

「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」
成果報告書

平成31年2月28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29～30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	
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.....	9
1.3.3 横偏差算出の最適化.....	11
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 公道での実証実験.....	17
1.4.1 正着箇所1 G1 駐車場.....	17
1.4.2 正着箇所2 有明テニスの森駅付近 北向き.....	18
1.4.3 正着箇所3 豊洲駅ロータリー.....	19
1.4.4 正着箇所4 有明テニスの森駅付近 南向き.....	20
1.5 ディスクブレーキシステムにおける制動性能の検証.....	22
1.5.1 試験車両・システム構成.....	22
1.5.2 制動性能試験.....	23
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.....	28
2.2.1 側方カメラによる白線検出.....	28
2.2.2 歩道縁石検出手法の検討.....	33
2.2.3 前方カメラによる白線検出.....	40
2.2.4 前方カメラ/側方カメラフュージョンの検討.....	44
2.2.5 イメージセンサの課題まとめ.....	45
2.3 FPGA 組込化実現性調査.....	46
2.3.1 目的.....	46
2.3.2 ハードウェア化方式検討.....	46
2.3.3 回路規模見積り.....	50
2.3.4 デバイス選定.....	52
2.3.5 結果.....	53

2.5	LiDAR による歩道縁石検出手法の検討	54
2.5.1	LiDAR の基本性能検証	54
2.5.2	測距性能評価方法	55
2.5.3	測距性能評価結果	56
2.5.4	LiDAR の基本性能まとめ	59
2.6	LiDAR による歩道縁石検出手法の検討	60
2.6.1	歩道縁石の検出方法	60
2.6.2	縁石検出の評価	63
2.6.4	公道上における縁石検出の実証実験	75
2.6.5	歩道縁石検出の結果と考察	79
第3章	乗用車と共用できる ECU 構造の検討	
3.1	目的	81
3.2	基本構成	81
3.3	まとめ	82
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	83
4.2	バス運転手による実車走行実験	84
4.2.1	実車走行実験	84
4.2.2	被験者	84
4.2.3	実験条件	85
4.2.4	走行実験結果	87
4.2.5	まとめ	90
4.3	シェアードコントロールの検討	91
4.3.1	シェアードコントロールに関する整理	91
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	93
4.4	まとめ	97
第5章	まとめ	97

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: $40\pm 20\text{mm}$) 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

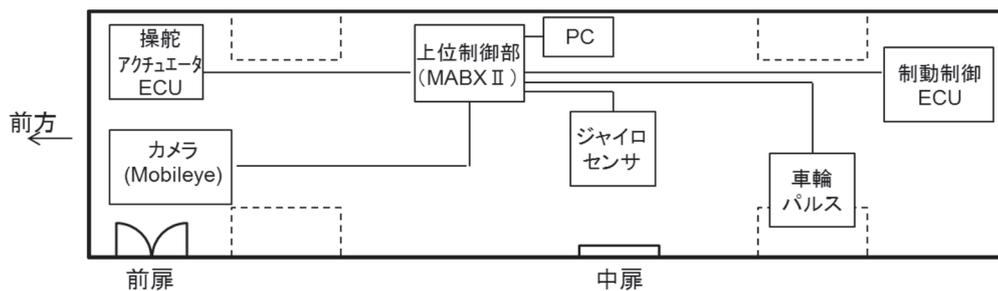


図 1.2.2-1 システム構成

(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。

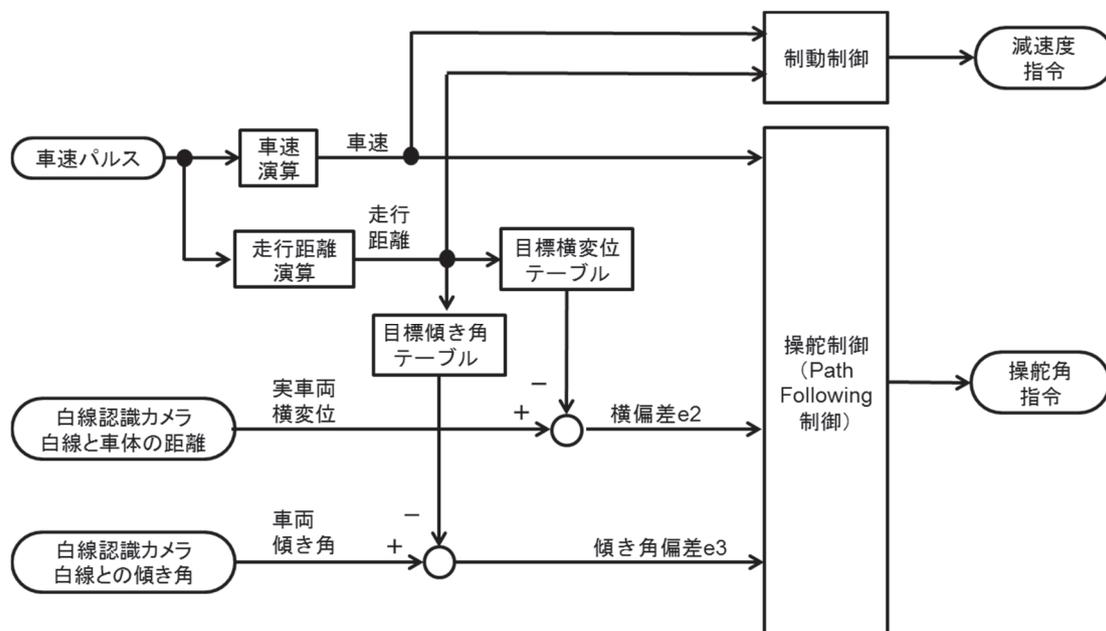


図 1.2.2-2 正着制御構成 (制御ブロック図)

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。

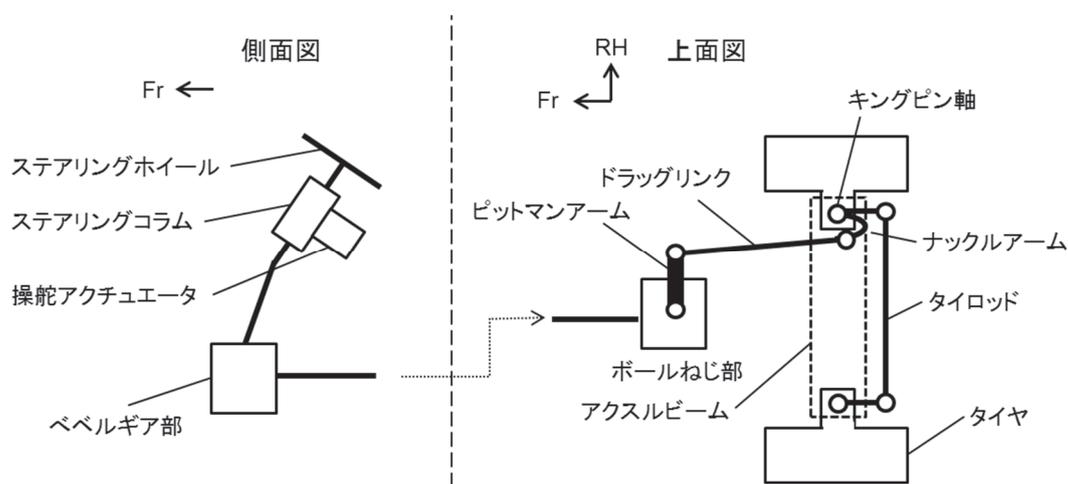


図 1.2.3-1 操舵系構成概念図

(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

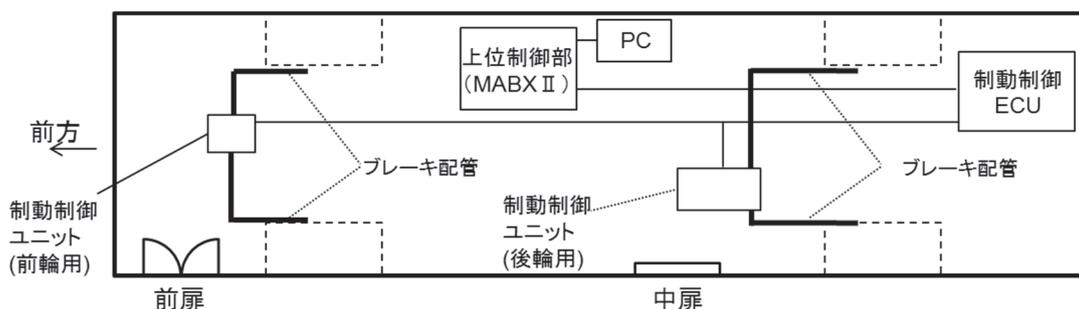


図 1.2.4-1 制動系構成図

(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。

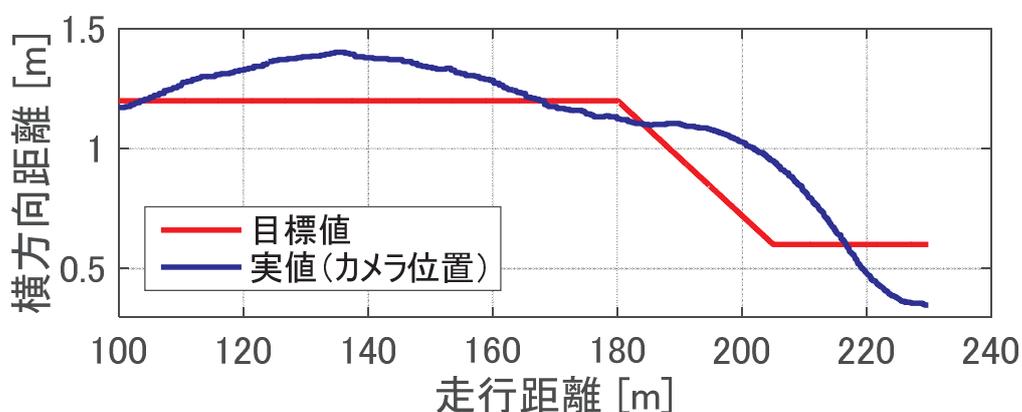


図 1.3.1-1 直線時に合わせたゲインでの挙動

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。

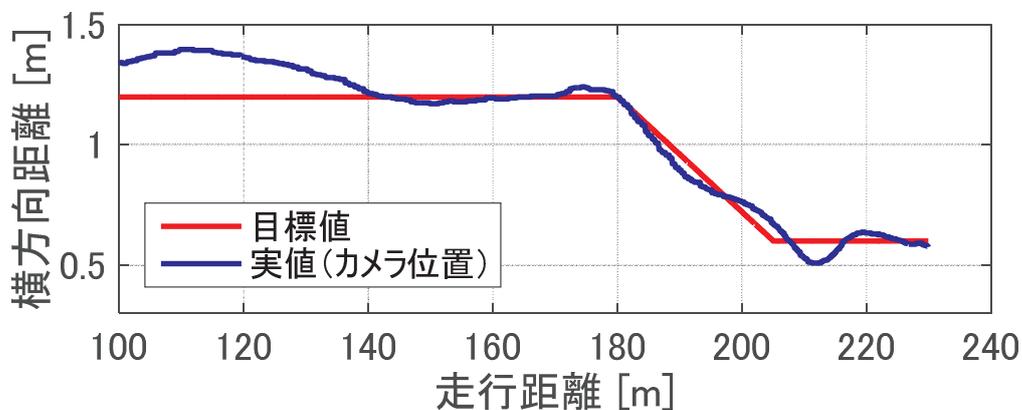


図 1.3.1-2 直線走行時と正着時でゲイン切替えした際の挙動

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。

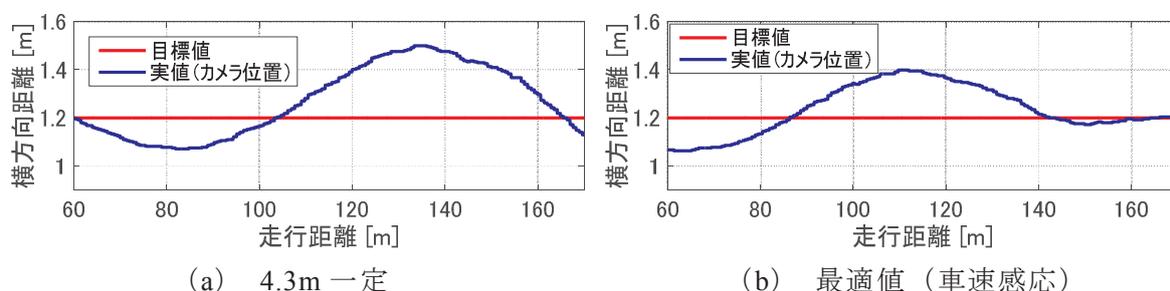


図 1.3.2-1 直線時の偏差確認位置違いによる挙動比較

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。

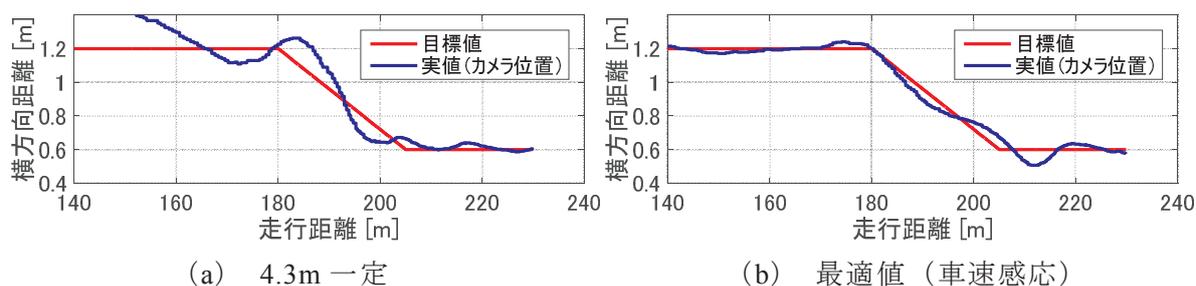


図 1.3.2-2 正着時の偏差確認位置違いによる挙動比較

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。

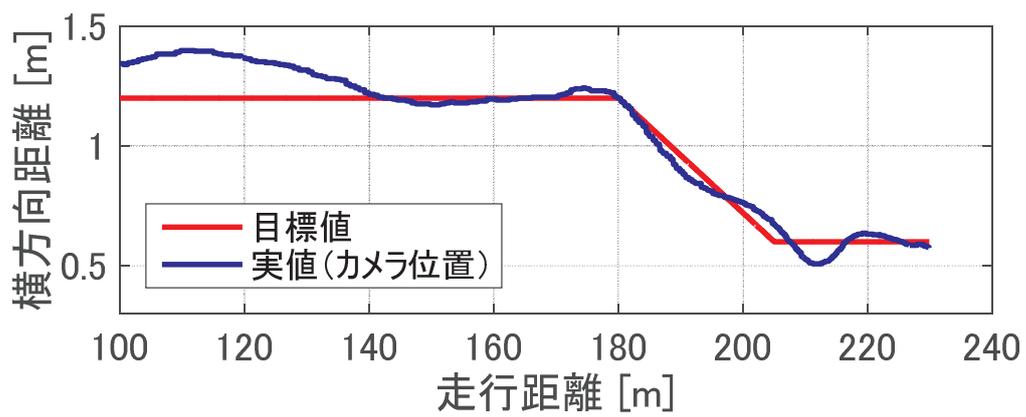


図 1.3.2-3 偏差確認位置の最適値設定による車両挙動

1.3.3 横偏差算出の最適化

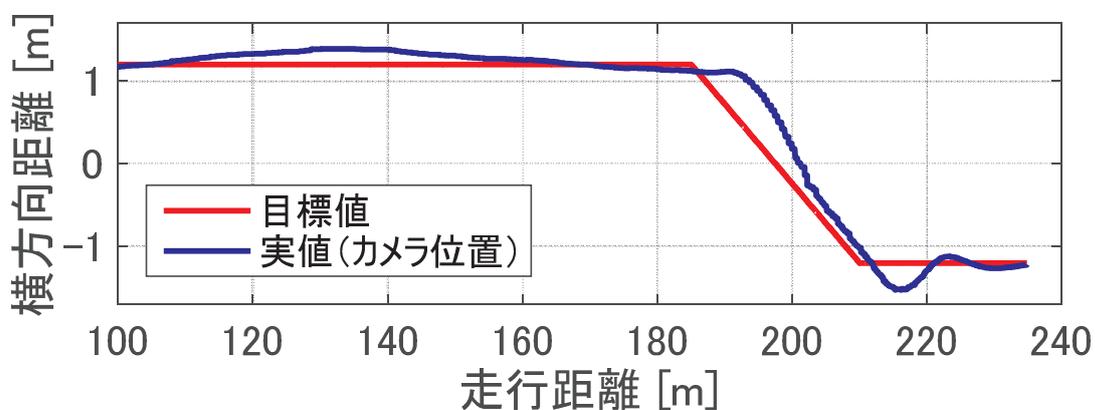
1.3.2 項 では、制御変数である横偏差について、車両前方の値に変換し、制御に用いていた。しかし、目標横位置（目標軌跡）については常に現在の走行距離（走行位置）における値を用いており、車両の応答遅れが大きかった。図 1.3.3-1 (a) に走行軌跡を、式 (1) に横偏差 $e2$ の算出式を示す。

$$e2 = Lt(D) - L(D + F) \quad (1)$$

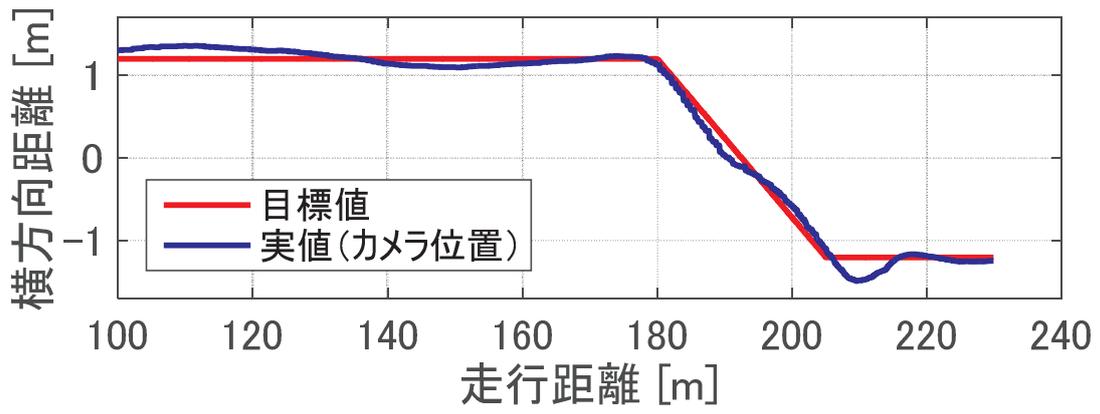
ただし、 $e2$: 横偏差、 Lt : 横方向位置（目標値）、 L : 横方向位置（実値）
 D : 走行距離、 F : 車体から偏差確認位置までの距離

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 $e2$ の算出式を示す。

$$e2 = Lt(D + F) - L(D + F) \quad (2)$$



(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。

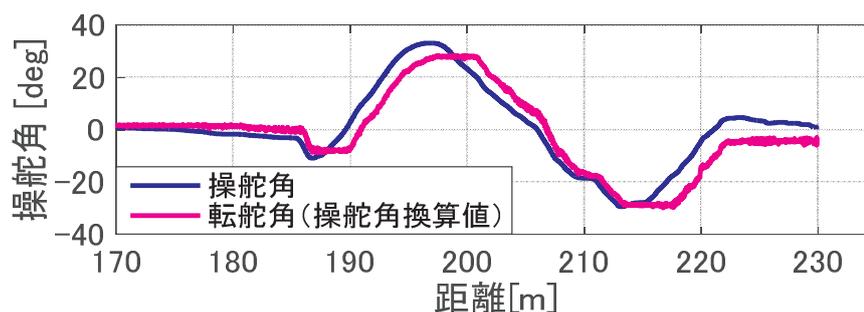
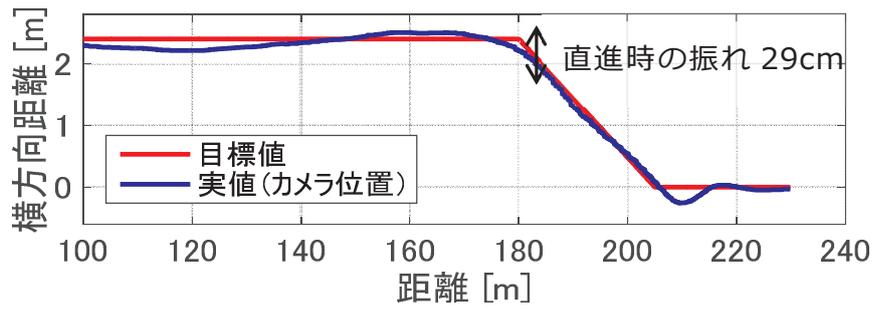
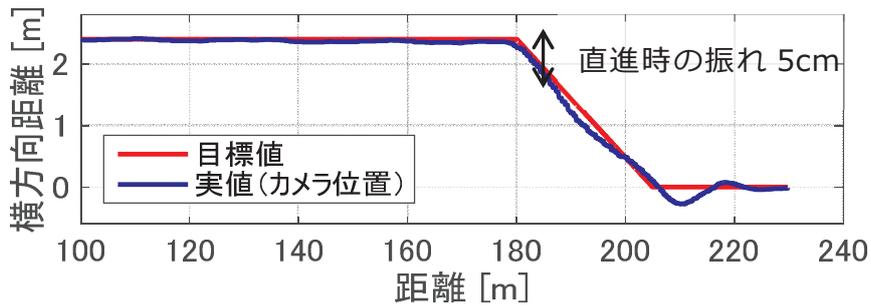


図 1.3.4-1 操舵角と転舵角の関係

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。

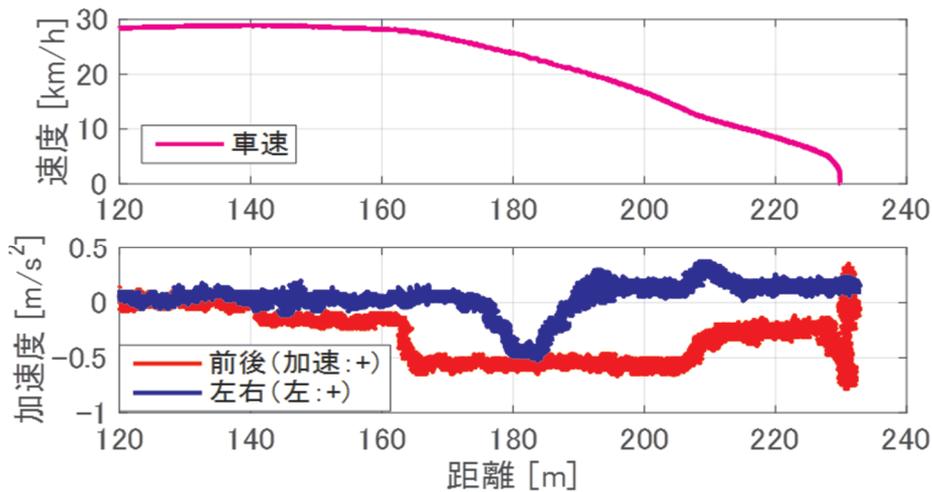


図 1.3.5-1 制動制御時の挙動

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。

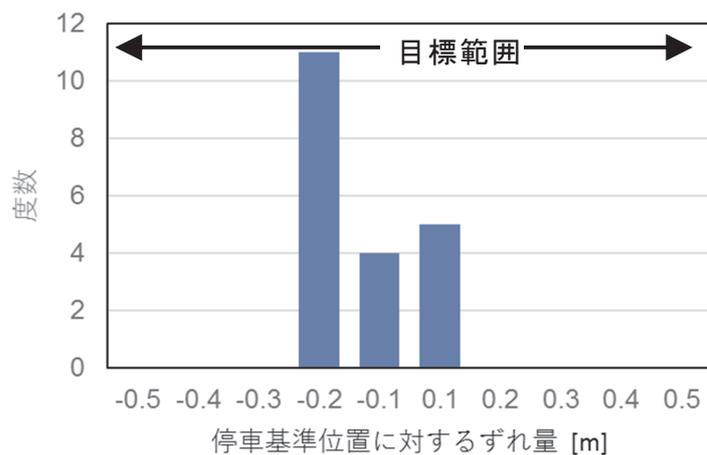
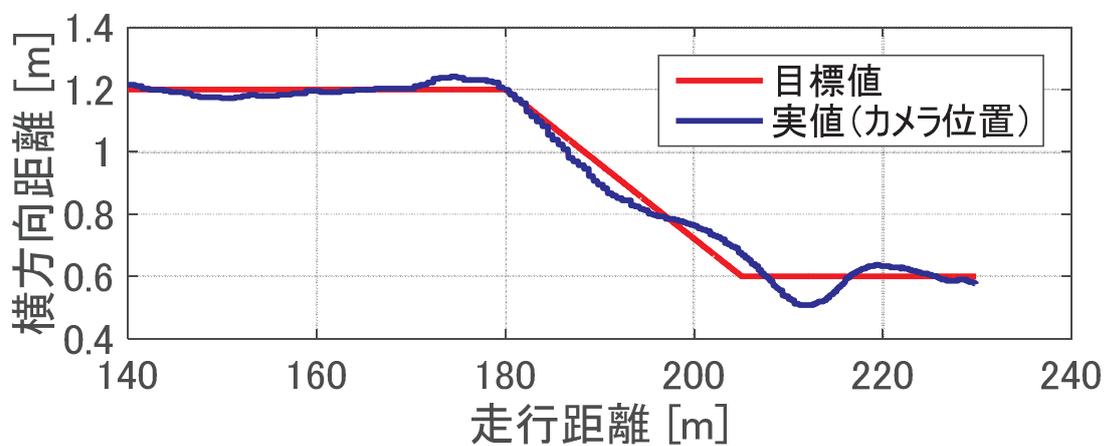


図 1.3.5-2 正着後の停車前後位置分布 (全 20 回)

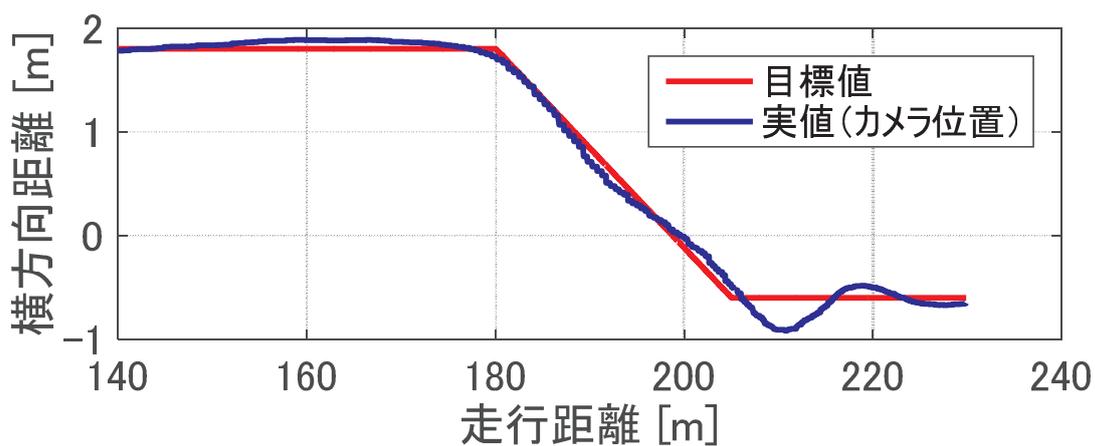
1.3.6 正着時の幅寄せ量拡大

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 公道での実証実験

公道を含めたコースとして、東京臨海地域にて実証実験を行った。コースは、G1 駐車場 (TFT ビル西隣、江東区有明 3 丁目)～豊洲駅(江東区豊洲 2 丁目) の往復とした。正着箇所は、G1 駐車場内の仮設プラットフォーム、有明テニスの森駅付近の路肩北向き、豊洲駅ロータリー、有明テニスの森駅付近の路肩南向きの 4 箇所とした。



