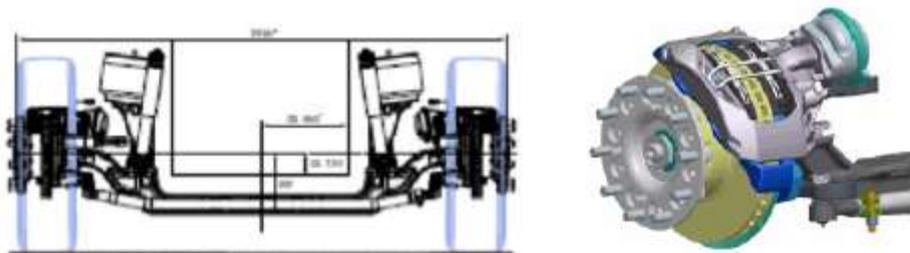


図 1.4.3-4 前軸搭載検討図



(a) 新規車両アクスル

(b) 欧州 ADB フロントアクスル

図 1.4.3-5 新規車両と欧州 ADB アクスル比較（前軸）

b. 後軸

欧州 ADB リアアクスルの ADB+チャンバはラジアルタイプ、WABCO 製 ADB+チャンバはアキシヤルタイプと両者の種類は異なるが、欧州 ADB リアアクスルに WABCO 製 ADB+チャンバの搭載可否を検討し、WABCO 製 ADB (MAXX22) の搭載が可能であることを確認した。新規車両への搭載可否を検討し、最適なアクスルを選定した。図 1.4.3-6 に前軸搭載検討図を、図 1.4.3-7 に新規車両と欧州 ADB アクスルの比較図を示す。

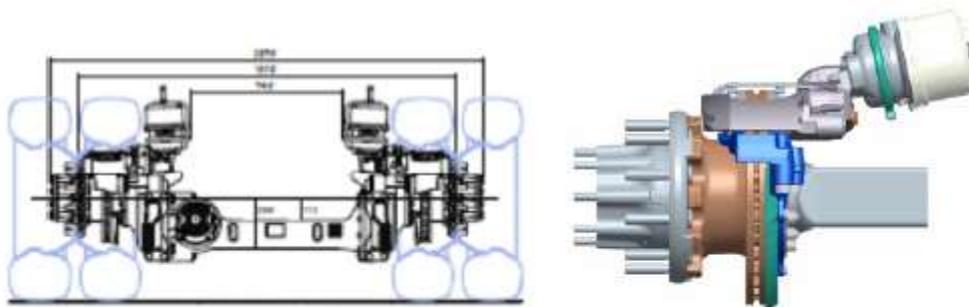


図 1.4.3-6 後軸搭載検討図



(a) 新規車両アクスル

(b) 欧州 ADB リアアクスル

図 1.4.3-5 新規車両と欧州 ADB アクスル比較 (後軸)

【参考文献】

- [1] 株式会社ジェイテクト：「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・検討における次世代都市交通システム正着制御に係るアクチュエータおよび制御技術に関する調査」成果報告書，平成 29 年 3 月 10 日
- [2] 吉田順ほか：トラック Path Following 制御に基づく自動運転，
日本機械学会論文集(c 編) Vol.77 783 号(2011-11)

第2章 インフラ整備の最小化に向けた課題調査

2.1 目的

最終目標となる $40\pm 20\text{mm}$ の正着精度を実現するためには、GPS や前方カメラ画像では、横方向の位置検出精度・分解能が不足している。磁気マーカなどによる誘導方式では、インフラ整備が必須となるだけでなく、障害物などの影響による柔軟な対応に課題が残る。そこで、側方カメラを用いて白線などの境界線検出・位置検出の高応答・高精度化を図り、最終的には前方カメラ画像と側方カメラ画像処理を統合化することで、インフラ整備の最小化と目標の正着精度の実現を目指す。今回、高精度化に向けた機能試作を行い評価した結果を報告する。

2.2 側方カメラによる白線検出

前方カメラでは、車両が安全に走行できる視野を確保する必要がある。そのため、視野角及び注視点距離、さらには横変位量を算出するためには鳥瞰図化する必要があり、横変位の距離精度を確保するうえで不利となる。そこで、横方向の距離精度向上に特化することで、視野角及びイメージセンサ解像度、画像歪の点で優位となる側方カメラを用い検証した。

2.2.1 センシングシステムの構成

側方カメラに用いた単眼カメラの主な仕様を表 2.2.1-1 に、外観を図 2.2.1-1 に示す。

表 2.2.1-1 側方カメラ（単眼）の主な仕様

メーカー／型式	Panasonic／960H CCD
有効画素数	960×480
水平解像度	650
視野角	水平 28.7° / 垂直 21.2°（準望遠時）
フレームレート	30fps（fps : frame per second）
信号方式	NTSC
電源／消費電流	12V／120mA
サイズ／重量	100mm×100mm×210mm／約 780g



図 2.2.1-1 側方カメラ（単眼）外観

単眼カメラで取得した画像データ（30fps）を図 2.2.1-2 に示す処理フローにて白線検出するシステムの機能試作を行った。図 2.2.1-3 に示す大型バス実験車両に、図 2.2.1-4 に示すように左側方の白線を検出できるように単眼カメラを搭載し評価を行った。

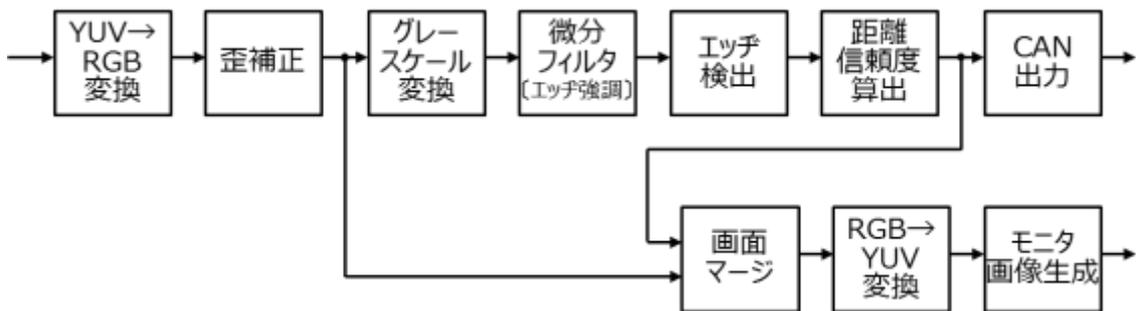


図 2.2.1-2 白線検出処理フロー



図 2.2.1-3 大型バス実験車両



図 2.2.1-4 側方カメラ（単眼）

ジェイテクト伊賀試験場の連絡路直線部を利用し、バス正着制御における横変位量の白線検出結果（図 2.2.1-5、図 2.2.1-6）を示す。緑線が車両側の白線エッジ検出部を示す。図 2.2.1-5 に示すように正常検出できているが、図 2.2.1-6 に示すように誤検出する場合も発生した。



図 2.2.1-5 白線検出結果（正常時）

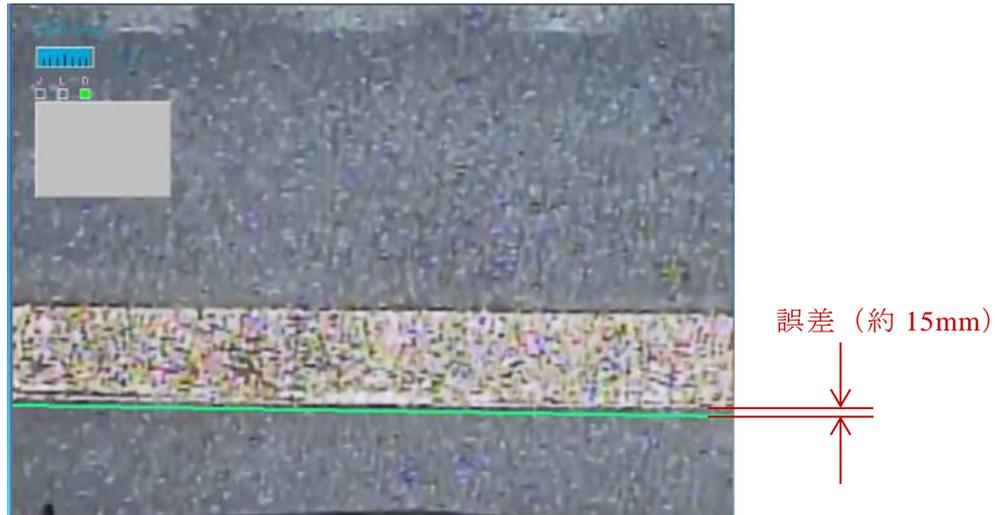


図 2.2.1-6 白線検出結果（誤差発生時）

2.2.2 誤差要因及び白線検出の高精度化

白線検出誤差が発生している状況を分析すると、白線のかすれが多く斑模様となっている領域（図 2.2.2-1 参照）にて発生しやすいことがわかった。また、図 2.2.2-2 のようにアスファルト路面が濡れた後、乾燥し始めた白線周辺の路面濡れ／乾燥部との明暗差の大きい境界線を白線エッジと誤検出していることもわかった。



図 2.2.2-1 白線かすれ部の影響



図 2.2.2-2 路面乾燥／濡れ部境界

検出アルゴリズムを見直すことで、白線のかすれ影響や路面の濡れ／乾燥部の明暗差を誤検出しないようロバスト性を向上させた。改善後の処理フローを図 2.2.2-3 に示す。

グレースケール変換後のフィルタ処理を新たに追加し白線かすれや、路面の濡れ／乾燥状態による斑模様への耐性を向上させた。また、その後の微分フィルタ／エッジ検出／距離・信頼度算出アルゴリズムを改善することで、白線エッジ以外のライン検出やボディ等への映り込みによる影響を排除した。改善後の白線エッジ検出画像を図 2.2.2-4 に示す。

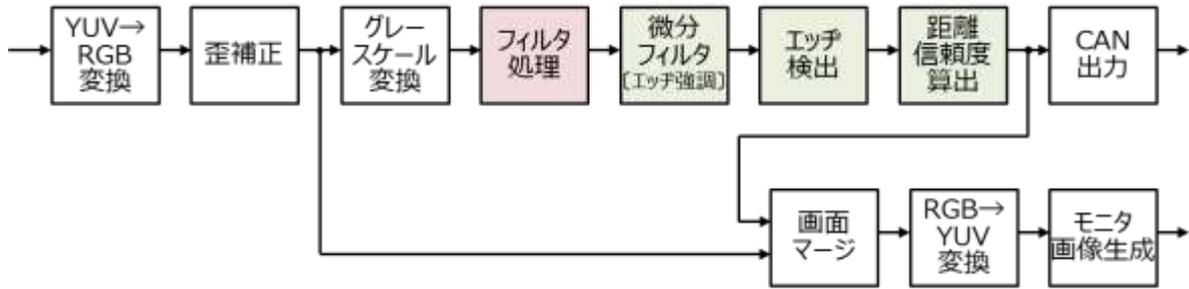


図 2.2.2-3 改善後の白線検出処理フロー

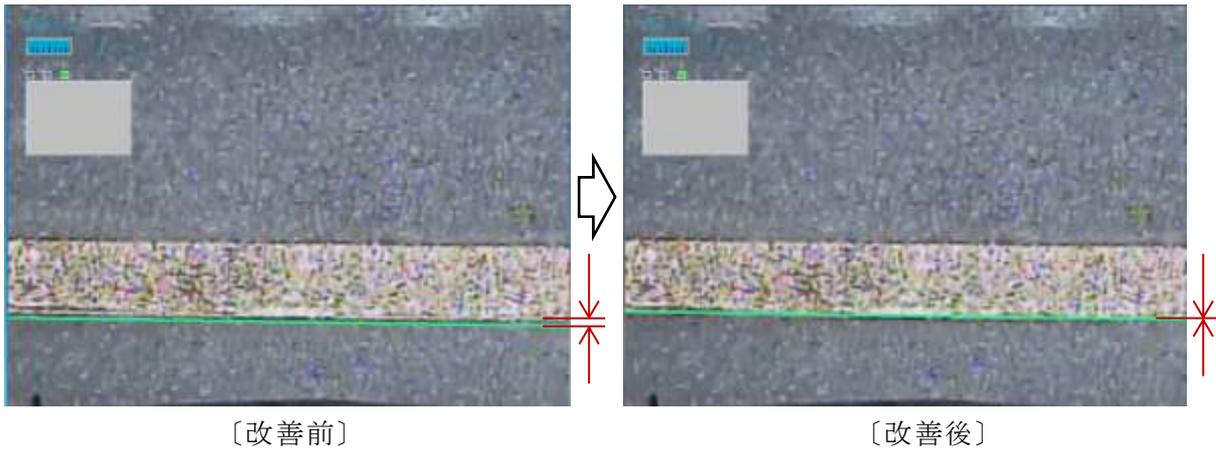


図 2.2.2-4 白線エッジ検出結果

2.2.3 横変位量の検出精度及び車両傾き角

改善した白線検出手法に基づき算出した白線エッジと車両間の横変位検出の評価を行った。評価は、ジェイテクト伊賀試験場の連絡路直線部にある白線（黄線）を基準とし、約750mm程度の横変位を目標に並走し停止した時点の白線（黄線）とバス車両との変位量を測定し比較評価した。図 2.2.3-1 に示すような評価を行い、実測値と側方カメラによる横変位検出結果を表 2.2.3-1 に示す。

