

「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
都市交通システムの制御性に関する調査検討」
報告書

平成 28 年 3 月 4 日

先進モビリティ株式会社

まえがき

「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の制御性に関する調査検討」に関する受託業務を完了したので報告する。なお、業務の実施に当たっては MI センサによる高精度位置検出技術を愛知製鋼株式会社、画像パターン学習による位置検出技術を九州工業大学、ワイドレンジカメラの照度最適化技術をソニー株式会社、道路座標変換による白線位置検出の高精度化技術を弘前大学に再委託を行っており、本報告書は再委託先分の成果を含めて作成したものである。

本報告書は、内閣府の平成 27 年度科学技術イノベーション創造推進委託費による委託業務として、先進モビリティ株式会社が実施した平成 27 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の制御性に関する調査検討」の成果を取りまとめたものです。

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

目次

はじめに	1
第1章 正着時における最大許容隙量の明確化.....	2
1.1 車椅子、ベビーカー側からの間隙および段差の許容限界調査.....	2
第2章 正着制御における位置標定方式の検討.....	10
2.1 電子指標方式の検討	10
2.1.1 検討システム構成	10
2.1.2 走行位置標定装置の精度検証	11
2.1.2.1 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離精度検証.....	12
2.1.2.2 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度精度検証.....	14
2.1.2.3 走行位置標定システム全体の精度検証	16
2.1.3 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の調査.....	17
2.1.3.1 距離の精度調査結果	17
2.1.3.2 角度の精度調査結果	18
2.1.3.3 変換座標の精度調査結果	19
2.2 正着誘導白線マーカ方式の検討	20
2.2.1 HDR カメラの制御法の検討.....	20
2.2.2 白線画像認識アルゴリズム	31
2.3 MI センサと低磁界マーカによる磁界誘導方式.....	40
2.3.1 MI センサを用いた位置検出装置の試作	40
2.3.1.1 低磁力極薄磁性体マーカ	40
2.3.1.2 磁気センサシステム.....	41
2.3.2 性能評価.....	46
2.3.2.1 実験概要.....	46
2.3.2.2 実験条件.....	46
2.3.2.3 評価結果.....	46
2.3.2.4 まとめ及び考察.....	48
2.4 位置特定用パターン学習方式	49
2.4.1 図形認識および制御アルゴリズム検討.....	49
2.4.2 性能評価	51

第3章 正着制御ロジックの検討	56
3.1 正着制御ロジックの検討	56
3.2 シミュレーション検討	57
3.2.1 車両運動モデルの検討	57
3.2.2 目標軌跡を辿るための実舵角と操舵角の算出.....	62
3.2.3 モデルの実車同定	65
3.2.4 正着制御シミュレータの製作	67
3.2.5 シミュレータによる操舵角度の算出.....	71
第4章 正着評価	74
4.1 実験車の概要	74
4.1.1 単車バス	76
4.1.2 連節バス	84
4.2 バス停形状および正着目標軌跡	89
4.2.1 ストレートバス停形状および正着目標軌跡.....	90
4.2.2 クサビバス停形状及び正着目標軌跡.....	91
4.3 正着性能評価	91
4.3.1 白線誘導マーカ方式による正着性能評価概要.....	91
4.3.2 正着性能評価コース作成	91
4.3.3 白線誘導マーカ方式による正着性能評価方法.....	93
4.3.4 正着実験方法	95
4.3.5 HEV 車の白線誘導マーカ方式による正着性能評価	97
4.3.6 連節車の白線誘導マーカ方式による正着性能評価.....	100
4.3.7 実験車による正着性能評価まとめ.....	103
第5章 まとめ	104

はじめに

事業の目的と実施内容について

本事業は、内閣府が関係省庁等と連携して進める「SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）・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）バスの制御性に関する調査検討を行ったものである。

事業の目的としては、車椅子の利用者を含めた乗客の乗降をしやすくするために、バスが停留所に停車する際に自動走行技術を用いることにより、バス停とバス乗降口との間隙が最小限になるように停車させる（専門用語で「正着」という）ことを狙いとした制御技術を開発することを目標にしている。

本年度の事業報告として、第1章では、車椅子でバスに乗る際の段差と間隙の許容限界を把握しておく必要があることから、被験者を用いた評価実験結果について報告する。

第2章では、正着制御における位置標定方式の検討として、①電子指標方式（GPS）、②誘導マーカ方式（白線）、③磁界誘導方式（MI センサ）、④位置特定用パターン学習方式（図形パターン）の4方式についての検討結果を報告する。

第3章では、正着制御ロジックの検討として、車両運動モデルおよびシミュレーションに関する検討結果について報告する。

第4章では、ART 実験車両を用いた正着性能の評価として、①実験車（単車バスおよび連節バス）の概要、②バス停形状および正着目標軌跡の検討、③単車バスおよび連節バスの正着性能評価について各々報告する。

第5章では、全体のまとめについて報告する。

第1章 正着時における最大許容隙量の明確化

1.1 車椅子、ベビーカー側からの間隙および段差の許容限界調査

次世代都市交通バス（ART）におけるバス停止着時の段差、間隙の許容量を設定するため、車椅子、ベビーカー側からの間隙および段差の許容限界を文献および実験にて調査した。

1) 調査結果まとめ

事前の文献調査にて、過去の複数の関連調査により、手動車椅子および電動車椅子とも、許容限界がおおむね段差（上り）3cm 前後、間隙 8cm 以内ということが判明した。

次に文献調査の結果を参考にしてバス乗降時における許容段差・間隙評価の実験計画を策定し、被験者を用いた実験を行った。

被験者 6 名（うち 1 名は女性）による評価実験の結果、バス正着制御の検討においては、手動車椅子および電動車椅子とも、バスベイとバス乗降口との間は、「段差（上り）3cm 以内、間隙 6cm 以内を許容限界とすることが望ましい」という調査結果を得た。

なお、上記許容限界を超える被験者データも存在するが、段差が 3cm を超える場合は、ウィリー等での前輪キャストへの荷重軽減が必須になると、間隙が 6cm を超える場合は、前輪キャストが間隙の隙間に落ち込む確率が高まるため、許容できないと判断した。

ただし、被験者はすべて健常者であるため、下肢以外にも障害がある方や力が衰えた高齢者の場合は、もう少し許容限界が狭まると考えられる。

また、ベビーカーについては文献調査のみとしたが、前輪キャストのタイヤ径が車椅子と同等レベルであることに加え、常に親などの保護者が操作を行うことから、上記許容限界は問題なくクリアできると判断した。

2) 実験方法

図 1.1-1 のようなバス停側プラットフォームに見立てた実験用台座（写真右手）を木枠で製作し、段差および間隙評価実験を行った。バスの車内側となる建物入口テラス面（写真左手）との段差は、厚さ 12 mm の板材で -6 mm ～ -54 mm まで調節できるようにし、間隙は台座を前後に移動させることにより、30 mm ～ 75 mm まで変更できるようにした。また実験中に間隙の大きさが変わらないよう間隙と同じ厚さの木片をはさんだ。



図 1.1-1 実験用台座

3) 被験者および車椅子の種類

被験者は20代から60代までの健常者6名（うち1名は女性）とし、全員車椅子未経験者であったが、手動車椅子および電動車椅子とも操作方法を十分習得したうえで実験を行った。

①被験者の属性

被験者	A	B	C	D	E	F
性別	女性	男性	男性	男性	男性	男性
年齢	20代	20代	30代	30代	40代	60代
体重	約50kg	約50kg	約60kg	約50kg	約75kg	約80kg

表 1.1-1 被験者の属性

②使用した車椅子の概要

実験に使用した手動車椅子および電動車椅子はいずれもレンタル会社から借用したもので、軽量で取り扱いが容易な普及型のものとした。また、車椅子の形状、寸法はJIS規格およびISO規格にて定められており、借用品はそれらに準じたものである。

（手動車椅子規格：JIS T9201、電動車椅子規格：JIS T9203）

②-1. 手動車椅子

- ・機種：自走式車椅子 松永製作所製
「ネクストコア NEXT-11B」
- ・重量：11.8 kg
- ・前輪キャスタ径：6 インチ（15.2cm）
- ・後輪タイヤ径：22 インチ



図 1.1-2 手動車椅子

②-2. 電動車椅子

- ・機種：介助式電動車椅子 ヤマハ製
「タウンイジョイ X」
- ・重量：29.0 kg
- ・前輪キャスタ径：6 インチ（15.2cm）
- ・後輪タイヤ径：16 インチ
- ・段差乗越高さ（諸元表）：25 mm
- ・諸元表 URL：



図 1.1-3 電動車椅子

http://www.yamaha-motor.co.jp/wheelchair/manual/pdf/manual_townyjoyx.pdf

4) 実験条件

①実験日 : 平成 27 年 10 月 22 日～29 日

②実験場所 : 東京大学駒場リサーチキャンパス (連携研究棟入口付近)

③実験方法 :

手動車椅子、電動車椅子とも、介助者なしで「段差」のみ 4 段階、「間隙」のみ 4 段階、「間隙+段差」組合せ 9 段階の 3 種類の実験を行った。

- | | | |
|-----------------|-----------------------|---------------------|
| ■段差 (4 段階) | : 06mm、18mm、30mm、42mm | (上り方向) |
| ■間隙 (4 段階) | : 30mm、45mm、60mm、75mm | |
| ■間隙+段差 (9 段階) : | | |
| | ・間隙 30mm+ | (段差 06mm、18mm、30mm) |
| | ・間隙 45mm+ | (段差 06mm、18mm、30mm) |
| | ・間隙 60mm+ | (段差 06mm、18mm、30mm) |

車椅子は、前輪キャストより後輪キャストの方が圧倒的にタイヤ径が大きいため、前進での段差・間隙乗り越えよりも後進の方が有利になると思われるが、高齢者や障害者等における安全な利用を考慮し、実験は前進方向のみとした。

(一時的な後進は許容した)

④評価基準

下記 4 段階の指標にて評価した。

評価指標	評価	説明
○	OK	力を入れなくても OK なレベル
△	何とか OK	ある程度力を入れるレベル
▼	ぎりぎり OK	可能な限りの努力をするレベル
X	NG	NG あるいは危険なレベル

表 1.1-2 評価基準

5) 実験結果

① 段差乗り越え実験（手動車椅子）

手動車椅子の場合、30mm の段差までは大半の被験者がなんなく通過できたが、42mm の段差になると、ほとんどの被験者が通過困難になった。

また、前輪キャストが2輪とも進行方向を向いていると、少ない力で乗り越えられることがわかった。

段差 (上り)	被験者（手動車椅子）						総合評価
	A	B	C	D	E	F	
06mm	○	○	○	○	○	○	○
18mm	○	○	○	○	○	○	○
30mm	△	△	○	○	X*	△	△
42mm	X	▼	▼	▼	X	▼	X

*後日、前輪キャストの向きに注意して再試行したところクリアした

表 1.1-3 段差乗り越え実験（手動車椅子）

② 段差乗り越え実験（電動車椅子）

電動車椅子の場合、30mm の段差までは大半の被験者がなんなく通過可能でしたが、42mm の段差になると、ほとんどの被験者が通過困難になった。

段差 (上り)	被験者（電動車椅子）						総合評価
	A	B	C	D	E	F	
06mm	○	○	○	○	○	○	○
18mm	○	○	○	○	△	○	○
30mm	△	○	○	○	○	○	○
42mm	X	▼	▼	▼	X	▼	X

表 1.1-4 段差乗り越え実験（電動車椅子）

③ 間隙乗り越え実験（手動車椅子）

手動車椅子の場合、60mmの間隙までは被験者全員が通過できたが、75mmの間隙になると、約半分の被験者が通過困難になった。

間隙	被験者（手動車椅子）						総合評価
	A	B	C	D	E	F	
30mm	○	○	○	○	○	○	○
45mm	○	○	○	○	○	○	○
60mm	○	○	○	○	○	○	○
75mm	▼	○	○	▼	▼	△	▼

表 1.1-5 間隙乗り越え実験（手動車椅子）

④ 間隙乗り越え実験（電動車椅子）

電動車椅子の場合、60mmの間隙で、1名の被験者が間隙にはまり再試行してOKとなったが、75mmの間隙になると、ほとんどの被験者が通過困難になった。

前輪キャストが2輪とも進行方向を向いていないと、間隙の隙間に落ちる危険性が高いため60mmを超える場合は注意しないと脱輪する場合があった。

また、前輪キャストの横軸が約50mmのため、間隙が60mmまでで脱輪した場合は途中で引っ掛かることにより脱輪しても復帰が可能な場合が多かったが、間隙が75mmで脱輪した場合には隙間に完全に落ち込んでしまい走行不能になった。

間隙	被験者（電動車椅子）						総合評価
	A	B	C	D	E	F	
30mm	○	○	○	○	○	○	○
45mm	○	○	○	○	○	○	○
60mm	△※	○	○	○	○	○	○
75mm	X※	○	○	▼	▼	▼	▼