図 1.4-1 実証実験コース

1.4.1 正着箇所 1 G1 駐車場

図 1.4.1-1 に G1 駐車場内の正着位置を、図 1.4.1-2 に仮設プラットフォームを示す。仮設プラットフォーム高さは約 340mm とし、バスステップ同等の高さとして、車いすを含めた乗降を考慮した。

障害物がないため GPS 受信状況に問題なく、また正着までの軌跡も自由度が高く、安定して正着可能であった。正着動作の途中は加速度が小さかったが、完全停止直前に前後加速度の変化が大きく、乗客の乗り心地の面で改善が必要と考えられる。



図 1.4.1-1 G1 駐車場正着箇所



図 1.4.1-2 仮設プラットフォーム

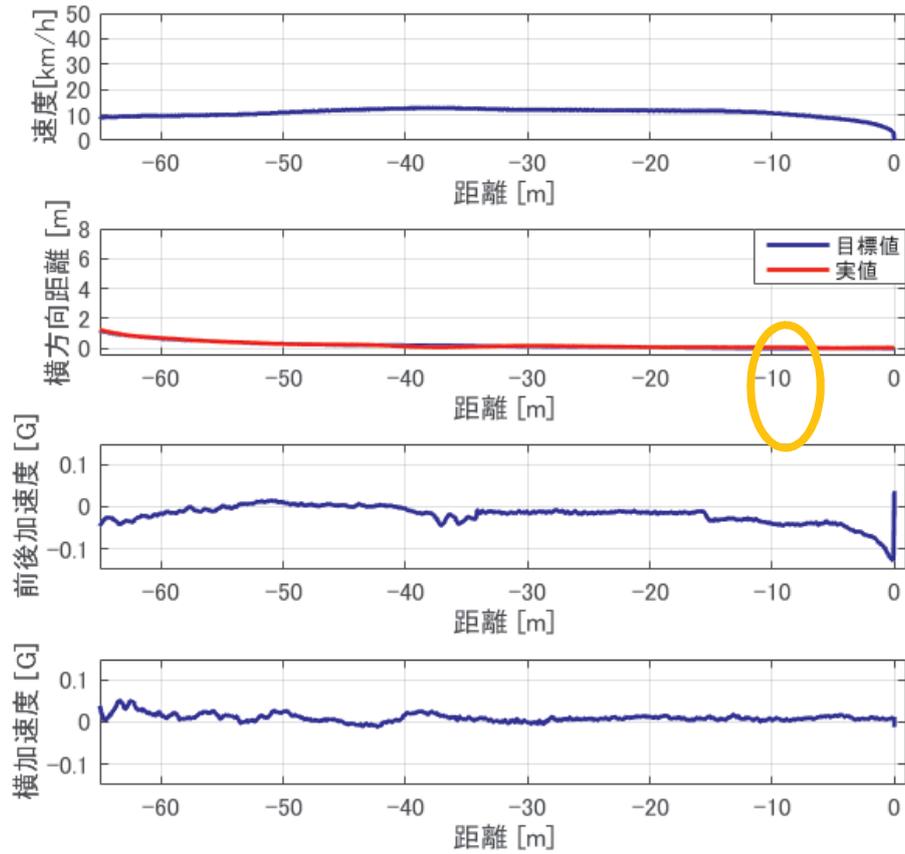


図 1.4.1-3 正着時のバス挙動データ

1.4.2 正着箇所 2 有明テニスの森駅付近 北向き

図 1.4.2-1 に有明テニスの森駅付近路肩、北向きの正着箇所を示す。正着箇所手前に高架の橋脚があり、GPS 信号が一旦途切れる。その通過後、GPS 受信の回復が遅い場合があるが、正着についてはほぼ安定して可能であった。ただし、停止位置精度向上と前後加速度変化の低減が必要と考えられる。



図 1.4.2-1 有明テニスの森駅付近 北向き正着箇所

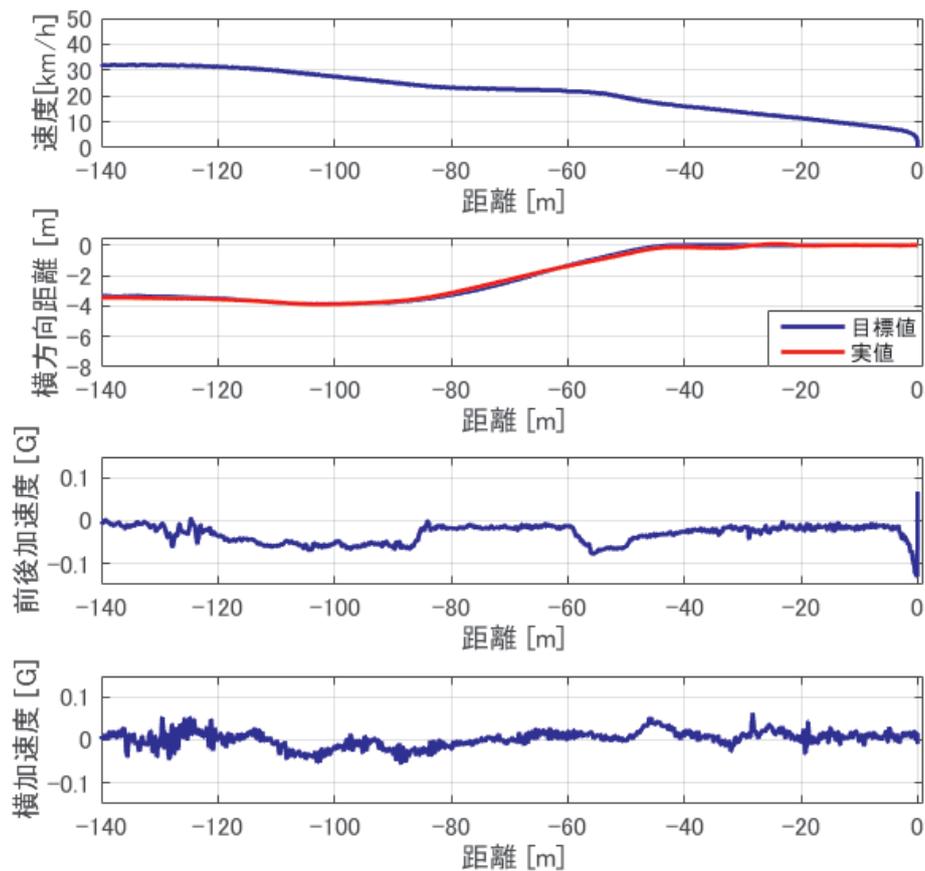


図 1.4.2-2 正着時のバス挙動データ

1.4.3 正着箇所 3 豊洲駅ロータリー

図 1.4.3-1 に豊洲駅ロータリー内の正着箇所を示す。正着手前アプローチの直線が短く、歩道屋根の柱や歩道緑石とのクリアランスが小さいため難易度が高いが、クリアランス限界での正着を実現した。またロータリーへの進入時に横加速度変化が大きく、乗客の乗り心地の点で改善が必要と考えられる。



図 1.4.3-1 豊洲駅ロータリー正着箇所

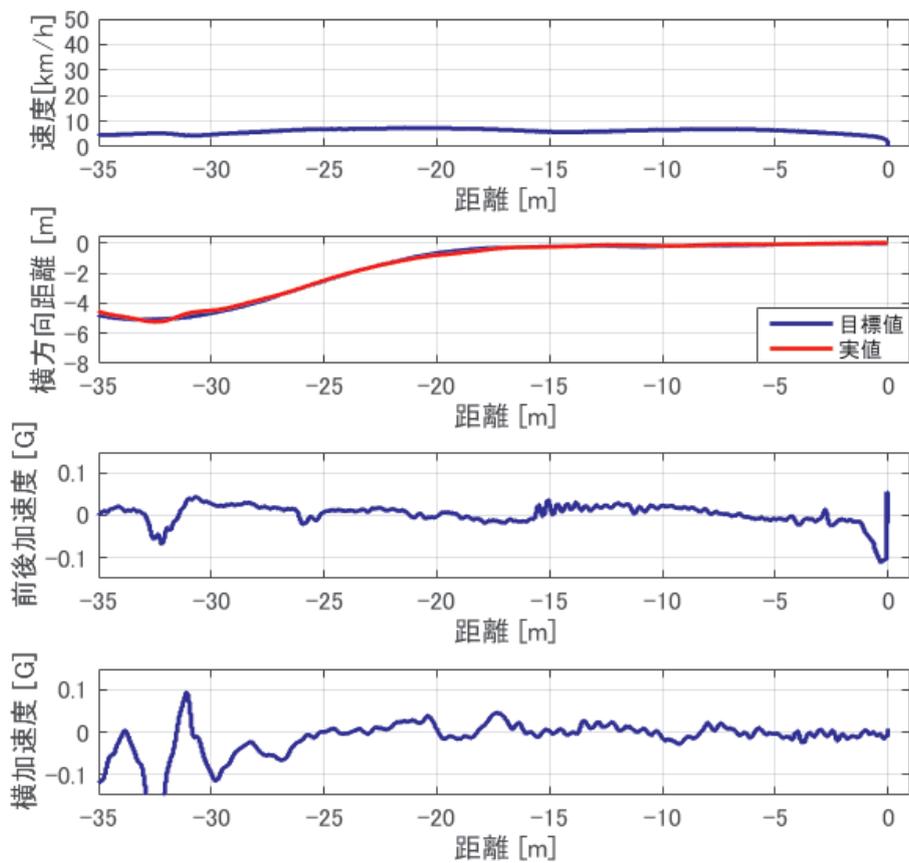


図 1.4.3-2 正着時のバス挙動データ

1.4.4 正着箇所 4 有明テニスの森駅付近 南向き

図 1.4.4-1 に有明テニスの森駅付近路肩、南向きの正着箇所を示す。下り勾配において、40km/h 程度の比較的高い車速から、滑らかな減速による正着を実現した。



図 1.4.4-1 有明テニスの森駅付近 南向き正着箇所

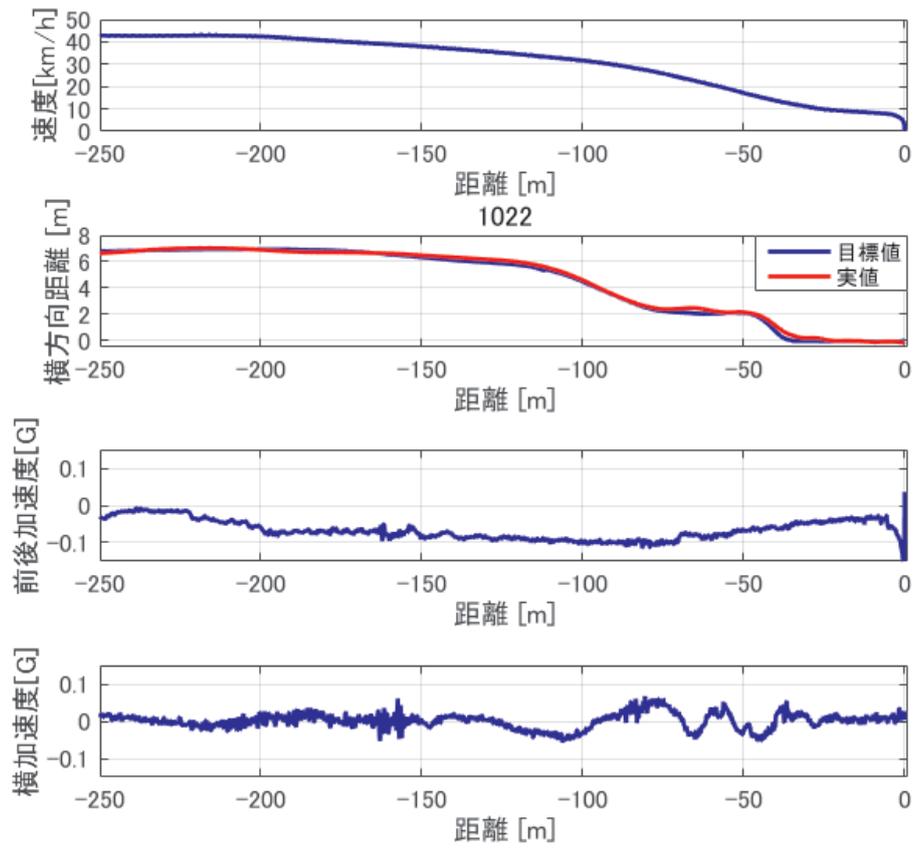


図 1.4.4-2 正着時のバス挙動データ

1.5 ディスクブレーキシステムにおける制動性能の検証

本節では、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の可能性を調査するため、同じ試験車両を使用して従来のドラムブレーキの場合の制動性能とディスクブレーキに置き換えた場合の制動性能をそれぞれ調査し、検証した結果を示す。

1.5.1 試験車両・システム構成

(i) 試験車両

試験車両は、平成 29 年度報告で使用した単車バス（日野自動車株式会社保有、以下大型バス）を使用した。以下に、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。

表 1.5.1-1 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、リア：1,820
重量	前軸荷重：3545kg, 後軸荷重：6590kg

(ii) 制動制御システム

前年度報告で使用した制動制御システムと同様に、電子制御ブレーキシステム（WABCO 製 EBS^(※1)）を搭載する。以下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。

(※1) WABCO Holding Inc.の商標

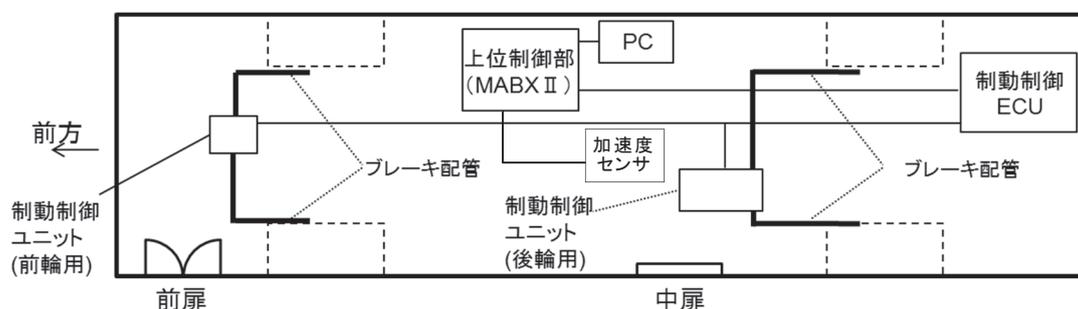


図 1.5.1-1 制動制御システムの構成図

動によるもので、(iii)安定性の項で考察する。

表 1.5.2-1 制動性能試験項目

試験項目	制動前車速	減速度	変化率（ジャーク）	試験回数
応答性試験	40km/h	1.0m/s ²	ステップ入力	4
掛け追従性	20km/h, 40km/h, 60km/h	0.5m/s ² , 1.0m/s ² , 1.5m/s ²	0.5m/s ³ , 1.0m/s ³	2~4
抜き追従性	20km/h, 40km/h, 60km/h	0.5m/s ² , 1.0m/s ² , 1.5m/s ²	0.25m/s ³ , 1.0m/s ³	2~4

(i) 応答性

制動指示をステップ入力したときの車両制動状態の測定結果を以下に示す。

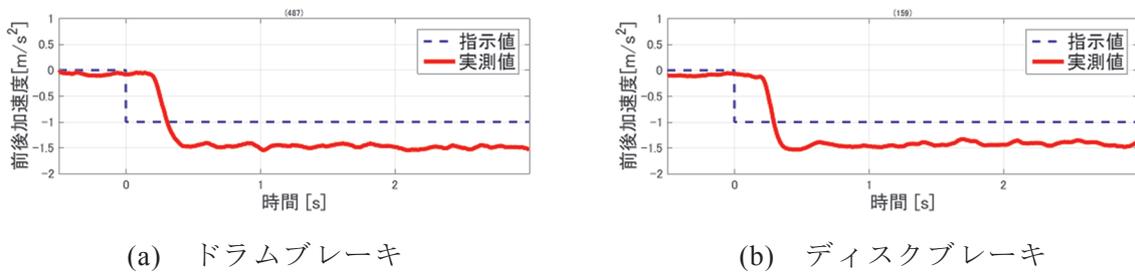


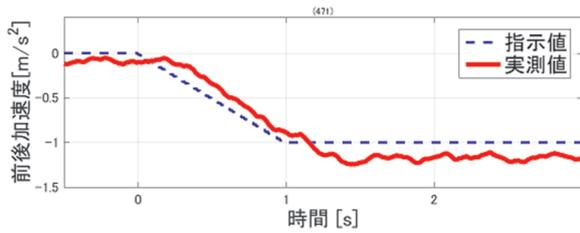
図 1.5.2-1 ブレーキ応答性の比較

入力に対する応答までのタイミングは、ドラムブレーキとディスクブレーキで変わらないので、ドラムブレーキとディスクブレーキの違いによる応答の差は無いといえる。

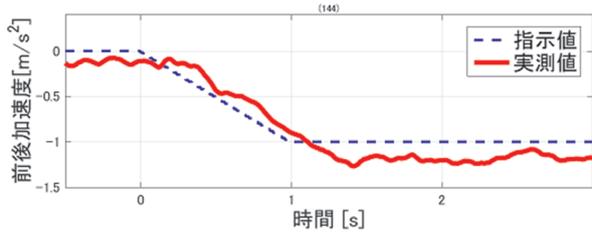
制動指示送出が車両挙動に表れるまでの期間が 200ms ほどあり、これはドラムブレーキシステムとディスクブレーキシステムで共通な要素である制動制御システムの応答時間およびブレーキ始動時のアクチュエータ制御に利用するエア圧の伝達にかかる時間であると考えられる。

(ii) 追従性

制動指示を一定変化量で増減させた場合及び一定量の制動指示を続けた場合の車両制動状態の確認を行った。

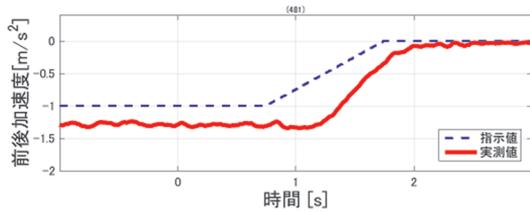


(a) ドラムブレーキ

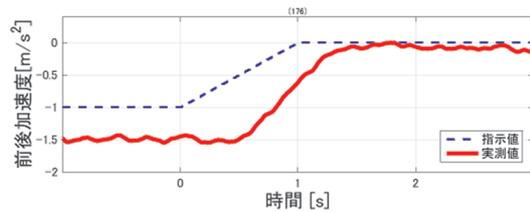


(b) ディスクブレーキ

図 1.5.2-2 ブレーキ掛け始めの追従性の比較

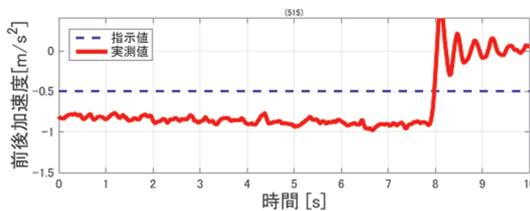


(a) ドラムブレーキ

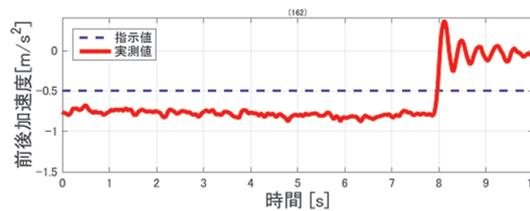


(b) ディスクブレーキ

図 1.5.2-3 ブレーキ抜き時の追従性の比較



(a) ドラムブレーキ



(b) ディスクブレーキ

図 1.5.2-4 ブレーキ一定時の追従性の比較

制動指示の変化および一定量の制動指示における応答においてもドラムブレーキとディスクブレーキの違いによる特徴的な差異は見受けられなかった。

試験前の予想としては、ドラムブレーキではセルフサーボ効果により粗い制動となり、それに対してディスクブレーキは細やかな制動となるので、車両挙動にも粗さの違いが表れると推測したが、結果として大きな差異は表れなかった。

この要因として考えられるのは、まず、今回の試験車両ではディスクブレーキへの換装は前輪のみであって後輪はドラムブレーキのままなので、ドラムブレーキの特性が完全には無くならなかったと考えられる。また、試験内容は最大 -1.5m/s^2 の減速度までで、車両重量は乗客を乗せていない状態であり、車両に対してシビアな走行条件ではなかったので顕

著な特性の違いが出にくかったとも考えられる。

他方で、ブレーキ掛け始めおよび抜きはじめにおいて、ドラムブレーキ/ディスクブレーキに関係なく一定の応答遅れが見受けられる。これは制動制御システムの応答必要時間と、メカ的なヒスによる応答遅れである。制御性を上げるには、これらの値を小さくするとともに、遅れ量をあらかじめ考慮した制動制御ロジックを上位制御で構築することにより、より目標とする制動制御に近づけることができると考える。

(iii) 安定性

試験を繰り返すにしたがって、減速度指示値に対する車両減速度実値の割合が増加した。これはブレーキ温度の上昇に伴うブレーキ摩擦力の変化の表れと推測する。試験全体を通した制動指示に対する車両の減速度の変化を図 1.5.2-5 に示す。指示減速度は、 0.5m/s^2 、 1.0m/s^2 および 1.5m/s^2 の3通りを実施したが、指示減速度ごとに車両減速度実値/指示値の比率が異なる傾向にあるので、試験を通した比率の推移を把握するために、指示値 1.0m/s^2 に着目した図とした。図の下部は、各制動試験開始時の車速条件である。制動時に運動エネルギーがすべて熱エネルギーに変換されるとすれば、車速の二乗に比例した熱エネルギーがブレーキ上で生成されることになる。

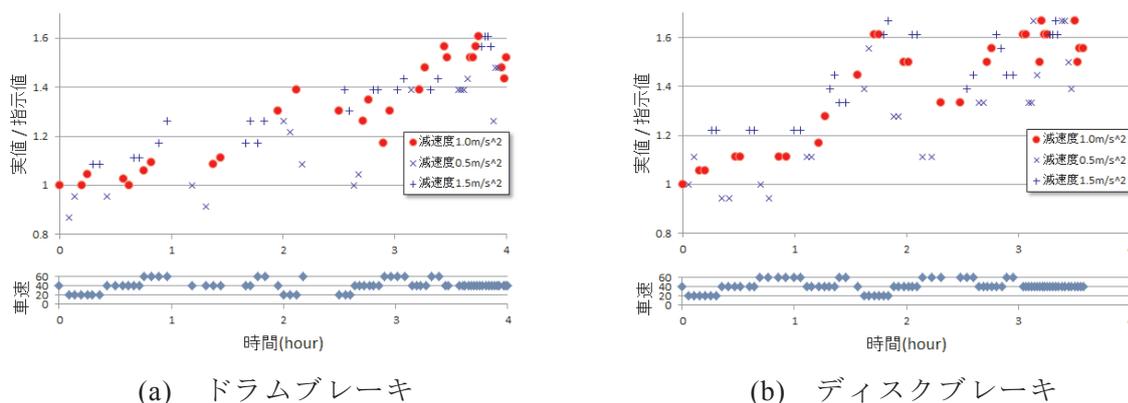


図 1.5.2-5 指示値に対する実値比率の分布の比較

ドラムブレーキ/ディスクブレーキの試験はどちらも同じ条件をほぼ同じ順序で行い、それぞれ 75 回ほど実施している。ドラムブレーキの試験では、間に 10 分以上運転しないインターバルが 3 回あった。

まず、ドラムブレーキ/ディスクブレーキともに、減速度指示値ごとの実値の比率に一定のばらつきがあるが、これは制動制御システムにおける指示値-ブレーキ圧力換算ロジックの変換率の調整により抑制できると推測する。本事業で実施している正着制御では、上位制御部により指示減速度ごとにずれ量の補正をおこなっている。

次に、減速指示 1.0m/s^2 における実値/指示値比率の分布を見比べると、ドラムブレーキのほうにはばらつきがあるとともに、試験開始からインターバルの期間を除いて右肩上がり

に増加している傾向が見える。一方、ディスクブレーキのほうは試験開始後しばらく一定であり、車速を上げた試験を繰り返すあたりで増加する傾向にあり、逆に低い車速での試験期間では減少する傾向にある。これはディスクブレーキの放熱性の良さによるところと考えられる。また、ディスクブレーキはドラムブレーキに比べ、連続した試験における結果のばらつきが少なく、変化する場合も一定の変化率で推移する傾向にあるといえる。これは、同じ条件での制動性能にばらつきが出にくいといえる。