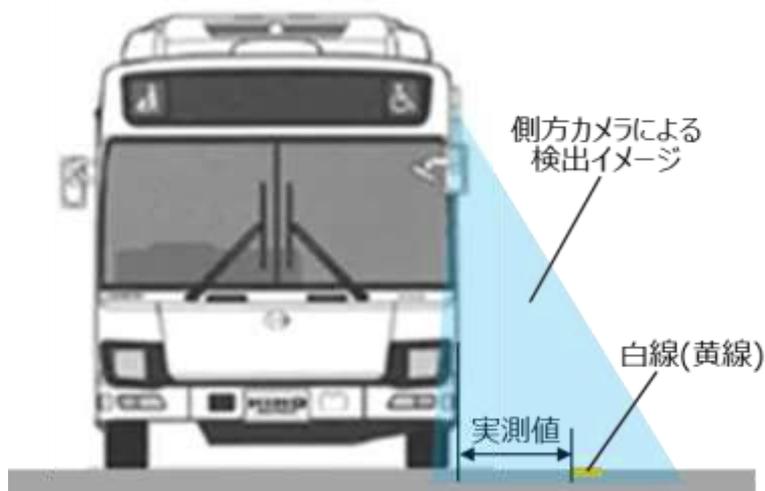
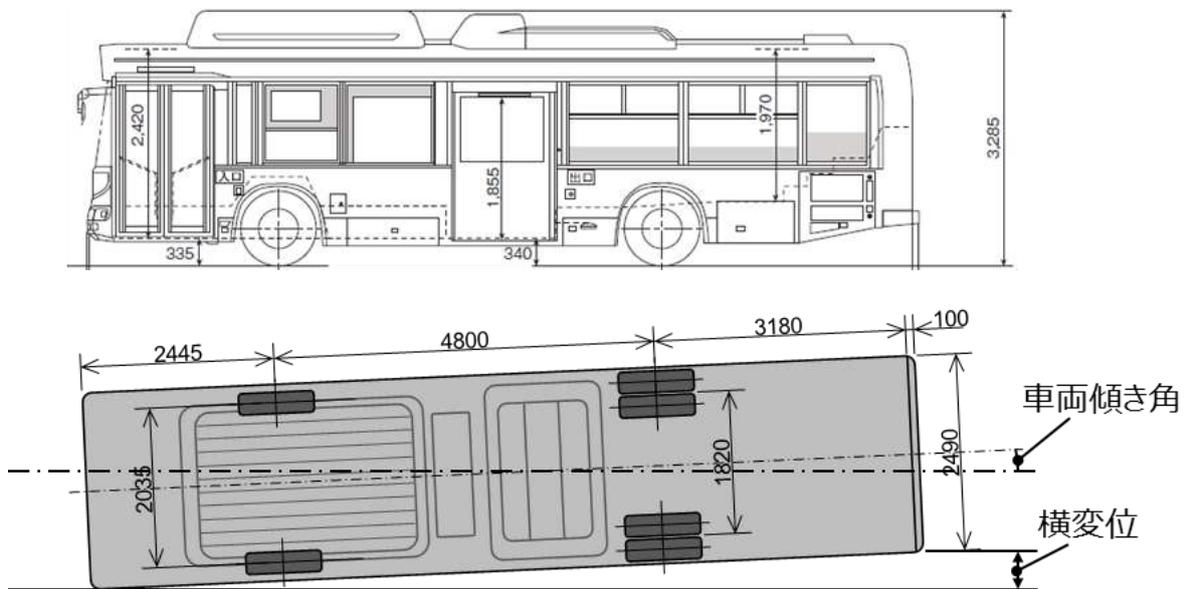


図 2.2.3-1 横変位量検出結果の評価

表 2.2.3-1 横変位検出結果

横変位実測値	側方カメラ検出結果	検出誤差
732 mm	731 mm	-1 mm
740 mm	739 mm	-1 mm
760 mm	767 mm	7 mm
775 mm	773 mm	-2 mm

白線検出処理を改善した結果、誤検出することなく 10mm 程度に測定バラツキを抑制することができた。また、一般的なジャイロセンサではバス停に対する車両傾き角を正確に検出することが困難であるが、前扉と中扉もしくは後輪軸の横変位を側方カメラで検出することにより、バス停留所などの目標に対するバス車両の傾き角を正確に制御することが可能となる。車両傾き角と横変位の関係を図 2.2.3-2、表 2.2.3-2 に示す。



(出典：日野自動車 HP

https://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve_75hu.pdf)

図 2.2.3-2 車両傾き角と横変位

表 2.2.3-2 車両傾き角と横変位量の例

車両傾き角	横変位 [車両長間：10m]	横変位 [車両長間：4.3m]
0.2 deg	34.9 mm	15.0 mm
0.1 deg	17.5 mm	7.5 mm

2.3 歩道縁石検出手法の検討

2.2 節にて側方カメラを用いた白線検出手法、及び横変位検出の高精度化に向けた検討結果を報告したが、現存のバス停留所付近には白線のない場合も多い。(図 2.3-1、図 2.3-2、図 2.3-3、図 2.3-4 参照)



図 2.3-1 新橋駅近くのバス停留所



図 2.3-2 臨海副都心のバス停留所



図 2.3-3 豊洲駅前ロータリーバス停留所



図 2.3-4 国際展示場駅前バス停留所

そこで、バス停留所の歩道縁石に着目し、縁石エッジの検出手法について検討を行った。バス停留所の歩道縁石は、コンクリート製の側溝と一体構造となっている縁石が多く、単眼カメラによる画像での確に識別することは困難であるため、ステレオカメラによる距離（深度）測定結果に基づく3次元点群データから縁石エッジを検出する手法を検討した。

2.3.1 センシングシステムの構成

調査したステレオカメラの仕様を表 2.3.1-1、外観を図 2.3.1-1 に示す。また、ステレオカメラの画像データの処理フローを図 2.3.1-2 に示す。

表 2.3.1-1 ステレオカメラの主な仕様

メーカー／型式	Stereolabs／ZED Stereo Camera
解像度	4M pixels
出力解像度／フレームレート	4416×1242／15fps 3840×1080／30fps 2560×720／60fps（使用したモード）
視野角	最大 110°
深度感知距離	0.5～20m
信号方式	USB3.0
電源／消費電流	5V／380mA
サイズ／重量	175mm×30mm×33mm／159g



図 2.3.1-1 ステレオカメラ

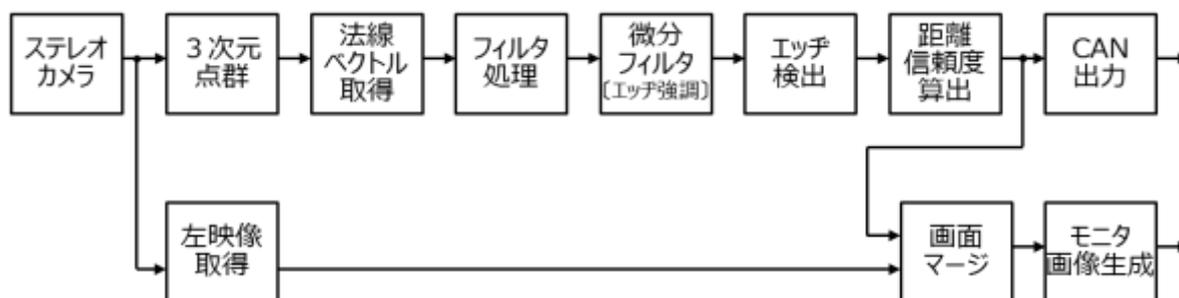


図 2.3.1-2 歩道縁石エッジ検出処理フロー

2.3.2 歩道縁石の検出結果

実際のバス停留所付近の歩道縁石を前項で示したステレオカメラで撮影した動画データを元に、前項で示した歩道縁石エッジ検出処理の検証を行った。図 2.3.1-1 に示す 4 つの

画像データのうち、左上→右上→左下→右下の順に、ステレオカメラの左映像→3次元点群データを元に深度マップ表示→3次元点群データを元に法線ベクトル表示→歩道縁石エッジ検出結果を表示している。桃色線が歩道縁石エッジ検出部を示す。法線ベクトル表示画像で歩道縁石の水平面（赤）と垂直面（青）のコントラストが明確になり、歩道縁石エッジを検出できていることがわかる。

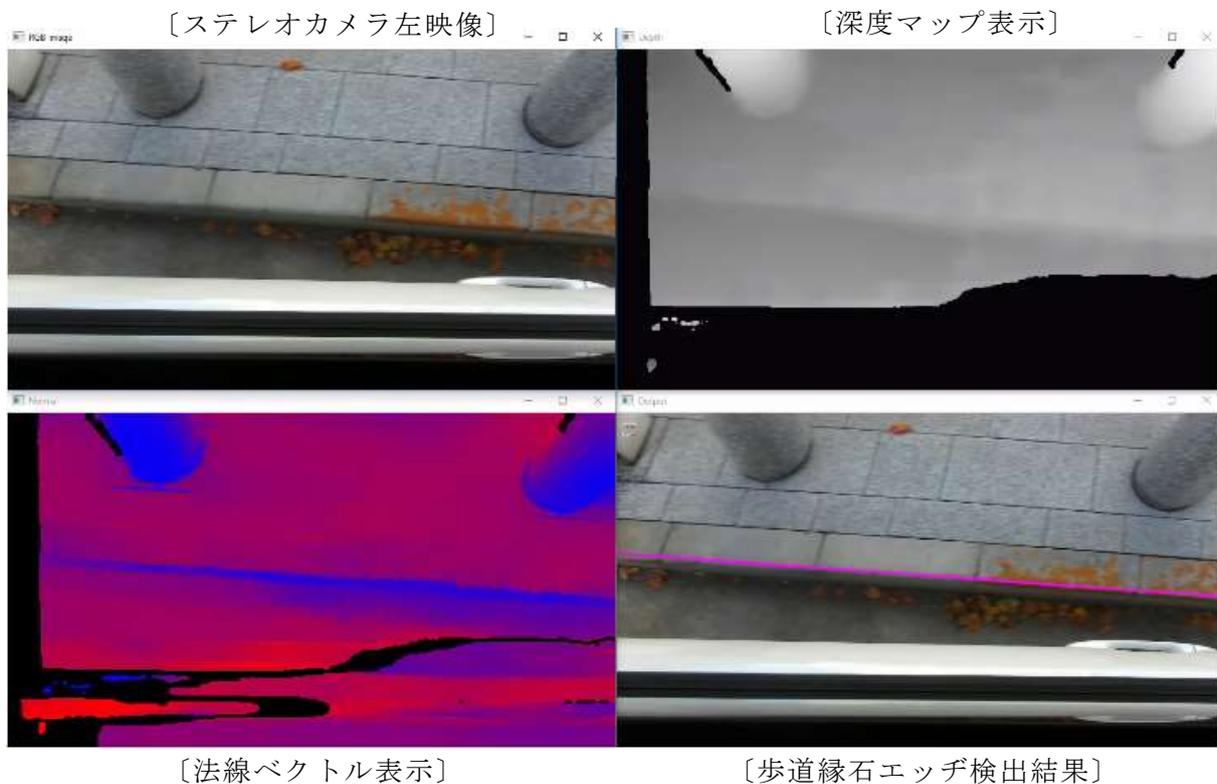


図 2.3.1-1 歩道縁石エッジ検出結果

2.3.3 白線検出と歩道縁石検出の統合化

次に、側方のステレオカメラによる白線検出と歩道縁石検出を図 2.3.3-1 に示すような処理フローに統合した。白線検出と歩道縁石検出を統合することで、バス停留所付近の横変位検出精度向上と、白線検出できない場面においても歩道縁石を検出することで柔軟に対応できるセンシングシステムの構築を目指した。