※前輪キャストが脱輪

表 1.1-6 間隙乗り越え実験（電動車椅子）

⑤ 間隙+段差 組合せ実験 (手動車椅子)

間隙と段差の組合せ実験においては、手動車椅子の場合、間隙 60mm で段差 30mm の組合せまでは、大半の被験者が通過できた。

追加実験を行って確認したところ、間隙・段差、各々個別での上限値を超えるケース、すなわち間隙が 75mm あるいは段差が 42mm になると通過が困難になることがわかった。

間隙	段差 (上り)	被験者 (手動車椅子)						総合評価
		A	B	C	D	E	F	
30mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	○	○	○
	30mm	○	○	○	○	X*	○	△
45mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	▼	○	○
	30mm	○	○	○	○	X*	○	△
60mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	△	○	○
	30mm	○	△※	○	○	X*	○	△

*後日、前輪キャストの向きに注意して再試行したところクリアした

※前輪キャストが脱輪

表 1. 1-7 間隙+段差組合せ実験 (手動車椅子)

⑥ 間隙+段差 組合せ実験（電動車椅子）

電動車椅子の場合も、間隙 60mm、段差 30mm までは大半の被験者は問題なく通過できたが、追加実験の結果、間隙 60mm、段差 30mm を超えるケースでは通過が困難になることがわかった。

間隙	段差 (上り)	被験者（電動車椅子）						総合評価
		A	B	C	D	E	F	
30mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	○	○	○
	30mm	○	○	○	○	X*	○	△
45mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	○	○	○
	30mm	○	○	○	○	X*	○	△
60mm	06mm	○	○	○	○	○	○	○
	18mm	○	○	○	○	○	○	○
	30mm	○	○	○	○	X*	○	△

表 1.1-8 間隙+段差組合せ実験（電動車椅子）



図 1.1-4 キャスタの向きが良いケース
(間隙 60 mm+段差 18 mm)



図 1.1-5 キャスタの向きが悪いケース
(間隙 60 mm+段差 18 mm)

6) 文献調査

被験者を用いた本実験を行う前に、予備調査として下記の参考文献の調査を行った。

その結果、過去の複数の関連調査により、手動車椅子および電動車椅子とも、許容限界がおおむね段差（上り）3cm 前後、間隙 8cm 以内であることと、ベビーカーについてもその数値であればクリアできるということが判明した。

6-1) 車椅子に関する参考文献

- ①平成 18 年 3 月 交通バリアフリー協議会 「ホームと列車の段差・隙間に関する研究」
- ②平成 16 年 9 月 「“歩道の一般的構造に関する基準案”に対する主な意見とそれに対する国土交通省の考え方」
- ③平成 14 年 10 月 国民生活センターテスト 「自走用手動車いすの安全性を考える」
- ④平成 12 年 9 月 土木学会第 55 回年次学術講演会「歩道舗装における車椅子のための適正な範囲」、大阪市立大山田優ほか
- ⑤平成 11 年 3 月 計画研究所コスモプラン 「車椅子の走行調査に基づく道路段差等に関する研究」

6-2) ベビーカーに関する参考文献

- ①ピジョン・段差乗り越え検証実験（産業技術総合研究所、東京工業大学との共同研究）
<http://runfee.pigeon.info/experiment/> （2014 年 12 月）
- ②アップリカ A 型ベビーカー比較レポート Baby-Pro REPORT23
<http://www.baby-pro.co.jp/morimoto/report/23/report-23.htm> （2006 年 10 月）

第2章 正着制御における位置標定方式の検討

プラットフォームへの正着におけるステアリング操舵制御に必要な位置標定法について、以下の4種類の標定方式の検討を実施した。

2.1 電子指標方式の検討

バス停車前の走行車線に設置された基準マーカとパイオニア社が開発中のGPS学習型位置標定装置を組み合わせた走行位置標定法の調査・検討を実施する。

2.1.1 検討システム構成

図 2.1.1-1 に検討した走行位置標定システムの概要図を示す。

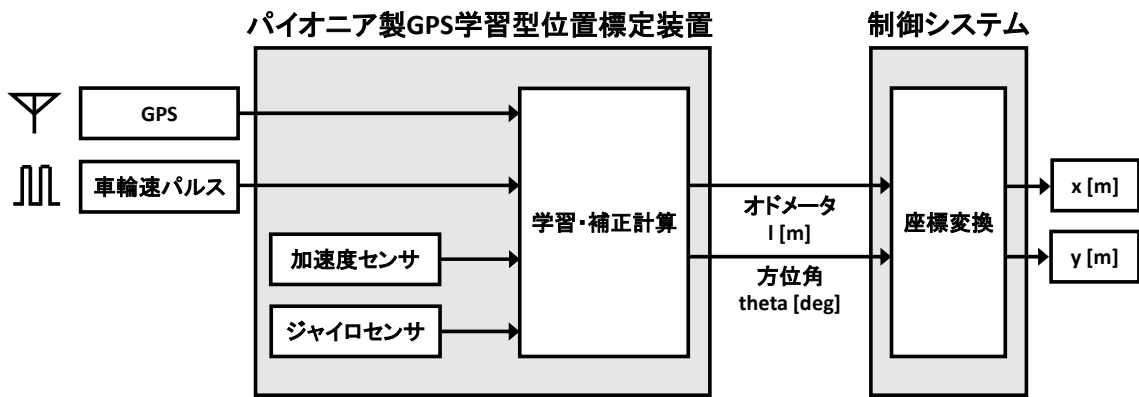


図 2.1.1-1 走行位置標定システムの概要図

走行位置標定システムには、パイオニア社が開発中のGPS学習型位置標定装置を使用した。

GPS学習型位置標定装置は、慣性航法センサと車両の車速パルス信号およびGPSからの測位情報を学習による補正をおこない、精度の高いオドメータ l [m] と方位角 θ [deg] を出力する。

走行位置標定システムはパイオニア製GPS学習型位置標定装置からのオドメータ l [m] と方位角 θ [deg] をもとに、起点マーカ位置からの相対的な座標値 (x, y) [m] を求めることが可能である。これと予め用意した正着軌跡の座標マップとの比較を行うことで横方向偏差と傾き角偏差を算出することが可能である。

次の座標計算式をARTバスの車両制御装置のプログラム内に追加し、走行位置システムの距離・角度・変換座標・偏差を同時に出力することが可能なシステムを構築した。

式 2.1.1-1 と式 2.1.1-2 に起点マーカ位置からの相対的な座標値 (x, y) [m] の座標計算を示す。

式中では GPS 学習型位置標定装置の i-1 回目から i 回目の出力の間のオドメータを l_i [m]、i 回目の方位角と起点マーカ地点の方位角との差を θ_i [deg] と定義した。

$$x_n = \sum_{i=1}^n l_i \cos \theta_i [m] \dots (2.1.1-1)$$

$$y_n = \sum_{i=1}^n l_i \sin \theta_i [m] \dots (2.1.1-2)$$

図 2.1.1-2 に起点マーカ位置からの相対的な座標値 (x, y) [m] の座標計算の概要図を示す。

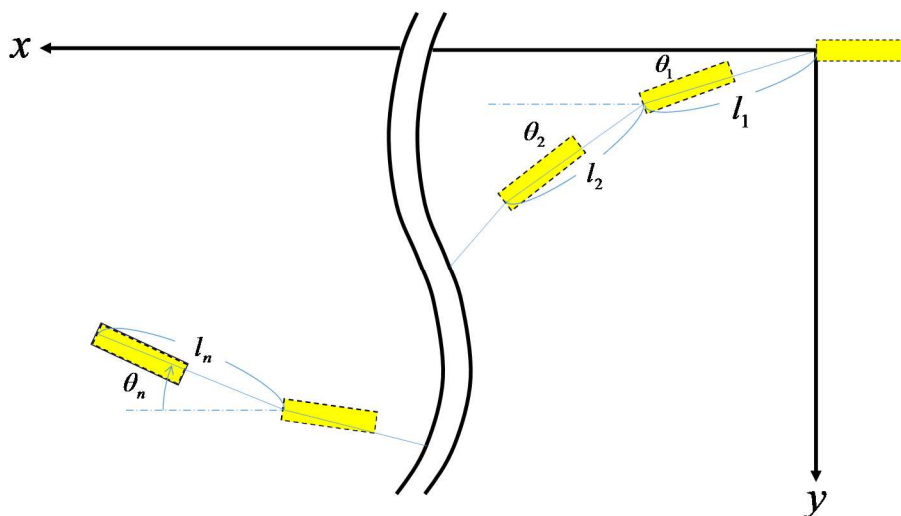


図 2.1.1-2 起点マーカ位置からの相対的な座標値 (x, y) [m] の座標計算の概要図

2.1.2 走行位置標定装置の精度検証

走行位置標定システムの精度検証のため、産業技術総合研究所の衝突実験場でパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の学習を行い、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置単体の距離と角度、走行位置標定システム全体の精度検証を行った。

2.1.2.1 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離精度検証

図 2.1.2.1-1 にパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離精度検証実験の概要図を示す。



図 2.1.2.1-1 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離精度検証実験の概要図

パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離精度検証実験は、直線上の距離の精度を求めるため直進走行を行い、発車地点と停車地点間の距離（100[m]程度）をメジャーで実測し、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の出力したオドメータとの誤差から精度を検証した。

表 2.1.2.1-1 に実測距離とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータと誤差を示す。

表 2.1.2.1-2 に実測距離とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータ（補正後）と誤差を示す。

表 2.1.2.1-3 に実測距離に対するパイオニア製 GPS 学習型位置標定システムのオドメータ（補正前・補正後）の平均二乗誤差（RMS）を示す。

表 2.1.2.1-1 実測距離とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータと誤差

N	実測	パイオニア製GPS学習型位置標定システム	
	距離 [mm]	オドメータ [mm]	オドメータ誤差 [mm]
1	99967	101159	1192
2	100081	101098	1017
3	100004	101066	1062
4	100023	101067	1044
5	98709	99967	1258

表 2.1.2.1-2 実測距離とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータ（補正後）と誤差

N	実測	パイオニア製GPS学習型位置標定システム	
	距離 [mm]	オドメータ(補正後) [mm]	オドメータ誤差(補正後) [mm]
1	99967	100041	74
2	100081	99981	-100
3	100004	99949	-55
4	100023	99950	-73
5	98709	98862	153

表 2.1.2.1-3 実測距離に対するパイオニア製 GPS 学習型位置標定システムの
オドメータ（補正前・補正後）の平均二乗誤差（RMS）

パイオニア製GPS学習型位置標定システム	
オドメータRMS [mm]	オドメータRMS(補正後) [mm]
1119	97

100[m]の直線走行時のパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータの実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は 1119[mm]となった。事後的に算出した補正係数によりオドメータの補正を行った場合、実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は 97[mm]となった。

パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置のオドメータが大きな誤差を含む結果となった原因として学習不足と車輪速パルス数の問題が挙げられる。

学習不足の問題では、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の条件を満たす距離の学習が十分に行えていなかった。パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置は、本来は 30[km/h]以上の車速での直線走行が距離の学習に必要であった。しかし郊外の路上で学習を行うことが出来ず、学習に使用した産業技術総合研究所の衝突実験場では速度を出すために十分な距離が取れないため、30[km/h]以下の速度で学習を行った。上記理由が補正なしの状態の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）が 1119[mm]となった主要原因として考えられる。

車輪速パルス数の問題では、使用した ART 単車バスの車輪速パルス数は 25 であることが挙げられる。車輪速パルス数は 25 のとき、1 車輪速パルス辺り約 6[cm]の距離を出力している。GPS による距離の学習による補正を加えたとしても、この粒度を上回る精度を出すことは困難である。

上記より、更なる精度向上の為には以下 2 点の改善が有効と考えられる。

- ・ 1 車輪速パルス辺りの距離誤差を減らすため、十分な距離のあるコースを用いて 30[km/h]以上の速度による学習を行う。
- ・ 粒度としての精度を向上するため、車輪速パルスを周波数逡倍する等の方法によって高精度化する。

2.1.2.2 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度精度検証

図 2.1.2.2-1 にパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度精度検証実験の概要図を示す。