以上のことから、ディスクブレーキはドラムブレーキにくらべ安定性があることが確認できた。

【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。

2.2.1 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。

2.2.2.1 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。

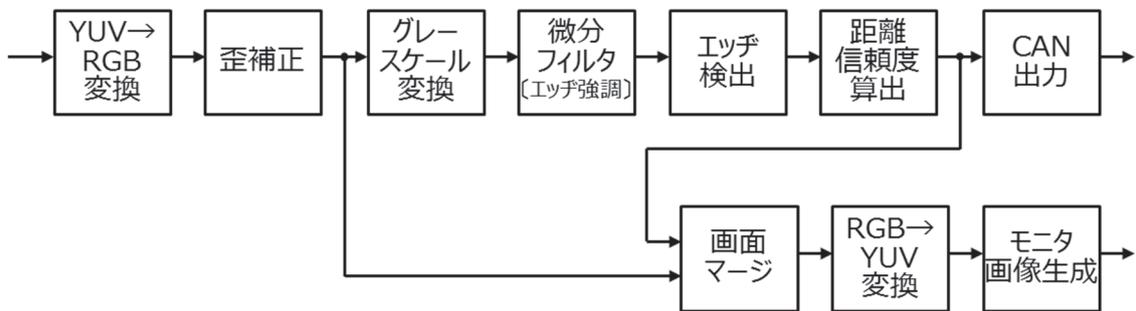


図 2.2.1-2 白線検出処理フロー



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。

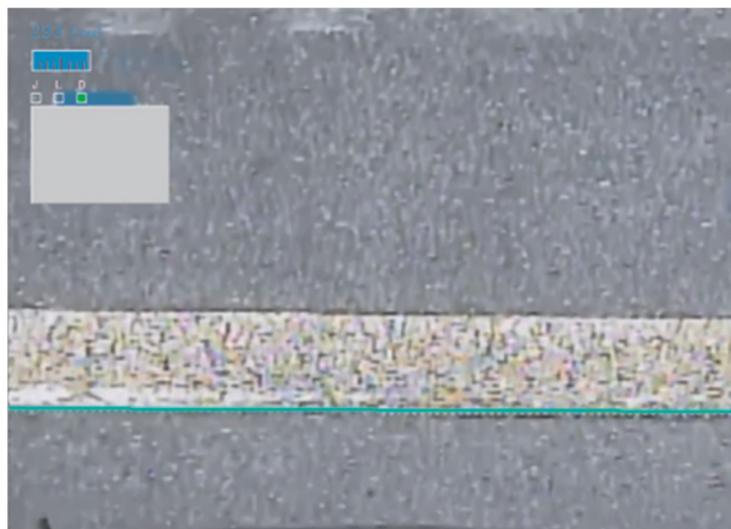


図 2.2.1-5 白線検出結果（正常時）

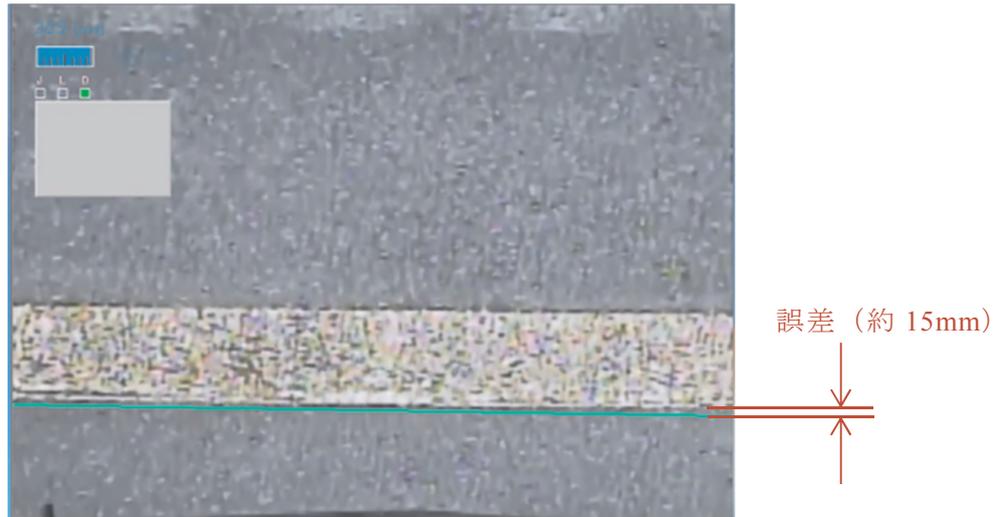


図 2.2.1-6 白線検出結果（誤差発生時）

2.2.1.2 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。

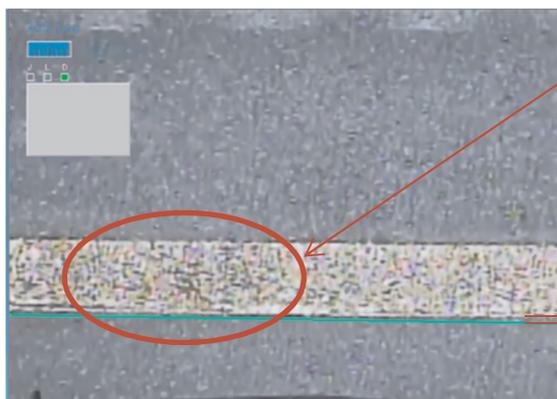


図 2.2.2-1 白線かすれ部の影響



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。

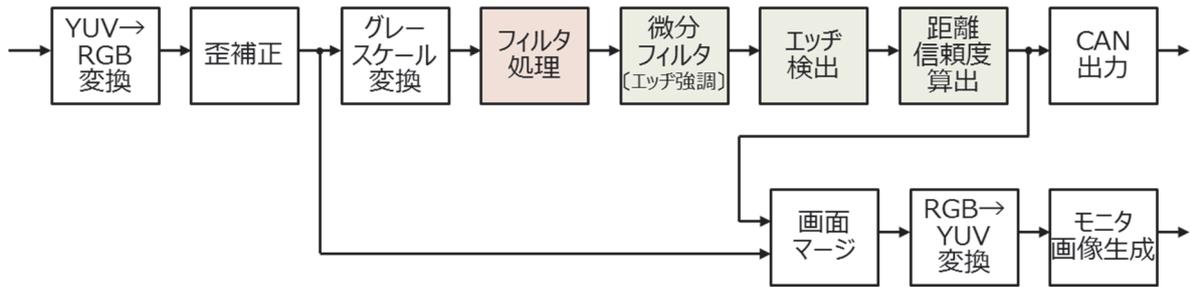


図 2.2.2-3 改善後の白線検出処理フロー

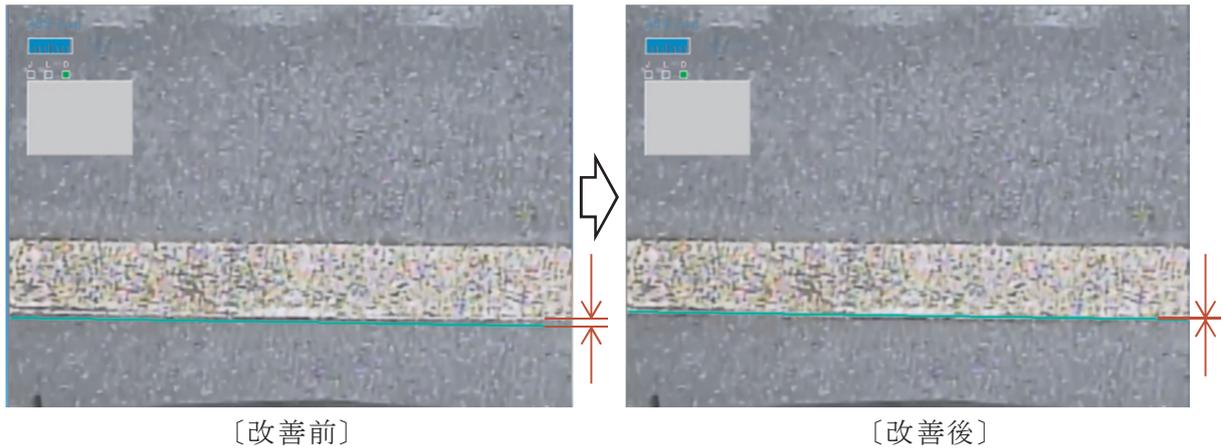


図 2.2.2-4 白線エッジ検出結果

2.2.1.3 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。

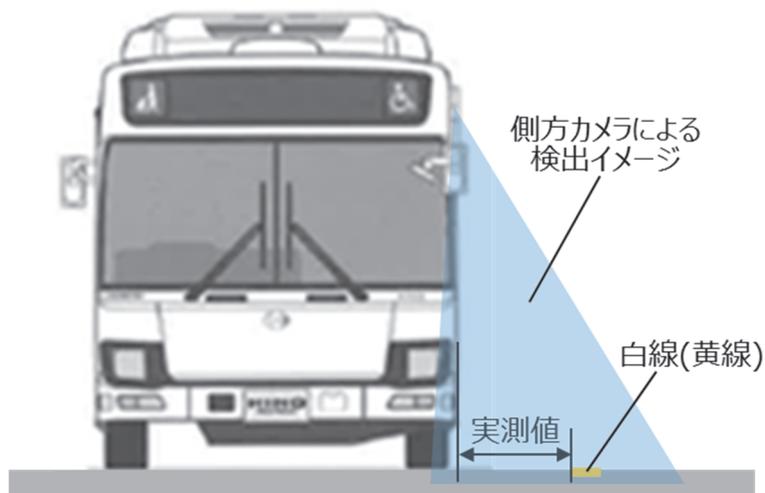
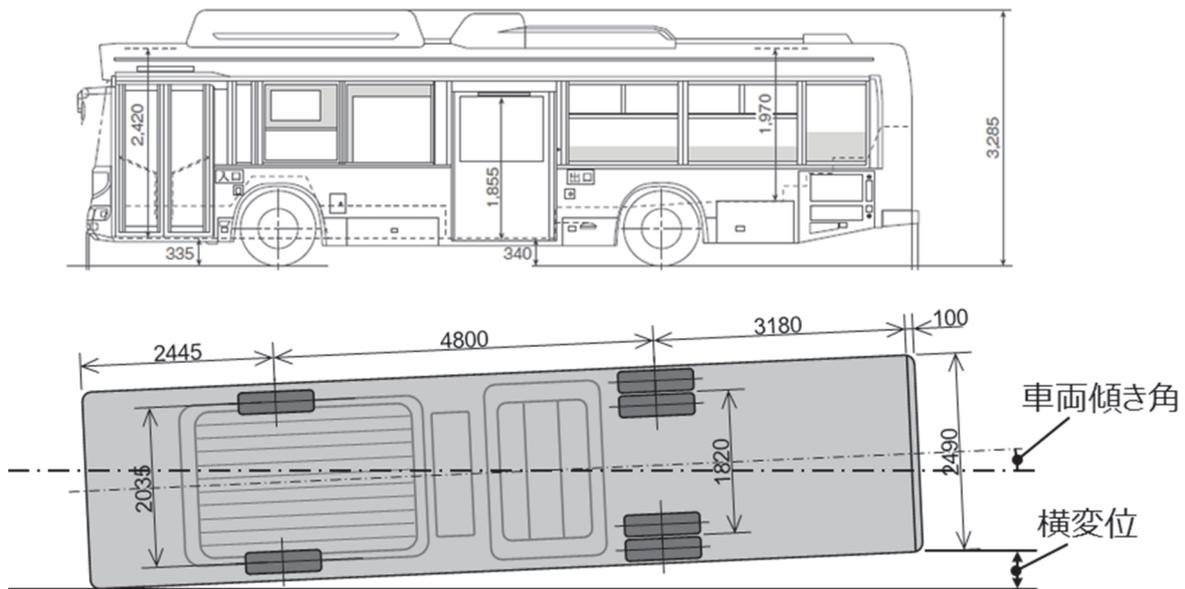


図 2.2.3-1 横変位量検出結果の評価

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

2.2.2 歩道縁石検出手法の検討

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的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。

2.2.2.1 センシングシステムの構成

側方カメラに用いたステレオカメラの主な仕様を表エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1に、外観を図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1に示す。

表エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1: 側方カメラ(ステレオ)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 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1: 側方カメラ(ステレオ)外観

側方カメラで取得した画像データ(約 15fps)を図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-2 に示すフローにて白線・歩道検出するシステムの機能試作を行った。図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-3 に示すように大型バス実験車両の前扉および中扉上部に側方カメラを搭載し、評価を行った。

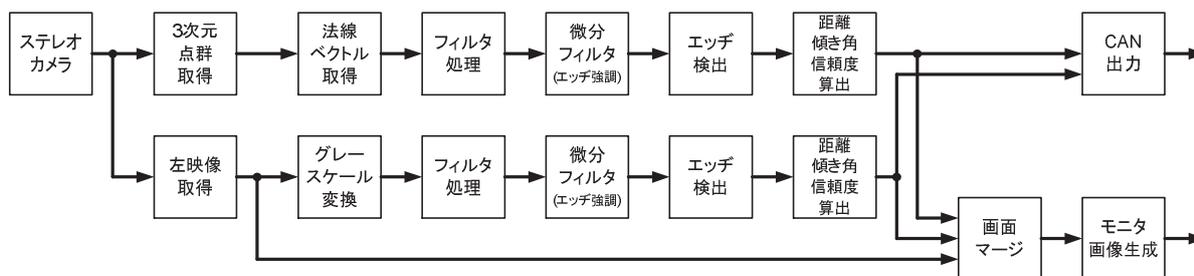


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-2: 側方カメラ処理フロー

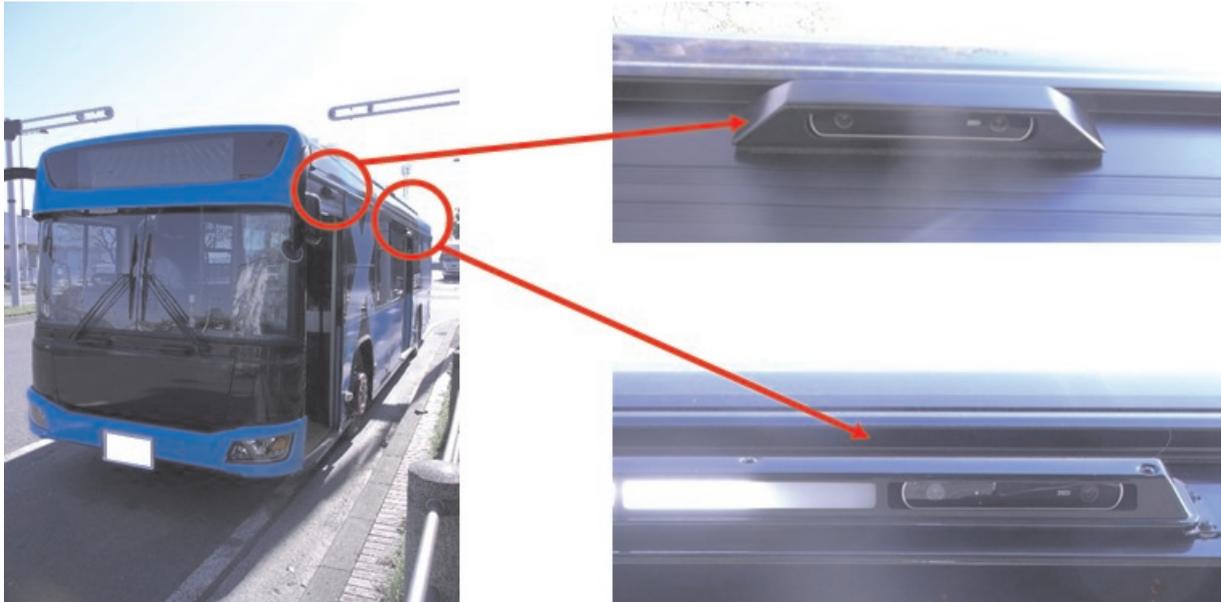


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-3: 大型バス実験車両および側方カメラ

図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-2 に示すように、白線は入力画像を輝度情報(グレースケール)に変換した画像、歩道縁石はステレオカメラから得られた3次元点群より計算される法線ベクトル画像を元にエッジを検出し、エッジの位置とエッジ品質(有効なエッジの割合)から距離、車両傾き角、信頼度を算出する。法線ベクトルは物体の表面における垂直ベクトル(単位ベクトル)であり、歩道と縁石垂直面の境界でベクトル成分が大きく変化するため、エッジとして検出が可能である(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-4)。

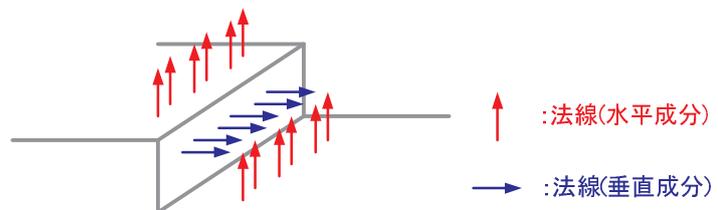


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-4: 法線ベクトル(歩道縁石)

また車両傾き角については、前扉および中扉の側方カメラそれぞれで独立して算出が可能であるが、前扉、中扉の距離情報(横変位)を利用する事で、微小な傾き角を正確に算出する事が可能となる(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-5)。

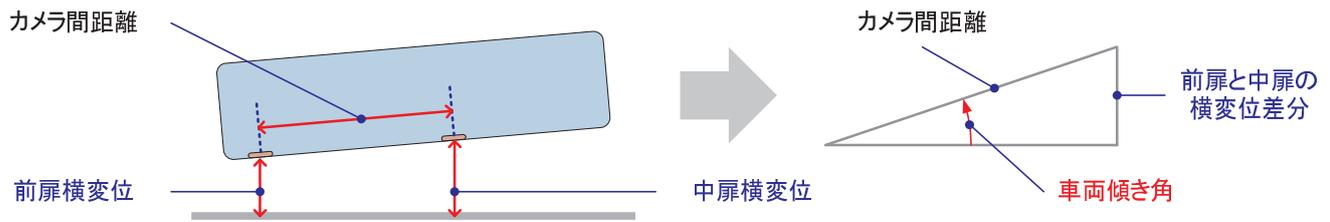


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-5: 車両傾き角

公道、商業施設における白線・歩道検出例を示す(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-6、図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-7)。緑線が検出した白線エッジ、マゼンダ線が歩道縁石エッジ(歩道と縁石垂直面の境界)である。

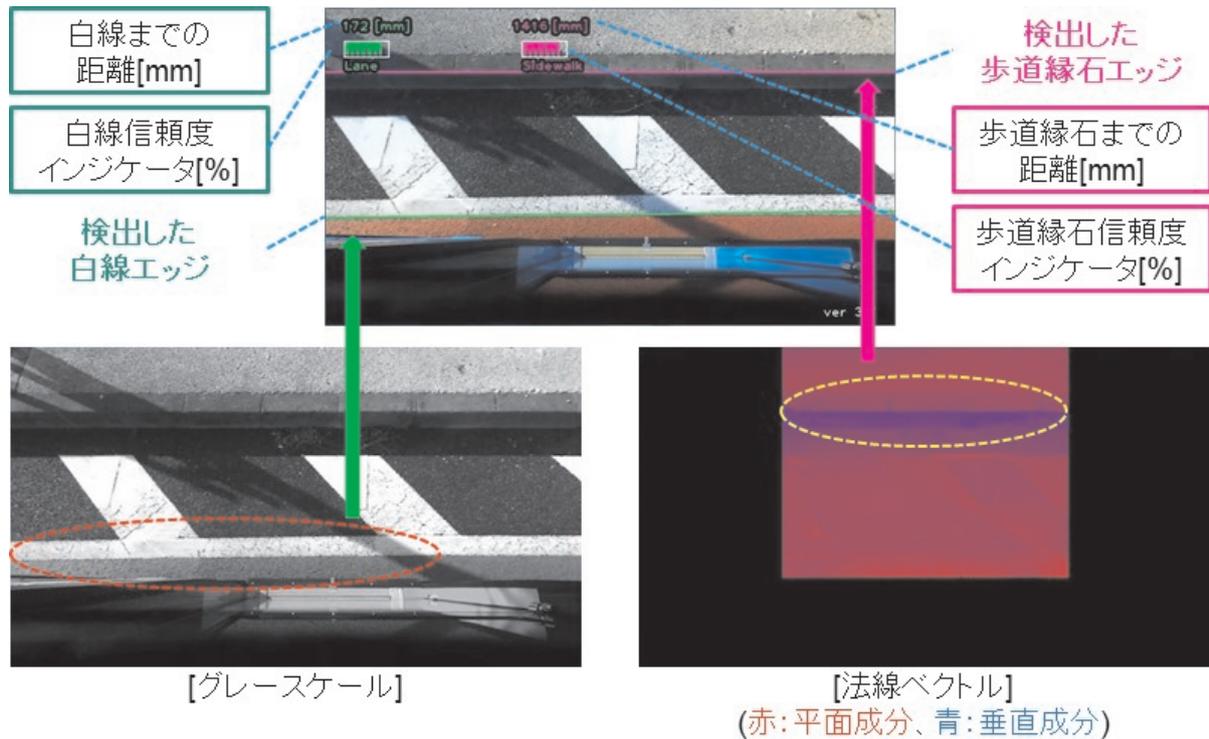


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-6: 白線・歩道検出(通常走行時)

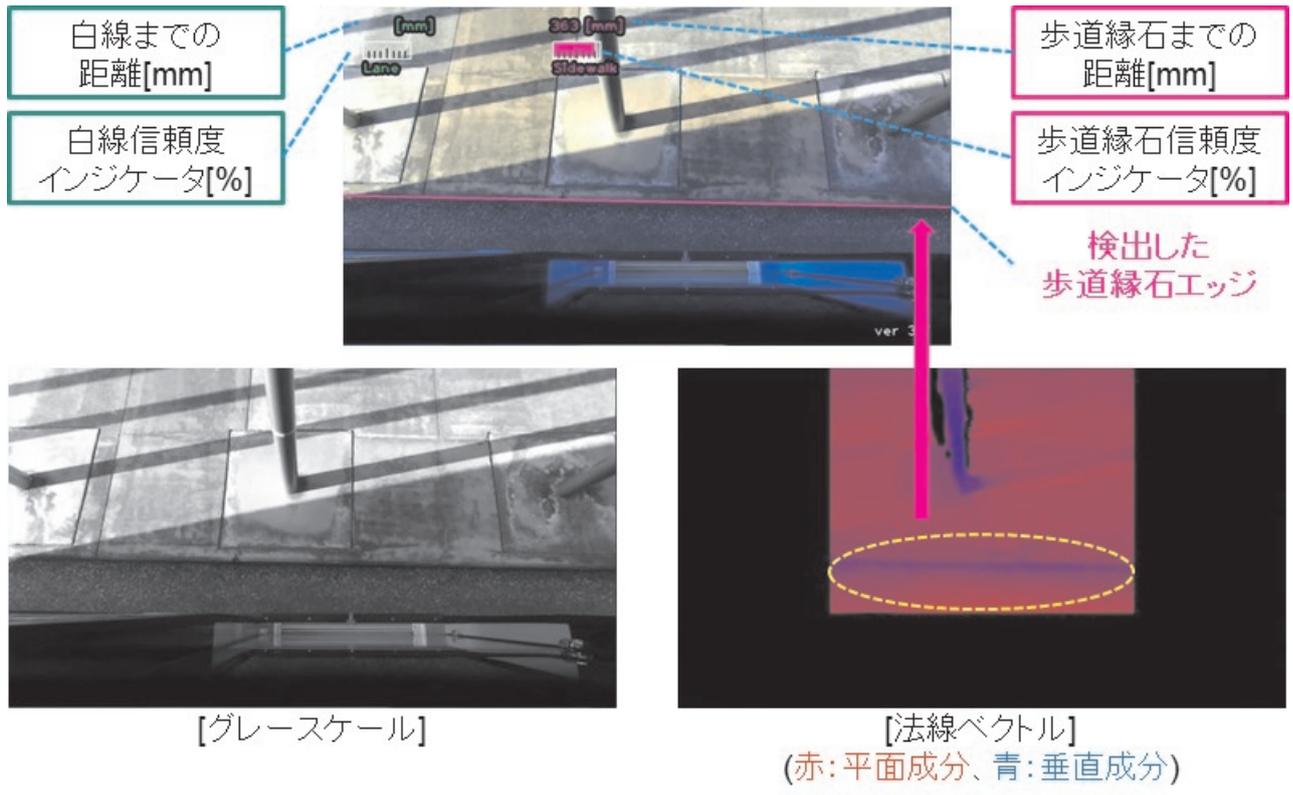


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-7: 白線・歩道検出(正着時)

2.2.2.2 白線検出ロバスト性向上検討

白線検出では白線エッジ部分の特徴である輝度値の変化点を図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-2 に示す微分フィルタ(エッジ強調)で抽出する。しかし、輝度値の変化点は白線に限らず路面上の影や横断歩道等にも存在している(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-8)。そこで、これら擬似白線を誤検出せずに白線のみを検出できるよう、エッジ検出部に白線幅チェック機能を追加した。

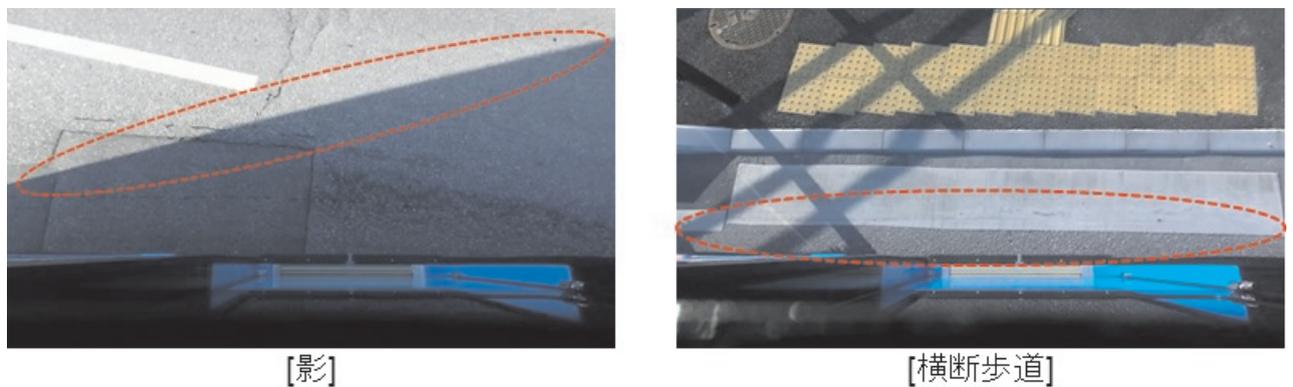


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-8: 影、横断歩道

白線幅は常に 150mm であるため、白線の車両側エッジと反対側のエッジの間隔が 150mm である事をチェックする必要がある。画像処理上は幅のチェックをピクセル数で行うが、白線は画面下部(カメラに近い)では太く、画面上部(カメラから遠い)では細く見えるため、エッジ検出位置(Y 座標：ピクセル値)に応じてチェック幅をアダプティブに変更する機能を追加した。事前に 2 点で Y 座標と白線チェック幅を合わせておき、線形補間を行う(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-9)。

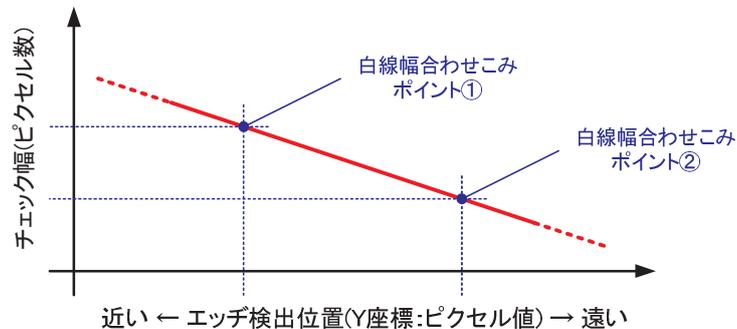


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-9：白線幅チェックで使用するチェック幅(ピクセル数)

本チェック機能を搭載した結果、白線位置に依らず安定して白線が検出できることを確認した(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-10)。図中のマゼンダ破線は、幅チェック誤差範囲であり、今回誤差範囲を±30%としている。



図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-10 : 白線検出(上部 : カメラから遠い、下部 : カメラに近い)

2.2.2.3 横変位量(白線・歩道までの距離)の高精度化

図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-2 に示す距離・信頼度算出部では画像処理で検出した白線・歩道縁石エッジの位置(Y座標)から実際の距離[mm]を算出するが、0章の白線幅と同様、検出位置によって1ピクセル辺りの実際の距離[mm]が変化する(カメラに近いほど小さく、カメラから遠いほど大きい)。そこで今回、二次関数を用いたピクセル→距離近似関数を検討した。事前に車両側面および2点でY座標と実測距離を合わせておき、3点を通る二次関数を構成する(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-11)。