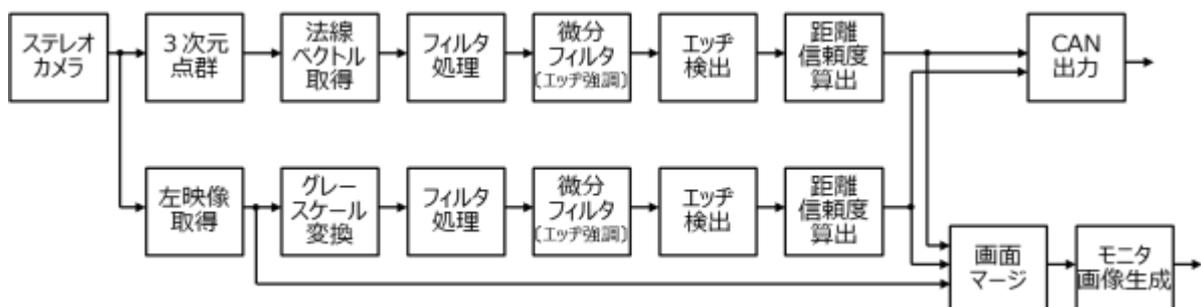


図 2.3.3-1 白線検出と歩道縁石検出を統合化した処理フロー

2.3.2 項と同様に、実際のバス停留所付近をステレオカメラで撮影した動画データを元に検証した。図 2.3.3-2 に白線検出した結果を、次に更に歩道縁石に接近していった際に、白線及び歩道縁石を検出した結果を図 2.3.3-3 に示す。緑線が白線エッジ検出部、桃色線が歩道縁石エッジ検出部を示す。

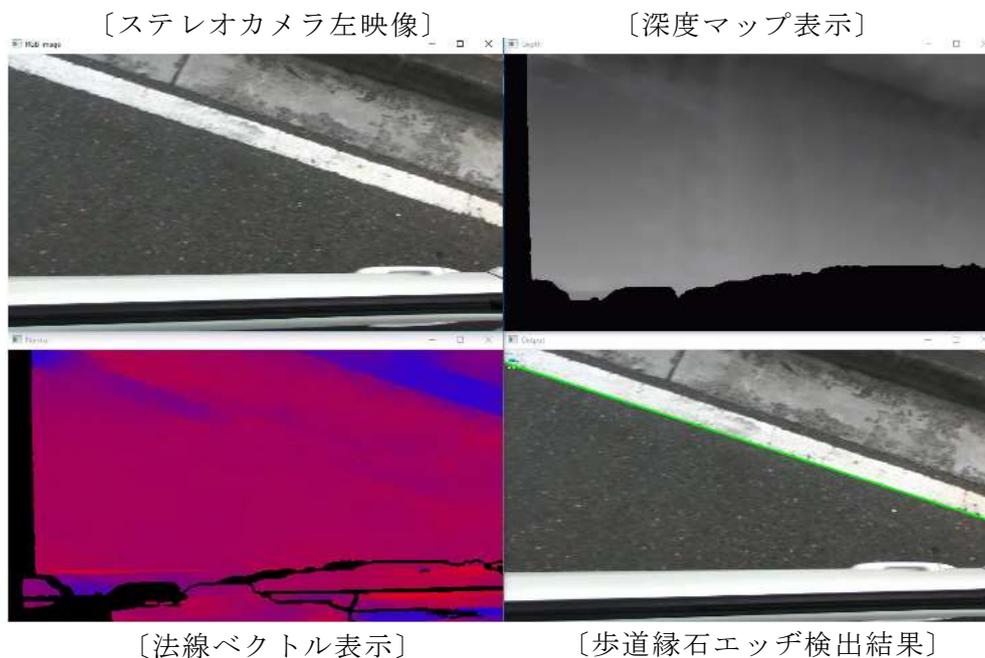


図 2.3.3-2 白線検出結果（歩道縁石接近前）

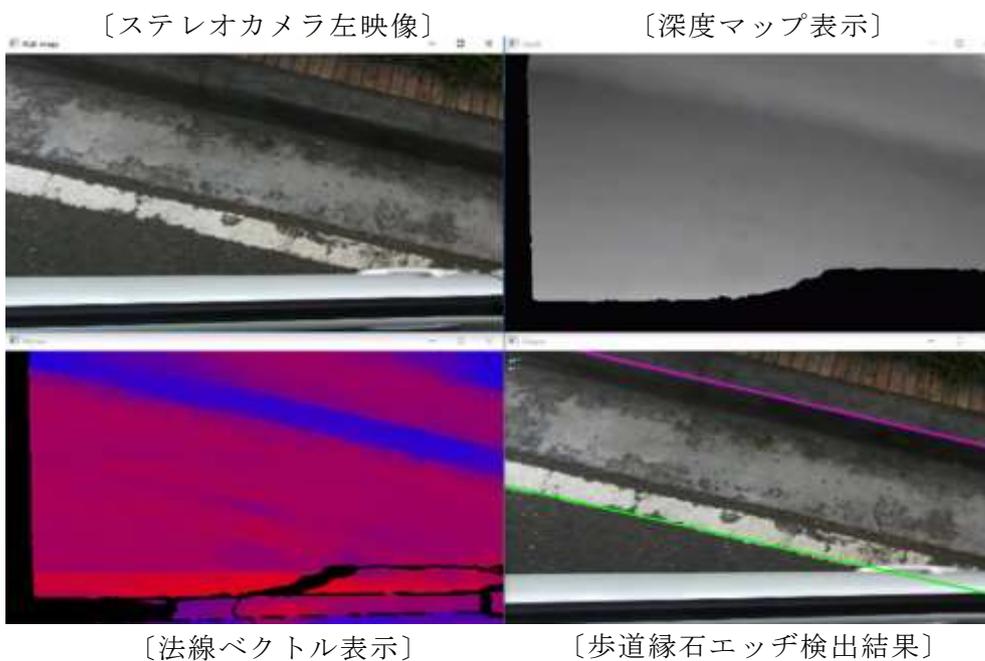


図 2.3.3-3 白線検出と歩道縁石検出した結果（歩道縁石へ接近）

2.4 イメージセンサの課題まとめ

今回検討した側方カメラに搭載した白線検出と歩道縁石検出を統合した処理を、今後は前方カメラによる走行レーン認識や障害物検知処理と統合化していくことで、次世代都市交通システムにおける正着制御及び定時運行に大きく貢献できるものと考えている。しかしながら、依然として逆光や夜間の濡れた路面への映り込みなど、ロバスト性向上のための課題は残存する。次年度の取組みにおいて、イメージセンサのロバスト性向上とともに、LiDAR など他方式センサとのセンサーフュージョン技術を検討し、実用化に向け取り組んでいく。

2.5 節では、まず今年度購入した LiDAR センサの基本性能を評価したので報告する。

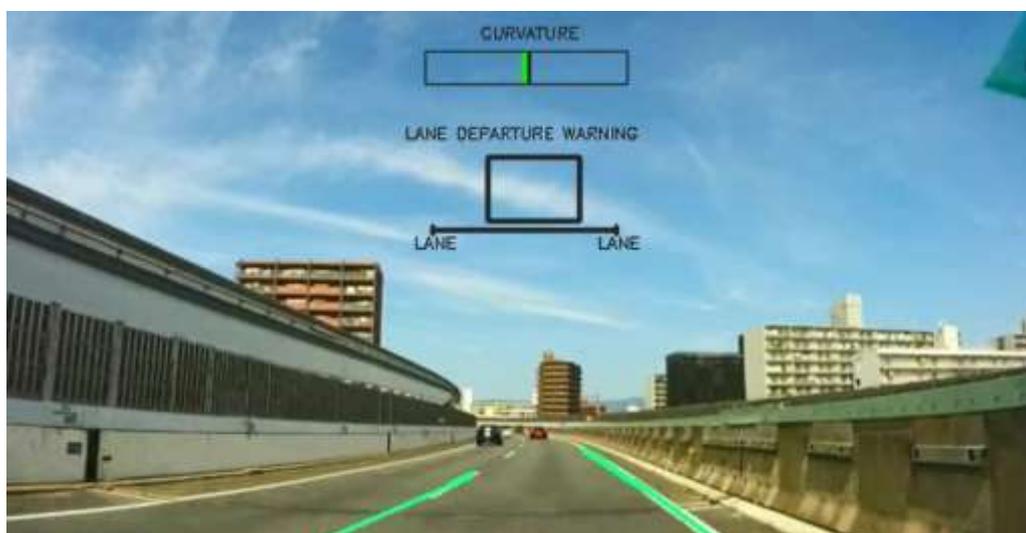


図 2.4-1 前方カメラによる走行車線検出



図 2.4-2 センサーフュージョン技術イメージ

2.5 LiDAR による歩道縁石検出手法の検討

2.5.1 LiDAR の基本性能検証

前節でイメージセンサに関する調査検討結果を報告したが、光量バランス、影や濡れた路面への映り込みなどロボスタ性向上のための課題が残る。そこで、イメージセンサが不得意とする条件下で位置検出精度を補完する方策の1つとして、LiDARの可能性について調査した。基本性能を評価したLiDARは2種類で、各センサの仕様を表2.5.1-1に、外観を図2.5.1-1示す。

表 2.5.1-1 LiDAR 仕様

メーカー	Velodyne	日本信号
品名・型式	VLP-16	FX10 型測距センサ
測距範囲	1~100m	0.5~5m
距離分解能	2mm	4mm
サンプリングレート	5~20Hz	4,10,16Hz
視野角（水平方向）	360deg	60deg
視野角（垂直方向）	30deg	50deg
角度分解能（水平方向）	0.1deg(5Hz) ~ 0.4deg(20Hz)	0.62deg(4Hz) 0.92deg(10Hz) 1.13deg(16Hz)
角度分解能（垂直方向）	2deg	0.82deg(4Hz) 1.28deg(10Hz) 1.52deg(16Hz)



(a) VLP-16



(b) FX10

図 2.5.1-1 LiDAR 外観

2.5.2 測距性能評価方法

センサ単体の静的な測距精度を評価するため、図 2.5.2-1 に示すようにセンサ正面に測距対象（ホワイトボード）を設置し、表 2.5.2-1 に示す条件で計測した。測距対象位置によるバラつきを評価するため、水平・垂直方向の各角度（図 2.5.2-2 参照）で比較する。

また、VLP-16 の測距範囲仕様は 1~100m だが、0.5m から測距データが出力されているため、FX10 の測距範囲仕様に合わせて 0.5m からの評価を行った。センサ-測距対象間距離は巻尺を用いて位置決めを行った。測距した 3 次元点群データを図 2.5.2-2 に示す。

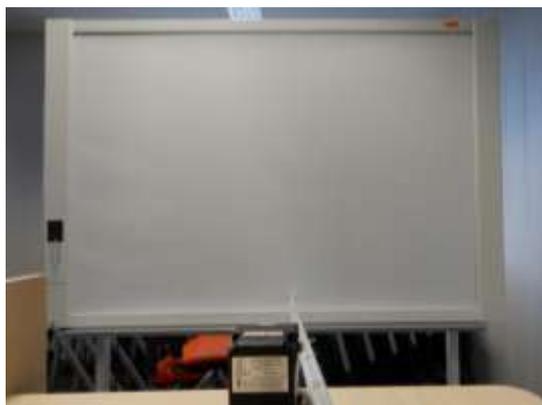
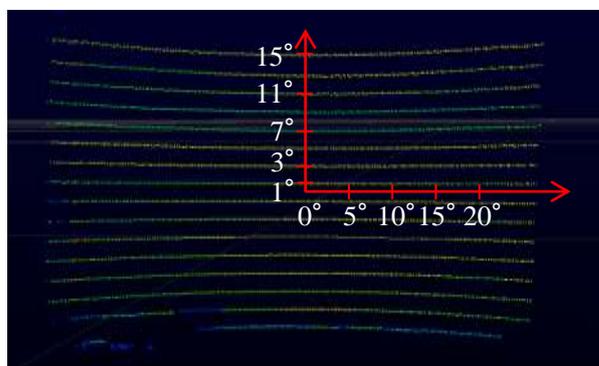