図 2.1.2.2-2 にストレート型バス停正着軌跡を示す。

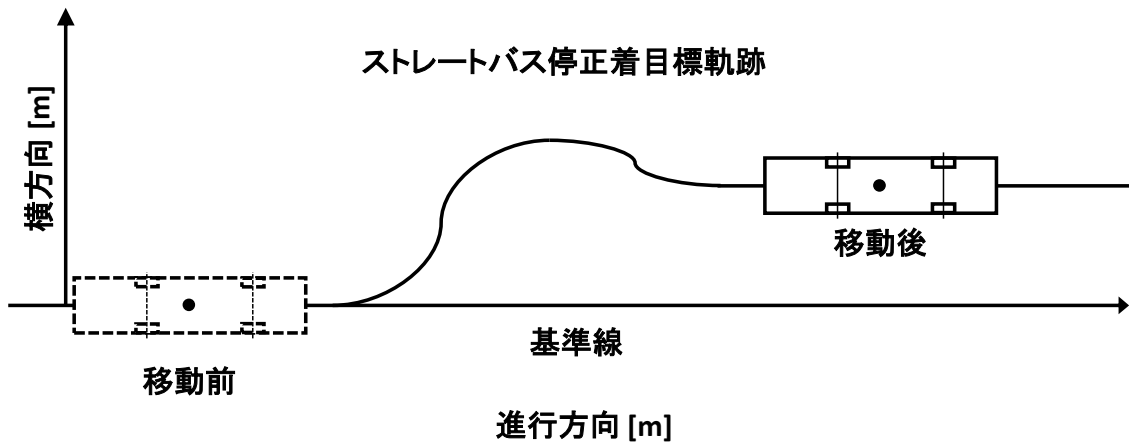


図 2.1.2.2-1 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度精度検証実験の概要図

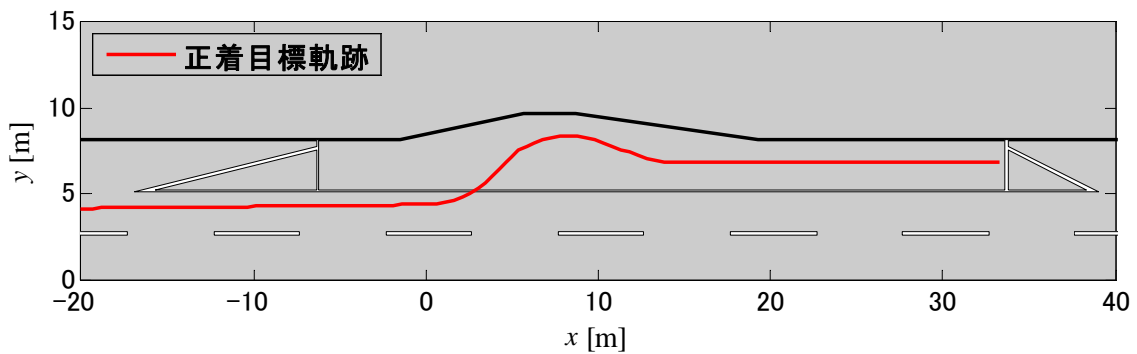


図 2.1.2.2-2 ストレート型バス停正着軌跡

パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角精度検証実験は、正着軌跡移動後の角度の精度を求めするため、ストレート型バス停正着軌跡に沿って手動走行し、基準線に対する車両の角度変化量をメジャーで実測し、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の出力した方位角の変化量との誤差から精度を検証した。

実験には産業総合技術研究所の衝突実験場に敷設したストレートバス停正着目標軌跡を使用した。ストレートバス停正着目標軌跡を使用した理由は、走行時における車体の方位角（ヨー角）の変動が大きいためである。ストレートバス停正着目標軌跡については4.2.1項にて後述する。

表 2.1.2.2-1 に実測角度変化量とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量と誤差を示す。
 表 2.1.2.2-2 に実測角度変化量とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量（補正後）と誤差を示す。

表 2.1.2.2-3 にパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量（補正前・補正後）の平均二乗誤差（RMS）を示す。

表 2.1.2.2-1 実測角度変化量とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量と誤差

N	実測	パイオニア製GPS学習型位置標定装置	
	角度変化量 [deg]	方位角変化量 [deg]	方位角変化量誤差 [deg]
1	-0.389	0.236	0.625
2	-0.367	0.516	0.883
3	-0.356	0.011	0.367

表 2.1.2.2-2 実測角度変化量とパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量（補正後）と誤差

N	実測	パイオニア製GPS学習型位置標定装置	
	角度変化量 [deg]	方位角変化量(補正後) [deg]	方位角変化量誤差(補正後) [deg]
1	-0.389	-0.294	-0.095
2	-0.367	-0.014	-0.353
3	-0.356	-0.519	0.164

表 2.1.2.2-3 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の方位角変化量（補正前・補正後）と多摩川精機 MEMS ジャイロ（参考値）の平均二乗誤差（RMS）

パイオニア製GPS学習型位置標定装置	
方位角変化量RMS [deg]	方位角変化量誤差RMS [deg]
0.659	0.231

ストレートバス停止着目標軌跡運転手による手動運転走行において、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度変化量の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は 0.659 [deg]となった。

学習に使用した産業技術総合研究所の衝突実験場では方位角の学習に必要な十分な距離が取ることができず、方位角の学習不足が発生した可能性がある。

そのため直前に計測した数値の実測値に対する補正係数により、方位角の補正を行った。

その結果、補正後の方位角変化量の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は 0.231 [deg]となった。

補正前・補正後の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は、参考値として同時に計測した多摩川精機製 MEMS ジャイロ（TAG250N2000）の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）0.818 [deg]と比較して良好な結果を示した。

ただし、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の内部に搭載されているセンサは MEMS センサであり、周囲温度の変化の影響を受け易いため、十分に車内を暖気する等、センサの取り扱いに留意する必要がある。

2.1.2.3 走行位置標定システム全体の精度検証

走行位置標定システム全体の精度の検証実験は、正着軌跡移動後の車体の座標位置(x, y) [m]の精度を求めるため、ストレート型バス停止着軌跡に沿って手動走行し、車体の移動量(x, y) [m]をメジャーで実測し、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の出力した車体の移動量(x, y) [m]との誤差から精度を検証した。

実験には 2.1.2.2 項で使用した、産業総合技術研究所の衝突実験場に敷設したストレートバス停止着目標軌跡を使用した。

表 2.1.2.3-1 に実測と走行位置標定システムの車両座標移動量と誤差を示す。

表 2.1.2.3-2 に実測と走行位置標定システム（補正後）の車両座標移動量と誤差を示す。

表 2.1.2.3-3 に補正前・補正後の走行位置標定システムの平均二乗誤差（RMS）を示す。

表 2.1.2.3-1 実測と走行位置標定システムの車両座標移動量と誤差

N	実測		走行位置標定システム			
	進行方向 [mm]	横方向 [mm]	進行方向 [mm]	横方向 [mm]	進行方向誤差 [mm]	横方向誤差 [mm]
1	66823	2477	67663	3000	840	524
2	66784	2498	67605	2437	821	-61
3	66829	2513	67715	2905	886	392
4	66876	2480	67722	2840	846	360
5	67068	2520	67868	2797	800	277

表 2.1.2.3-2 実測と走行位置標定システム（補正後）の車両座標移動量と誤差

N	実測		走行位置標定システム(補正後)			
	進行方向 [mm]	横方向 [mm]	進行方向 [mm]	横方向 [mm]	進行方向誤差 [mm]	横方向誤差 [mm]
1	66823	2477	66918	2931	95	454
2	66784	2498	66861	2365	77	-133
3	66829	2513	66970	2825	141	312
4	66876	2480	66976	2767	100	287
5	67068	2520	67120	2731	52	211

表 2.1.2.3-3 補正前・補正後の走行位置標定システムの平均二乗誤差（RMS）

走行位置標定システム		走行位置標定システム(補正後)	
進行方向RMS [mm]	横方向誤差RMS [mm]	進行方向RMS [mm]	横方向RMS [mm]
839	357	98	299

ストレートバス停止着目標軌跡の運転手による手動運転走行において、走行位置標定システムの車両の位置座標(x, y)の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は進行方向（x 軸方向）で 839[mm]、横方向（y 軸方向）で 357[mm]となった。

2.1.2.1 項と 2.1.2.2 項のパイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の距離と方位角の精度検証実験と同様に走行距離と方位角に補正を行った場合、補正後の走行位置標定システムの車両の位置座標(x, y)の実測値に対する平均二乗誤差（RMS）は進行方向（x 軸方向）で 98[mm]、横方向（y 軸方向）で 299[mm]となった。

特に補正後の走行位置標定システムの車両の位置座標(x, y)の実測値に対する横方向(y軸方向)の誤差は最小で-133[mm]であり、正着制御の目標とする±2[cm]以内の範囲に収まっていない。

車両の位置座標(x, y)の誤差の原因は、以下の距離精度の問題が挙げられる。

2.1.2.1項で述べたように、実験で使用したART単車バスに搭載したパイオニア製GPS学習型位置標定装置の出力するオドメータ1[m]には、学習不足と車輪速パルス数の問題による誤差が含まれている。

特に1車輪速パルス辺り約6[cm]の粒度で距離を出力しており、GPSの学習による補正を行ったとしても、±6[cm]の範囲の距離の誤差が座標変換時に含まれ、車両の位置座標(x, y)の誤差が累積する。

2.1.3 パイオニア製GPS学習型位置標定装置の調査

2.1.2項のGPS学習型位置標定装置の精度検証結果において、出力値として想定より誤差を含んだものとなり、距離や方位に対して補正係数を使用する必要があった。これは、ART単車バスの実験時は、パイオニア製GPS学習型位置標定装置の学習条件に対し、郊外の路上での学習が出来ず、学習実験に使用した産業技術総合研究所の衝突実験場では十分な距離がないため、十分な学習を行う環境が整っていなかったためである。

そこで、ART単車バスと同程度の車輪速パルス数(車輪速パルス数24)の車両に対し、市街地や高速道路等を走行して学習が十分に進んだ際の精度調査(距離、角度、変換座標)を実施した。

2.1.3.1 距離の精度調査結果

距離精度調査では、直線上の距離の精度を求めるため直進走行を行い、開始地点と終了地点間の距離(850[m]程度)を計測し、パイオニア製GPS学習型位置標定装置の算出したオドメータと、オドメータ算出の基準とする1車輪速パルス辺りの学習値(以下、学習値と記載する)の精度を検証した。

表2.1.3.1-1に距離精度検証試験の実測値とオドメータと誤差を示す。

表 2.1.3.1-1 距離精度検証試験の実測値とオドメータと誤差

実測 距離[m]	パイオニア製GPS学習型位置標定装置				
	オドメータ[m]	オドメータ誤差[m]	学習値[m]	学習値誤差[%]	学習値誤差による 距離誤差見積もり[m]
857.149	857.204	0.055	0.064	0.004	0.037

実測値に対するオドメータの誤差は0.055[m]、学習値の誤差は0.004[%]となった。学習値の誤差から算出した実測距離に対する距離誤差の見積もりは0.037[m]であった。学習値の誤差から見積もった誤差よりもオドメータの誤差の方が大きい、学習値が0.064[m]であるため、オドメータの誤差は想定範囲内である。

2.1.3.2 角度の精度調査結果

図 2.1.3.2-1 に、角度と変換座標の精度調査に使用するコースを示す。

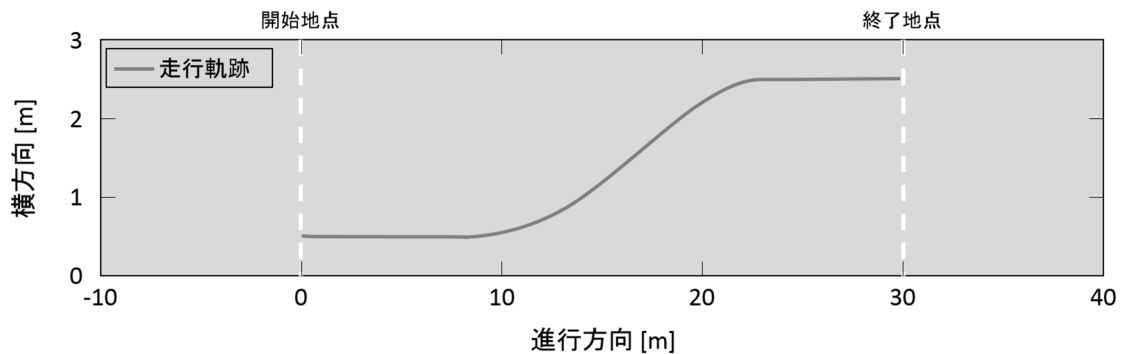


図 2.1.3.2-1 角度と変換座標の精度調査に使用するコース

図 2.1.3.2-1 のコースを使用して、開始地点と終了地点での車両の角度を、車両に設定した基準点と基準線(横方向 0[m]地点、開始地点、終了地点)間の距離を計測することで求め、パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の算出した方位の精度を検証する試験を行う。開始地点では横方向 0[m]地点と開始地点の線、終了地点では横方向 0[m]地点と終了地点の線を基準線とし、車両に設定した基準点と基準線間の垂線の距離を計測する。なお、図 2.1.3.2-1 は進行方向に対して左方向に移動するが、両方向の誤差を検証するため、進行方向に対して右方向に移動するコースでの試験も行った。

表 2.1.3.2-1 に角度精度検証試験の実測値と方位角と誤差を示す。

N	実測	パイオニア製GPS学習型位置標定装置	
	角度変化量[deg]	方位角変化量[deg]	方位角変化量誤差[deg]
1	1.723	1.613	-0.110
2	0.175	0.384	0.208
3	0.285	-0.155	-0.440
4	-1.295	-1.671	-0.376
5	-1.537	-1.526	0.011