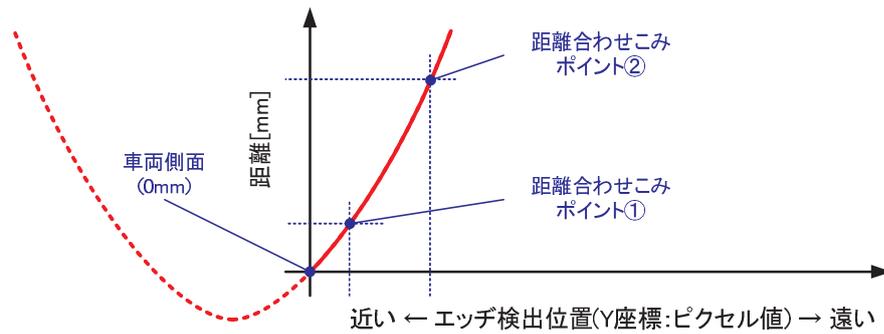


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -11 : ピクセル→距離近似関数

本近似関数を白線検出に適用し、実測値と検出値を比較したところ、誤差±10mm程度と良好な結果を得た(表エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -2)。

なお、歩道縁石検出に適用した場合は、縁石の高さの分、検出位置が画面上部にずれてしまうため、実測値よりも若干大きい値となってしまう(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -12)。また、乗客の位置や路面状況等によりサスペンションの沈み込み量も変化し、これらも誤差要因となりうる。状況に応じてアダプティブに補正する方法が今後の課題となる。

表エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -2 : 横変位検出結果(白線検出)

横変位実測値	側方カメラ検出結果	検出誤差
58mm	63mm	+5mm
380mm	377mm	-3mm
420mm	413mm	-7mm
948mm	943mm	-5mm
1705mm	1697mm	-8mm

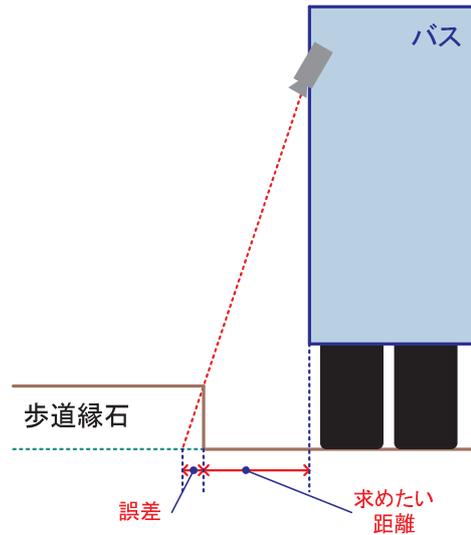


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-12 : 歩道縁石検出時の誤差

2.2.3 前方カメラによる白線検出

前方カメラでは、車両が安全に走行するために走行レーンの位置情報を認識する必要がある。側方カメラでは、白線位置は高い精度で検出可能であるが、検出対象の領域が狭いため、車両の走行方向や、周囲の車両との位置関係の情報は取得できない。そこで前方カメラを用いて、自走行レーンの白線認識に関する検証を行った。

2.2.3.1 センシングシステムの構成

前方カメラに側方カメラと同一のステレオカメラを使用する。主な仕様、外観は表エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1、図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-1 の通り。

前方カメラで取得した画像データ(約 15fps)を図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-13 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 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-14 に示す大型バス実験車両の前面に前方カメラを搭載し、評価を行った。

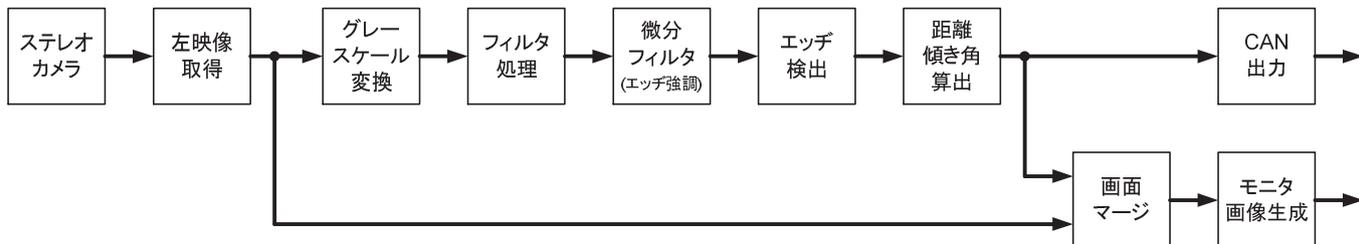


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-13 : 前方カメラ処理フロー



図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-14 : 大型バス実験車両および前方カメラ

公道における白線検出結果を示す(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-15)。緑線が白線エッジである。白線は入力画像を輝度情報(グレースケール)に変換した画像を元にエッジを検出する。

白線は道路の消失点(水平線)の下部に存在しているが、消失点付近はノイズが多く、また走行、路面状況により消失点位置も変動しうるため、消失点のさらに一定量下部の領域のみを検出対象領域としている。



図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-15 : 白線検出

2.2.3.2 白線検出ロバスト性向上検討

側方同様、路面上の影や横断歩道は擬似白線となり、誤検出の原因となりうる(☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-16)。そこで前方でも☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-13のエッジ検出部に白線幅チェックを追加した。



[影]



[横断歩道]

☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-16 : 影、横断歩道

側方同様、白線の車両側エッジと反対側のエッジの間隔が 150mm であることをチェックする必要がある。前方画面では消失点(水平線)に向かい 1 点に収束していき、白線幅のピクセル数は消失点からの距離(Y 座標)に比例するため、エッジ検出位置に応じてチェック幅をアダプティブに変更する機能を追加した。事前に 1 点で Y 座標と白線チェック幅を合わせておき、消失点との 2 点で線形補間を行う(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-17)。

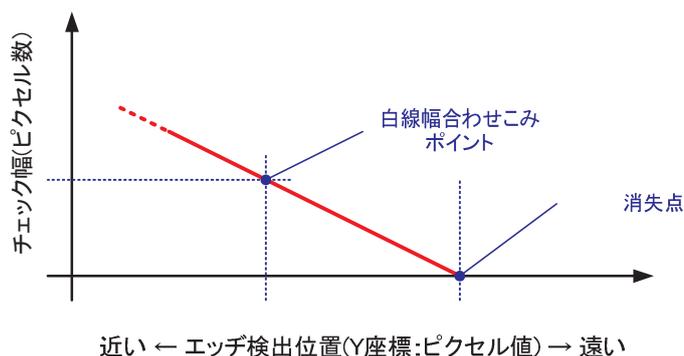


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-17: 白線幅チェックで使用するチェック幅(ピクセル数)

本チェック機能を搭載した結果、白線位置に依らず安定して白線が検出できることを確認した(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-18)。



図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-18: 白線検出(上部:カメラから遠い、下部:カメラに近い)

2.2.3.3 横変位量(白線までの距離)の算出

前方カメラではバス前方の横偏差を算出する(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-19 注視点①)。そのため、図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-13 の距離算出部では検出エッジをトップビュー上の位置情報に変換する必要がある。前方画像からトップビューへの変換イメージを図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-20 に示す。

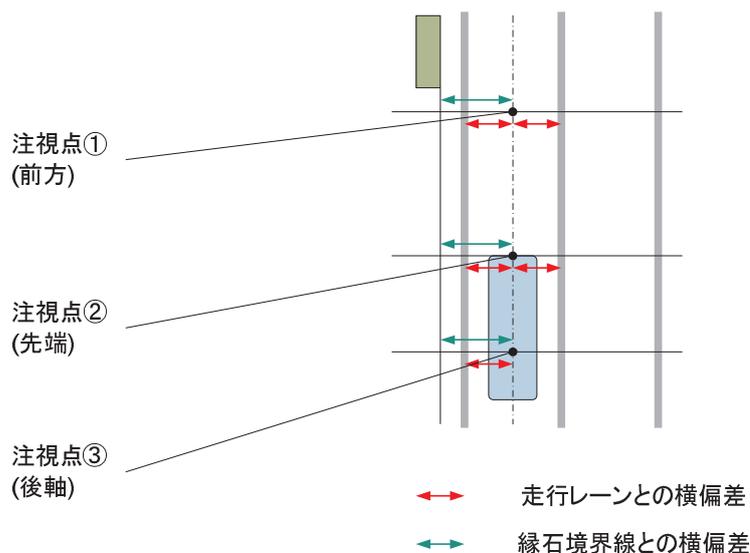


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-19 : 横変位

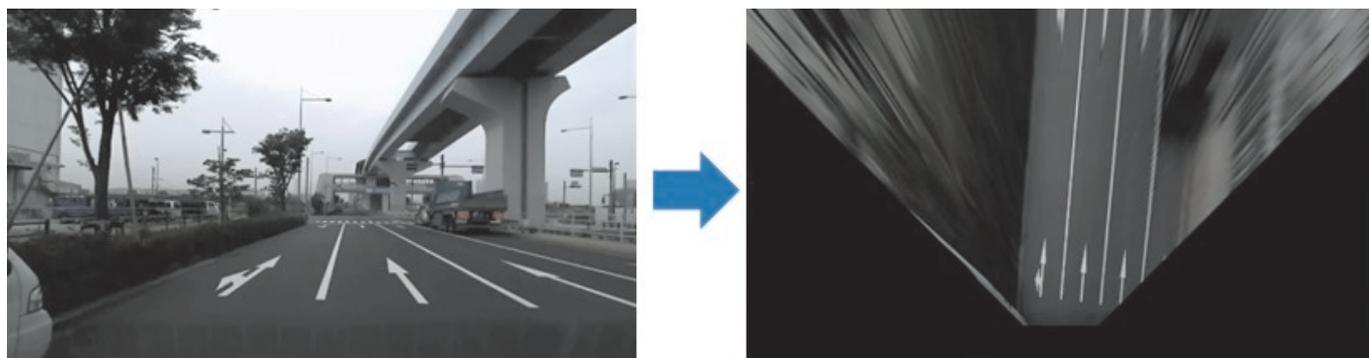


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-20 : 前方画像からトップビューへの変換(イメージ)

2.2.4 前方カメラ/側方カメラフュージョンの検討

前方カメラと側方カメラそれぞれの検出結果をフュージョンさせる事で、それぞれの検出精度、ロバスト性向上を図る。今回は検出精度が高い側方カメラの検出結果を前方カメラに送信する系を検討した。

2.2.4.1 システム構成

前方カメラと側方カメラは別のマシンで動作させ、検出結果の送受信には CAN(Control Area Network)を使用する。(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-21)

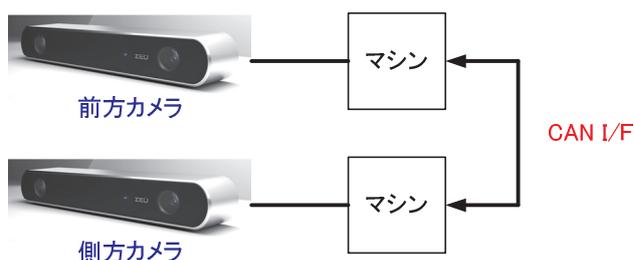


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-21 : システム構成

CAN で受信した側方カメラでの検出位置(白線、歩道)を用い、(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-22) に示すフローにて前方カメラでフュージョンを行う機能試作を行った。網掛け部分がフュージョン向けに新たに追加した処理である。側方カメラの検出位置をトップビュー上でバス進行方向に向かって延長し、前方カメラでの検出位置と比較を行う。側方カメラの白線検出位置と一致した場合は、前方カメラの白線検出結果の信頼度が高いと判断する。側方カメラの歩道縁石検出位置と一致した場合は、前方カメラの白線検出位置を歩道縁石検出位置と読み替える。

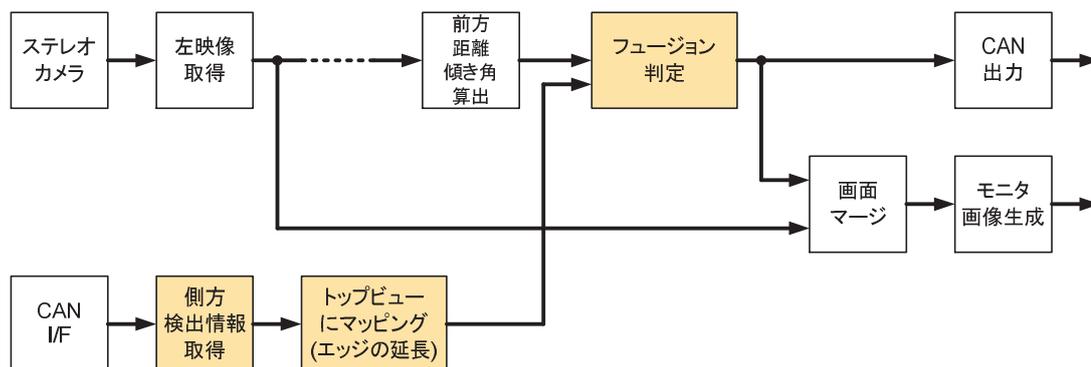


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-22 : フュージョンフロー

公道を利用して、フュージョンした結果を(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-23、(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-24) 示す。左が前方画面、右が側方画面である。

図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-23 は側方カメラの白線検出位置と前方カメラの白線検出位置が一致したケースで、信頼度が高い白線であることを示すために青太線を表示している。図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-24 は側方カメラの歩道縁石検出位置と一致したケースで、前方での白線検出結果を歩道検出に変更したことを示すために、マゼンダの太線を表示している。

今回の検討では、前方単独で歩道縁石を検出する機能はなく、フュージョン時に白線として誤検出した結果を歩道検出に変更する機能のみであり、今後の技術課題である。

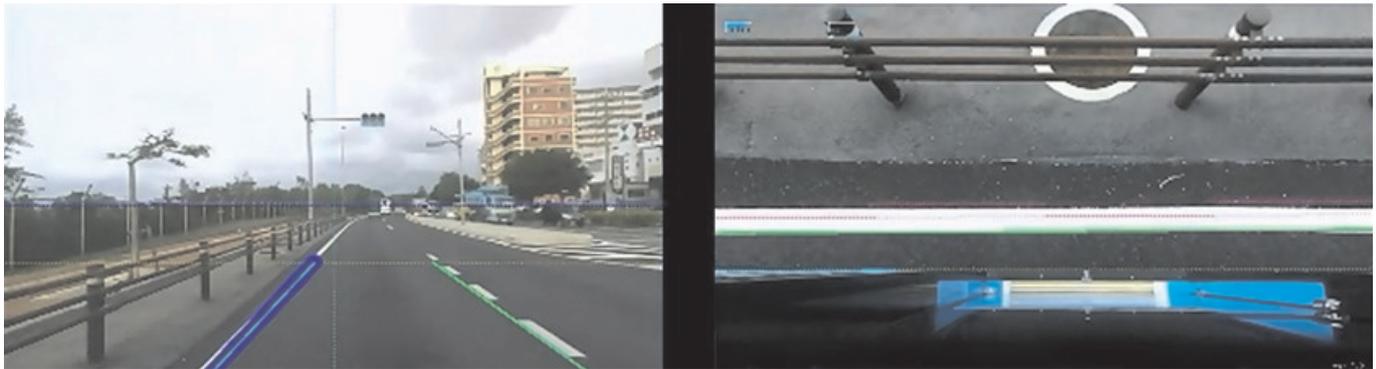


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-23 : 白線フュージョン

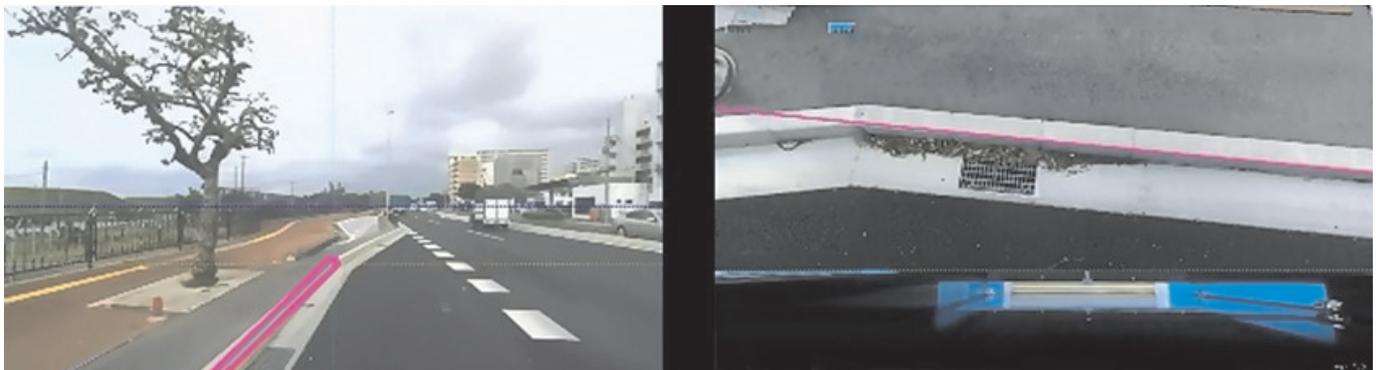


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-24 : 歩道フュージョン

2.2.5 イメージセンサの課題まとめ

検出ロバスト性向上、高精度化に取り組み、イメージセンサおよび既存インフラを用いた正着制御の実現性を見出した。また、前方カメラによる白線検出にも取り組み、走行レーンにある程度安定して検出できる事を確認した。さらに、前方カメラと側方カメラの統合化のファーストステップとして、側方カメラの検出情報を前方カメラに送信し、フュージョンの部分的な動作を確認した。

しかしながら依然として路面状況、天候等の条件によっては誤検出、未検出が発生しており、イメージセンサ処理そのもののロバスト性向上の検討と共に、他方式センサとのフュージョン技術を確立していく事が今後の課題となる。

2.3 FPGA 組込化実現性調査

2.3.1 目的

ステレオカメラでは左右それぞれのカメラ画像をもとに 3 次元座標情報を計算する。縁石検出時に利用した法線ベクトルの情報は 3 次元座標情報から算出される。

現時点では GPU 搭載の小型サーバーを利用して画像処理計算を行っている。一般に、GPU は FPGA と比較して非常に高価なデバイスである。また、正着制御には 30fps 程度の処理性能で遅延なく計算する必要がある。安価で処理条件を満たすため、FPGA の利用検討を行う。

2.3.2 ハードウェア化方式検討

側方カメラでは、ステレオカメラから得られる 3 次元点群の情報を利用して歩道縁石を検出している。ステレオ画像データを使って歩道縁石を検出する処理フローを図 2-25 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-25 に示し、各処理ブロックについて詳細を述べる。

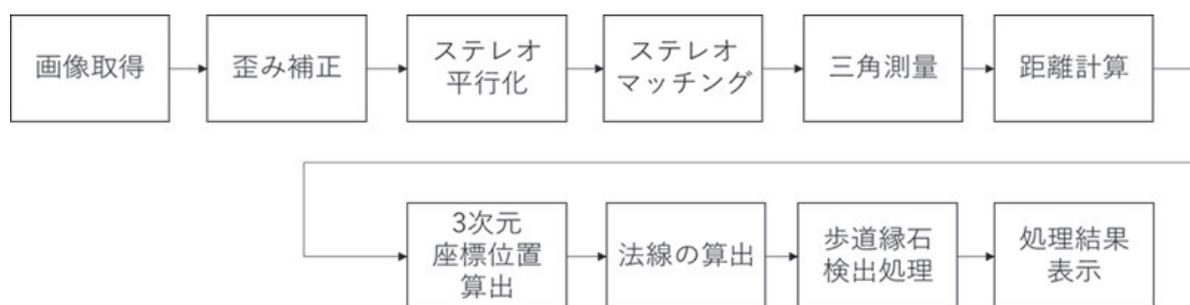


図 2-25 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-25 : 処理概要

ステレオカメラは、平行に並んだ 2 つのカメラで 1 つのユニットである。画像データは、左右に並んだ 2 つのカメラから同時に取得される。

まず初めに、レンズによる歪みを取り除くため図 2-26 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-26 のように補正して歪曲を取り除く。画素データを補正後の画素位置に移動させるため、補正処理の計算にはランダムなメモリアクセスが発生する。ランダムなメモリアクセスはハードウェア化にはあまり向かない処理である。

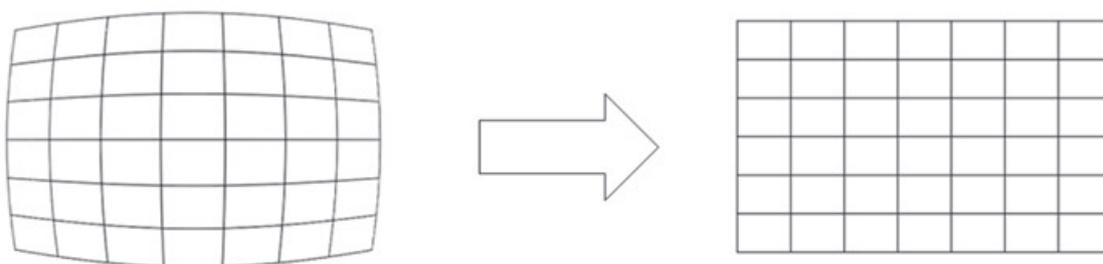


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -26: 歪み補正

次に、ステレオマッチング処理を行う。ステレオマッチングでは左右の画像を比較して、画像のズレの程度から視差を算出する。画素のズレを取得するときには、画像横方向に一致する画素の探索を走査するため、マッチングの前処理として左右画像に平行性を持たせることが重要である。これをステレオ平行化という。ステレオ平行化では、エピポーラ線が走査線と一致するように入力画像を補正する(図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -27)。変換パラメータはカメラキャリブレーション時に入手できる。変換パラメータを使って画素毎に左右それぞれの画像に、画素の数だけ座標の変換処理を実行する。

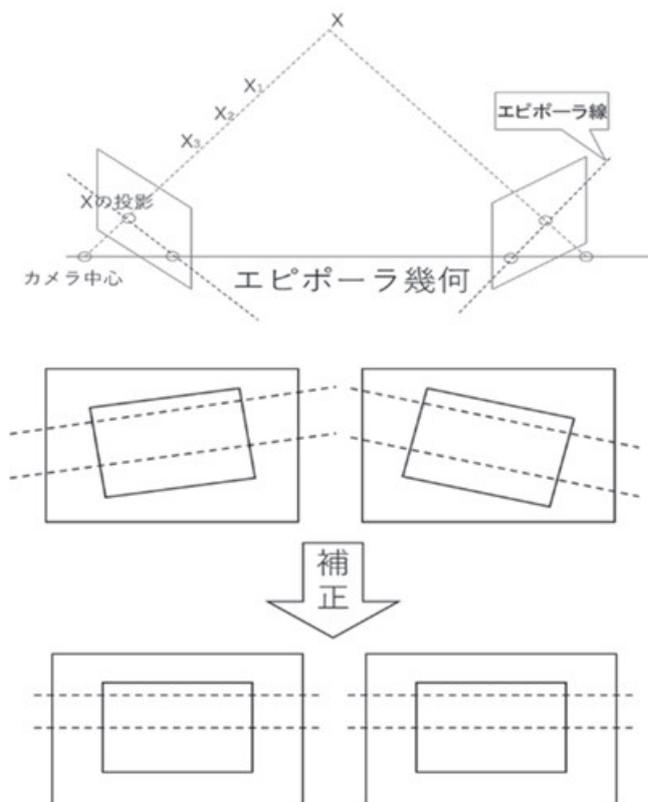


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -27: ステレオ平行化

ステレオマッチングの概要を図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。 -28 に示す。ステレオマッチングでは、左右の画像が一致するピクセル位置を1画素ごとに求める。事前にステレオ平行性を保つ処理をしているため、走査方向は横方向のみである。同一物体を同一時刻に撮影したとき、カメラからの距離が近ければ近いほど、左右画像を重ね合わせたときの画素のズレは大きくなる。

マッチング処理では、右側の画像をテンプレート画像とし、同じような画素値を持つ画素が、左側の画像のどの位置に位置するか検索幅分だけ探索し、最も差異が小さい画素位置を算出して視差を得る。これを全ての画素に対して実施する。

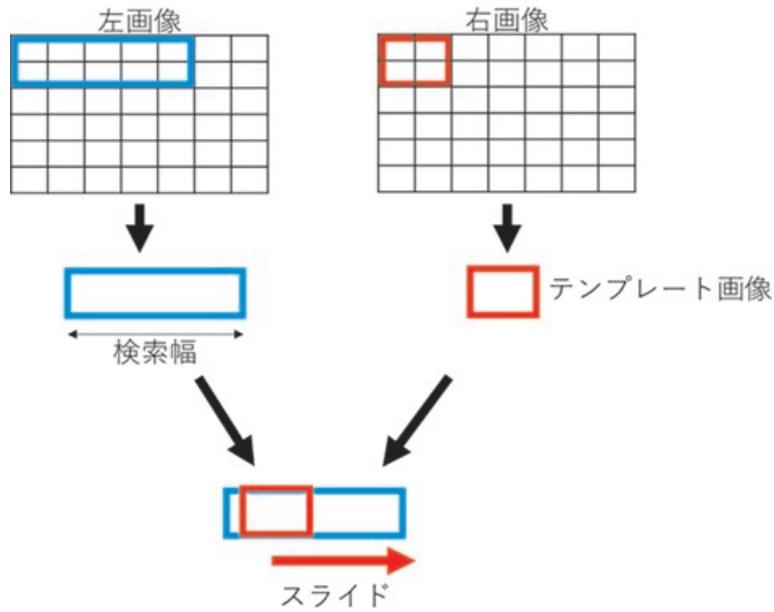


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-28 : ステレオマッチング

その視差情報から図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-29 に示す三角測量を行うと3次元座標情報が得られる。図中、 $x_l - x_r$ は視差、 f は画像の焦点距離、 b はカメラ間距離である。

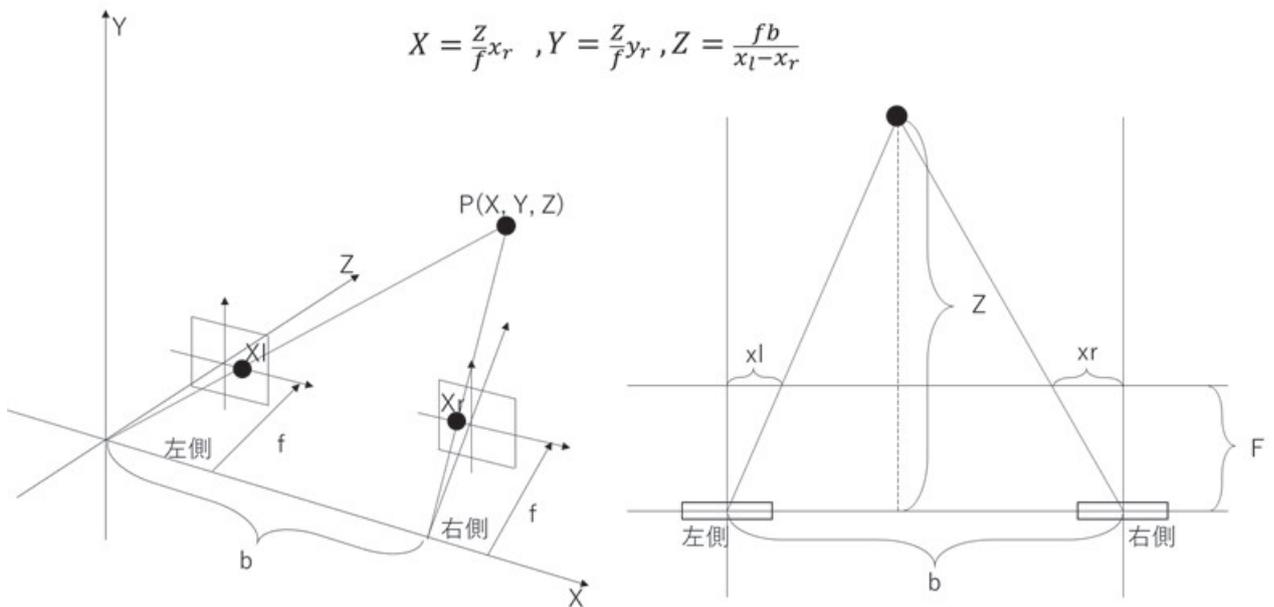


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-29 : 三角測量

3次元座標情報から、隣り合う3点の座標を抽出し、外積計算すると法線情報が取得できる。法線情報を使って歩道縁石検出アルゴリズムを適用し、歩道縁石を検出する。

以上が処理概要である。

一連の処理の中で最も処理量が多いのは、全ての画素に対して検索幅分の探索処理を行った上で最も視差が少ないピクセル位置を算出するステレオマッチング部と予想される。このステレオマッチング部のように同じ処理を繰り返し行うブロックは同一回路を複数並べることによって同時に計算可能である。このような処理はハードウェア化すると効果的に処理時間が短縮でき、ハードウェア化に向いているといえる。