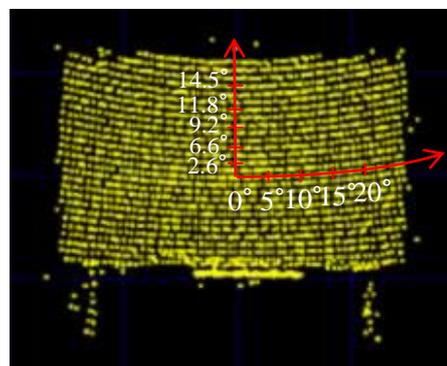
図 2.5.2-1 測距性能評価試験

表 2.5.2-1 測距性能評価試験条件

サンプリングレート	10Hz
サンプル数	50 サンプル
センサ-測距対象間距離	0.5~1.5m、0.1m 毎
水平方向角度	0,5,10,15,20 deg
垂直方向角度	VLP-16: 1, 3, 7, 11, 15 deg FX10: 0, 2.6, 6.6, 9.2, 11.8, 14.5 deg



(a) VLP-16



(b) FX10

図 2.5.2-2 3次元点群データ

2.5.3 測距性能評価結果

(1) 測距対象位置の影響

センサ-測距対象間 1.1m における奥行き方向の距離 Z[m] の計測結果を図 2.5.3-1 に示す。縦軸の Z は 50 サンプル (5 秒間) の平均値である。いずれのセンサも約 0.05m のオフセットがあるが、これは各センサのゼロ点がセンサ前端より後方にあるためである。

VLP-16 では垂直方向角度によって Z が約 0.03m 変動している。VLP-16 は垂直に配置された 16 個のレーザセンサを水平方向に走査して計測しており、計測データの座標変換にはあらかじめ設定された垂直方向角度と回転角センサで計測した水平方向角度を用いている。

垂直方向角度によるバラつきにはレーザセンサの個体差や組立て誤差が影響していると考えられ、各レーザセンサについて補正を行うことで測距対象の位置による影響を低減できると考えられる。

一方、FX10 においては水平方向角度、垂直方向角度が 0deg の時に Z が極端に小さい。計測時のレンジイメージと輝度イメージ (図 2.5.3-2) を確認すると、距離が小さく認識されている正面付近で輝度が高くなっており、FX10 内部で距離を算出する過程で輝度による補正が行われていると考えられる。測距対象との距離や角度、材質が輝度に与える影響、輝度値が計測値に与える影響を考慮することで計測対象位置による影響を低減できる可能性がある。

図 2.5.3-3 に測距精度 (3 σ) [m] を示す。縦軸の測距精度は奥行き方向距離 Z の 50 サンプル (5 秒間) のバラつき 3 σ を表している。

VLP-16 では最大 0.020m、FX10 で最大 0.031m と VLP-16 の方が高精度であった。しかし、いずれのセンサも車両を 40 \pm 20mm で正着させるためには単一の測定点では繰り返し精度が不足しており、縁石の平面内にある複数の計測点をフィルタリングや平均化などの処理をすることで精度を向上する必要があると考えられる。

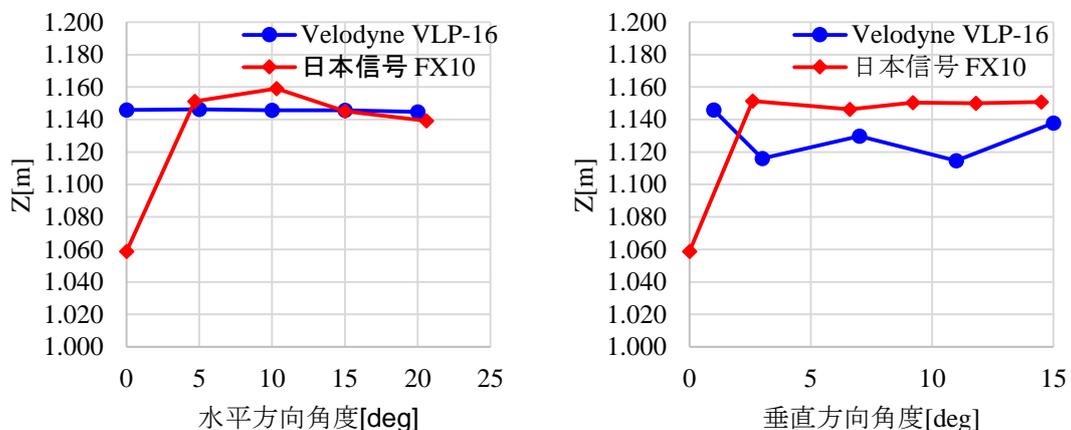
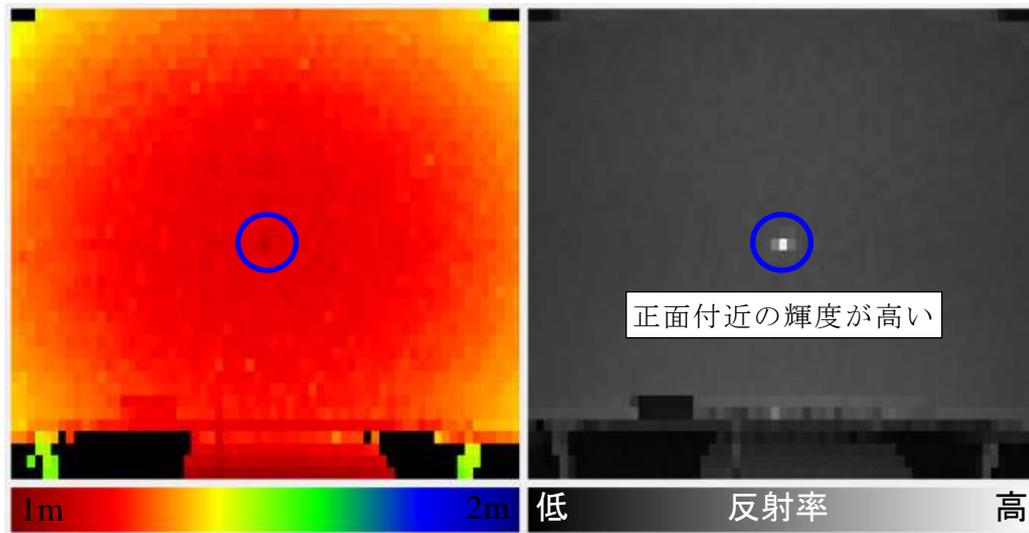


図 2.5.3-1 センサ-測距対象間 1.1m における奥行き方向距離 Z 計測結果



(a) レンジイメージ

(b) 輝度イメージ

図 2.5.3-2 FX10 計測画面 (センサ-測距対象間 1.1m)

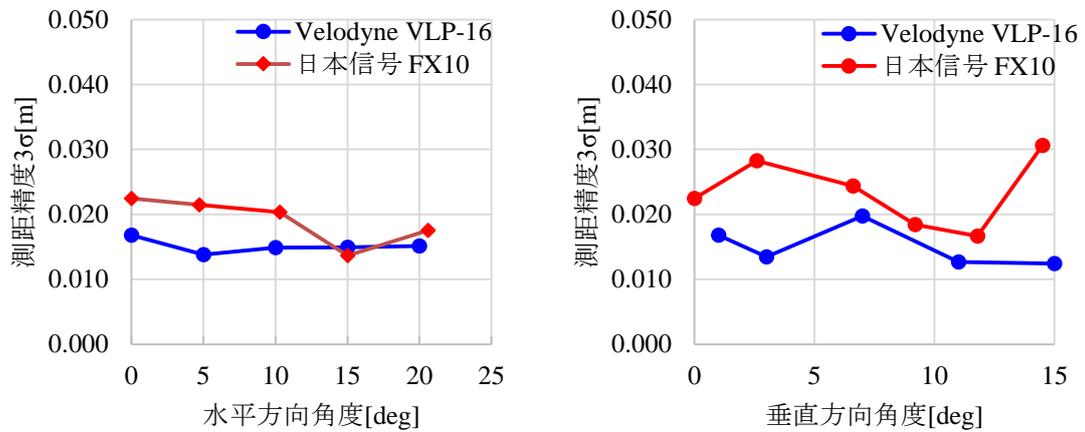


図 2.5.3-3 センサ-測距対象間 1100mm における奥行き方向距離 Z の精度 (3σ)

(2) センサ-測距対象間距離の影響

センサ-計測対象間距離に対する測距誤差を図 2.5.3-4 に、測距精度 (3σ) [m] を図 2.5.3-5 に示す。(1) 測距対象位置の影響で述べたように、FX10 でセンサ正面付近の計測値が異常値となるため、水平方向角度が VLP-16、FX10 とともに 10deg、垂直方向角度が VLP-16 : 1deg、FX10 : 0deg の計測データを示す。測距誤差は奥行き方向距離 Z[m]50 サンプル(5 秒間)の平均値からセンサ-測距対象間距離を減算した値である。測距精度 (3σ) は奥行き方向距離 Z の 50 サンプル (5 秒間) のバラつき 3σ を表している。

VLP-16 の測距誤差はセンサ-測距対象間距離の増加につれて減少し、仕様上の最少測距距離である 1m 以上では $\pm 0.01\text{m}$ 程度の範囲で変動している。また、測距精度 (3σ) は 0.015m 程度で推移しているが、センサ-計測対象間距離 0.7m の時に突発的に悪化した。水平、垂直方向角度の異なるデータでも突発的に精度が悪化することが確認されており、縁石認識精度を向上するためには精度が悪化する条件を明らかにする必要がある。

FX10 の測距誤差はセンサ-測距対象間距離 0.5m から 0.7m まで増加するがその後、距離に応じて減少し、 ± 0.015 程度の範囲で変動している。測距精度 (3σ) はセンサ-測距対象間距離 0.9、1m の時に悪化した、おおむね VLP-16 と同等となっている。

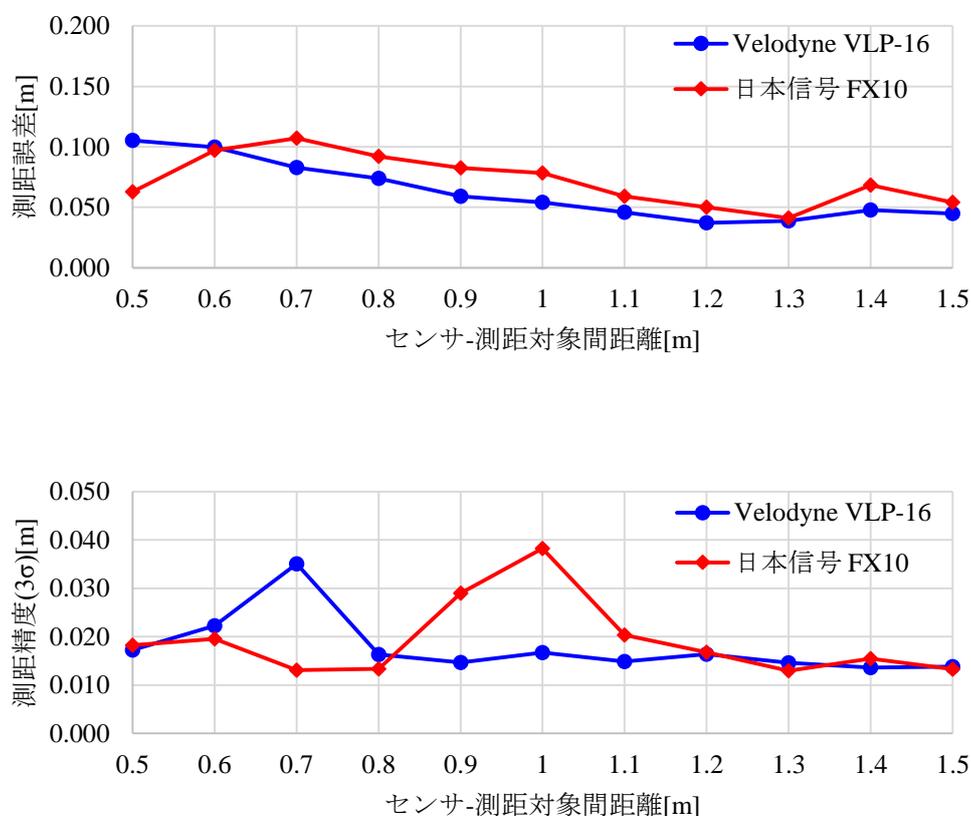


図 2.5.3-5 測距精度計測結果

2.5.4 LiDAR の基本性能まとめ

VLP-16 及び FX10 の 2 機種 of LiDAR について測距性能を評価した。

VLP-16 では計測対象位置による測距誤差のバラつきが、計測対象との距離 1.1m において約 0.03m であった。垂直方向に配置されているレーザの個体差や取付け誤差が原因と考えられ、今後個々のレーザについて評価を行い補正を行うことで精度向上が可能と考えられる。