表 2.1.3.2-1 角度精度検証試験の実測値と方位角と誤差

角度精度検証試験の方位角の平均二乗誤差 (RMS) は 0.279[deg]となった。

2.1.2.2 パイオニア製 GPS 学習型位置標定装置の角度精度検証において、表 2.1.2.2-2 にある補正後の結果に近い値となったため、十分に学習が進むと良好な結果となるといえる。

2.1.3.3 変換座標の精度調査結果

図 2.1.3.2-1 のコースを使用して、開始地点の初期角度を設定してパイオニア製 GPS 学習位置標定装置で算出した方位角とオドメータから座標変換を行い、進行方向の距離と横方向の距離の比較を行う。本調査は、2.1.3.2 角度の精度調査と同じ試験で実施した。

表 2.1.3.3-1 にコース走行時の実測値と進行方向距離と左右方向の距離と誤差を示す。

表 2.1.3.3-1 コース走行時の実測値と進行方向距離と横方向の距離と誤差

N	実測		パイオニア製GPS学習型位置標定装置			
	進行方向[mm]	横方向[mm]	進行方向[mm]	横方向[mm]	進行方向誤差[mm]	横方向誤差[mm]
1	29650.500	2726.000	29754.053	2726.210	103.553	0.210
2	29583.000	2309.750	29673.446	2309.794	90.446	0.044
3	30891.000	2449.000	30903.591	2449.150	12.591	0.150
4	28911.000	-2693.500	28941.966	-2693.307	30.966	0.193
5	28863.500	-2675.000	28865.664	-2674.753	2.164	0.247

実測値では開始地点での初期方位の精度が出なかったため、横方向の誤差が最小になる方位を開始地点の初期角度として設定し、座標変換を行った。

コース走行時の進行方向の平均二乗誤差 (RMS) は 63.286[mm]、と横方向の平均二乗誤差 (RMS) は 0.183[mm]となった。

十分な学習を行い、初期角度の設定を適切に行うことができると、変換座標として良好な結果を出すことができるといえる。

2.2 正着誘導白線マーカ方式の検討

2.2.1 HDR カメラの制御法の検討

ART における正着制御においてバス停における照明装置がない場合でも正確な正着性能を維持するには、1～10 万 Lux の幅広い照度範囲で安定的に高画質な動画を撮像することが可能なカメラが求められる。そこで、夜間から薄暮時、晴天時のいずれの条件でも高画質な白線画像が撮像可能となる HDR (High Dynamic Range) カメラを試作し、カメラの性能評価を実施する。なお本カメラの試作および性能評価についてはソニー株式会社に再委託し実施した。

(1) HDR カメラの試作

今回試作した HDR カメラのシステム概要を図 2.2.1-1 に示す。

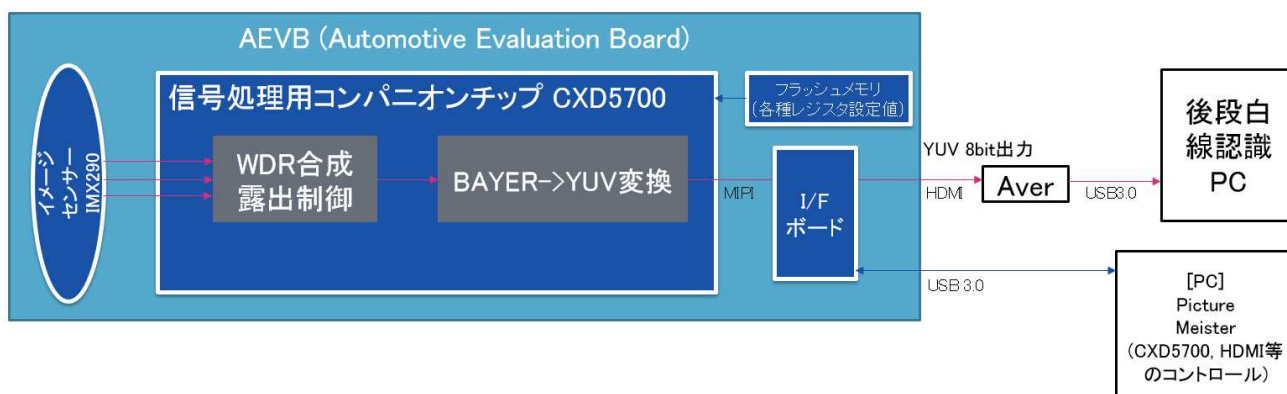


図 2.2.1-1 HDR カメラのシステム概要

図 2.2.1-1 において、HDR カメラのベースとしてソニー株式会社が独自開発した AEVB (Automotive Evaluation Board) を用いた。AEVB はイメージセンサー IMX290 (ソニー (株) 製)、信号処理コンパニオンチップ CXD5700 (ソニー株式会社製 SoC LSI)、I/F ボード、設定値格納用フラッシュメモリから構成される。高画質な HDR 撮影と、後段白線認識 PC への良好な接続を可能にすべく、レンズの選定、CXD5700 の制御、I/F の構成と制御を検討開発した。車載用イメージセンサーは IMX224 (1.2M Pixel)、IMX290 (2M Pixel) が接続可能であるが、今回はより精密な白線位置検出を行えるべく IMX290 を選定した。

AEVB の外観図を図 2.2.1-2 に示す

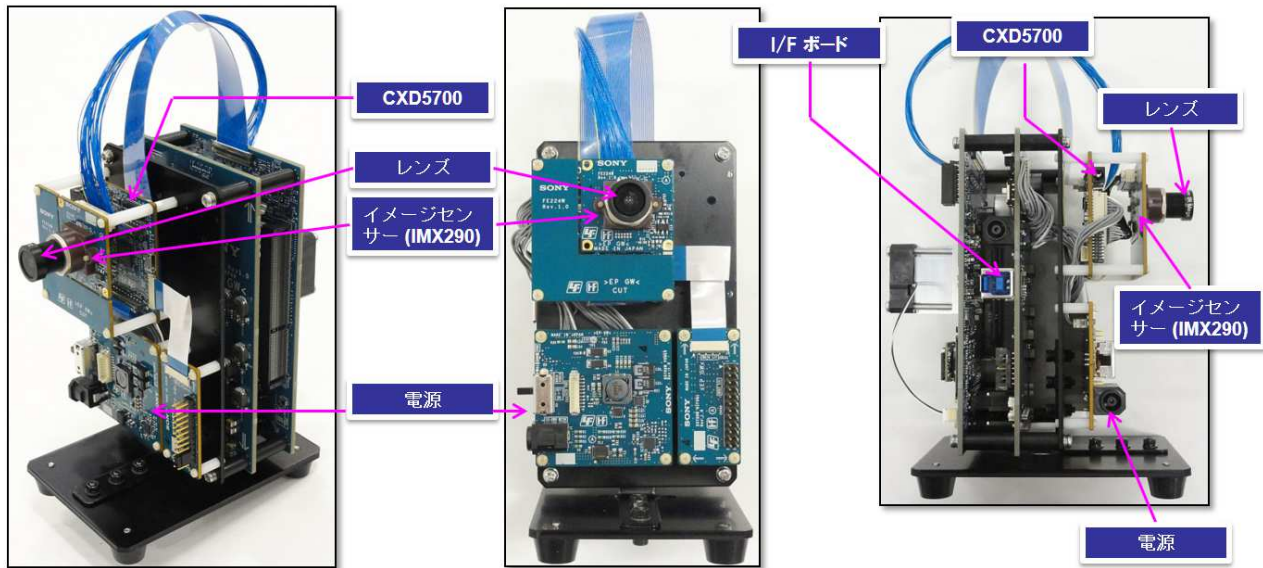


図 2. 2. 1-2 AEVB の外観図

図 2. 2. 1-2 の AEVB 外観図に示すように各ボードはまとめて台座に固定されている車載向け評価キットである。

図 2. 2. 1-3 にバスへ設置した場合の画角範囲を示す。レンズは下記に示す撮影要件を満たす画角を選定した。

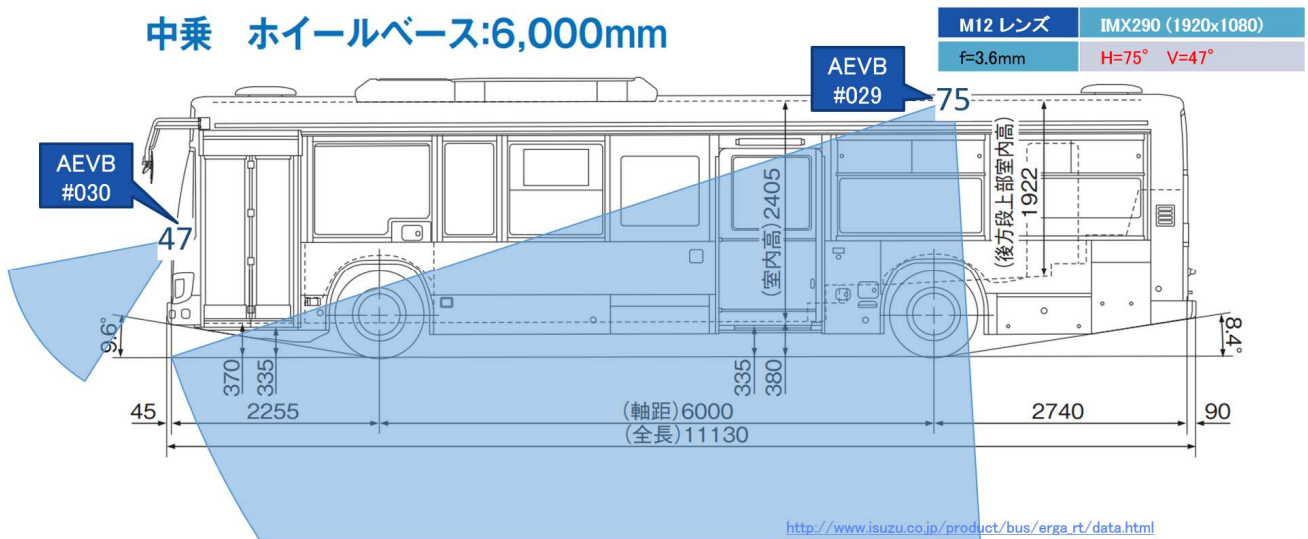


図 2. 2. 1-3 AEVB のバスへの設置とレンズの画角範囲(ホイールベース 6メートル)

図 2.2.1-3 において、AEVB はシリアル番号#029 と#030 をそれぞれ図の位置に設置し、道路の白線を撮影する。レンズは焦点距離 $f=3.6\text{mm}$ でありイメージセンサーIMX290 との組み合わせでは、画角は水平方向 $H=75^\circ$ 、垂直方向 $V=47^\circ$ である。車体側面から撮影する AEVB #029 は画面水平方向が進行方向と一致するように後軸上に設置する。前後軸間を撮影する要件があるが、この図から明らかなように $H=75^\circ$ の画角はホイールベースが 6 メートルであってもホイールベース間の白線撮影が可能である。バスフロントダッシュボードに設置する#030 は正位置(垂直方法が鉛直)に設置する。

AEVB の出力 I/F は HDMI で、後段の白線認識 PC とは HDMI-USB コンバーターを介して接続される。後段との接続性確認のために HDMI-USB コンバーターとして市販の Aver Media 社 C710 を用い、撮影検証をおこなった。

図 2.2.1-4 に実験用バスに設置した AEVB で撮影し該 HDMI-USB コンバーターでキャプチャした画像を示す。



実験用バス サイド撮影画像(AEVB #029)



実験用バス フロント撮影画像(AEVB #030)

図 2.2.1-4 AEVB の実験バスでの撮影試験画像

図 2.2.1-4 に示したように HDMI-USB コンバーターによるキャプチャが行え、後段 PC との接続や撮影に問題の無い事を確認した。また AEVB#029 の撮影画角は前後軸間を撮影できており前記撮影要件を満たした。

次に AEVB の撮影パラメータについて述べる。AEVB は撮像動作時にコンパニオンチップ CXD5700 によりリアルタイム制御される。今回は路面照度に自動適応してシャッタースピード・ゲイン等のパラメータを自動調整した HDR 撮影が可能な制御を行うように CXD5700 のレジスタ設定を行った。図 2.2.1-5 に、今回設定の CXD5700 の処理の流れを示す。



図 2.2.1-5 コンパニオンチップ CXD5700 の処理の流れ

図 2.2.1-5 において処理の概要を示す。イメージセンサーにより撮像された画像は入力 I/F を経て HDR 合成ブロックに入力する。HDR 合成は複数の異なる露光時間で撮像された画像データを合成し、ダイナミックレンジの広い 1 枚の画像に合成する。AE/GAIN は被写体の照度に応じて適応的にシャッタースピードとゲイン(画像データの増幅度)の制御調整を行う。RAW 現像処理は、イメージセンサーの撮像生データ(RAW データ)を、広く一般的に使われている画像フォーマットである YCbCr データに変換する。