視差を評価する関数は数種類あるが、今回はマッチングに十分な精度を持ち、他の手法と比較して計算量が少ないとされる SAD (Sum of Absolute Difference) 関数を採用する。☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-30 は、画素値の差分の絶対値の和(SAD 値)で類似度を評価する関数である。

比較対象画像の画素値を $I(x, y)$ 、テンプレート画像(基準画像)の画素値を $T(x, y)$ とし、テンプレート画像の幅を w 、高さを h とする。 (d_x, d_y) は画素をずらす量であり、SAD 値が最小となる (d_x, d_y) が類似度が高い、すなわち視差となる。

☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-28 に示したように、左画像：比較対象画像、右画像：テンプレート画像であり、ステレオ並行化が行われている事から実際は、 $d_y = 0$ である。

$$\text{SAD}(d_x, d_y) = \sum_{x=0}^{w-1} \sum_{y=0}^{h-1} |I(d_x + x, d_y + y) - T(x, y)|$$

☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-30 : SAD 関数

テンプレート画像のサイズについては、論文『高速高精度な次世代リアルタイムステレオカメラ(澤幡ほか、2008年)』を参考に横 8 pixel×縦 4 pixel とした。論文では 1024×384 の元画像に対し、8×4 のテンプレート画像サイズを適用しており、今回側方カメラで使用する画像サイズ(720p : 1280×720)と横サイズが同程度であるため、テンプレート画像サイズを同じにしている。また、ZED Camera を使って撮影されたステレオ画像(☒ エラー! 指定したスタイルは使われていません。-31)より、左右のピクセル差分は最大 50pixel 程度であることがわかったため、マージンをとって探索範囲は 64pixel とした。画素のズレが最小となる位置を求めるために、1pixel 毎に探索範囲分 SAD 値を計算し、その中で最も SAD 値が小さい画素位置を計算し、視差を求める。この処理を 1 フレーム分全ての画素に対して実行する。

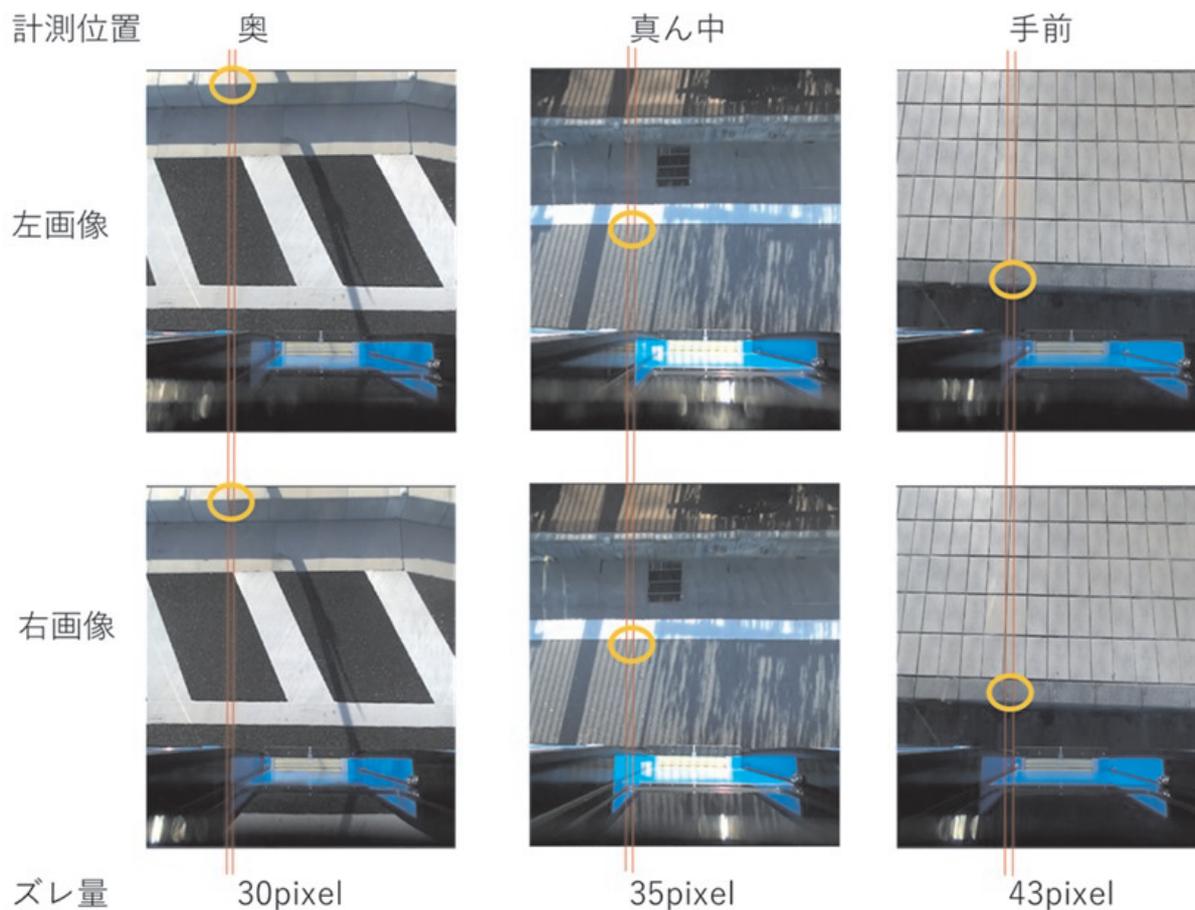


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-31: ステレオ画像左右ズレ幅チェック

今回1フレームあたりのピクセル数は $1280 \times 720 = 921600$ ピクセルであるため、これを921600回繰り返し実施すると1フレームの処理結果を得ることができる(実際には画像の上下左右端を考慮すると若干少なくなるが、ここでは簡単のため921600回とする)。今回目標フレームレートは30fpsとしている。本条件でFPGA化した場合の回路規模について見積りを行った。

2.3.3 回路規模見積り

同じ処理を繰り返す場合、ハードウェアでは繰り返し処理部分を並列に計算できる。まず計算の最小単位である1ピクセル分のSAD値計算処理を1つのSAD値計算回路として定義した。処理イメージを図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-32に示す。1ピクセルデータは8bit長(0-255)となる。余裕を持たせて、1ピクセルあたりのデータサイズを16bit長とする。以上の条件で回路を合成し、回路規模を算出したところ、647個のLUTを使用して1ピクセル分のSAD値の計算ができることがわかった。

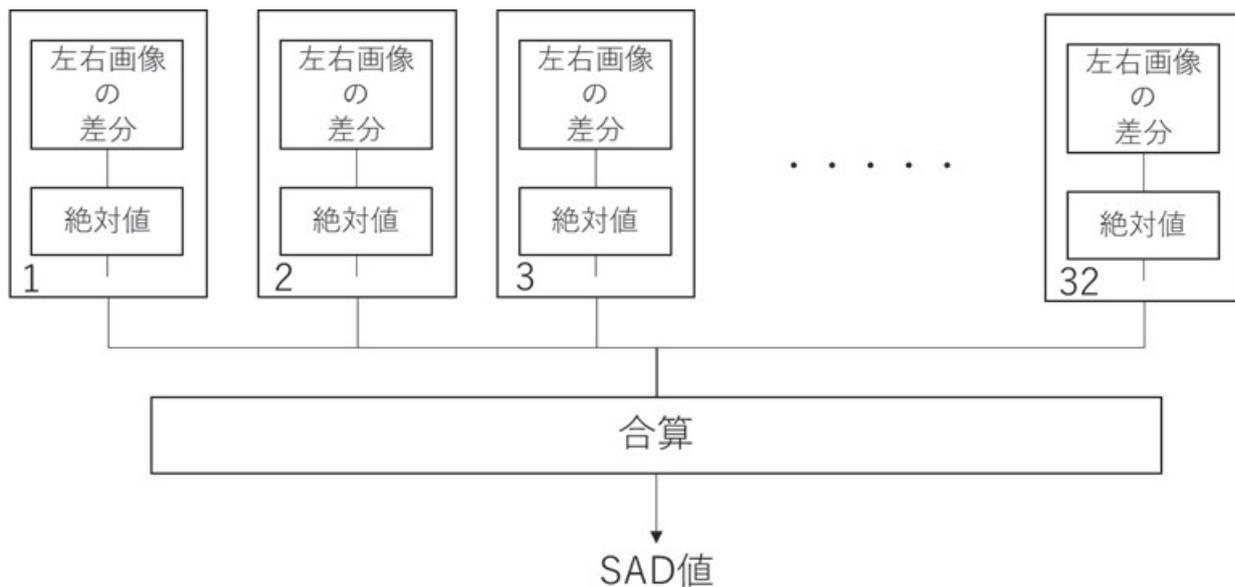


図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-32 : SAD 値計算回路

FPGA のクロックを 100MHz で動作させるとき、30fps で処理するためには、1 フレームを 3.3M サイクル以内で処理が完了すればよい。

図 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-32 の回路をシリアルに処理した場合、1 フレームを処理するために必要なクロックサイクルは、 $64[\text{pixel}] \times 1280 \times 720[\text{pixel}] \div 59\text{M}$ サイクルである。よって回路を 18 個並列に並べて計算すれば、理論上 3.3M サイクル以内に計算が完了できる。

SAD 値計算回路 1 つあたり LUT は 647 個なので、18 個並列に並べた場合、全体で 11646 個の LUT が必要である。この程度の LUT の数であれば、かなり小規模な FPGA でも対応可能である。

次に、ZED カメラの最高解像度である 2K モード(横 2208[pixel]×縦 1242[pixel])を 30fps で処理する場合の回路規模について見積りを行う。一般に、高い解像度の画像データを利用した方が、精度が良い画像処理の結果を取得できると言われている。

720p モード(1280×720)と比較して 2K モードのピクセル数は縦横共に 1.725 倍である。これに伴い、テンプレート画像のサイズも 1.725 倍、すなわち 14×7 程度が必要となる。SAD の入力画素数が 32→98 に増加するため、SAD 値計算回路の LUT は単純計算で $647 \times 98 / 32 \div 1982$ 個程度と見積ることができる。検索幅も $64 \times 1.725 \div 110\text{pixel}$ 程度となる。

上記と同様に、100MHz クロックでシリアルに処理した場合、 $110[\text{pixel}] \times 2208 \times 1242[\text{pixel}] \div 302\text{M}$ サイクルである。よって SAD 計算回路を 91 個並べて並列に計算すれば、3.3M サイクル以内に処理を完了できる。91 個並列に並べた場合、全体で 180362 個の LUT が必要である。

FPGA のクロックを 150MHz で動作させた場合は 1 フレーム 5M サイクル以内に計算が完了すればよく、SAD 計算回路の並列数は 61 個となる。このとき LUT は 120902 個必要である。

2K モードを 100MHz クロック、15fps で処理する場合は、6.7M サイクル以内に 1 フレームの処理を完了させればよく、SAD 計算回路の並列数は 46 個となる。すなわち、LUT は 91172 個必要である。

2.3.4 デバイス選定

0 章での見積り結果を表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-3 に示す。解像度とフレームレート、クロック周波数の各条件において、LUT の数から候補デバイスを選定した。

表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-3 : 回路規模の見積りまとめ

解像度@フレームレート	LUT 数	クロック周波数	候補デバイス
1280×720@30fps	10999 個	100MHz	XC7A200T
2208×1242@30fps	175195 個	100MHz	XC7K325T
2208×1242@30fps	115500 個	150MHz	XC7A200T
2208×1242@15fps	86625 個	100MHz	XC7A200T

選定したデバイスの仕様を表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-4 に示す。

表 エラー! 指定したスタイルは使われていません。-4 : FPGA 仕様

項目	Xilinx 社製 Artix-7(XC7A200T)	Xilinx 社製 Kintex-7(XC7K325T)
Slice Registers	267600	407600
Slice LUT	133800	203800
Block RAM	365	445
IOB	500	500
BUFGCTRL	32	32

選定したデバイスはいずれも一般に数多く利用されている。

2K モードを処理する場合、Artix-7 シリーズの FPGA ではクロック周波数 100MHz で処理が間に合わないため、150MHz 上げるか、フレームレートを 15fps に下げることがある。Artix-7 シリーズと比較して性能/価格共にハイエンドなデバイスである Kintex-7 シリーズを使用すれば、100MHz クロックで 2K モード 30fps が処理できる。

2.3.5 結果

見積り結果より、720p モードであれば安価な Artix-7 シリーズでも十分な性能が出せる見込みを得た。

最高解像度である 2K モードを適用する場合、処理画像サイズ、テンプレート画像サイズが縦横共に 1.7 倍となり、検索幅も 1.7 倍となるため $1.7^5 \approx 15$ 倍の計算量となる。Kintex-7 シリーズの適用がベストであるが、フレームレートを下げる、もしくは FPGA クロック周波数を上げる事で Artix-7 シリーズでも対応可能である。

いずれにしても、選定したデバイスは一般に数多く利用されているため安価に入手可能であり、GPU と比較して FPGA を適用するメリットはあるといえる。

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バスト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。

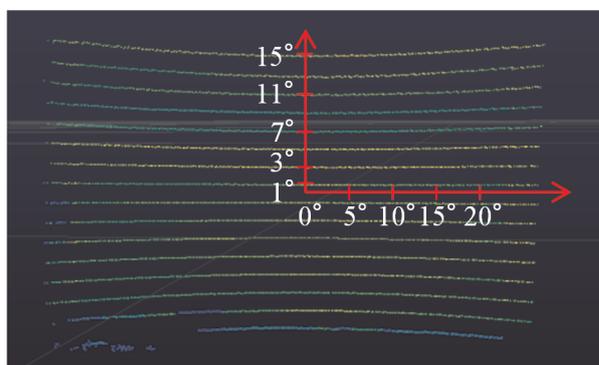
また、VLP-16 の測距範囲仕様は 1~100m だが、0.5m から測距データが出力されているため、FX10 の測距範囲仕様に合わせて 0.5m からの評価を行った。センサ-測距対象間距離は巻尺を用いて位置決めを行った。測距した 3 次元点群データを図 2.5.2-2 に示す。



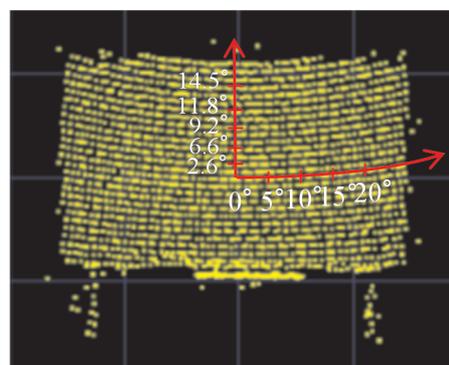
図 2.5.2-1 測距性能評価試験

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 (3σ) [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 3σ 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 ± 20 mm 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。

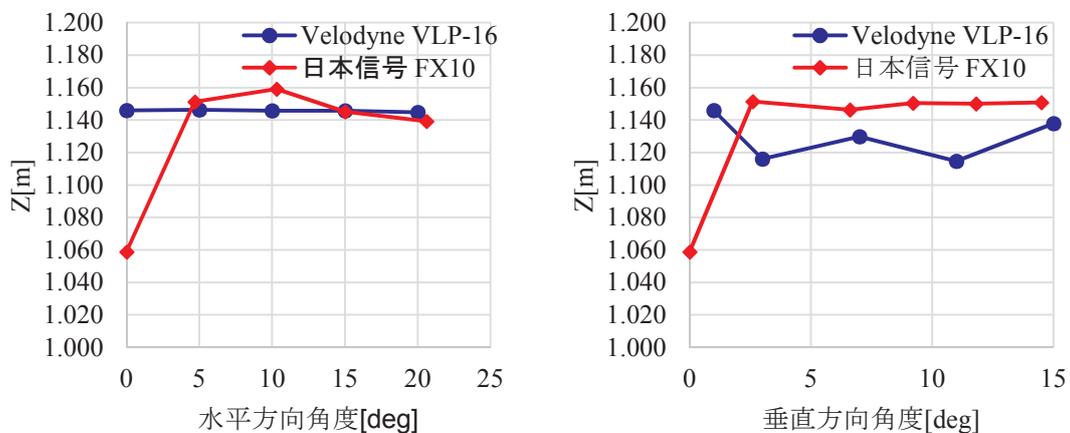
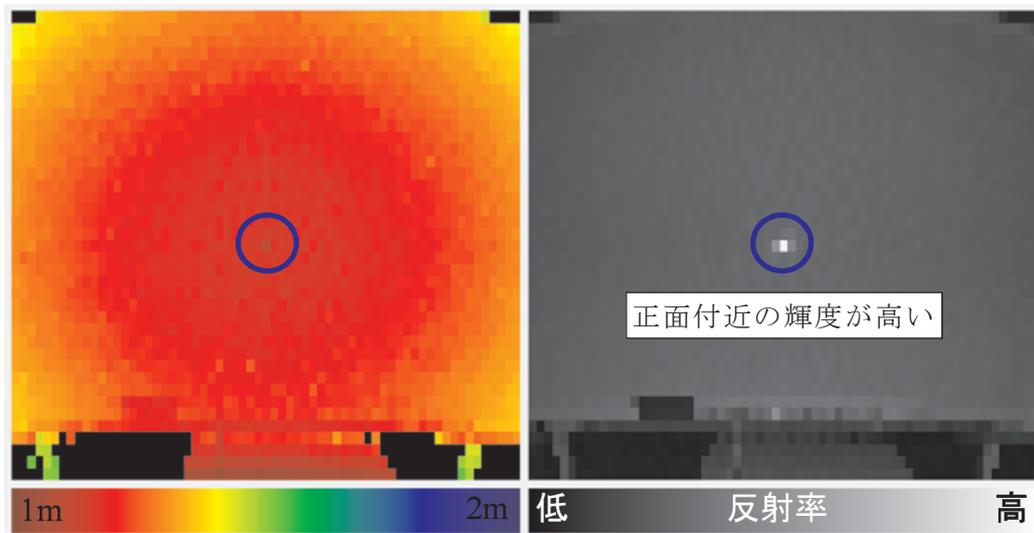


図 2.5.3-1 センサ-測距対象間 1.1m における奥行き方向距離 Z 計測結果



(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)

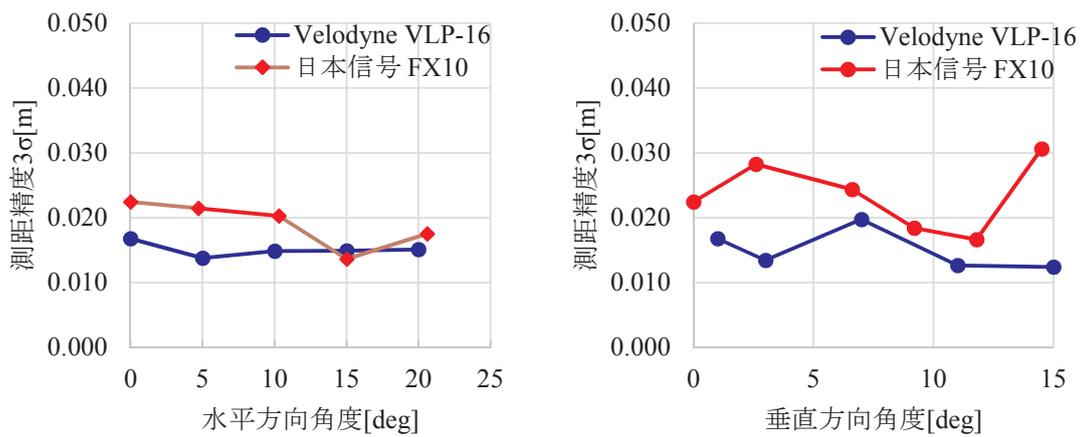


図 2.5.3-3 センサ-測距対象間 1100mm における奥行き方向距離 Z の精度 (3σ)

(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 の時に悪化したがおおむね VLP-16 と同等となっている。

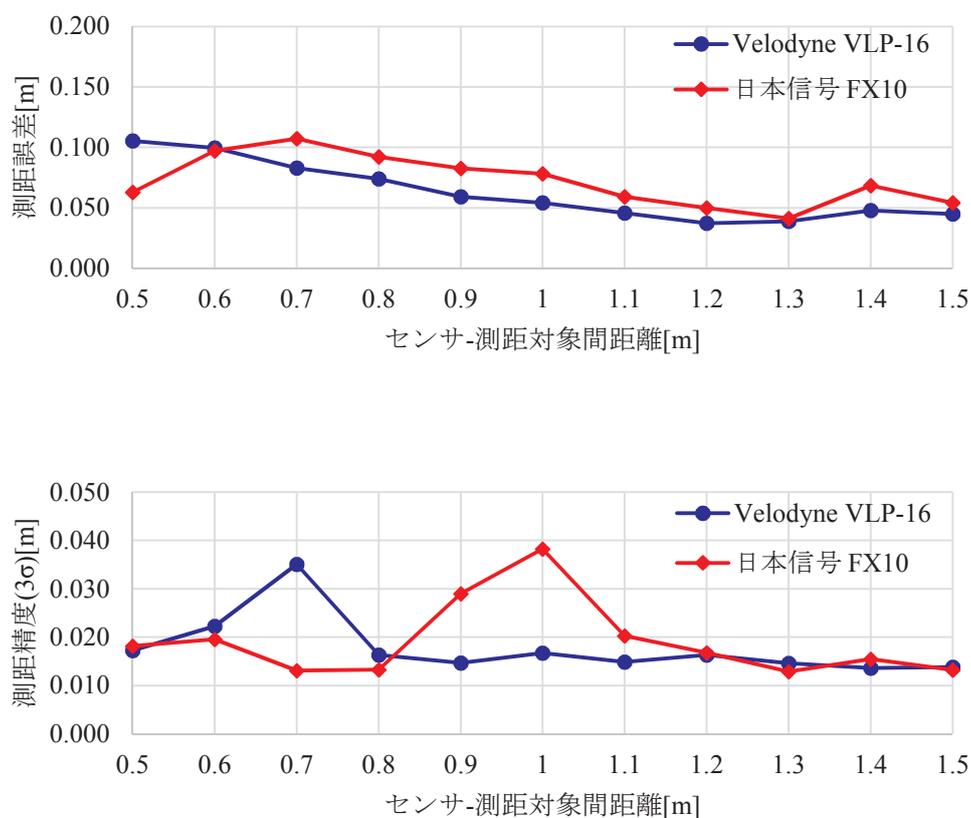


図 2.5.3-5 測距精度計測結果

2.5.4 LiDAR の基本性能まとめ

VLP-16 及び FX10 の 2 機種 の 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り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。

2.6 LiDAR による歩道縁石検出手法の検討

2.6.1 歩道縁石の検出方法

(1) 目的

本システムは、路線バスの自動運転に向けて、道路左側の歩道縁石までの距離を Lidar により計測し、自車位置の左側空間の把握、および、バス停止着時の目標 60mm 位以内を達成するものである。

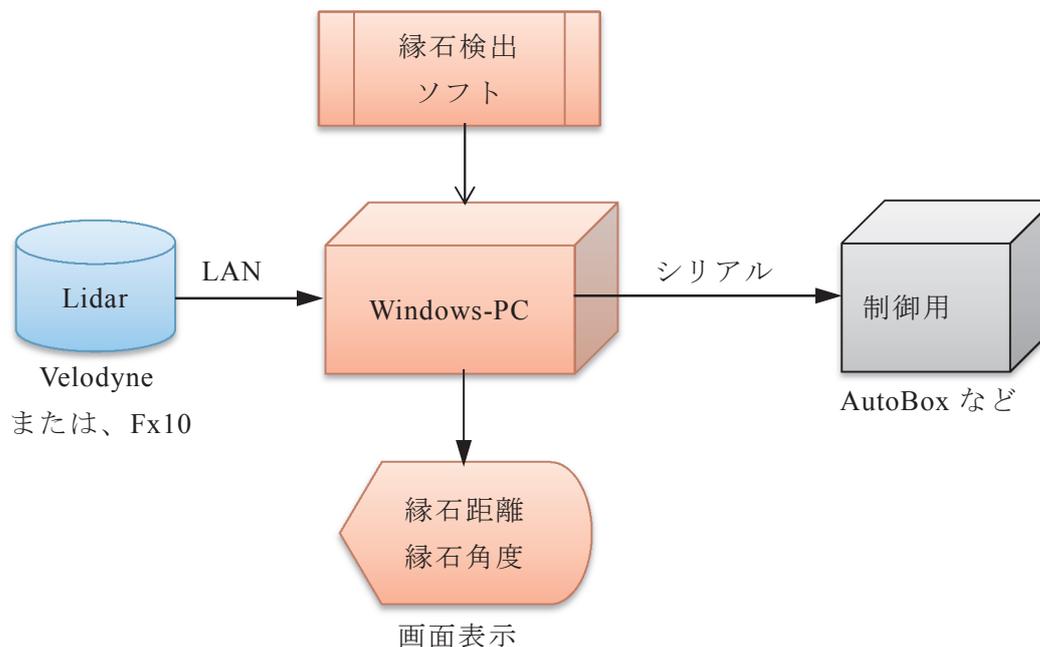
従って、道路左側にある歩道縁石のみを捉えることを目的とし、その距離と縁石との角度を把握し、縁石に近づいているか、離れていくかを把握することである。

Lidar をバスの前側の底面に取り付けて、進行方向左側の縁石に向けて計測し、縁石との距離と傾き角度を計算して、制御側へ出力するソフトウェアを作成し、歩道縁石の検出度合と精度を検証した。