また、測定対象との距離 1m 以下においては距離が近いほど誤差が大きくなることから、VLP-16 の搭載位置は縁石から常に 1m 以上離れる位置にすることが望ましい。

FX10 では輝度値の高い計測位置で距離が小さく計測されることが確認された。今後、縁石と同等の材質で輝度値の分布がどのようになるか、輝度値による距離の補正が可能かどうかの検証を実施していく。

また、VLP-16、FX10 いずれの LiDAR も $40 \pm 20\text{mm}$ の正着精度を実現するためには単一の測定点での繰返し精度が不足している。そのため、縁石側面などの同一平面内の測距データにフィルタリングや平均化などの処理を行うことで、距離検出精度の向上を目指す。

第3章 乗用車用と共用できる ECU 構造の構築の検討

3.1 目的

次世代都市交通システム正着制御に係るセンシング技術や制御技術の実用化に向け、当社の電動パワーステアリング用 ECU での実績を活かしながら、自動運転で必須となる機能安全対応技術や操舵・制動の統合連携制御を織り込んだ乗用車と共用可能な自動運転対応制御システムの検討を行ったので報告する。

3.2 基本構成

乗用車用途と共用できる箇所を最大限に活用しつつ、乗用車と大型バスで異なる電源電圧（12V/24V）に対応必要な箇所のみ変更することとした。図 3.2-1 に示すように、冗長型操舵 ECU については、24V 対応に変更する箇所以外は乗用車用と共用する（白抜き部分）。また、正着精度を実現するためには、大型バス特有の操舵系の応答遅れ補償など、乗用車と異なる制御の導入が不可欠であるため、正着制御用 ECU 基板を増設する構成とした。故障により操舵系 ECU の機能が一部失陥しても、制御継続可能な冗長型のシステム構成としている。ただし、本構成では正着制御 ECU 部が失陥した場合、正着制御継続は不可能となり、運転者の操舵介入を促すことになる。

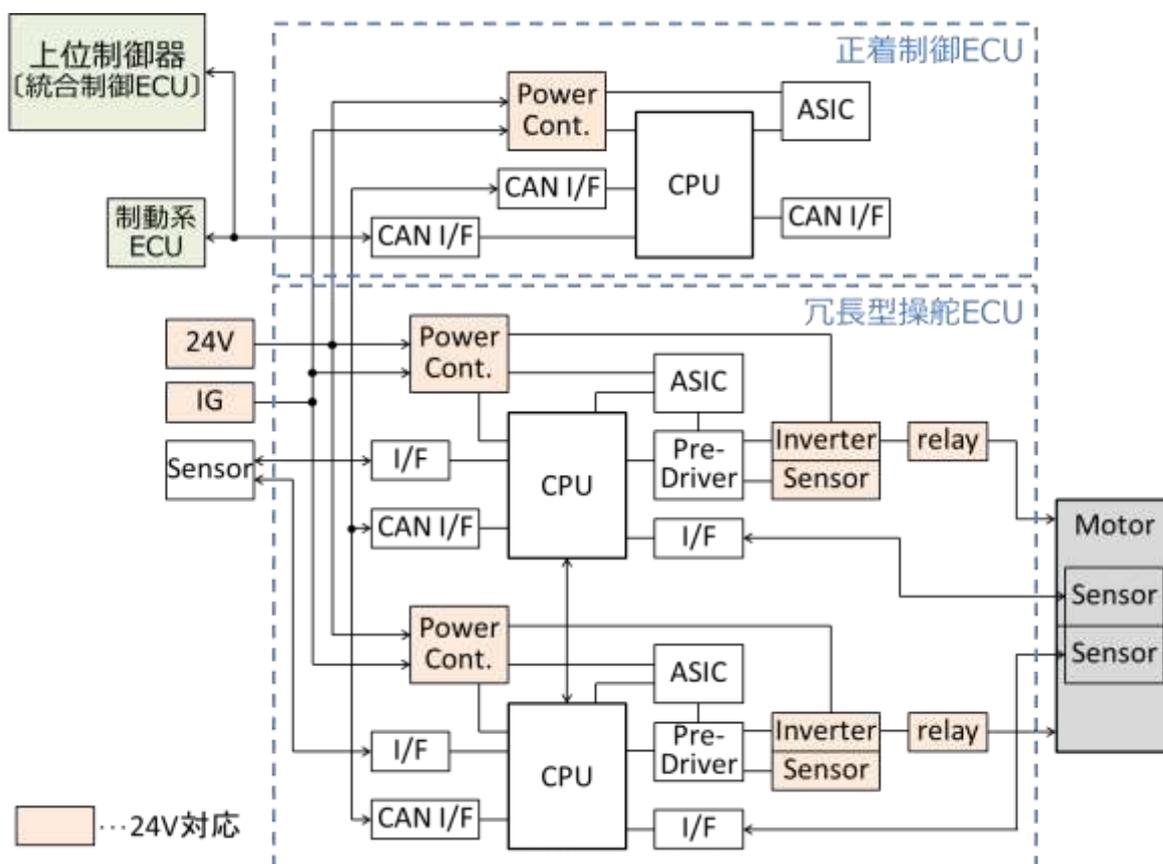


図 3.2-1 自動運転対応大型バス用操舵系制御システムのブロック図

図 3.2-2 に、構想段階の操舵系 ECU の概観を示す。内蔵する基板は、冗長型操舵 ECU と正着制御 ECU の 2 枚構成とすることで、今後の自動運転技術の進化や正着制御 ECU の冗長化にも柔軟に対応できる構成としている。

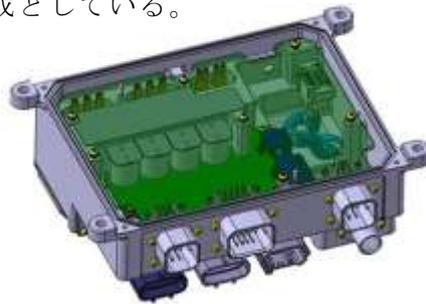


図 3.2-2 構想段階の操舵系 ECU 外観

3.3 まとめ

上位制御器も含め、乗用車用途と共用できる要素は多い。現時点での上位制御器も含めた大型バス自動運転システム構成例（概略）を図 3.3-1 に示す。全体最適を考えた際、もっとも考慮すべき点は、制御器系の電源電圧を 24V 対応とするのか、24V/12V 変換器を搭載し乗用車用途との共用化・共通化を図ることも考慮すべきと思われる。また、通信環境やダイナミックマップなどインフラを含めた周辺技術も劇的に進化していく可能性が高く、次世代交通システムとしての利便性や快適性を向上させるエンターテインメント領域のコンテンツも増加していくことが予想される。環境変化や時代背景を考えると、上位制御器の負荷は増加する一方となり、システム全体の通信負荷や演算負荷を考慮すると、正着制御などの特定箇所への位置精度向上技術は、下流側のシャシー系制御器が担うべきとも考え、実用化に向けた調査検討を継続して推進していく。

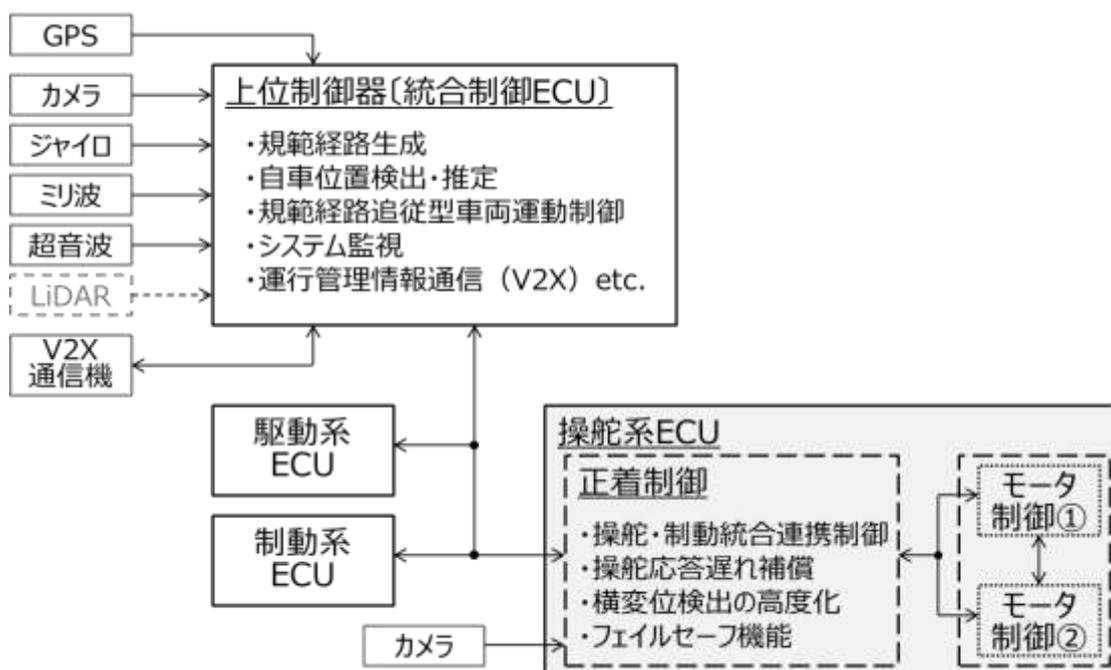


図 3.3-1 大型バス自動運転システム構成例（概略）

第4章 運転者の操作と自動制御の利点の両立に関する研究

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）では、段差や幅を最小限に抑えたバス停への正着制御機能の研究開発が推進されている。SIPでは、Society of Automotive Engineers（SAE）で定義している自動運転レベルを採用しており、自動運転のレベル3では、基本的にシステムが運転を行い、運転者は監視義務からも解放される。しかし、緊急時やシステム故障時などシステムが要請したときは、運転者が手動運転により対応を行うことが期待されている。正着制御機能は、レベル2およびレベル3による実用化が考えられる。レベル2やレベル3の場合は、運転主権があるのはシステムか運転者かのいずれか一方である。運転主権をシステムに100%依存していたのでは、システムの要請に対する運転者の対応が遅れてしまう可能性がある。そのため、運転主権が運転者とシステムの両方にあり、役割分担によって実施されること（シェアードコントロール）により、常に運転者が操舵操作に関与していることが望ましい。

そこで、正着制御機能における運転者と自動制御の利点の両立について、実現方法を検討するとともに、ドライビングシミュレータ（DS）にて機能確認を行った。本内容は、東京大学への再委託研究として実施した内容であり、4.1節から4.4節で述べる。

4.1 目的

SIPの研究開発では、「すべての人に優しく、使いやすい移動手段を提供する」ことを基本理念とし、「段差や幅を最小限に抑えたバス停への正着制御機能により、車いすやベビーカーの方が介助なしで乗降できる使いやすさを実現するほか、周辺の交通状況をふまえたスムーズな加減速機能により、車内転倒事故防止を図る」ことがあげられている。車いすの車輪がバス停とバス車両との間に落ちることなく、乗降を行うためには60mm以下に隙間を抑える必要がある。そのため、図4.1.1-1に示すように実証実験では $40\pm 20\text{mm}$ の精度での正着制御機能の実現を目指し、実車による制御実験が実施され、性能の実証が行われている。実証実験のシステムは、レベル2相当であり、運転手が操舵に介入した際にはシステムは手動に切り替わる（オーバーライド）。実路では、バス停付近に駐車車両や落下物などが存在する可能性がある。バス停への正着では、これらの駐車車両を避けながらの実施が必要となる。現状のセンシング性能では、落下物や轍を安定して検出することは難しく、当面はこのような障害については運転手による認識により行われることが期待される。しかし、運転手が操舵に介入した場合は、システムは自動から手動へと切り替わってしまう。そのため、正着において運転者による運転では、安定した再現が困難な場面（バス停の摺り寄せなど厳密な制御性能が求められるような場面）については自動制御により正着を行い、それ以外の場面では運転者の介入を許すといった自由度の高いシステムが求められる。運転者の介入により、微小な障害物や落下物などを避けたり、緊急時の対応を迅速に行えるなどの利点が考えられる。また、運転者の自由度を高めることにより、運転手に対する正着制御機能の受容性の向上へとつながることも期待される。



図 4.1.1-1 バス停への正着制御の実証実験

本調査では、運転者の操作と自動制御の利点の両立を目指し、正着に関する知見を得ることを目的として路線バスのドライバによる実車実験を行う。その際の運転行動および車両情報を計測して、実現すべき目標機能やシェアードコントロールについて検討を行う。また、システムと人とのシェアードコントロールの実現について検討を行い、基本コンセプトを示すとともに、プロトタイプシステムを提案し、ドライビングシミュレータを用いて機能検証を行う。最終的に、得られた知見から正着制御機能におけるシェアードコントロールの実現方法を検討する。