以上の制御システムにより撮像した画像例を以下図 2.2.1-6 に示す。

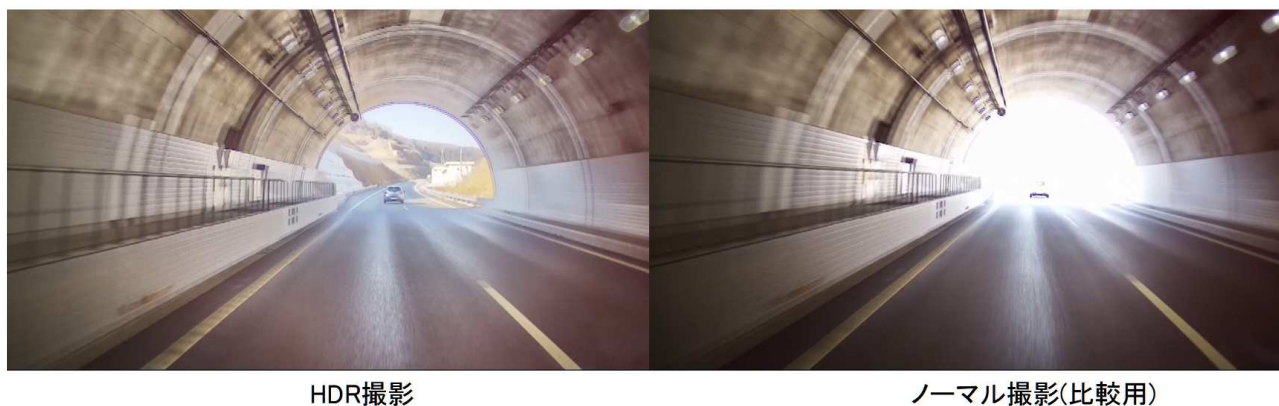


図 2.2.1-6 AEVB によるダイナミックレンジの広いシーンの撮影例

図 2.2.1-6 は、車載映像シーンで広いダイナミックレンジをもつ画像として、トンネルの出口を AEVB で撮影したものである。左画像が AEVB で今回の制御設定にして HDR 撮影した画像、右が比較参考用に HDR ではないノーマル撮影した画像である。一見してわかるように、左の HDR 撮影した画像は 10 万ルクス程度の明るいトンネル外から数ルクス程度の暗いトンネル内まで鮮明であるのに対し、右のノーマル撮影した画像は被写体のダイナミックレンジに追従できずにトンネル外の風景が白飛びしている。

また以下の図 2. 2. 1-7 に、0.5 ルクスでの AEVB による撮影例を示す。



図 2. 2. 1-7 AEVB による照度 0.5 ルクスでの撮影例(暗室での撮影)

図 2. 2. 1-7 の撮影条件である 0.5 ルクスは人間の視覚では非常に暗く感じられるシーンであるが、今回の AEVB 制御ロジックによりテストチャートなども視認できるような画像が撮影可能であった。以上の撮影例でもわかるように一般的な撮影シーンでは照度やダイナミックレンジに適応的に CXD5700 による制御が働き鮮明な画像が撮影可能といえる。以下の(2)「HDR カメラの性能評価」では、今回の ART の正着用誘導マーカの撮影に特化した条件で撮影評価を行った。

(2) HDR カメラの性能評価

今回制御設定された HDR カメラ (AEVB) を使い、夜間から薄暮時、晴天時の 1~10 万 Lux の幅広い照度範囲条件において白線を撮影し評価を行った。

カメラ位置・構図は 12 月 9 日に AEVB を ART バス実験車両にて設置試験した時の条件に準じた。

図 2.2.1-8 にそのカメラ位置・構図を示す。

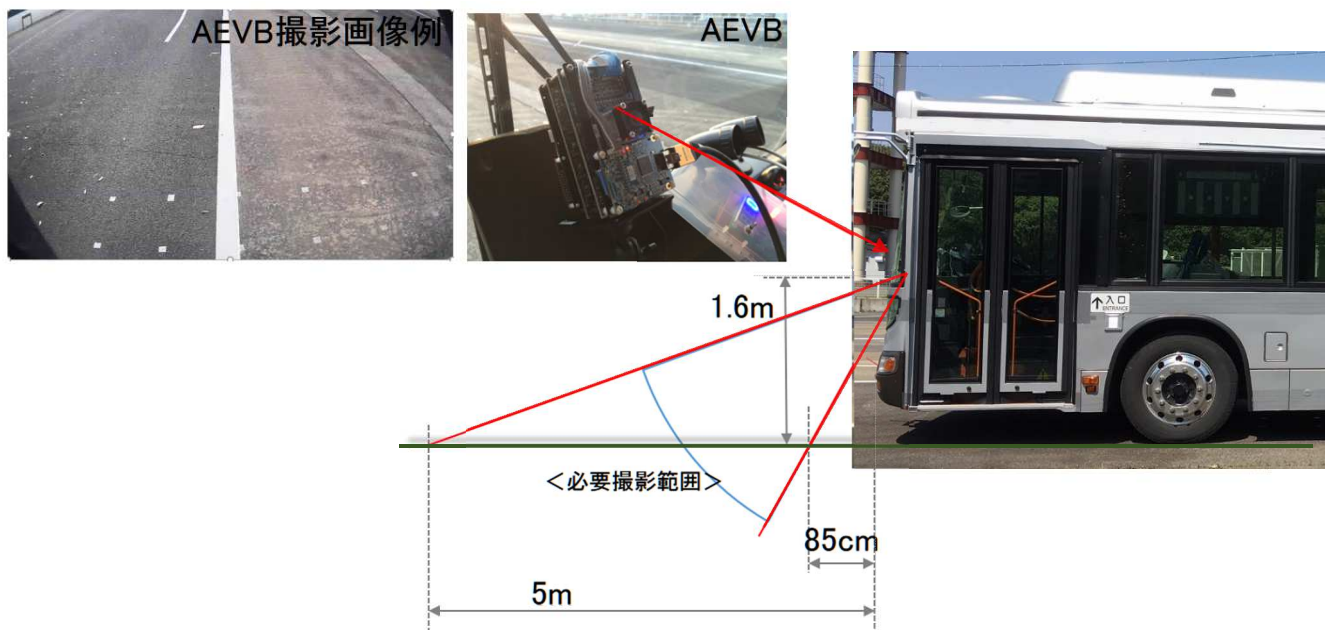


図 2.2.1-8 AEVB と白線の位置関係

図 2.2.1-8 に示したように、AEVB は高さ 1.6 メートルに位置し 5 メートル先まで白線を撮影する。以下の撮影評価では図 3.2.1-8 の条件になるべく近づけるべく、アスファルト路面上に 1.6 メートルに三脚を立て AEVB を設置し道路工事に用いる白線をアスファルトの上に敷き、出来る限り同条件を再現して撮影を行った。

以下の表 2. 2. 1-1 に撮影したシーン条件と結果を示す

撮影条件		撮影結果				
シーン	路面照度	撮影画像	Shutter(msec)	Gain (dB)	白線	テストチャート
日中昼間 順光	96,000 lx	図3.2.1-9	0.288	0.1	◎	◎
日中昼間 逆光	96,000 lx	図3.2.1-10	0.340	0.2	◎	◎
夕暮れ西日 逆光 (明るい)	7,600 lx	図3.2.1-11	2.170	0.1	◎	◎
夕暮れ西日 逆光 2 (暗い)	1,420 lx	図3.2.1-12	11.118	0.1	◎	◎
薄暮 (明るい)	100 lx	図3.2.1-13	19.200	14.2	◎	◎
薄暮 2 (暗い)	13 lx	図3.2.1-14	29.200	28.6	◎	◎
夜間 (街灯近く明るい)	5 lx	図3.2.1-15	29.200	35.0	◎	◎
夜間 2 (街灯遠く暗い)	1 lx	図3.2.1-16	29.200	54.0	○	○

表 2. 2. 1-1 性能評価の撮影条件と結果

表 2. 2. 1-1 で、○は物体を間違いなく視認で認知できる撮影画像、◎はさらに鮮明に撮影された事を示す主観的指標である。撮影条件はほぼ 1 ルクス～10 万ルクスを網羅し、また逆光で路面が反射する条件も含んだ。その撮影実験結果から、各撮影条件に適応したシャッター速度、ゲインが制御・設定され、白線とテストチャートが良好に撮影された。以下に撮影した画像結果を示す。



図 2. 2. 1-9 日中昼間 順光 [96, 000 lx]



図 2. 2. 1-10 日中昼間 逆光 [96,000 1x]



図 2. 2. 1-11 夕暮れ西日 逆光 (明るい) [7,600 1x]



図 2.2.1-12 夕暮れ西日 逆光 2 (暗い) [1,420 lx]



図 2.2.1-13 薄暮 (明るい) [100 lx]



図 2.2.1-14 薄暮2 (暗い) [13 1x]



図 2.2.1-15 夜間 (街灯近く明るい) [5 1x]



図 2.2.1-16 夜間 2 (街灯遠く非常に暗い) [1 1x]

撮影された画像から、5ルクス～約10万ルクスでは被写体である白線とテストチャートが非常に鮮明である。かなり暗い1ルクスではイメージセンサーのノイズが画質に影響しているが被写体はひと目で認識ができ、白線のエッジも5m先まで視認できる。

以上の結果から、試作したHDRカメラ：AEVBは、CXD5700のロジックにより適切なHDR合成、シャッター速度、ゲイン等の制御を行い、様々な撮影条件における白線着誘導マーカの撮影を良好に行うことが可能なカメラといえる。

2.2.2 白線画像認識アルゴリズム

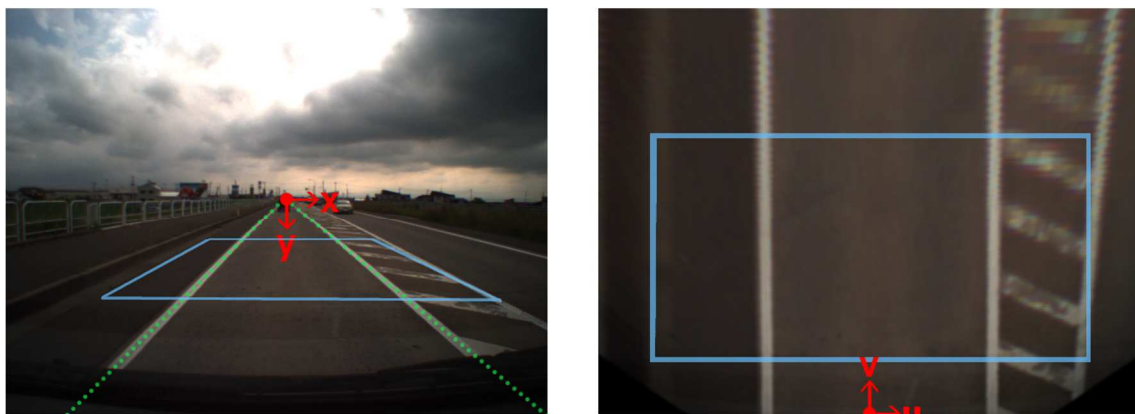
HDR カメラによって撮影された画像から白線と車両との離隔距離を高精度に検出するため、高精度なカメラ座標→道路座標変換機能を有する白線位置検出用画像認識アルゴリズムを検討する。具体的には、隊列走行用に開発した下向カメラによる白線認識アルゴリズムに①～④の機能を付加し、車両直前の曲線部を含む白線を精度良く認識できるようにする。

- ① HDR カメラにより撮像された Full HD (1920×1080 画素) 画像を入力・処理する。
- ② 車両直前の道路を撮影した入力画像 (図 2.2.2-1(a)) を道路面上方から俯瞰した逆透視投影変換画像 (以後、IPM(Inverse Perspective Mapping)画像と呼ぶ：図 2.2.2-1(b)) に変換する。
- ③ 正着誘導用の白線に含まれる曲率が大きい白線に対応できる。
- ④ 逆透視投影変換パラメータ及び IPM 画像座標-車体座標変換パラメータを Full HD 画像から簡易に生成する。

(1)HDR カメラ入力への対応

ソニー株式会社製 HDR カメラの解像度 (1980×1080) に対応できるように、機器構成及び画像入力部のプログラムを変更した。図 2.2.2-2 に HDR カメラを入力とした際の機器構成を示す。HDR カメラの出力は HDMI 信号であるため、AVerMedia 社製 USB3.0 HDMI キャプチャー(CV710)を変換器に用い、USB3.0 経由で白線認識アルゴリズムが動作するテガラ車載用 PC に Full HD 画像が入力される。

CV710 経由で Full HD 画像を入力するため、画像処理ライブラリ (OpenCV) のバージョンを従来の 2.4.1 から 3.0.0 に更新した後、白線検出プログラムの画像入力部をソニー株式会社より提供された画像入力部のルーチンに変更した。