また、カメラによる歩道縁石の検出についても考察する。

(2) システム構成

システムの構成図を下記に示す。



1) Lidar

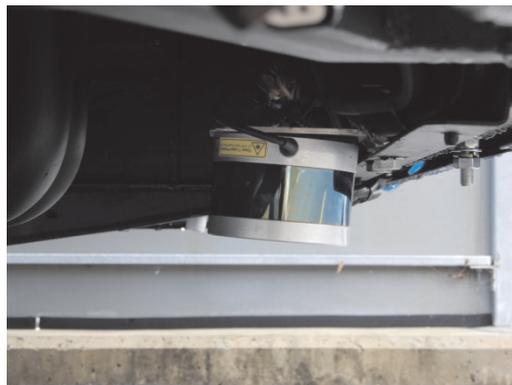
Lidar は、Velodyne「VLP-16」および Fx10 により歩道縁石を計測し、計測した距離を 3D の点群座標に変換して扱う。

2) Lidar の設置場所

バス車体の前、ほぼ中央の底面に、逆さまで、左側の縁石に向けて設置した。

設置角度は、ピッチ方向に下向き約 8° とした。

センサーの設置角度は、オートチューニング用のプログラムにより自動検出する。



【Velodyne の設置写真】

3) Windows-PC

Lidar で計測したデータを Windows-PC へ Lan ケーブルで接続して、取り込む。

4) 縁石検出ソフトウェア

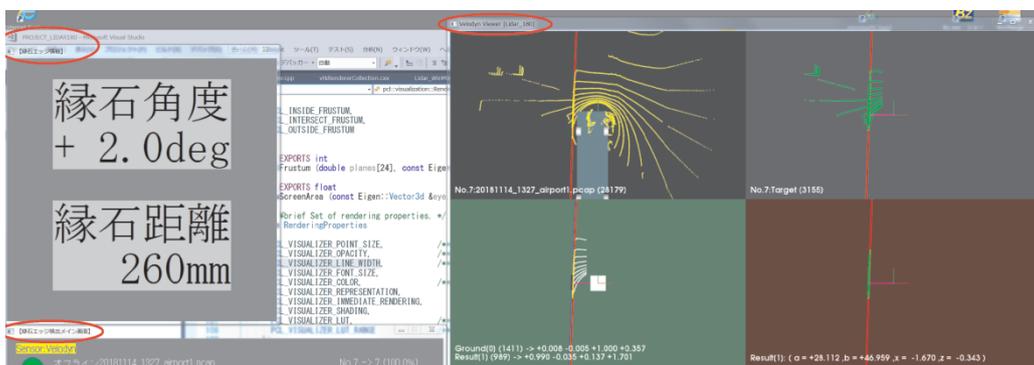
ソフトウェアは、VC++で作成した LidarMain.exe を実行する。

プロジェクト名は、「Lidar999」とし、999の部分にはバージョン示す番号とした。

検出(評価)用と設置角度チューニング用があり、パソコン内のフォルダーにより使い分ける。

a. ソフトウェアの画面

VC++のプロジェクト名は、Lidar180(2018/11/22 時点)として開発した。
 評価中の画面キャプチャを下記に示す。



4つの背景色がある右側のウィンドウについて、下表に記す。

左上枠の黒系の背景枠 「バス(底面とタイヤ)の表示があり」	計測データを3D点群に変換し、 全ての点群を黄色で表示
右上枠の灰色系の背景枠	3D点群からフィルター後の点群を 緑色で表示
左下枠の緑色の背景枠 「水平面ベクトルの表示があり」	地面として検出した点群を白色で、 縁石として検出した点群を黄色で表示
右下枠の朱色の背景枠	縁石の点群のみを緑色で表示
赤色の直線(4つの背景枠に表示)	地面と縁石の交線を示す
マゼンダの直線(4つの背景枠に表示)	縁石距離を示すための直線

5) 出力側(制御用 AutoBox など)

縁石検出ソフトで検出した縁石距離と縁石角度を、RS232C規格のシリアル通信にて、制御側へ出力する。

2.6.2 縁石検出の評価

(1) 設置角度の算出

1) Velodyne 設置角度のチューニング

下記写真のように、垂直面をバス車体左側に当てて、この垂直面と地面を計測して、設置角度を算出し、垂直面との距離を計算する。



チューニングの全体写真

チューニングの下部写真

a. ほぼ水平に設置したとき

Lidar の設置位置が、縁石(左側)に向けて逆さまであるため、チューニング開始時のパラメータの初期値を $x := -0.0\text{deg}$ 、 $y := 180.0\text{deg}$ 、 $z := -90.0\text{deg}$ に設定し、チューニングを開始する。

Lidar140_Tuning を作成後、チューニングの精度を高めるため、Lidar150_Tuning に改善し、伊賀試験場で評価した。

結果から、算出した角度は 1deg 前後以内でほぼ水平で、実際に設置されている角度に一致した。

パラメータファイルに $x := -0.7^\circ$ 、 $y := 181.1^\circ$ 、 $z := -90.5^\circ$ を書き込んだ。

進行方向(ピッチ)に下向きに、約 5deg 程度に設置したとき

チューニング	roll	Pitch	yaw	結果
Lidar150	-0.3deg ⇒X=-0.3deg	4.7deg ⇒y=184.7deg	-0.5deg ⇒z=-90.5deg	実際と合っている

パラメータファイルに $x := -0.3^\circ$ 、 $y := 184.7^\circ$ 、 $z := -90.5^\circ$ を書き込んだ。

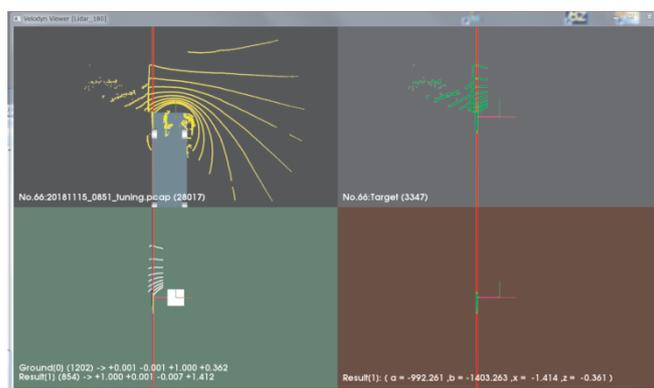
水平設置時と比べ、ロール方向は水平に近くなり、ピッチ方向は 3.6° 下向きになった。

b. 車体左端との計測値

チューニング時は、縁石距離=0mm となる距離であり、バス左端から Lidar までの距離を計測して、この時の距離と誤差を確認した、

チューニング時の計測	ソフト計算値 (車体左端までの距離)	車体左端から Lidar の実位置	計算値の誤差
	1.41m	1.41m	0.00m

車体左端までの計測誤差が 0mm であることから、縁石距離はこの値を計測値から引き算することで計算できる。



c. 結果と課題(縁石検出に影響)

- ・ Lidar の設置角度を自動で検出することができた。
- ・ 設置角度の算出は、Lidar を設置し直したときには再算出が必要である。
- ・ 水平面の検出は、平らな地面または道路によりピッチ角とロー角を算出し、縁石検出の判定に影響するため、凹凸のない地面でかつバスに振動を与えないことに注意する。バスの振動については、チューニングを何回か繰り返すことで結果を判断することが必要である。
- ・ 垂直面の検出は、バスの左端に垂直面をヨ一方向に対して正確に設置することが困難であるため、ヨ一角により計算する縁石角度の精度に影響し、この垂直面を正確に設置することが課題である。

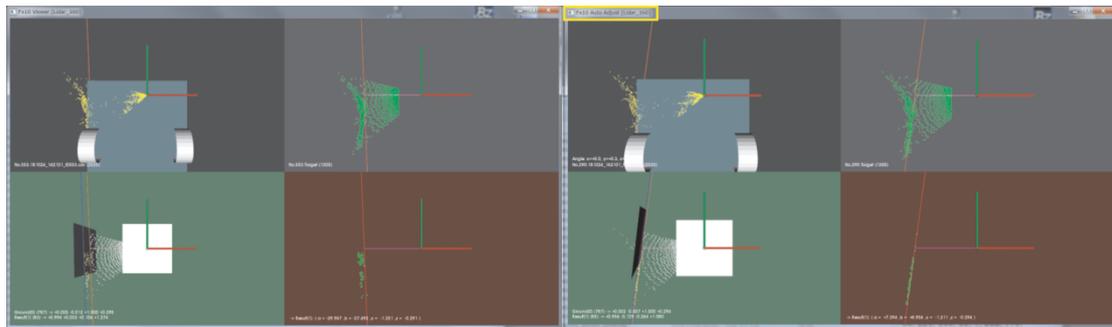
2) Fx10 設置角度のチューニング

a. Fx10 の設置について

Velodyne と同様に縁石に向けて逆さま向きに設置したが、Fx10 では垂直方向の点群密度が多いため、設置角度はほぼ水平のみとした。

チューニング開始時のパラメータの初期値を $x := -0.0\text{deg}$ 、 $y := 180.0\text{deg}$ 、 $z := -90.0\text{deg}$ に設定し、チューニングを開始した。

真上から見た画面キャプチャを下記に示す。



チューニング	roll	pitch	yaw	結果
Lidar160 (東大柏)	-	-	-	安定せず 毎回値が異なる

b. 結果

Fx10 では、垂直面の点群の検出が直線にならないため、検出する垂直面が安定せず、チューニングができなかった。

Velodyne のみ、評価および実証試験を行うことにした。

(2) 計測データと座標変換

計測したデータの座標変換の結果は、Velodyne 製品に添付されているソフトウェア「VeloView」の表示結果と同一になることを確認した。また、ここでは、Velodyne を水平に接して縁石を検出できるかを検討した。

1) 点群数の確認

VLP-16 では 16 個のセンサーがあり、1 回転する毎に 3D 空間として更新するため、この 1 回転分の点群の個数を確認した。

a. 点群の最大個数

VLP16 の全範囲(水平方向 360° 、垂直角 30°)の計測範囲では、28800 個($(360^\circ / 0.2^\circ) * 16$ 点)の点群となる。

b. 縁石を検出可能な点群の最大個数

縁石の側面が検出可能な範囲を水平方向 160° 、垂直角 16° ($+1^\circ \sim -15^\circ$)とした場合、約 5600 個の点群となる。

c. 縁石を計測した場合の点群数

縁石とバスとの距離が約 30cm で仮想バス停に停車した場合に、Lidar から縁石までの計測距離は約 1.7m で、高さ 10cm の縁石の側面を計測した結果は、約 400 個の点群となった。

d. まとめによる結果

	点群数
全範囲 360° (1 回転分) の計測数 (計算値)	28800 個
縁石検出可能な最大個数 (計算値)	約 5600 個
高さ 10cm の縁石を、計測距離が約 1.7m で計測した時	約 400 個

縁石を検出するためには、対象範囲にあらかじめフィルターをかけて、点群数を少なくすることで本プログラムの処理負荷を軽減させることとする。

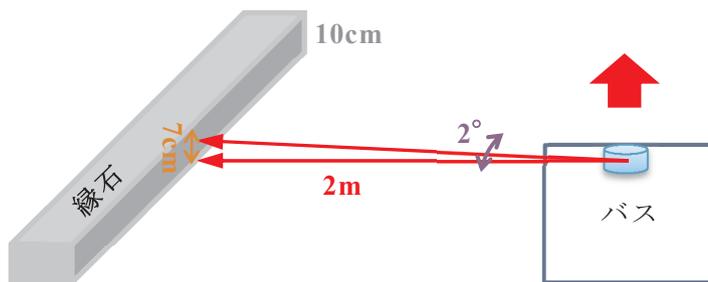
2) 縁石に当たる走査線の確認

同一のセンサーで計測された点群を結んだ線を、「走査線」と定義する。この 16 本の走査線が縁石に当たる時の本数と走査線の間隔を確認した。なお、VLP-16 では各センサー間の垂直角度は、 2° である。

a. 水平距離が 2m の場合

Lidar を水平に設置して縁石までの水平距離が約 2m の計測では、縁石に当たる走査線の間隔は約 7cm となる。

下図に示すように、高さ 10cm の縁石の場合は走査線が 1~2 本となる。



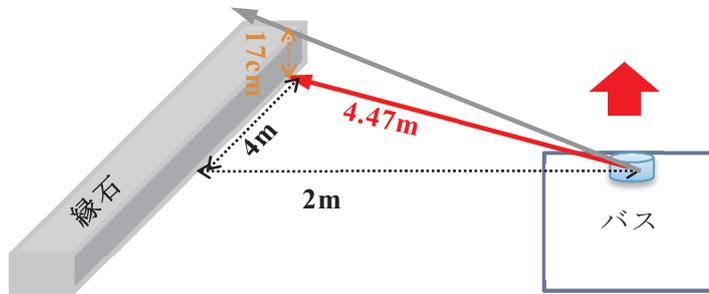
b. 水平距離が 4m の場合

同様に、水平距離 4m の計測では、縁石に当たる走査線の間隔は約 14cm となる。

高さ 10cm の縁石の場合には、走査線が 1 本~2 本になる。

c. 水平距離が 2m で進行方向 4m 先の場合

縁石までの水平距離は約 4.7m となり、縁石に当たる走査線の間隔は約 17cm となる。
高さ 10cm の縁石の場合には、走査線が 1 本以下になる。



d. 水平距離が 4m で進行方向 4m 先の場合

縁石までの水平距離は 5.66m となり、走査線の間隔は約 20cm となる。
高さ 10cm の縁石の場合には、走査線が、ほとんど当たらない。

e. まとめと結果

水平距離	進行方向 距離	Lidar での 計測距離	走査線の 間隔	縁石の高さ	走査線
2m	-	2m	約 7cm	10cm	○:1 本~2 本
4m	-	4m	約 14cm	10cm	△:1 本~2 本
2m	4m	4.47m	約 17cm	10cm	△:1 本以下
4m	4m	5.66m	約 20cm	10cm	×:1 本以下

Lidar を水平に設置にした場合、縁石に当たる走査線が 2 本程度で少なく、本プログラムで縁石の垂直面を見つけることが難しい。そのため、水平ではなく、斜めに当てることで走査線の本数が増え、縁石の垂直面を見つけやすくすることが必要である。

よって、Lidar の設置を縁石に対して右斜めした向きに設置することにし、バスの進行方向に対して下向きのピッチ角をつけた。

(3) 点群処理

1) フィルター

a. フィルターの範囲

縁石を探す左側は、Lidar の位置から 0.8m から 6m 以内とし、x 座標は -6m から -0.8m とした。

進行方向の前後は、前側 8m 以内、後側 1m 以内の範囲(走行中の縁石を探すため、前側を長くする)とし、y 座標は -1m から 8m とした。

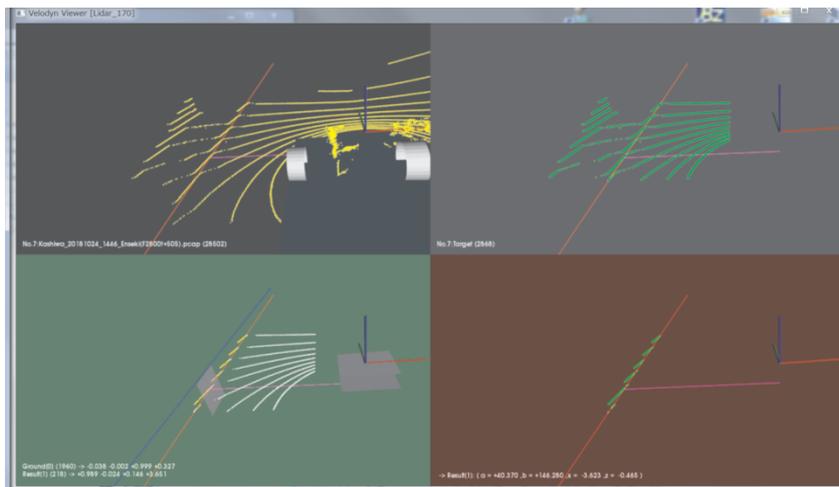
高さ方向は、Lidar の位置から地面までとし、Lidar は地面から 0.36m の高さに設置しているため、z 座標は -0.5m ~ 0.1m とした。

2) 平面の切り出し

平面の切り出しは、フリーソフトウェアである Point Cloud Library (PCL) を使用し、外れ値を除去する RANSAC (アルゴリズム) を指定して行った。

a. 水平面 (地面、道路)

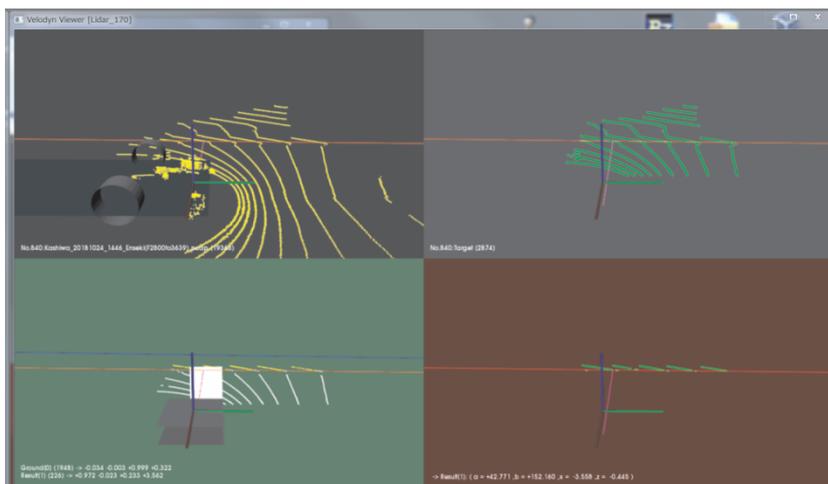
実際の道路は水はけ用にゆるやかな凸状であるが、問題なく水平面を検出できた。後方上から見た画面キャプチャで下記に示す。



左下の緑色背景枠で白色の点群が地面を検出しているが、縁石付近の点群は水平面として検出されていない。

b. 垂直面 (縁石)

東大柏実験フィールドでの縁石検出時を、真横右側上から見た画面キャプチャで下記に示す。



右下朱色の背景で緑色の点群が縁石側面を検出しているが、縁石に当たる走査線は 5 本以上である。また、Lidar の設置角がピッチ方向に下向きであるため、右下下がりの走査線となっていることがわかる。

(4) 縁石検出の判定

伊賀試験場にて、約 6~10cm の高さの縁石の検出を評価した。



縁石の垂直面は、縁石の地面から高さを含むことなどの判定条件を追加し、すぐ上にあるフェンスを、縁石の側面と判定しないことも評価した。

1) 縁石距離の実測方法



上記の写真で、縁石距離は 34.9cm を示している。

Lidar はバス左側面から 1.41m にあり、Lidar の計測値は 1.76m となる。

停車状態	ソフト計算値 (縁石までの距離)	縁石距離 (計算値- 1.41m)	縁石距離の実測 値 (縁石と車体左 端)	実測値との 誤差
------	---------------------	-------------------------	-------------------------------	-------------

停車中	1.76m	34.9cm	34.9cm	なし
-----	-------	--------	--------	----

2) フェンスおよび壁などの垂直面の除外

点群処理で切り出した垂直面に対して、各点群の高さが 20cm 以下を含み、30cm を超える点群が多くないものを、縁石と判定した。これによりフェンスおよび壁などの垂直面を除外した。

a. 評価結果

Lidarからの距離 (水平距離) 縁石に当たる Lidarの走査線の本数 縁石検出結果 (縁石の高さ 10cm)

約 4m	2 本程度	検出不可	
約 4m から約 2.3m	2~3 本程度	検出不安定	
約 2.3m から 1.41m	3 本程度以上	検出可能	誤差?cm 程度
1.41m 以下	バスの下部なる	-	地面検出用に計測

高さが約 10cm の縁石では約 2.3m、つまりバス車体と縁石とは約 0.9m が限界となっています。

高さが約 10cm の縁石を検出可能な距離は、Lidar 水平時は約<1.7>m 迄であったのが、約<2.2>m になった。

縁石との距離が大きくなるほど、縁石の側面に当たる Lidar の走査線が少なくなり、縁石の側面が認識できなくなった。⇒Lidar の走査線の垂直角度分解能は 2° である。

実験結果では、縁石を検出している走査線が 3 本以上あれば、検出精度がより確実になるため、Lidar の設置は、縁石の垂直面に対してロール(車体ではピッチ)方向の傾きをつけることが望ましいと決定した。

b. 縁石距離が約 2.6m の縁石を真横で計測する場合

Lidar で縁石を計測する距離は 4m(バスから約 1.4m 内側に設置)であり、水平に計測する場合は、走査線の間隔が、VLP16 の仕様から約 14cm となる。高さ 25cm の縁石の場合、走査線が 1 本から 2 本で、垂直面として切り出せず、縁石として検出できなかった。

c. 縁石距離が約 2.6m の縁石を 4m 先から計測する場合

上記の縁石を 4m 先から検出する場合の水平距離は 5.66m となり、走査線の間隔が約 20cm となる。高さ 25cm の縁石の場合、走査線が 1 本になることが多く、プログラムが垂直面として捉えられることが不可能となる。

d. 縁石距離が約 2.6m にある縁石を 6m 先から計測する場合

上記の縁石を 6m 先から検出する場合の水平距離は 7.21m となり、走査線の間隔が約 25cm となる。高さ 25cm の縁石の場合、走査線が 1 本となる。

d. 結果と対策

高さ 25cm の縁石を真横距離 4m で計測する場合、走査線が 1 本から 2 本であり、プログラムが垂直面として検出できなかった。その対策として、Lidar の走査線を縁石の垂直面に対して、斜めに当てることで対策することとした。そのため、Lidar の設置を進行方向の前側ピッチ方向に下向きの場合を検討した。

3) 設置角度による比較

設置角度については、水平設置とピッチ方向に下向き約 5° の場合で比較した。バス停への正着制御を想定して、走行後、縁石から約 30cm 離れた位置に停車し、3 回繰り返し計測を実施した。

水平に設置した場合

走行後の 停車回数	ソフト計算値 (縁石までの距離)	縁石距離 (計算値- 1.41m)	縁石距離の実測 値 (縁石と車体左 端)	実測値との 誤差
1 回目	1.75m	0.34m	0.35m	-0.01m
2 回目	1.70m	0.29m	0.29m	0.00m
3 回目	1.75m	0.34m	0.345m	0.005m
3 回平均		-	-	0.00m

下向き 4.7deg の場合(ピッチ方向)

走行後の 停車回数	ソフト計算値 (縁石距離)	縁石距離 (計算値- 1.41m)	縁石距離の実測 値 (縁石と車体左 端)	実測値との 誤差
1 回目停止時	1.79m	0.38m	0.38m	-0.01m
2 回目停止時	1.79m	0.33m	0.28m	0.10m
3 回目停止時	1.76m	0.35m	0.36m	-0.01m
3 回平均		-	-	0.00m

なお、2 回目の計測は実測値の記入ミスと判断した。

結果

、その振幅は約 13mm 程度であるが、その中で頻繁値と思われる値を読み取った。なお、制御への通知は 1cm 単位であり、誤差は最大 1cm 以下となった。

上記の結果から、自動運転の正着制御では 1cm 単位であり、が可能であると推測した。

4) 走行中の対策

バスの走行中の振動などによる前後、左右の揺れを考慮するために、水平面(地面)を検出したときに、車体とのピッチ(x 軸回転)方向とロール(y 軸回転)方向で座標の補正をかけた。

5) 考察

今回、VLP-16 で評価を行ったが、下記に挙げた上位機種であれば、垂直角度分解能が小さく、縁石に当たる走査線が増えるため、縁石検出の可能性が高くなると推測できる。

	垂直角度	垂直角度分解能
VLP-16	30° (+15° ~ -15°)	2°
VLP-32	40° (+20° ~ -20°)	1.29°
HDL-64e	26.8° (+13.4° ~ -13.4°)	0.42°
VLP-16-HiRes	20° (+10° ~ -10°)	1.33°

(5) 縁石距離と縁石角度の算出、およびデータ出力

1) 縁石距離の実測と Lidar の計測値の誤差

上記の写真で、縁石距離は 34.9cm である。

Lidar はバス左側面から 1.41m にあり、Lidar の計測値は 1.76m となったため、実測値との誤差は 0.001m となった。

実験結果では、縁石を検出している走査線が 3 本以上あれば、検出精度がより確実になるため、Lidar の設置は、縁石の垂直面に対してロール(車体ではピッチ)方向の傾きをつけることが望ましいと決定した。

2) 縁石を検出できる距離

3) 結果と考察

実験 1 と比べると、縁石の側面にあたる Lidar の走査線が増え、縁石の垂直面を検出が向上することを確認できた。そこで、垂直面の判定は、縁石に対して斜め方向に走査し、走査線の本数を増やすため、Lidar の設置は進行方向に対してピッチ角をつけこととした。

原因追求および調査結果

ブロック 20cm に対して、地面からの検出高さを 20cm 以内と判定すると、地面との高さ検出で約 2cm 程度のゆらぎがあるため、高さ 20cm を超える点郡として判定し壁とみなして、縁石として検出しないことが多いことがわかった。「縁石として検出する縁石の高さを 20cm 以下の点郡が 90%以上」の判定を「高さを 23cm 以下」に変更したところ、15:25 の pcap データで、スポンジとの距離を約 2.3m で常に検出できた。

(6) 評価後の改良

1) ピッチ方向に下向きにする

前回(伊賀試験場 10/16)の考察を元に、Lidar の設置角度をピッチ方向に下向き約 10° とし、縁石の検出精度を確認した。

東大柏キャンパスでの縁石検出(2018/10/25-10/26)

2.6.4 公道上における縁石検出の実証実験

(1) 実証実験

往復約 18km を走行し、実際の縁石をほとんど検出することができた。

1) 設置角度のチューニング

Lidar170_Tuning の内容

Velodyne 設置角度の検出用で、伊賀試験場、東大柏実験場での評価によりパラメータを見直したものを。

チューニング結果

チューニングを行い、下記の設置角度となった。

チューニング	roll	pitch	yaw	結果
Lidar170	-1.1deg ⇒x=- 1.1deg	+8.1deg ⇒y=188.1deg	+1.4deg ⇒z=-88.6deg	実際と 合っている

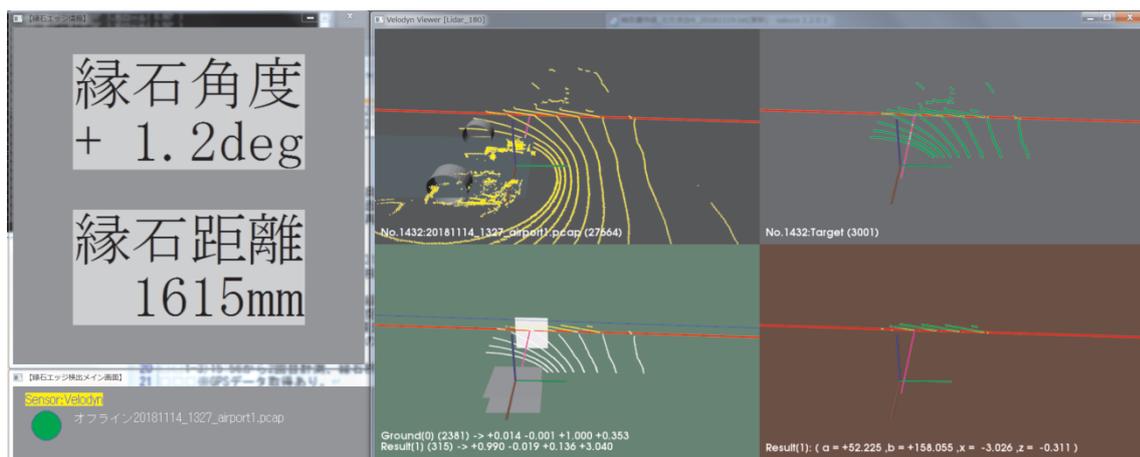
⇒進行方向に対して、下向きに 8.1° となった。

設置角度が車両進行方向に対して下向き(約 8°)のピッチと一致した。

a. 縁石検出の評価

Lidar170_Evaluation の内容

・東大柏での評価では、縁石の奥の建屋壁(計測距離で約 5m)を地面に近い垂直面と判定し、縁石と誤検出したため、地面とのピッチとロールを検出して高さ(Z 軸)を補正することを追加したソフトである。(2018/11/2 に実装済み)



評価結果

・走行中、停止中ともに、リアルタイムに実縁石を計測しつつ、縁石は問題なく検出できた。

(2) 実証実験後の追加仕様と検証

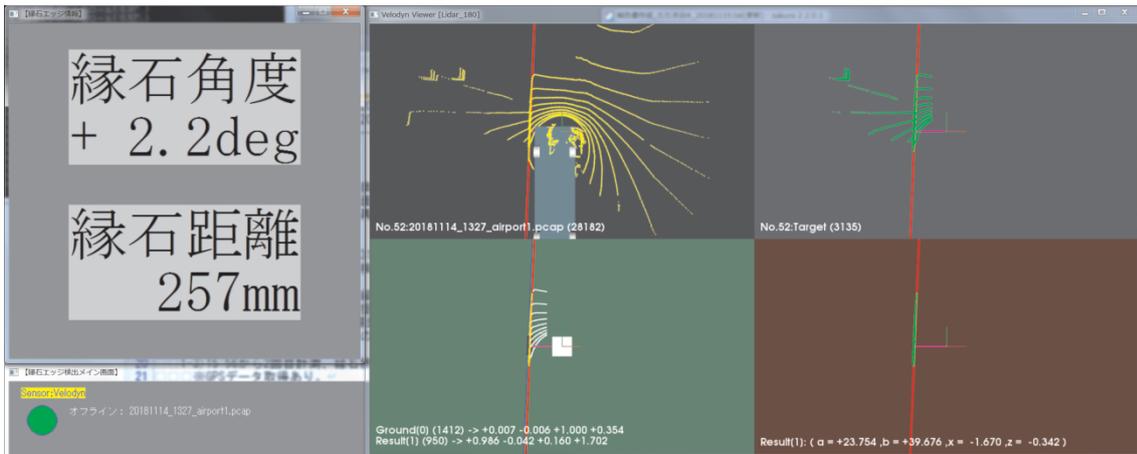
1) 検証

a.