4.2 バス運転手による実車走行実験

4.2.1 実車走行実験

本調査におけるシェアードコントロールでは人とシステムとの協調が重要となる。そのため、運転者の操作と自動制御の利点を両立したシェアードコントロールの実現に向けた検討として、職業ドライバ（路線ドライバ）を対象として、正着制御実験を実施した。本走行実験は、東京大学の倫理審査専門委員会での承認および被験者へのインフォームドコンセントを得た上で実施した。

4.2.2 被験者

本走行実験では、5名の職業ドライバ（路線ドライバ）により正着走行を実施した。表 4.2.2-1 に被験者情報を示す。

表 4.2.2-1 被験者情報

被験者	年齢	性別	免許歴 (年)	大型免許歴 (年)	路線ドライバ歴 (年)
A	31	女性	4	4	3
B	62	男性	44	42	12
C	47	男性	23	8	3
D	56	男性	36	30	8
E	46	男性	28	21	5

4.2.3 実験条件

本実験は、東京大学生産技術研究所附属千葉実験所にて行った。実験走行では、小型路線バスとして利用されているリエッセ（日野自動車）を用い、図 4.2.3-1 に示すように、直線路（約 300m）に対する正着と右折後すぐの正着の 2 種類とした。図 4.2.3-1 中の①が直線路に対する正着箇所、図中の②が右折後すぐの正着箇所となる。直線路の正着は、停車までの幅寄せまでに長い距離が確保できるケース、右折後すぐの正着は停車までの幅寄せまでの距離が短いケースを想定している。



図 4.2.3-1 実験フィールド

直線路の正着実験における経路は次の 3 種類とした。また、図 4.2.3-2 に直線路における走行実験の概要を示し、実際の実験風景を図 4.2.3-3 に示す。

- A：同一車線走行からの正着
- B：センターラインからの正着
- C：対向車線からの正着

車速については、運転手の任意の速度と、30km/h 定常からの減速とした。なお、30km/h 定常からの減速については、運転手の任意の減速とした。

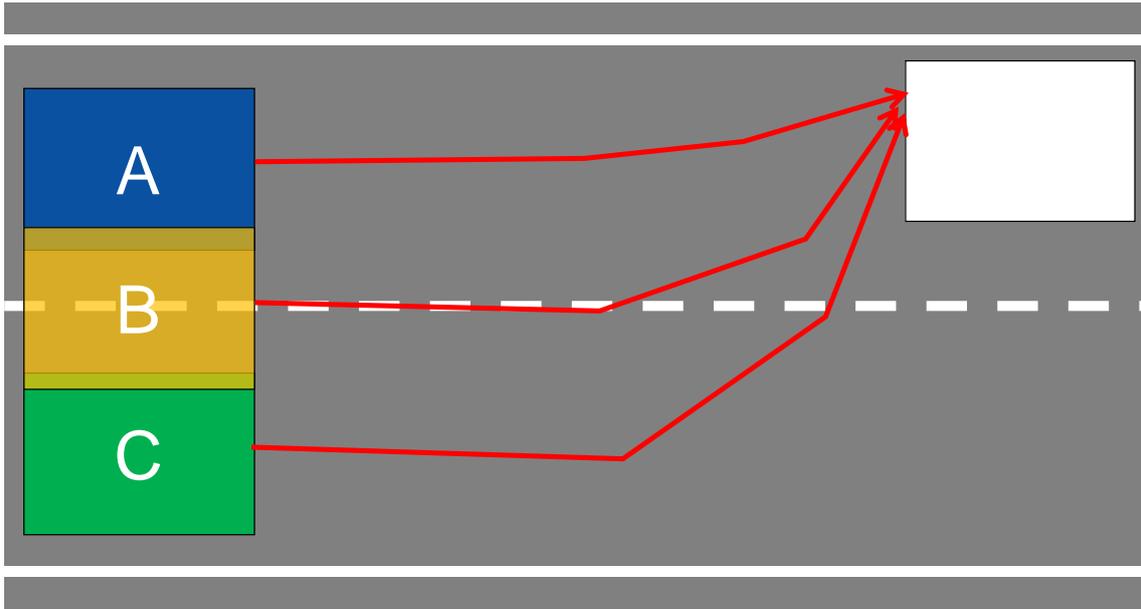


図 4.2.3-2 直線路における正着実験



図 4.2.3-3 直線路の正着実験における開始地点（実際の風景）

右折後すぐの正着実験について、図 4.2.3-4 に走行実験の概要と実際の実験風景を示す。



図 4.2.3-4 右折後すぐの正着実験

実験条件を表 4.2.3-1 に示す。

表 4.2.3-1 実験条件

試行 ID	正着箇所	走行開始地点	車速
1	直線路	同一車線	任意
2	直線路	同一車線	任意
3	直線路+右折	センターライン	任意
4	直線路+右折	センターライン	任意
5	直線路+右折	対向車線	任意
6	直線路+右折	対向車線	任意
7	直線路+右折	センターライン	30km/h 一定
8	直線路+右折	センターライン	30km/h 一定
9	直線路+右折	対向車線	30km/h 一定
10	直線路+右折	対向車線	30km/h 一定

4.2.4 走行実験結果

各試行後に、実験車両の前方と中央の乗降口と縁石までの距離を計測した。計測地点を図 4.2.4-1 に示す。計測結果を表 4.2.4-1 に示す。



図 4.2.4-1 計測地点

表 4.2.4-1 実験結果

被験者	天候	試行	正着精度:直線(cm)		正着精度:カーブ(cm)	
			前方位置	中央位置	前方位置	中央位置
A	くもり	1	4.5	0.8		
		2	5.2	0.6		
		3	4	0.5	7	2.8
		4	6	1.2	3.1	1.2
		5	1.6	0	2.5	0.6
		6	4.1	0.2	2.3	0.2
		7	4.7	0.1	6	1.5
		8	1.9	0	3	1.1
		9	6.6	1.6	3.4	0.6
		10	2.7	0	2	0
B	くもり	1	12.5	4.6		
		2	5	0		
		3	14	5.5	12	3
		4	10	3.1	7.6	0.4
		5	6.7	2	3.2	0
		6	7.7	0.9	8.7	2.7
		7	8.4	1.1	12.4	4.3
		8	6.4	0.2	5.3	0
		9	1.4	0	4.5	0
		10	13	3.7	4.5	0
C	小雪	1	12.4	7		
		2	14.7	7.2		
		3	11.6	5.6	14.4	5.8
		4	12.8	4.6	13.6	7
		5	12.2	5.1	16.2	7.4
		6	8	4.6	10	3.1
		7	16.5	9.8	2.6	0
		8	12.1	6.7	1.5	0.4
		9	2.5	0	11	2.5
		10	10.9	4.6	17.6	7.7
D	小雨	1	10.2	4.3		
		2	17	8.7		
		3	14.9	7	18.5	10.5
		4	12.2	3.4	9.5	1.4
		5	4.9	0	8.6	2.6
		6	19.5	7.4	5.5	1.3
		7	8.5	0.4	25.3	13.3
		8	11.5	3.2	10.5	2.4
		9	5.4	0.3	4.5	0
		10	10.6	2	14.6	5.5
E	晴れ	1	3.7	0		
		2	8.5	0.4		
		3	6	0	5.9	0
		4	3.6	0	10	1.3
		5	0.6	0	4.9	0
		6	0	0	7.6	0.3
		7	0.4	0	3.5	0
		8	5.9	0.6	3	0
		9	0	0	3.8	0
		10	3.7	0	2.1	0

直線路と右折における正着精度を図 4.2.4-2 に示す。直線路と右折とで精度に大きな違いは生じなかった。スタート位置については、図 4.2.4-3 に示すように正着幅の広い対向車線から開始した方が精度が良い結果となった。車速については、図 4.2.4-4 に示すように 30km/h 定常からの正着の方が精度が高い結果となった。