(a) 入力画像

(b) IPM 画像

図 2.2.2-1 俯瞰画像の作成



図 2. 2. 2-2 機器構成

(2) 逆透視投影変換画像の作成

下向カメラによる白線認識アルゴリズムは白線を真上から撮像した画像を入力としている。このため、入力画像（図 2. 2. 2-1(a)）を道路面上方から俯瞰した IPM 画像（図 2. 2. 2-1(b)）に変換し、白線を検出する。

入力画像中の画素位置を (x, y) 、IPM 画像中の画素位置 を (u, v) 、入力画像中の消失点位置を (V_{px}, V_{py}) 、IPM 画像の横軸（縦軸）方向の拡大・縮小率を R_x (R_y)、入力画像中の y 座標値の下限を y_{lim} とすると、 (x, y) と (u, v) の間には以下の関係式(2. 2. 2-1)が成り立つ。

$$(u, v) = (R_x \cdot (x - V_{px}) / (y - V_{py}), R_y^2 / (y - V_{py}) - R_y^2 / y_{lim}) \quad \text{式 (2. 2. 2-1)}$$

入力画像（1980×1080 画素）中の全画素に式(1)を適用し、変換先の座標 (u, v) を算出する。そして、予め設定しておいた矩形領域（480×640 画素）内の画像を IPM 画像として切り出す。図 2. 2. 2-3 に、正着誘導用の白線を撮影した HDR カメラ画像から IPM 画像を作成した例を示す。



(a) 入力画像 (Full HD)

(b) IPM 画像

図 2. 2. 2-3 Full HD 画像から作成した IPM 画像

(3) 白線認識アルゴリズム

道路上には影や汚れなど様々な模様が存在するため、本アルゴリズムでは、白線の候補点を白線幅により絞り込む。IPM 画像は道路面を真上から俯瞰した画像であるため、白線幅は位置に依らず一定となる。よって、白線候補点は一定範囲の幅を持つエッジ点の組に限定する。また、掠れなどにより白線が不鮮明な場合もあるため、ノイズ耐性のある Hough 変換を用いて画像内の白線位置・角度を算出する。本アルゴリズムの流れは以下の通りである。

- ① Full HD 画像 (1980×1080 画素) 入力
- ② IPM 画像 (480×640 画素) 作成
- ③ 垂直エッジ抽出とノイズ除去
- ④ 白線候補点抽出
- ⑤ Hough 変換による直線検出
- ⑥ IPM 画像座標値を車体座標値に変換

まず、式(2.2.2-1)を用いて Full HD 画像 (図 2.2.2-3(a)) の IPM 画像 (図 2.3.3-3(b)) を作成する。IPM 画像中で白線は主に垂直方向に伸びているため、ソーベルフィルタにより垂直エッジ点を検出する。次いで、IPM 画像を水平方向に走査し、エッジ強度の極大点と極小点のみを抽出する。この処理によりノイズが低減された垂直エッジ画像が得られる (図 2.2.2-4(a))。垂直エッジ検出用のソーベルフィルタを用いると、白線の左右側線はエッジ強度の絶対値が大きい正負のエッジ点の組となる。図 2.2.2-4(a)では、輝度レベルが暗→明に変化する正のエッジ点を白点、明→暗に変化する負のエッジ点を黒点で示している。このため、垂直エッジ画像を水平方向に走査し、正と負のエッジ点間の距離が白線幅の範囲内にあり、かつエッジ強度の絶対値が大きい場合、エッジペアの負エッジ点を白線候補点として抽出する (図 2.3.3-4(b))。

次いで、これらに Hough 変換を適用し、白線候補点を通る直線を求めるが、正着制御に用いる白線は曲線部を含むため (図 2.2.2-3(a))、白線全体を一つの直線で近似することができない。このため、図 2.2.2-4(c)に示すように、IPM 画像を縦方向に均等 3 分割し、各分割領域内で白線候補点に最もフィッティングする直線を Hough 変換で算出する。Hough 変換とは、直交座標上の点群を Hough 空間へ投票することで直線を検出する手法であり、投票値が高いパラメータから白線を求めるのでノイズに対して頑健である。また、HDR カメラはコントラストと解像度が共に高いため、アスファルト面の細かい輝度変化が鮮明に撮像される。このため、垂直エッジ抽出時に粒状のノイズが通常カメラより多数発生するが、Hough 変換を用いることでこの影響は回避できている。図 2.2.2-4(c)の水色の直線が、各領域内の白線検出結果である。

各領域で得られた直線式に、予め設定しておいた計測点の v 座標値を代入し、計測点の u 座標値を求める。そして、予めカメラキャリブレーションにより求めておいた射影変換行列を用いて計測点の IPM 画像座標値 (u, v) を実空間上の車体座標値 $(x, y, 0)$ に変換し、車体中心から白線までの距離を求める。



(a) 垂直エッジ

(b) 白線候補点

(c) 直線検出

図 2. 2. 2-4. 曲線部に対応した白線検出

(3) カメラキャリブレーション

逆透視投影変換パラメータ及び IPM 画像座標-車体座標変換パラメータを Full HD 画像から簡易に生成するカメラキャリブレーション用ツールを作成した。カメラキャリブレーションには図 2. 2. 2-5 に示すように、車両前方の路面にマーカを正方格子状に配置し、撮影した画像を用いる。車体座標系の原点は車両前部中央であり、この座標系でのマーカ位置 $(X, Y, 0)$ は予め計測しておく。撮影した画像をキャリブレーションツールに入力し、IPM 画像を作成する。本ツールは GUI 画面上でマーカ数と配置が設定できる。また、IPM 画像の作成に必要な消失点位置、拡大・縮小率、 y 座標下限値が画面から入力できるため、これらの値を対話的に変更し、最適な IPM 画像を生成していく。そして、図 2. 2. 2-6(b) に示すように、得られた IPM 画像に対し、IPM 画像座標系でのマーカ位置 (u, v) をマウスによるポインティングで求め、各マーカの IPM 画像座標値 (u, v) と車体座標値 $(X, Y, 0)$ の組から IPM 画像座標-車体座標変換パラメータを最小二乗法により算出する。

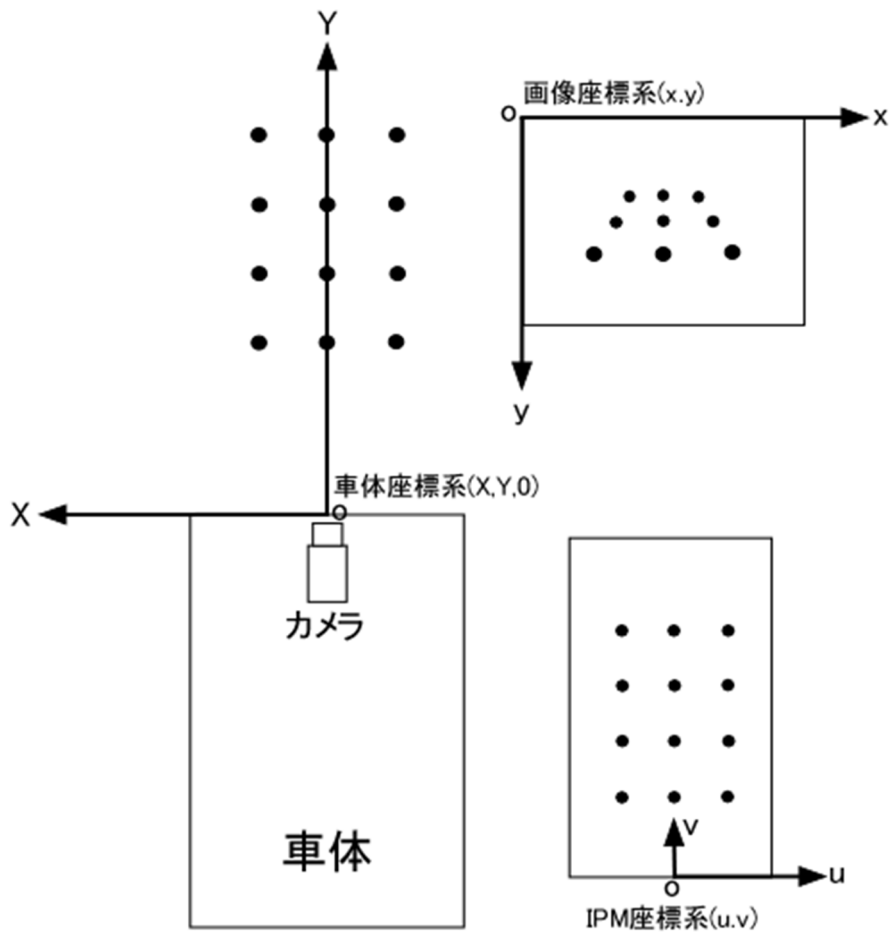
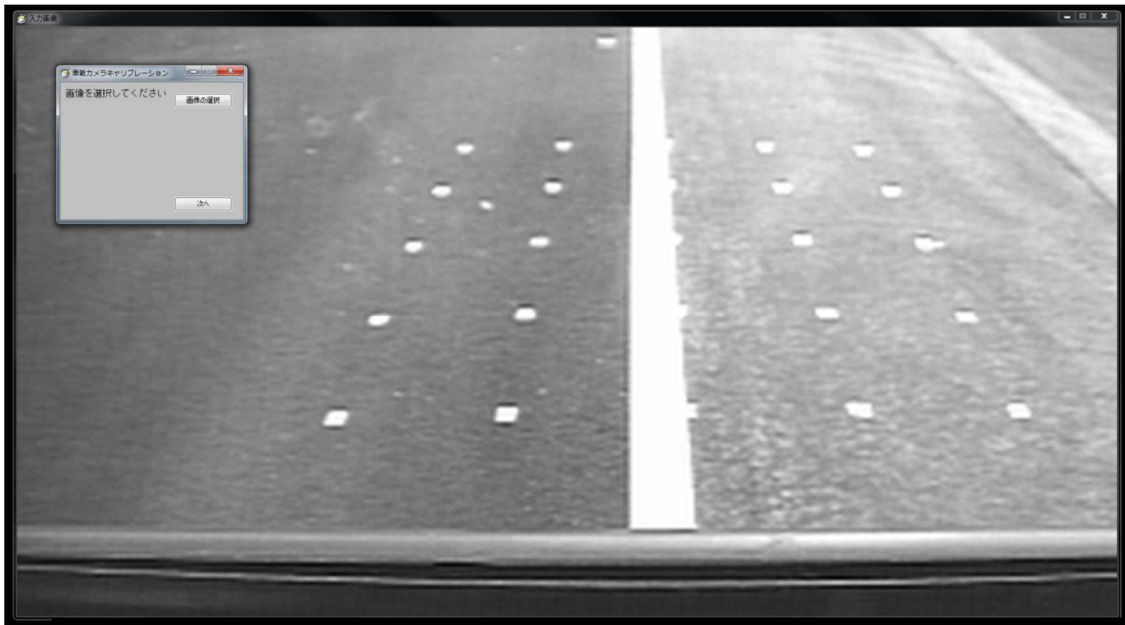
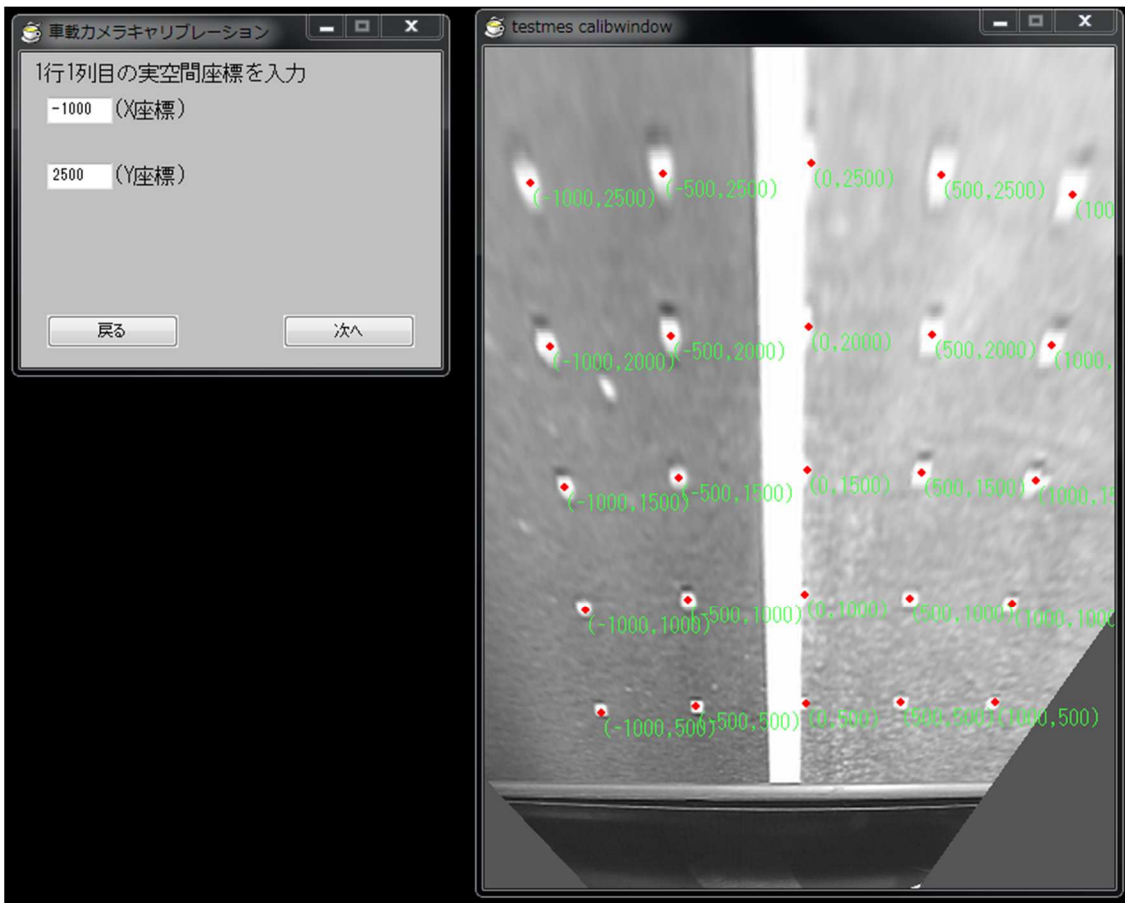