・計測データは、フリーウェアソフトの「Wireshark」で保存しておいた「20181114_1327_airport1.pcap」を使用し、縁石検出をしているときの画面をキャプチャした。

No52 フレーム(真上から)

縁石角度+2.2deg, 縁石距離 257mm を検出した。

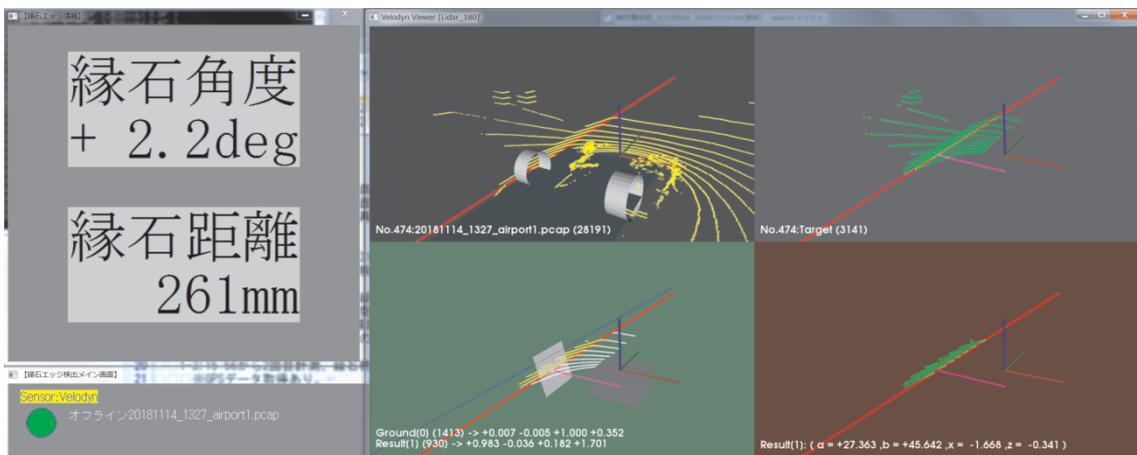


停車中。

フィルター後の右上のグレー画面では、縁石には Lidar の走査線が 9 本に当たっている。(東大柏での実験結果より、走査線が多いことを確認できた)

No474 フレーム(斜めから)

縁石角度+2.2deg, 縁石距離 261mm を検出した。

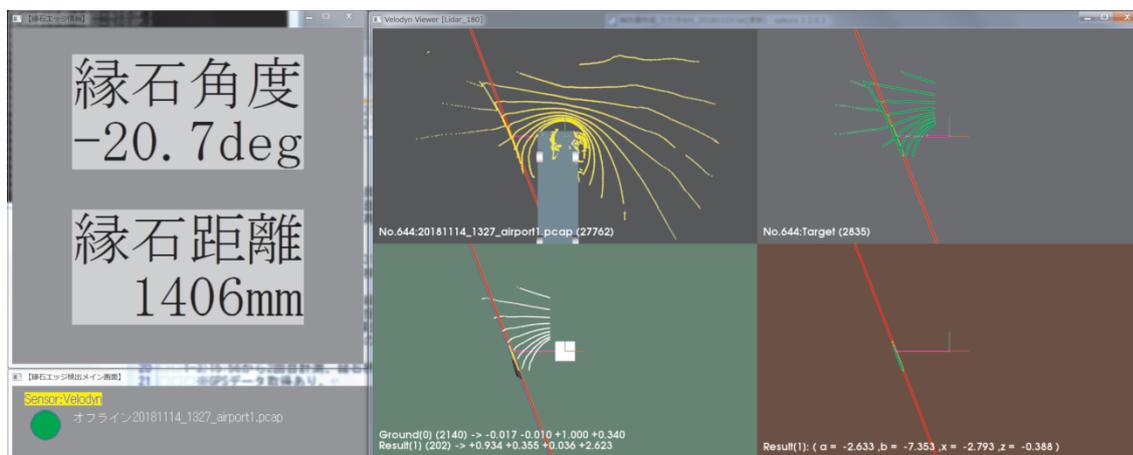


停車中。

縁石検出結果の右下のレンジ画面では、縁石を Lidar の走査線 8 本で検出できている。

No644 フレーム(真上からの)

縁石角度 -20.7deg , 縁石距離 1406mm を検出した。

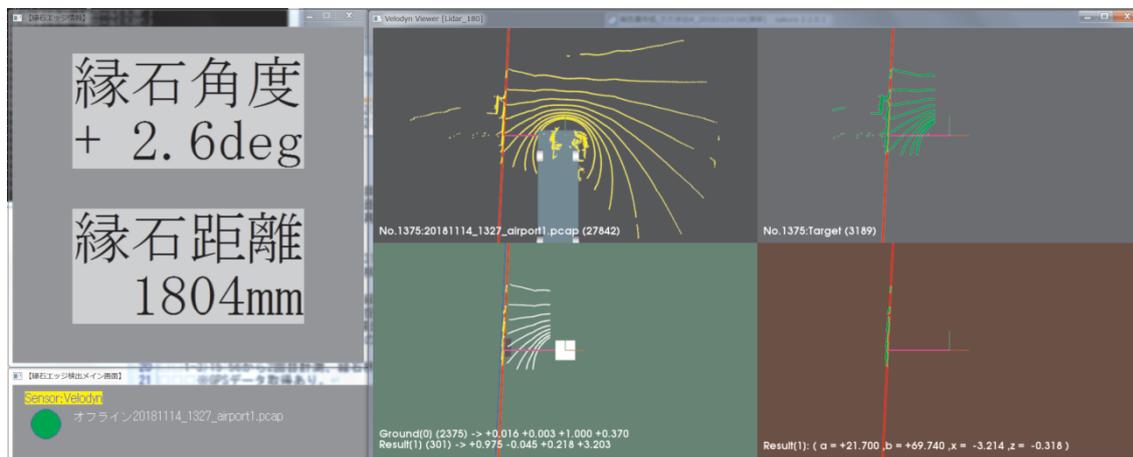


交差点進入により縁石(やいり円弧の形状)から離れていく途中。

縁石にはLidarの走査線が2本に当たっており縁石を検出し続けたが、これ以上離れていくと当然検出はされない。

No1375 フレーム(真上から)

縁石角度 $+2.6\text{deg}$, 縁石距離 1804mm を検出した。



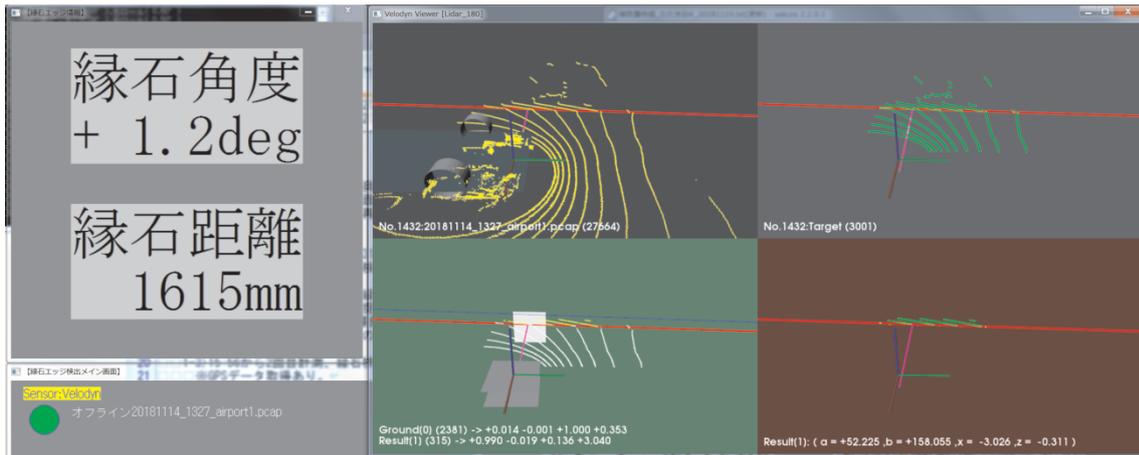
縁石に接近中で、検出可能となった直後。

縁石距離が約 1.8m 程度から縁石を検出可能になり、縁石をLidarの走査線 6 本で検出できている。

※Lidarはバス側面から 1.41m に設置のため、約 3.21m を計測している。

No1432 フレーム(右側真横から)

縁石角度 $+1.2\text{deg}$, 縁石距離 1615mm を検出した。

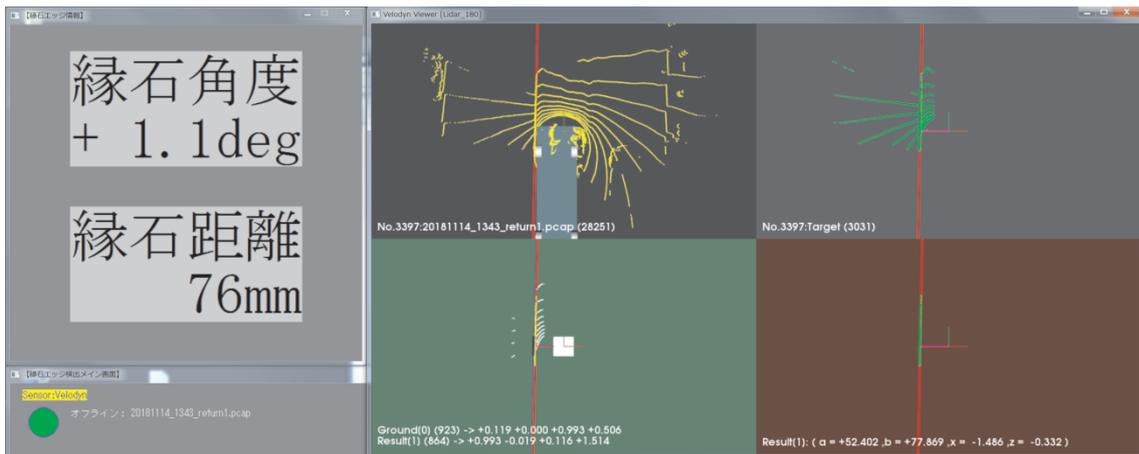


縁石は、Lidar の走査線は5~6本で検出できている。

b. バス停に到着、停車中の計測

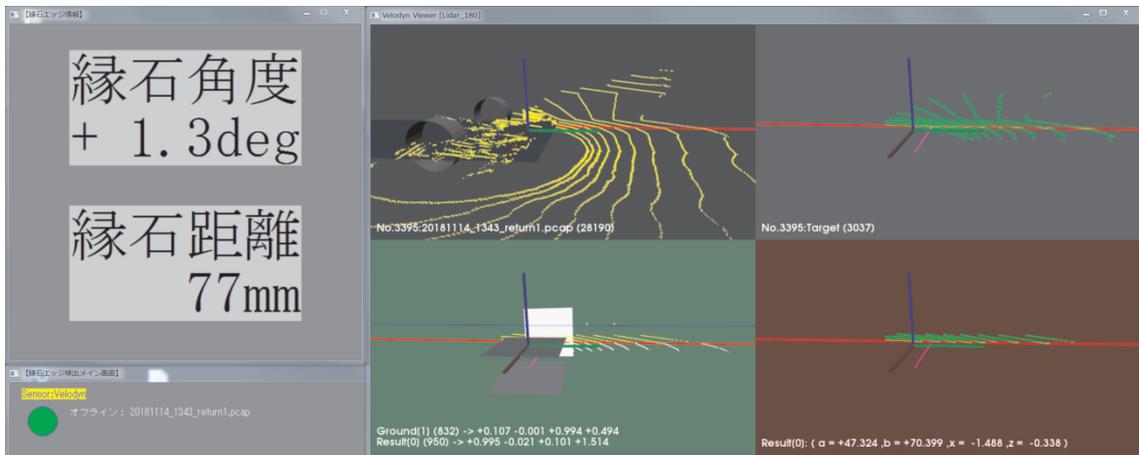
真上からの画面表示

No3397 フレームで、縁石角度+1.1deg, 縁石距離 76mm を検出した。



右側真横からの画面表示

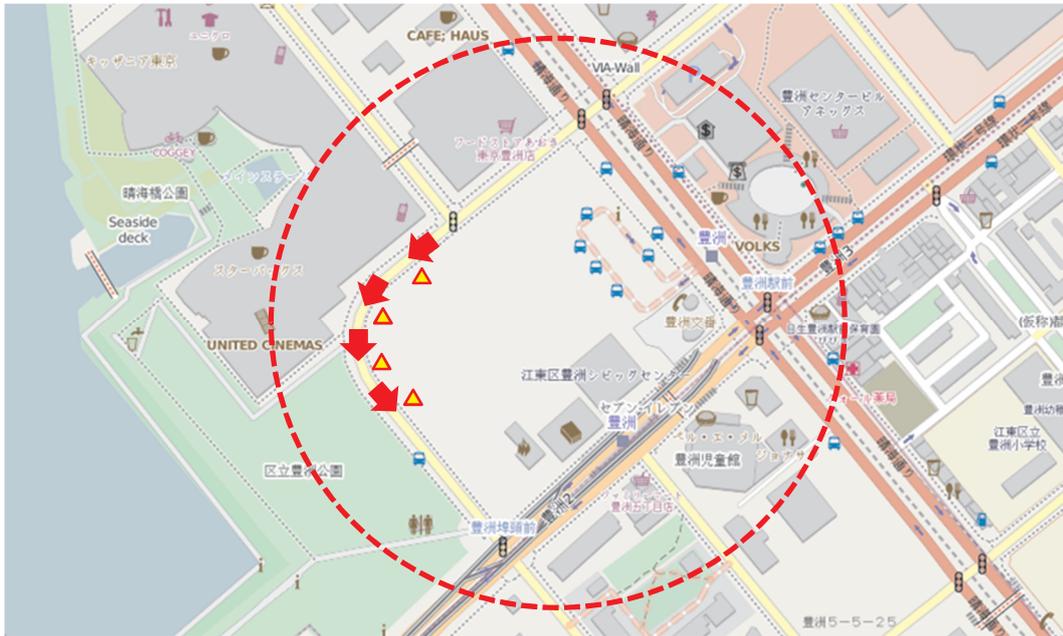
No3395 フレームで、縁石角度+1.3deg, 縁石距離 77mm を検出した。



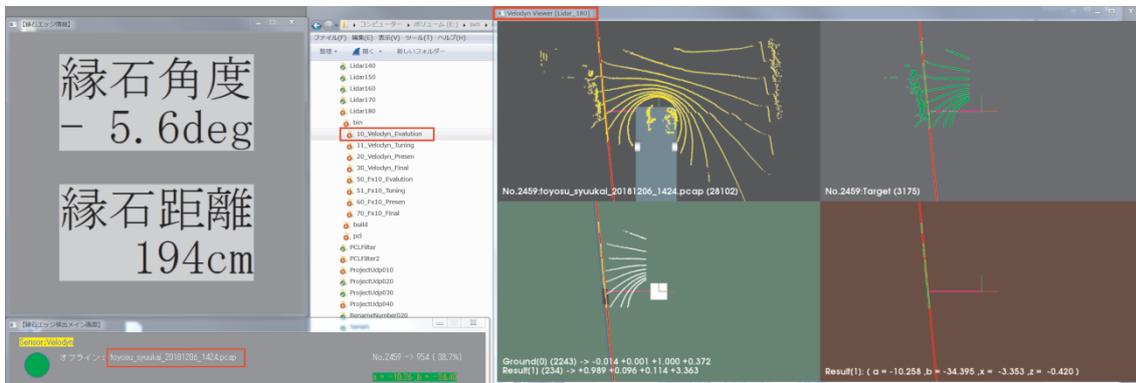
(3) 豊洲実証実験

1) 左カーブの走行で縁石検出

下図の場所を走行中でも、縁石距離を約 1.7~1.9m として検出し続けることができた。



その時の画面キャプチャで真上から見た図を下記に示す。



2.6.5 歩道縁石検出の結果と考察

(1) カメラによる縁石検出との比較

縁石の検出可能な距離は、Lidar、カメラ共に走行中でも2mを超えており、最も左側の走行車線であれば、どちらでも問題はない。しかし、カメラの場合、バス左側上部から真下方向の2Dの画像処理により、直線を検出するため、Lidarでの縁石検出の場合には次の3つの利点がある。

1) 歩道縁石上に植栽が多い場合

カメラは直線を判別しにくくなるが、Lidarは立体空間上にある3D点群から垂直面を切り出すため、縁石を判別することが可能である。

2) ゆるやかなカーブに沿った歩道縁石の検出

カメラは直線のみを判別するため検出不可能であるが、Lidarは、縁石の垂直面が円弧の接線で垂直面が最も大きい箇所を探すことが可能であり、縁石を検出することができた。

3) バス停付近での縁石検出と検出距離の精度

Lidarはバスの底面から真左の縁石との距離を計測し、誤差1cm以下で検出できるが、カメラでは、真横下付近にある縁石検出は不可能である。また、縁石の検出と検出距離の精度はLidarのほうが良い。

4) 結論

道路左側の歩道縁石が続いている場合で、縁石との距離を把握し続けて自動運転する場合は、Lidarによる検出がカメラより有利である。

(2) 自動運転に向けて

計測データには±10mm以内のゆらぎによる誤差が生じるため、上位の制御へは1cm単位として通知する。

バス停の歩道縁石に60mm以内に正着制御する自動運転の場合は、縁石距離が最大1cmの誤差で、カメラによる縁石検出と比べても精度が良いため、本システムが有利と判断した。

また、バスが走行中であっても、左側にある歩道縁石と車体の距離が、約2.2m以内であれば、縁石を把握することができ、その距離と角度を算出できた。

(3) 今後

車道左側の歩道縁石の把握だけでなく、右側の歩道縁石、さらに接触の可能性のある対象物の把握をしていくことも必要である。

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。

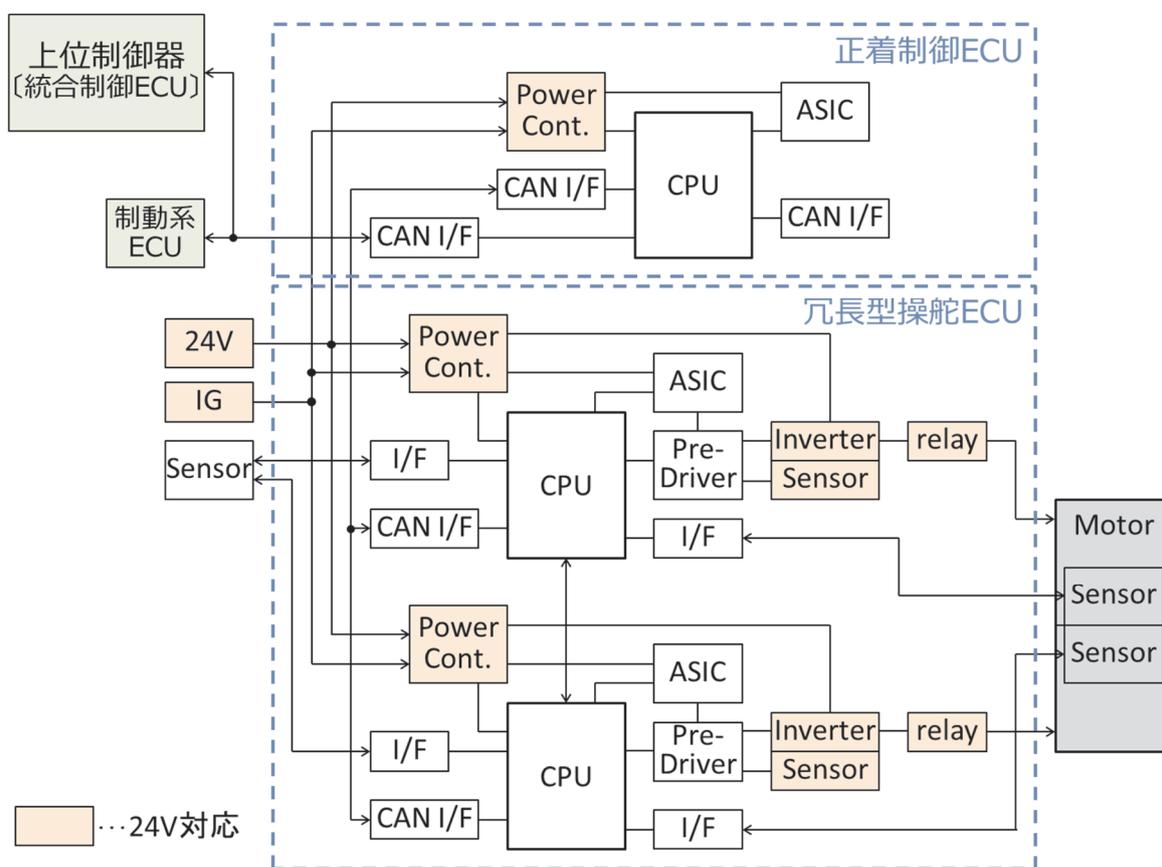


図 3.2-1 自動運転対応大型バス用操舵系制御システムのブロック図

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。

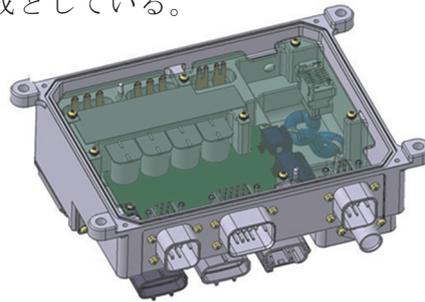


図 3.2-2 構想段階の操舵系 ECU 外観

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。

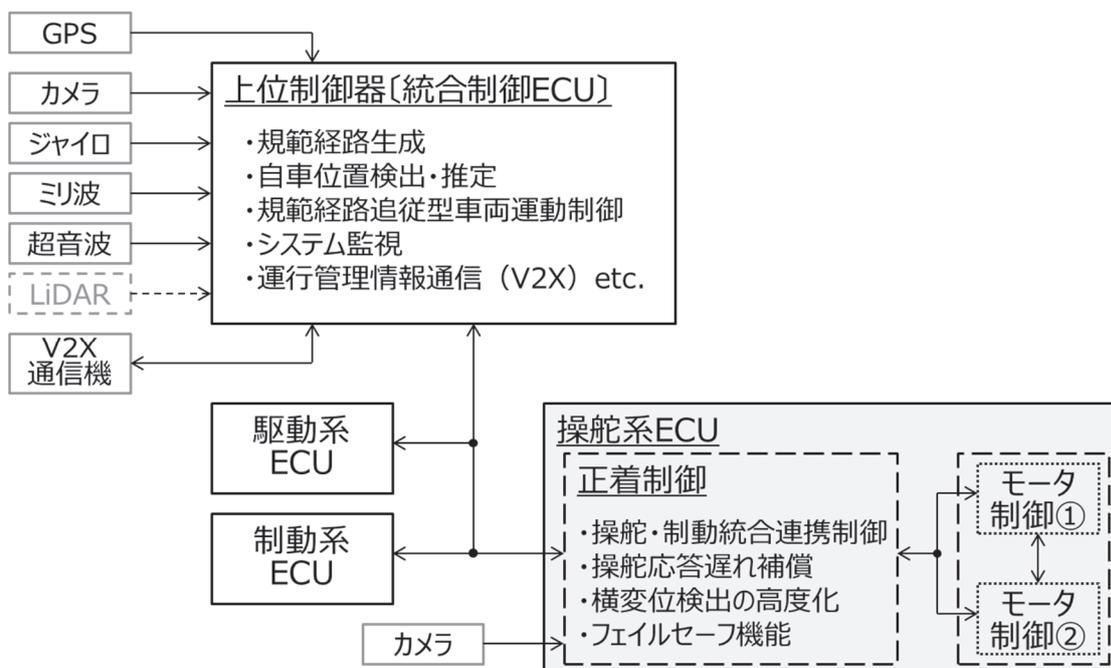


図 3.3-1 大型バス自動運転システム構成例（概略）

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ー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、職業ドライバー（路線ドライバー）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名の職業ドライバー（路線ドライバー）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。