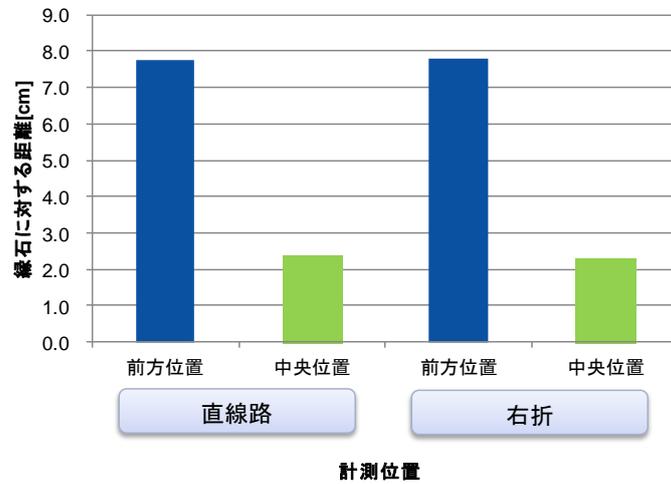


図 4.2.4-2 正着結果（直線路+右折）

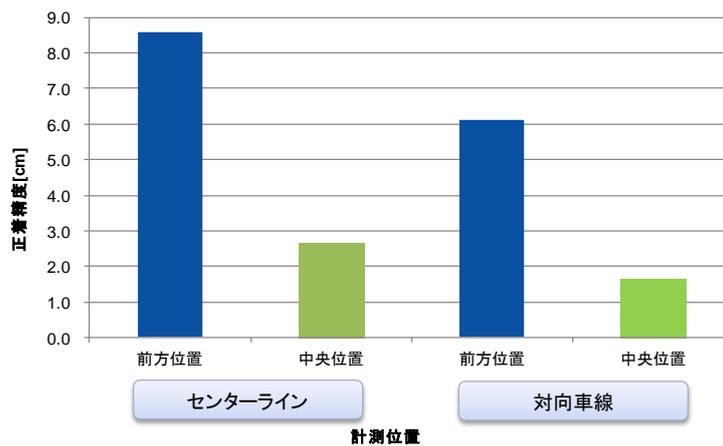


図 4.2.4-3 正着結果（センターライン+対向車線）

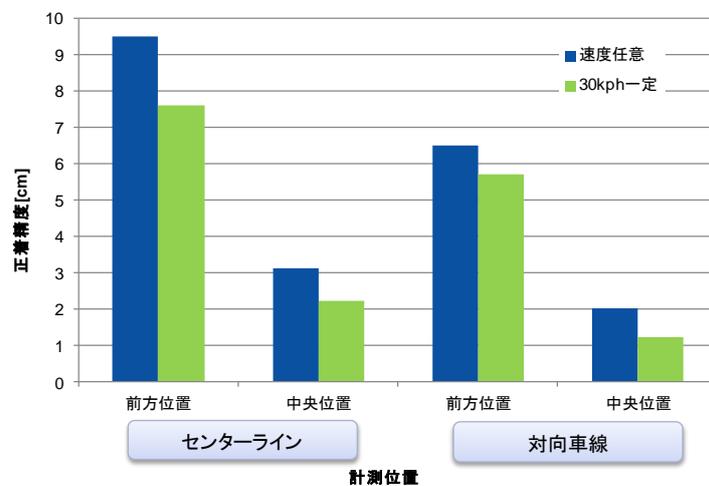


図 4.2.4-4 正着結果（速度条件ごと）

同一車線での精度の高かった被験者 E の試行 1 の正着時の GPS 軌道を図 4.2.4-5 に示す。また、その際の曲率半径を図 4.2.4-6 に示す。

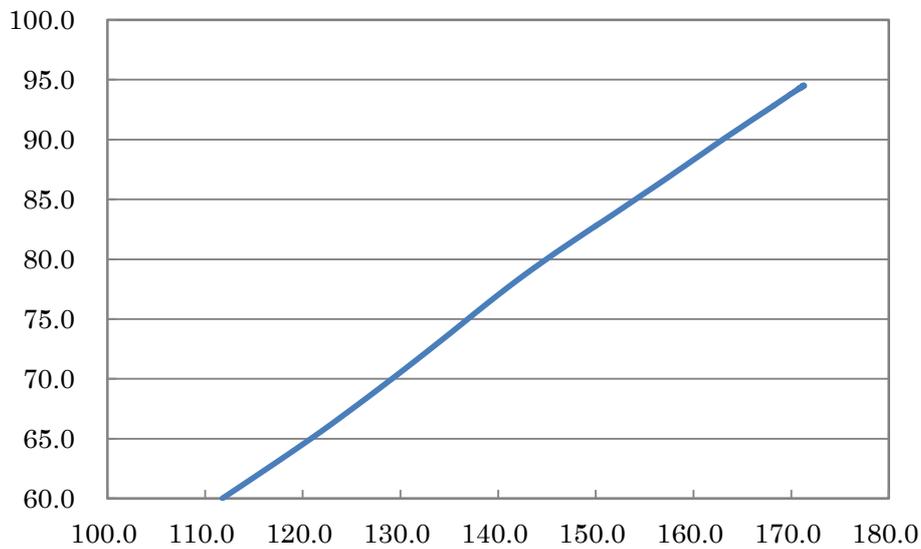


図 4.2.4-5 正着 GPS 軌道（被験者 E の試行 1）

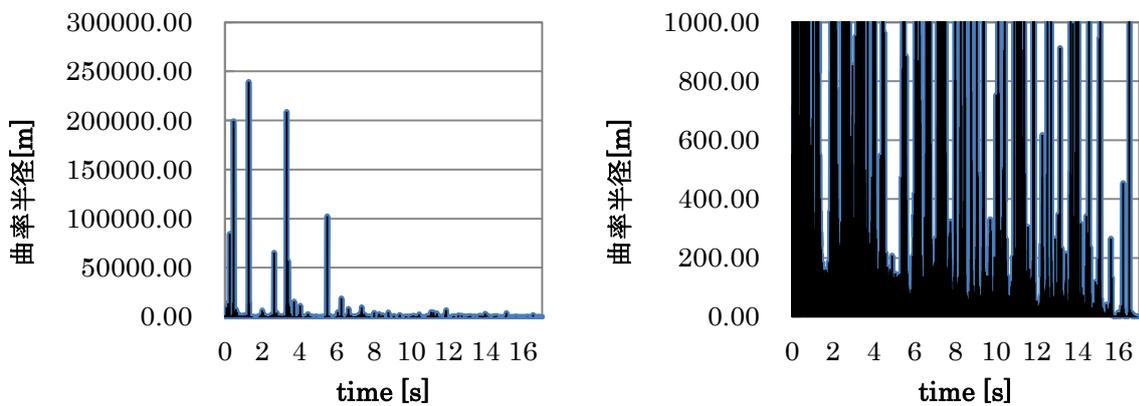


図 4.2.4-6 正着 GPS 軌道の曲率半径（被験者 E の試行 1）

4.2.5 まとめ

実車走行実験により正着に関する職業ドライバーの運転データを計測することができた。今後、本運転データを用いて正着時の目標軌道の設計やシステムのパラメータ設計などに活かすことが可能である。

4.3 シェアードコントロールの検討

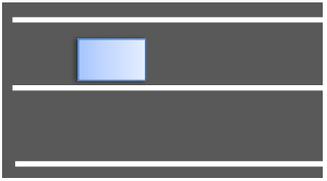
4.3.1 シェアードコントロールに関する整理

自動制御による正着精度と運転者による運転に関する自由度を両立するシェアードコントロールの検討のため、以下の観点から整理を行った。

- ・どのタイミングでどのような操作があり得るか
- ・各評価軸でシステムの組合せを整理する
候補となるシステム：
 - A：操舵角制御（ドライバ介入なし）
 - B：反力トルクによるガイダンス（LKA）
 - C：ドライバモデルを導入した LKA
 - D：操舵方向のみ伝達（操舵量不明）
 - E：反力トルクによる FF 制御
- ・システム/運転者/乗客からの見え方を評価する

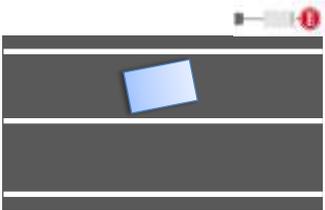
整理した結果を図 4.3.1-1 に示す。

幅寄せ開始直前



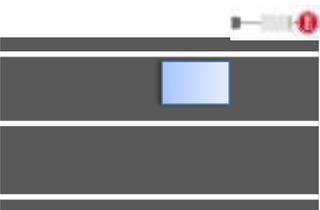
LKA	ドライノイFB	ドライノイFF	システム	ドライバ	乗客	
A	○	×	×	◎ 高精度な操舵制御が可能 評価：操備差・通過角	△：自由度が低く、障害物回避時はシステムの切り替えが必要 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	
B	○	○	×	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角		
C	○	○	×	△：精度の高い走行が期待できるが、ドライノイの操作に依存してしまう 評価：操備差・通過角 ×：操舵制御の精度について期待できない 評価：操備差・通過角	◎：ドライノイにより自然な操作が期待できる(走行安定性も期待できる) 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	○：乗客の乗り心地には特に影響ない 評価：横G・横ジャーク
D	×	×	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角		
E	×	○	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵角Fが外乱のように感じる可能性がある 評価：主観評価	

幅寄せ中



LKA	ドライノイFB	ドライノイFF	システム	ドライバ	乗客	
A	○	×	×	◎ 高精度な操舵制御が可能 評価：操備差・通過角	×：自由度が低く、障害物回避などの非常時の対応は困難 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	○：経路さえ適切に設計すれば、乗客の乗り心地には特に影響ない 評価：横G・横ジャーク
B	○	○	×	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	△：操舵としてはバンバシ制御に近いので乗り心地の悪化につながる可能性がある 評価：横G・横ジャーク
C	○	○	×	△：精度の高い走行が期待できるが、ドライノイの操作に依存してしまう 評価：操備差・通過角 ×：操舵制御の精度について期待できない 評価：操備差・通過角	◎：ドライノイにより自然な操作が期待できる(走行安定性も期待できる) 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	△：操舵としてはバンバシ制御に近いので乗り心地の悪化につながる可能性がある 評価：横G・横ジャーク
D	×	×	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	×：操舵方向の指示だけでは乗り心地が悪化する可能性がある 評価：横G・横ジャーク
E	×	○	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵角Fが外乱のように感じる可能性がある 評価：主観評価	△：自然な運転に近くなることが期待できるが、F入力により乗り心地の悪化につながる可能性がある 評価：横G・横ジャーク

切替しから停車



LKA	ドライノイFB	ドライノイFF	システム	ドライバ	乗客	
A	○	×	×	◎ 高精度な操舵制御が可能 評価：操備差・通過角	×：自由度が低く、障害物回避などの非常時の対応は困難 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	○：経路さえ適切に設計すれば、乗客の乗り心地には特に影響なく、高精度な正着が可能 評価：横G・横ジャーク
B	○	○	×	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：主観評価	△：操舵としてはバンバシ制御に近いので乗り心地の悪化とともに、正着できない可能性がある 評価：横G・横ジャーク
C	○	○	×	△：精度の高い走行が期待できるが、ドライノイの操作に依存してしまう 評価：操備差・通過角 ×：操舵制御の精度について期待できない(高精度な正着は困難) 評価：操備差・通過角	◎：ドライノイにより自然な操作が期待できる(走行安定性も期待できる) 評価：主観評価 ○：障害物回避といった操作の自由度が高い(通常の運転に近い環境で走行可能) 評価：主観評価	×：操舵方向の指示だけでは乗り心地が悪化する可能性がある 評価：横G・横ジャーク
D	×	×	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵角Fが外乱のように感じる可能性がある 評価：主観評価	△：自然な運転に近くなることが期待できるが、F入力により乗り心地の悪化につながる可能性がある 評価：横G・横ジャーク
E	×	○	○	△：操備差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・通過角	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵角Fが外乱のように感じる可能性がある 評価：主観評価	△：自然な運転に近くなることが期待できるが、F入力により乗り心地の悪化につながる可能性がある 評価：横G・横ジャーク

図 4.3.1-1 シェアードコントロールに関する整理

4.3.2 シェアードコントロールのプロトタイプシステム

図 4.3.2-1 に示すような自車両上に制御点がある PathFollowing 制御といった制御を用いる場合、システムの目標に対するシステムのフィードバックが運転者の直感と一致しないことが考えられる。これは、人は本来車両前方を見て、将来的な車両運動を予測して修正操舵を行うからである。

操舵制御

～Path Following Control～

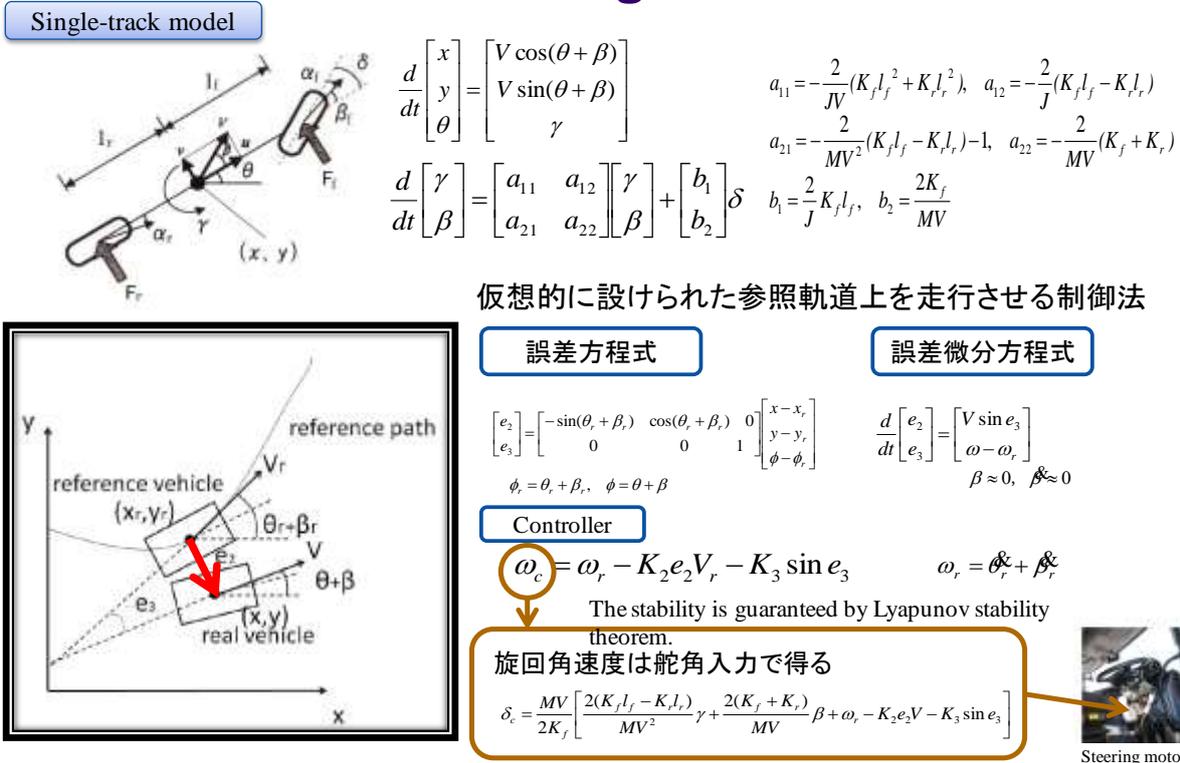


図 4.3.2-1 Path Following 制御

人との親和性の向上のため、図 4.3.2-2 に示すように前方注視モデルに基づくフィードバックを採用する。また、前方注視点に対する誤差だけでなく、図 4.3.2-3 のように角度に関する誤差を考慮する。運転者による運転操作に対する応答性を向上させるため、微分項を導入した式 4.3.2-2 によりフィードバックするトルクの算出を行う。

$$u = K_{p1} e + K_{d1} \dot{e} + K_{p2} \theta + K_{d1} \dot{\theta}$$

$u = \text{反カトルク} \quad K = \text{FBゲイン} \quad \text{(式 4.3.2-2)}$

$e = \text{誤差(横偏差)} \quad \theta = \text{誤差(角度偏差)}$

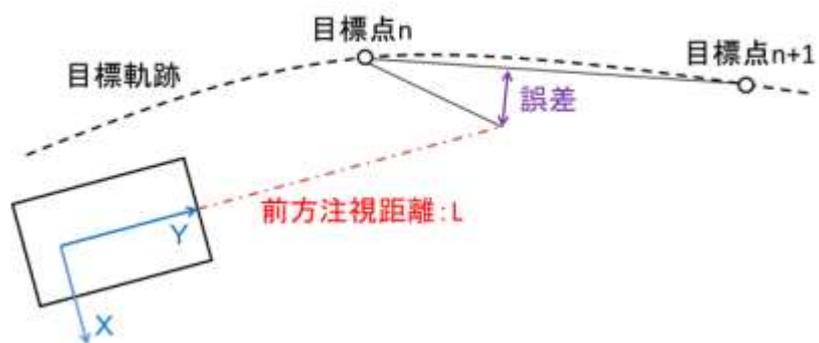


図 4.3.2-2 前方注視モデル

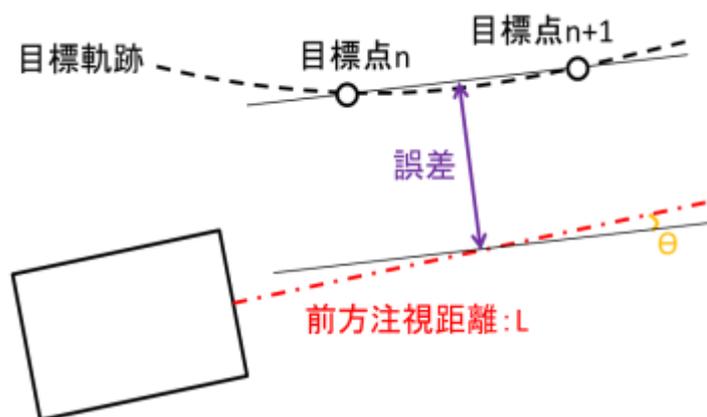


図 4.3.2-3 角度の誤差を考慮した前方注視モデル

運転者の自由度については図 4.3.2-4 の (2) に示すように、ゲインに不感帯を設定することにより表現を行う。一般に、図 4.3.2-4 の (1) のように一定値によりフィードバックを行うが、本システムでは不感帯とゲインを表現する関数を整形することで、運転者との協調を図る。