図 2.2.2-5 キャリブレーション用マーカと各種座標系



(a) マーカ画像



(b) IPM 画像上でのマーカ点のポインティングと車体座標の入力

図 2.2.2-6 カメラキャリブレーション用ツール

(4) 実験結果

・白線検出結果

正着制御実験用に引かれた白線(左エッジ)を検出した結果を図 2.2.2-7, 図 2.2.2-8 に示す。曲率がか
なり大きい曲線部が存在するが、IPM 画像を 3 分割し、3 本の直線で近似することにより曲線部におい
ても白線が正しく検出できている。



図 2.2.2-7 白線認識結果 1 (左：入力画像、右：IPM 画像上での認識結果)

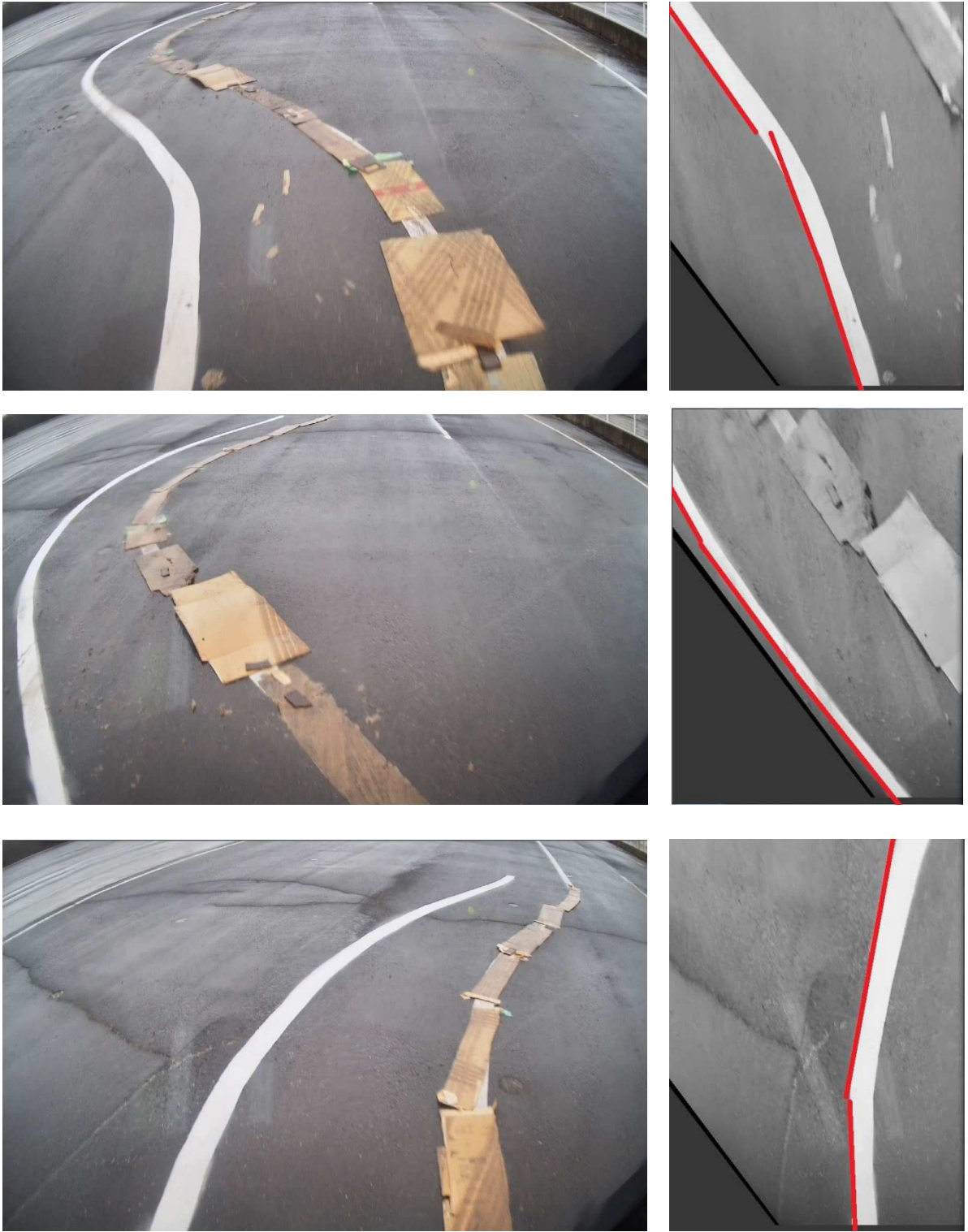


図 2. 2. 2-8 白線認識結果 2 (左 : 入力画像、右 : IPM 画像上での認識結果)

・白線位置の精度

実験用バスのフロントウィンドウ内側に図 3.2.2-9 の画角で HDR カメラを設置し、キャリブレーション及び白線位置計測実験を行った。キャリブレーションには路面に設置した $5 \times 4 = 20$ 点のマーカを用いた。路面上に白線を置き、本白線認識アルゴリズムで車体前方約 3m の地点の X 座標（横位置）を計測した結果を図 2.2.2-10 に示す。グラフの横軸が真値、縦軸が計測結果である。最左端の白線位置を 0mm とし、50mm 単位で白線を右方向にずらしながら計測を行った。0~1,350mm の間の誤差は ± 15 mm 以下であったが、1,400~1,500mm の間の誤差は最大 50mm となった。この原因はレンズ歪によるものと考えられる。図 2.2.2-9 に示されるように、画像周辺はレンズの樽型歪により歪曲している。このため、周辺部に近い 1,400~1,500mm 間の点の計測精度が低下したと考えられるが、この問題は歪の小さいレンズを用いるか、入力画像に歪補正をかけることで解決可能である。



図 2.2.2-9 キャリブレーション用マーカ

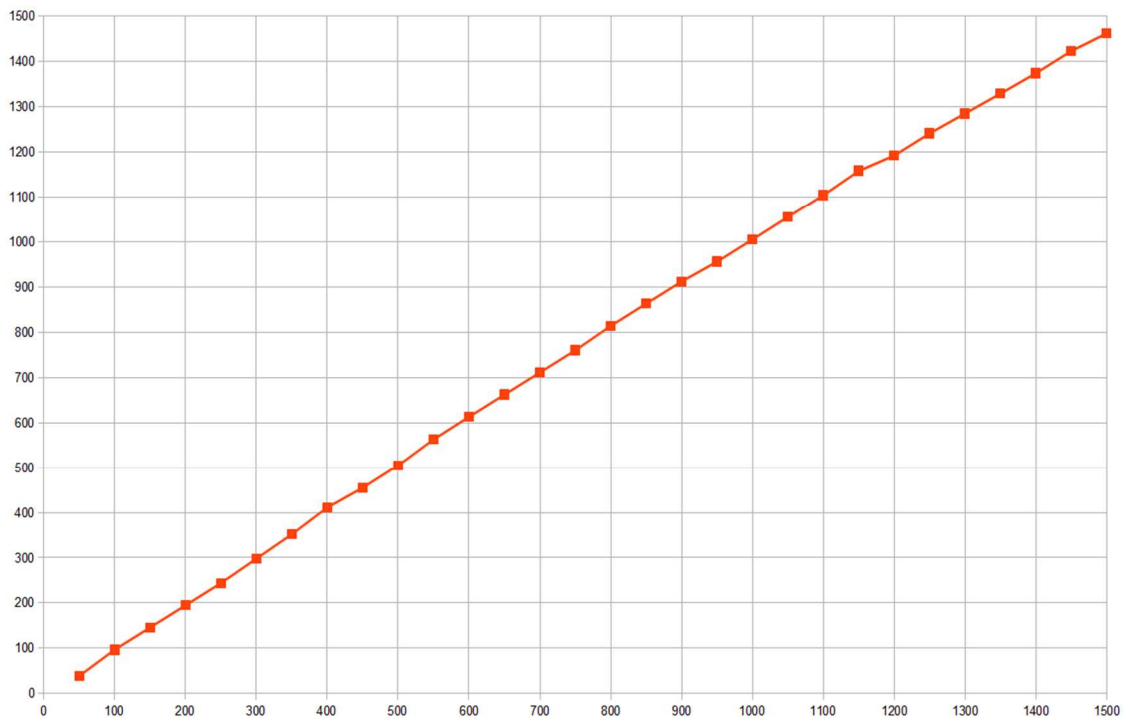


図 2.2.2-10 白線位置計測結果（縦軸：計測位置 (mm)，横軸：真値 (mm)）

2.3 MI センサと低磁界マーカによる磁界誘導方式

積雪時やマーカの維持管理性を向上するため、きわめて低磁力の磁性体マーカと高感度 MI (Magnetic Impedance) センサの組合せによる磁気マーカ誘導方式を検討する。具体的には、道路中央表面に連続的または離散的に敷設した磁石マーカから発生した磁場を、車両下部に設置した超高感度磁気センサで検出することにより、左右方向のずれ量を算出する方法を検討する。

2.3.1 MI センサを用いた位置検出装置の試作

2.3.1.1 低磁力極薄磁性体マーカ

路面への施工性に優れる 1mm 厚さの、安価で耐環境性に優れるフェライトラバー磁石を試作した。なお、着磁方向は上下方向の単極着磁とした。

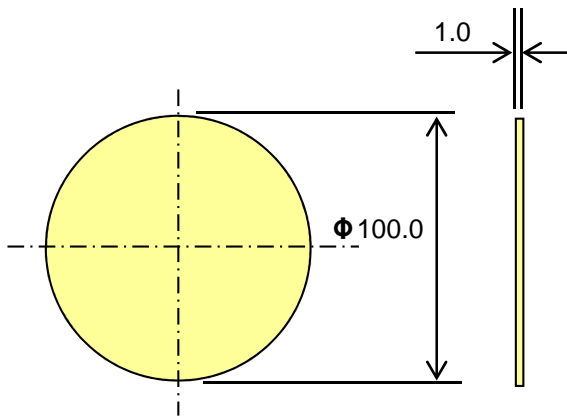


図 2.3-1 磁性体マーカ写真



図 2.3-2 磁性体マーカ写真

試作品の外観写真及び磁気分布を下図に示す。

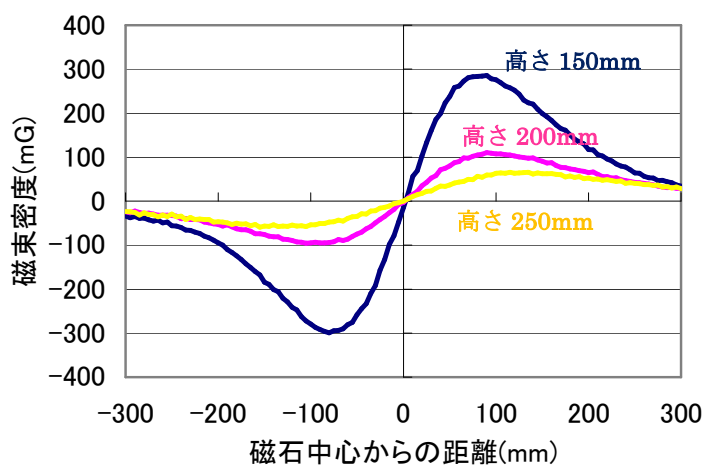


図 2.3-3 X 方向磁気分布.