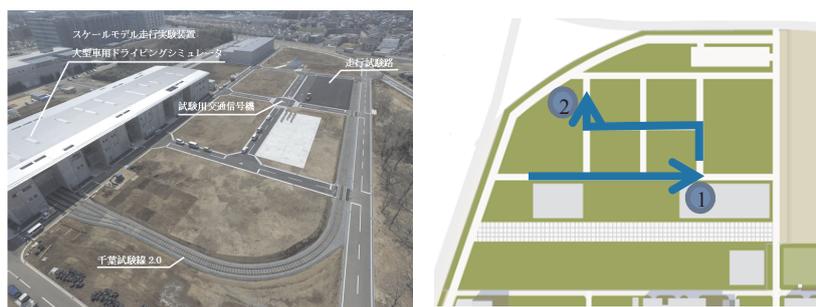


図 4.2.3-1 実験フィールド

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。

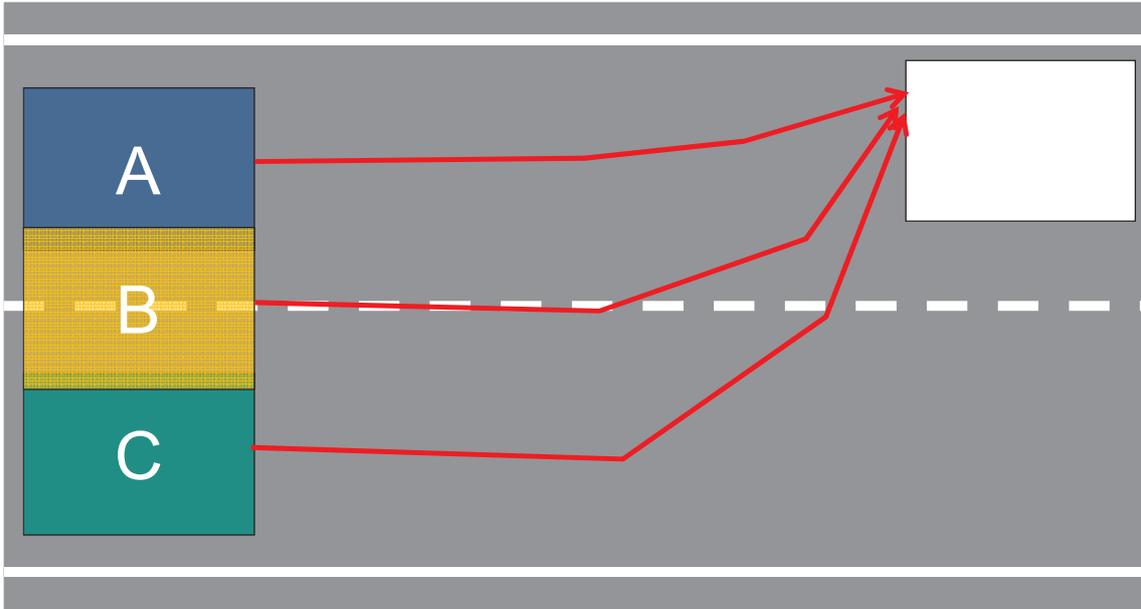


図 4.2.3-2 直線路における正着実験



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。

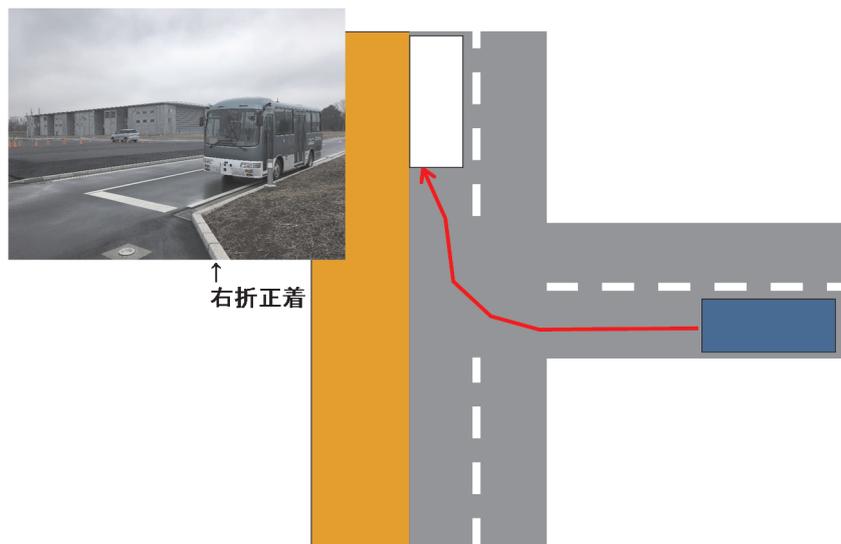


図 4.2.3-4 右折後すぐの正着実験

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。

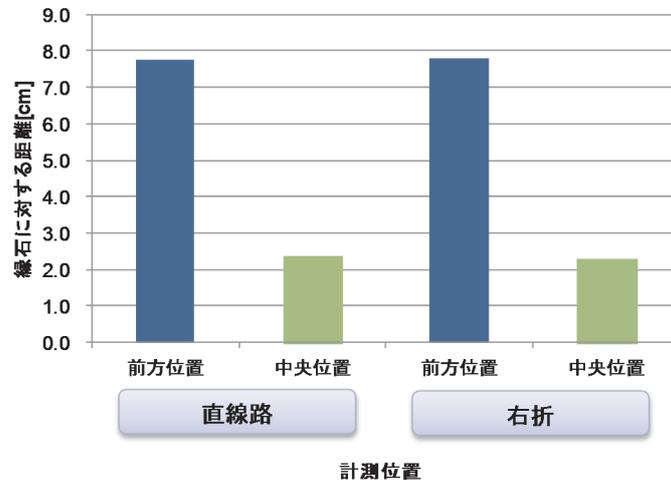


図 4.2.4-2 正着結果（直線路+右折）

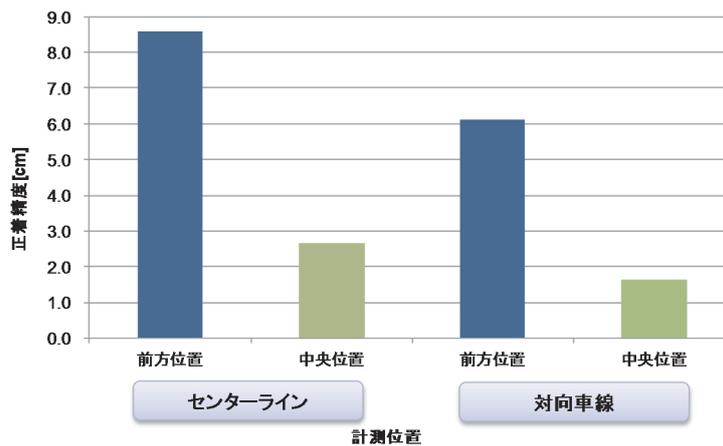


図 4.2.4-3 正着結果（センターライン+対向車線）

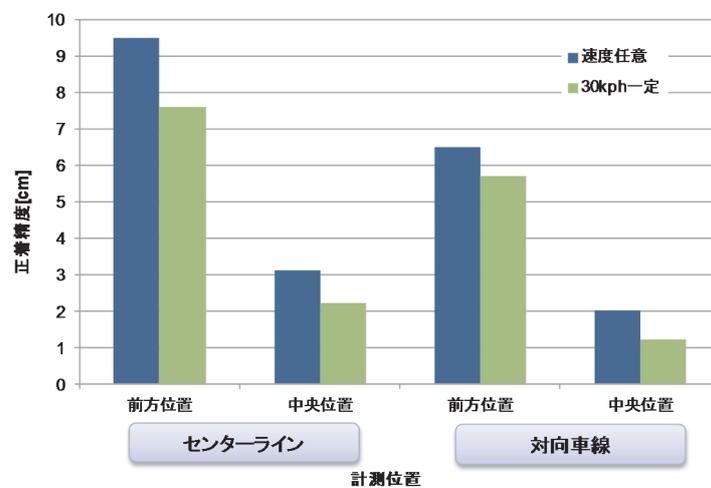


図 4.2.4-4 正着結果（速度条件ごと）

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。

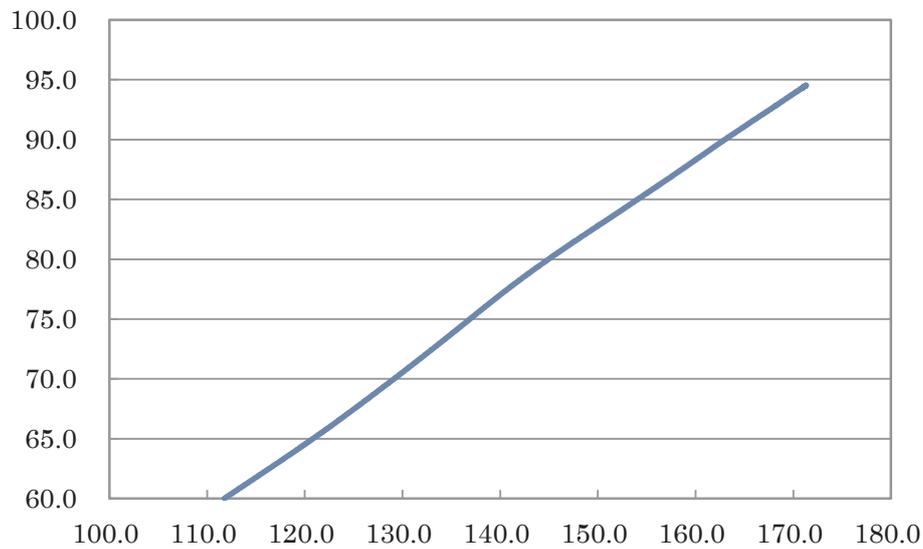


図 4.2.4-5 正着 GPS 軌道（被験者 E の試行 1）

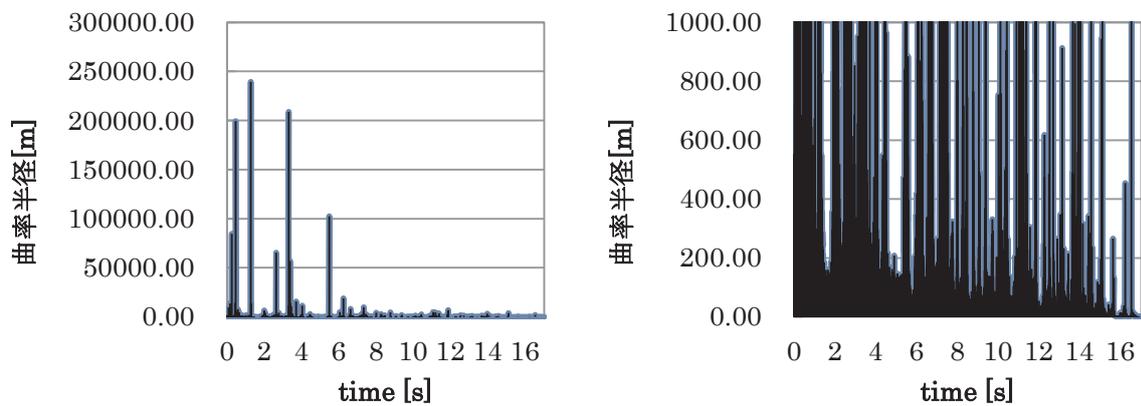


図 4.2.4-6 正着 GPS 軌道の曲率半径（被験者 E の試行 1）

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

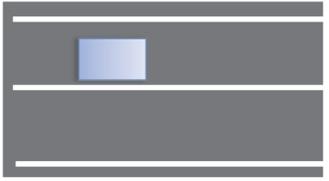
4.3.1 シェアードコントロールに関する整理

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/βFB	ドライ/βFF	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・運航時	△：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：空襲評価	
B	○	○	×	△：精度差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	
C	○	○	×	△：精度の高い進行が期待できるが、ドライバの操作に依存してしまふ 評価：操舵制御の精度について期待できない 評価：操備差・運航時	◎：ドライバ/βFF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：空襲評価	○：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	×	×	○	△：精度差を小さく収めることが期待できない 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	
E	×	○	○	△：精度差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・運航時	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵操作が外乱に感ずる可能性がある 評価：空襲評価	

幅寄せ中



	LKA	ドライ/βFB	ドライ/βFF	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・運航時	×	○：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	○	○	×	△：精度差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	△：操舵としてはβ/βFF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	○	○	×	△：精度の高い進行が期待できるが、ドライバの操作に依存してしまふ 評価：操舵制御の精度について期待できない 評価：操備差・運航時	◎：ドライバ/βFF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：空襲評価	△：操舵としてはβ/βFF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	×	×	○	△：精度差を小さく収めることが期待できない 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	×
E	×	○	○	△：精度差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・運航時	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵操作が外乱に感ずる可能性がある 評価：空襲評価	△：自然な運動に近いことが期待できるが、FF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/βFB	ドライ/βFF	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・運航時	×	○：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	○	○	×	△：精度差を小さく収めることが期待できる 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	△：操舵としてはβ/βFF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	○	○	×	△：精度の高い進行が期待できるが、ドライバの操作に依存してしまふ 評価：操舵制御の精度について期待できない 評価：操備差・運航時	◎：ドライバ/βFF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：空襲評価	△：操舵としてはβ/βFF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	×	×	○	△：精度差を小さく収めることが期待できない 評価：操備差・運航時	○：障害物回避といった操作の自由度が高い 評価：空襲評価	×
E	×	○	○	△：精度差を小さく収めることが期待できない 評価：操備差・運航時	△：障害物回避といった操作の自由度が高いが、操舵操作が外乱に感ずる可能性がある 評価：空襲評価	△：自然な運動に近いことが期待できるが、FF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。

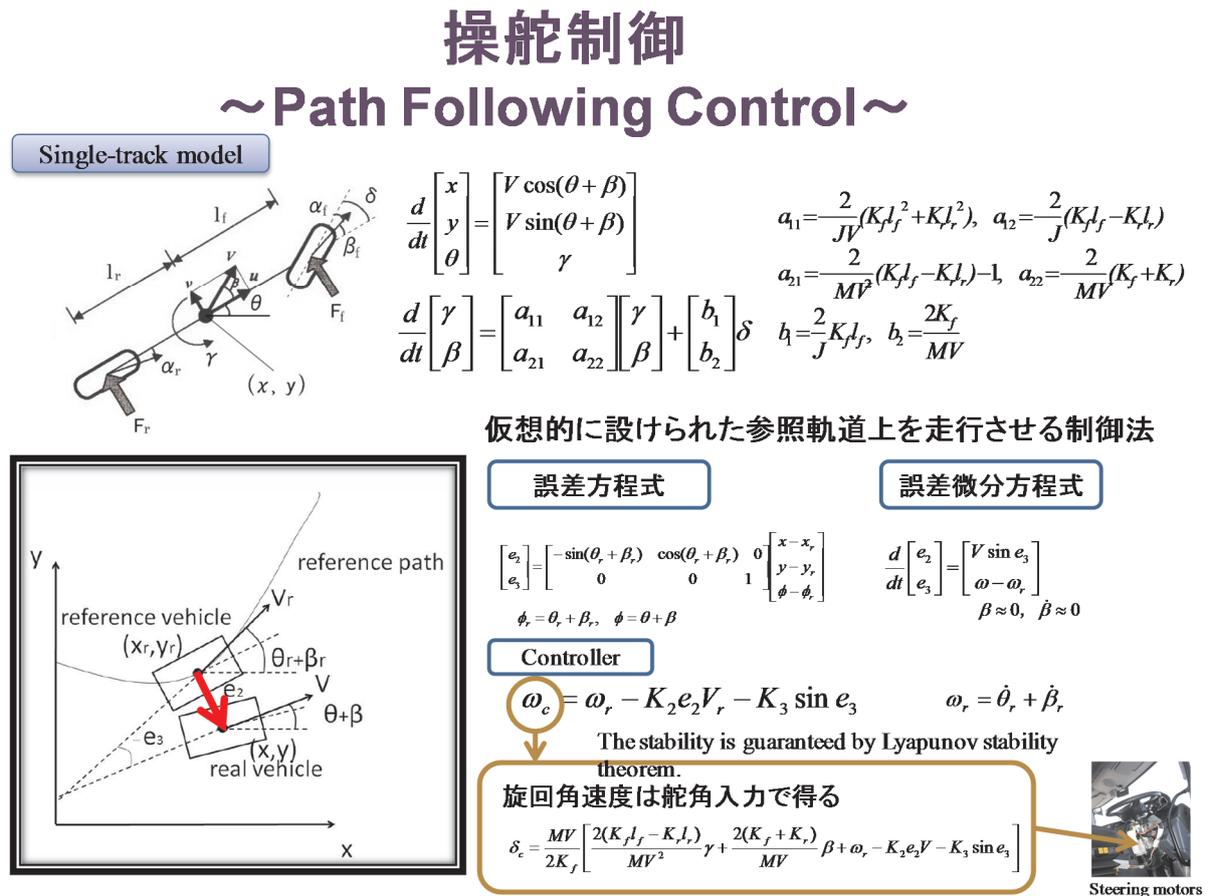


図 4.3.2-1 Path Following 制御

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。

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

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

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

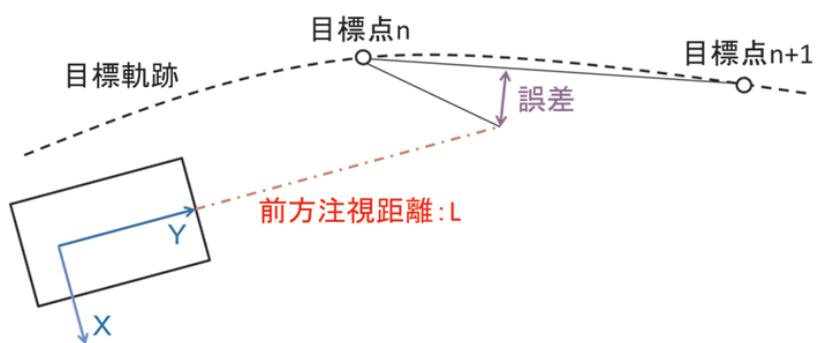


図 4.3.2-2 前方注視モデル

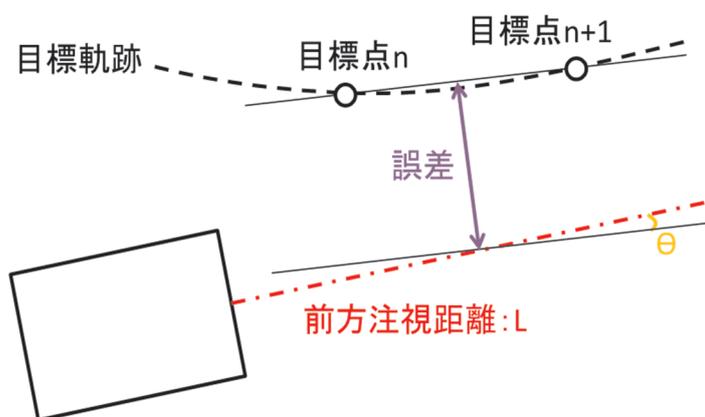


図 4.3.2-3 角度の誤差を考慮した前方注視モデル

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。

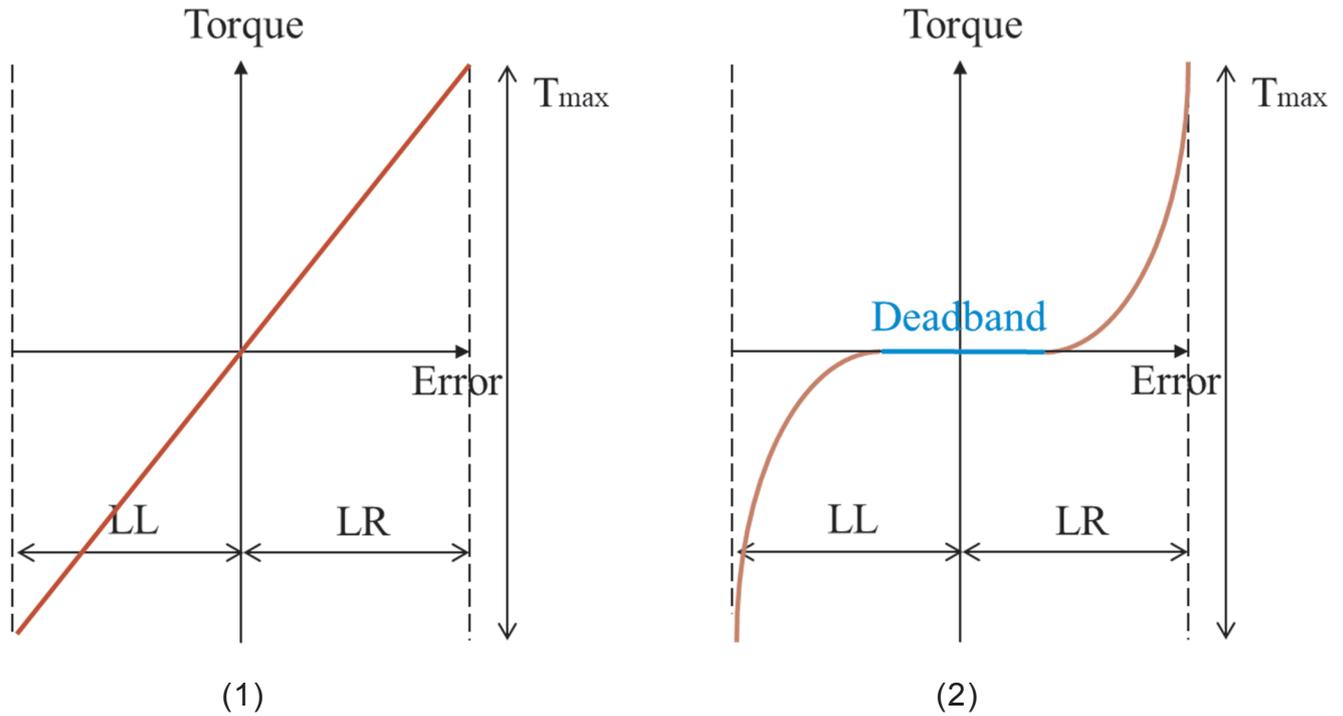


図 4.3.2-4 人の自由度の表現

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。

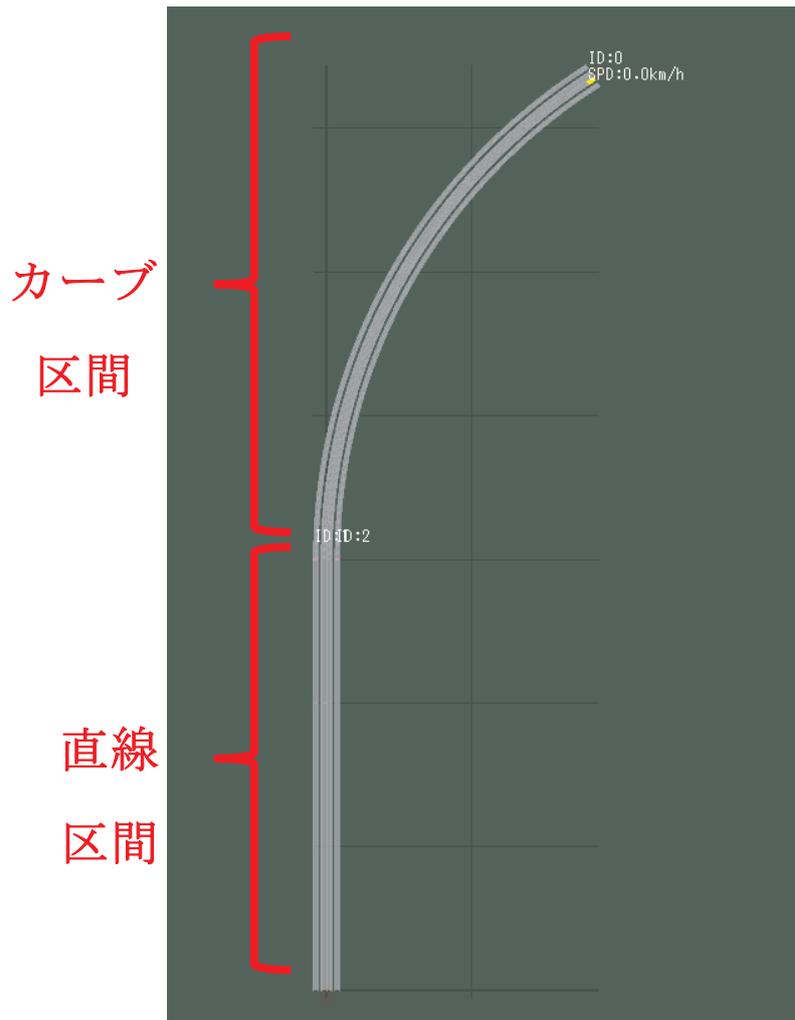


図 4.3.2-5 DS 実験での走行コース

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。

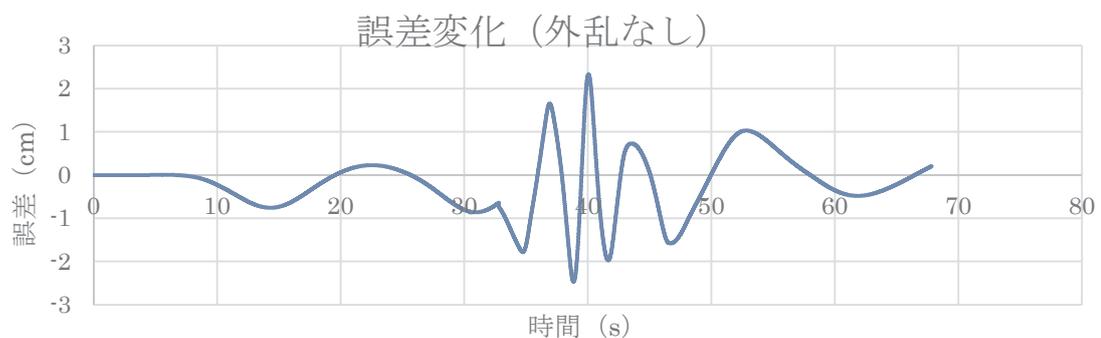


図 4.3.2-6 実験結果（外乱なし）

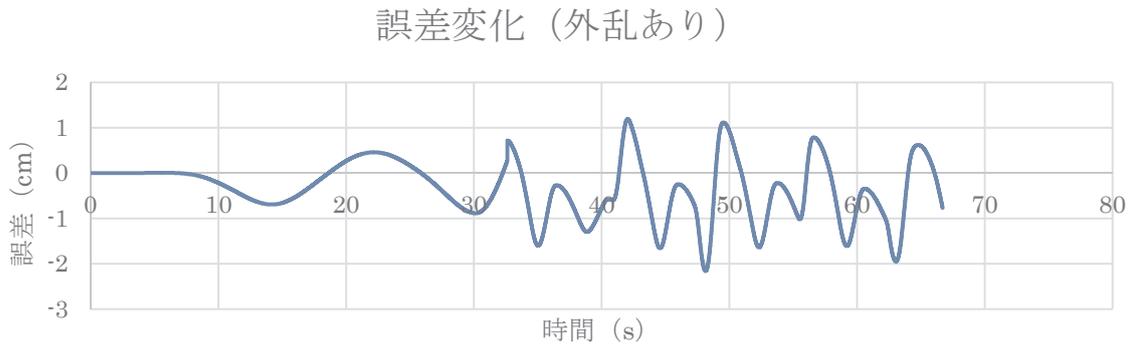


図 4.3.2-7 実験結果（外乱あり）

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。

公道での実証実験を行い、正着制御可能であることを示した。また道路形状や周辺環境による、制御やセンシングへの影響を示した。

ドラムブレーキのディスクブレーキ化による、減速制御の安定化の可能性を示した。

バス側方および前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。

LiDAR を搭載して歩道縁石検出システムを構築し、検出可能であることを示した。またカメラによる手法に対する優位点を見出した。

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。

以上の調査研究により、ART バスにおける正着制御の可能性を示した。