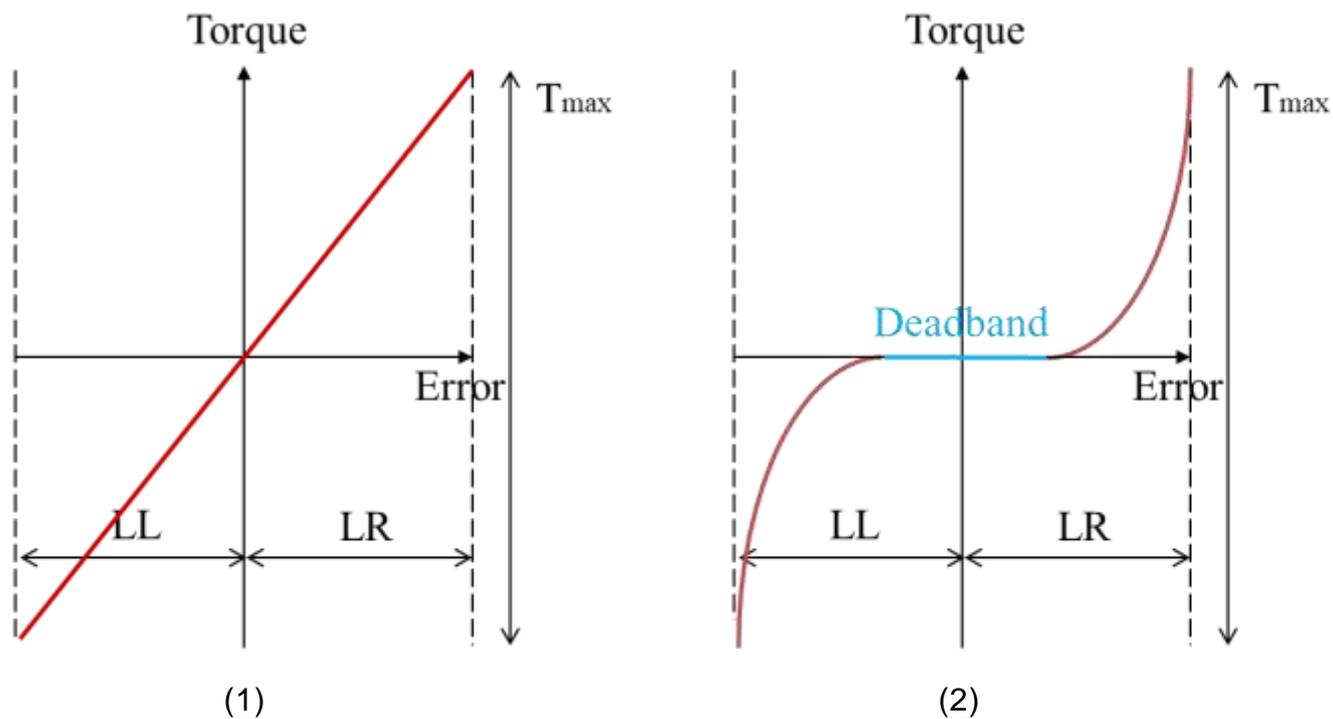


図 4.3.2-4 人の自由度の表現

本機能を東京大学生産技術研究所の保有するドライビングシミュレータへ実装し、機能確認を行った。走行するコースは図 4.3.2-5 に示すような直線とカーブで構成されたコースの走行を行った。本検証では、180R とした。また、速度については 40km/h とし、自動で定常に制御されるため、運転手は操舵のみを行うこととした。まず、基本機能の確認として、手放しによる走行と手で外乱を加えながらの走行を行った。

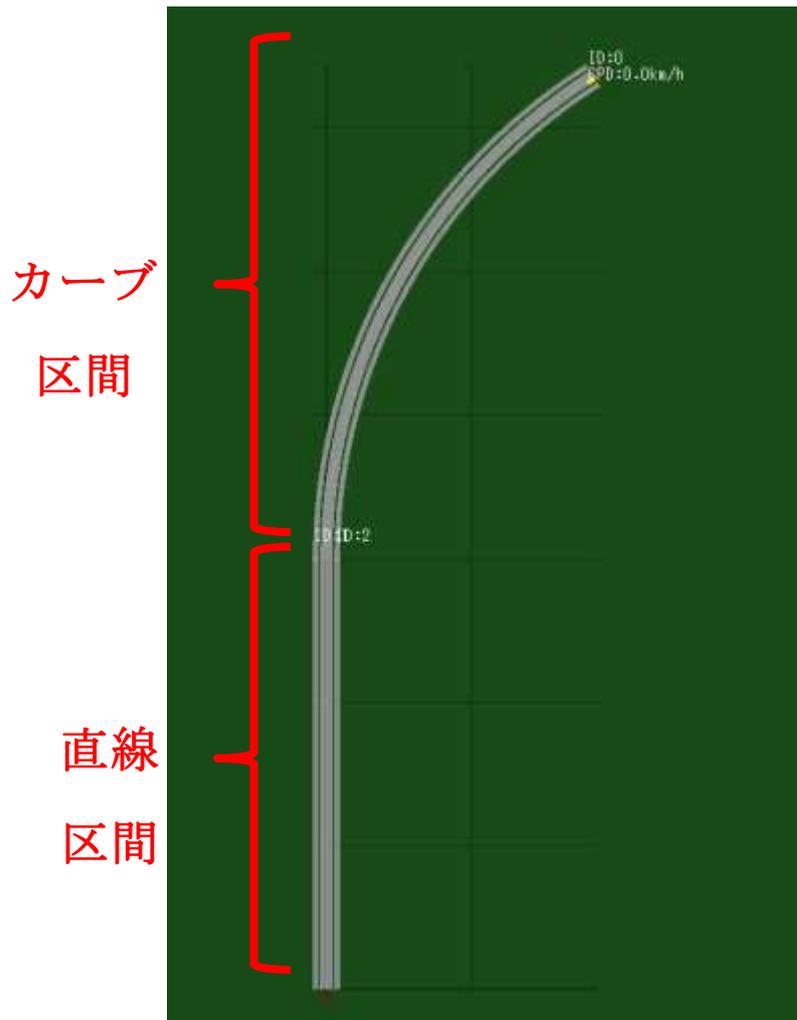


図 4.3.2-5 DS 実験での走行コース

DS 実験結果について、図 4.3.2-6 に「外乱なし」の結果を示し、図 4.3.2-7 に「外乱あり」の結果を示す。まず、「外乱なし」は運転者がハンドル操作を加えていない結果を示し、「外乱あり」は運転者がハンドル操作を加えていることを示す。まず、「外乱なし」については、80s 過ぎで直線からカーブへと切り替わるため誤差が過渡的に増大しているが収束できている結果が得られた。次に、「外乱あり」については、40、50、60s 付近でハンドル操作（外乱）を加えても目標軌道に追従できている結果が得られた。

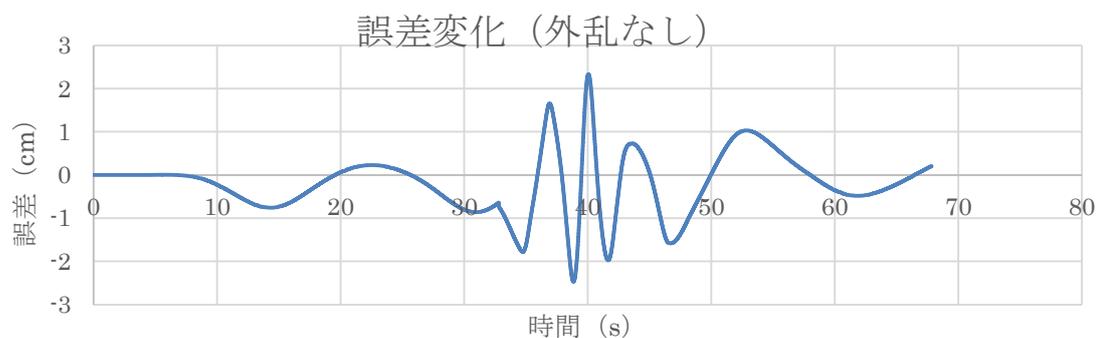


図 4.3.2-6 実験結果（外乱なし）

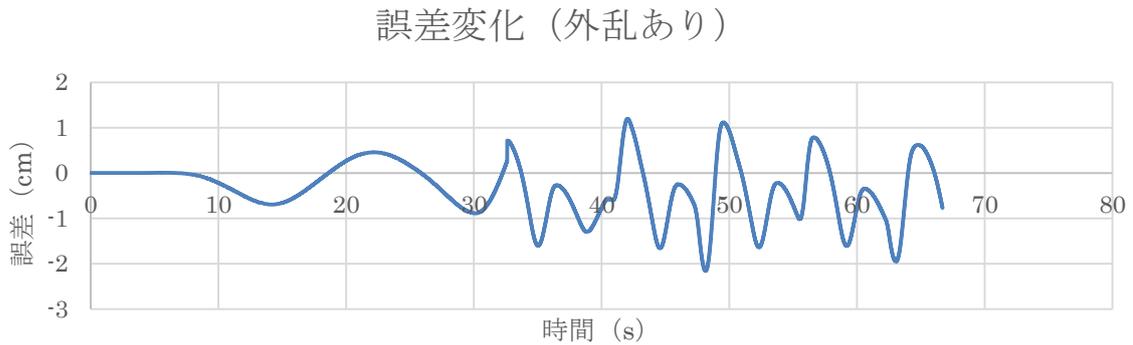


図 4.3.2-7 実験結果（外乱あり）

4.4 まとめ

本研究は、運転者の操作と自動制御の利点の両立を目的として、実車実験により実際のバス運転手の運転行動のデータ計測を行った。また、本コンセプトに基づく正着制御のシェアードコントロールのプロトタイプを作成し、ドライビングシミュレータにより機能確認を行った。今後は、本結果をもとに制御手法の検討およびパラメータスタディを行い、本システムの実現を目指す。

第5章 まとめ

大型バスでの正着制御において、横偏差算出に関する方策、制御ゲインに関する方策、操舵系あそびを考慮する方策により、直進時の車両横方向偏差の振幅を低減し、正着精度も向上した。ただしあそびの考慮により、ハンドルが素早く動く挙動が起こるため、今後、改善方法を検討する。また制動制御を構築し、高い位置精度での停止を実現した。

バス側方に搭載したカメラを用いて、白線や縁石などの境界線を検出可能であることを示した。ただし逆光や夜間の濡れた路面への映り込みなど、ロボスタ性向上の課題も明らかになった。

運転者の操作と自動制御の利点の両立を目的として、職業ドライバーによる実車での正着実験を行い、目標軌跡の設計やシステムのパラメータ設計のためのデータが得られた。また正着制御のシェアードコントロールのプロトタイプを作成し、ドライビングシミュレータに実装した。今後は、本結果をもとに制御手法の検討およびパラメータスタディを行い、本システムの実現を目指す。

今後も、以上のような課題解決に向けた調査検討を引き続き行い、ARTバス技術に貢献できるよう、推進していく。