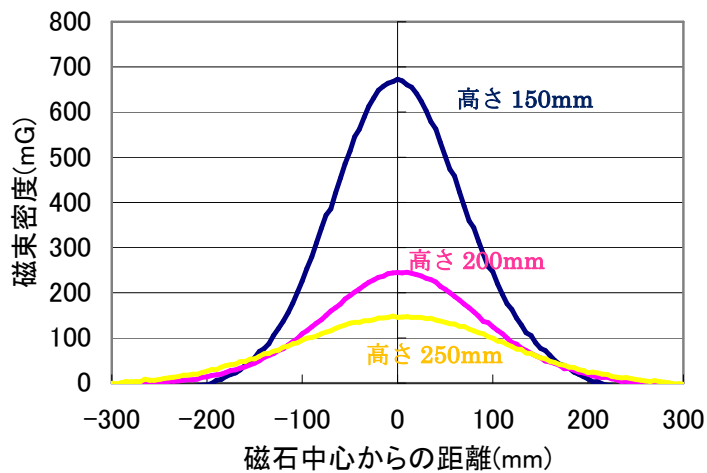


図 2.3-4 Z 方向磁気分布.

2.3.1.2 磁気センサシステム

車幅方向に 50mm ピッチで配置した磁気センサ (MI センサ)、磁気勾配計測用の差動増幅回路、制御演算用マイコン及び PC から構成されるシステムを試作した。

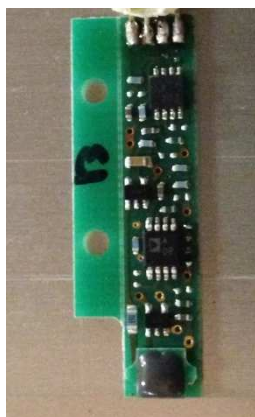


図 2.3-5 磁気センサ (MI センサ)

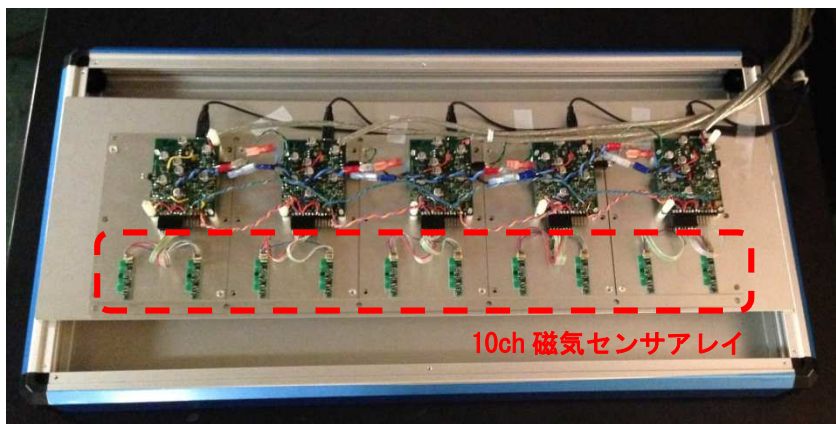


図 2.3-6 磁気センサシステム

試作した磁気センサシステムに用いた磁気センサ（MI センサ）の特性を以下に記す。

表 2.3-1 磁気センサ特性

項目	条件	特性
測定レンジ (G)	—	±6 G 以上
直線性 (%FS)	±6G	0.6 %FS
周波数特性	—	100 kHz
σ ノイズ	10kHz 以下	0.8 mG
ノイズ密度	@1Hz	0.1 μ G \sqrt Hz

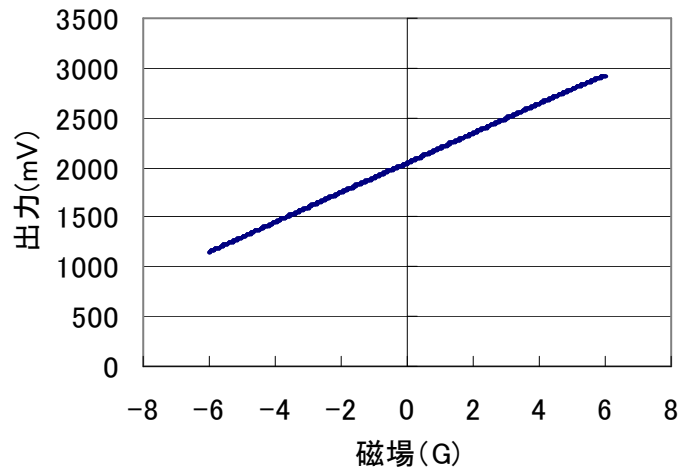


図 2.3-7 ±6Gauss 出力特性

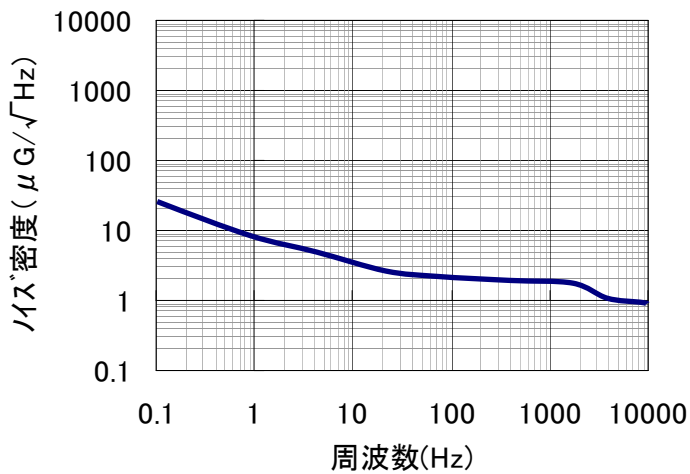


図 2.3-8 ノイズ密度

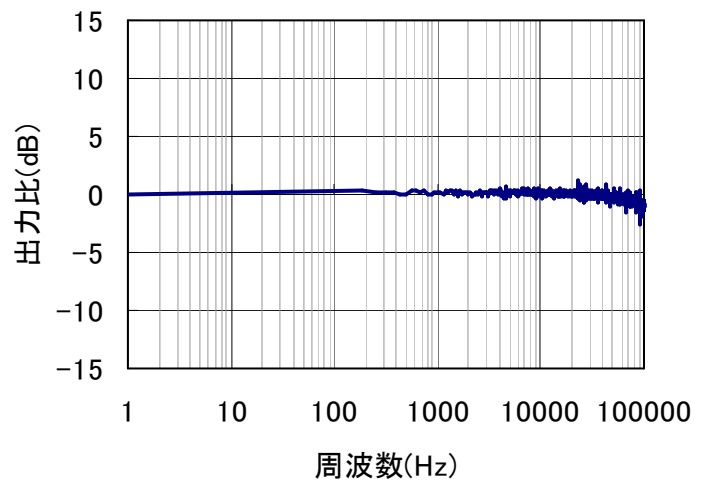


図 2.3-9 周波数特性

試作した磁気センサシステムの信号処理ステップ（愛知製鋼既存技術）を以下に記す。

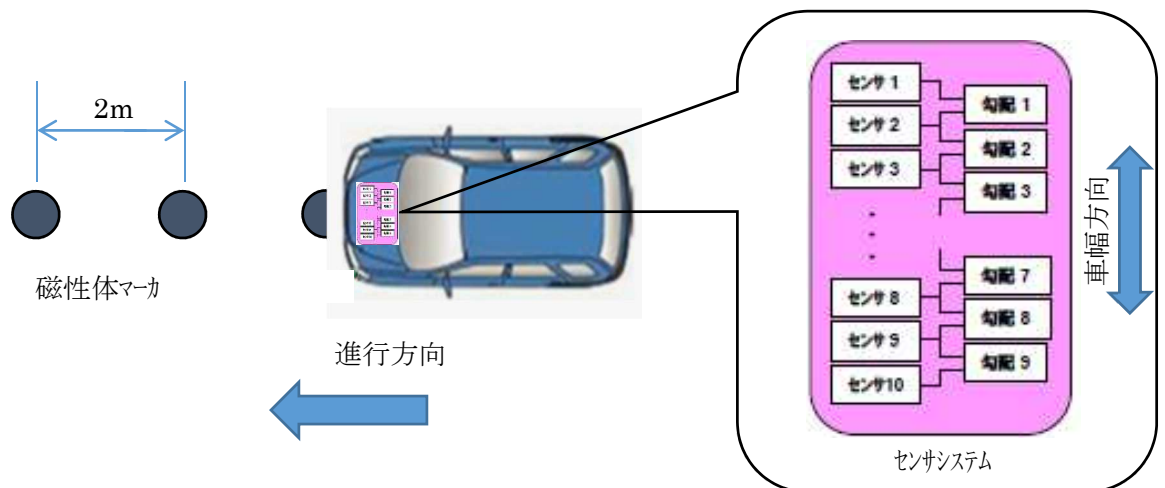


図 2.3-10 センシングイメージ図

ステップ① 磁気測定

車幅方向 50mm ピッチに配置した 10ch の磁気センサで磁気測定

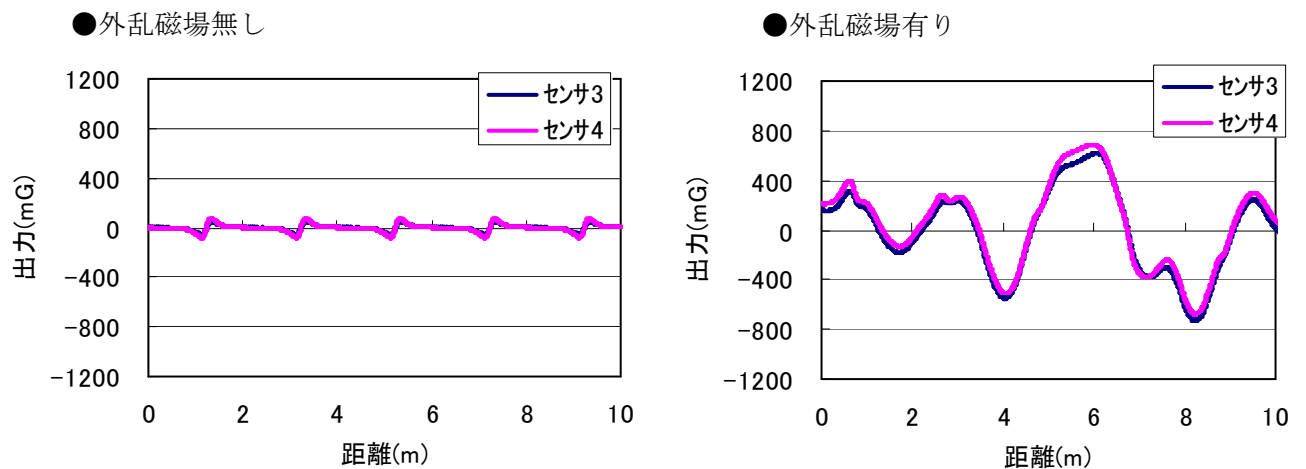


図 2.3-11 磁気センサ生出力

ステップ② 磁気勾配計測

隣接するセンサ出力より磁気勾配を計測

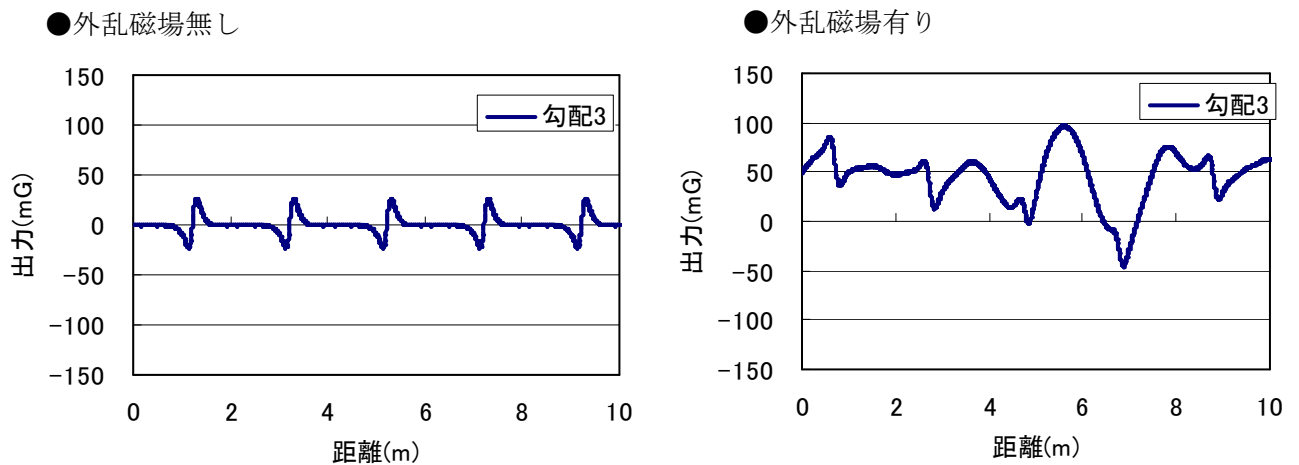


図 2.3-12 磁気勾配計測

ステップ③ フィルタ処理

空間フィルタ処理で磁性体マーカ信号を抽出し、有無を判定

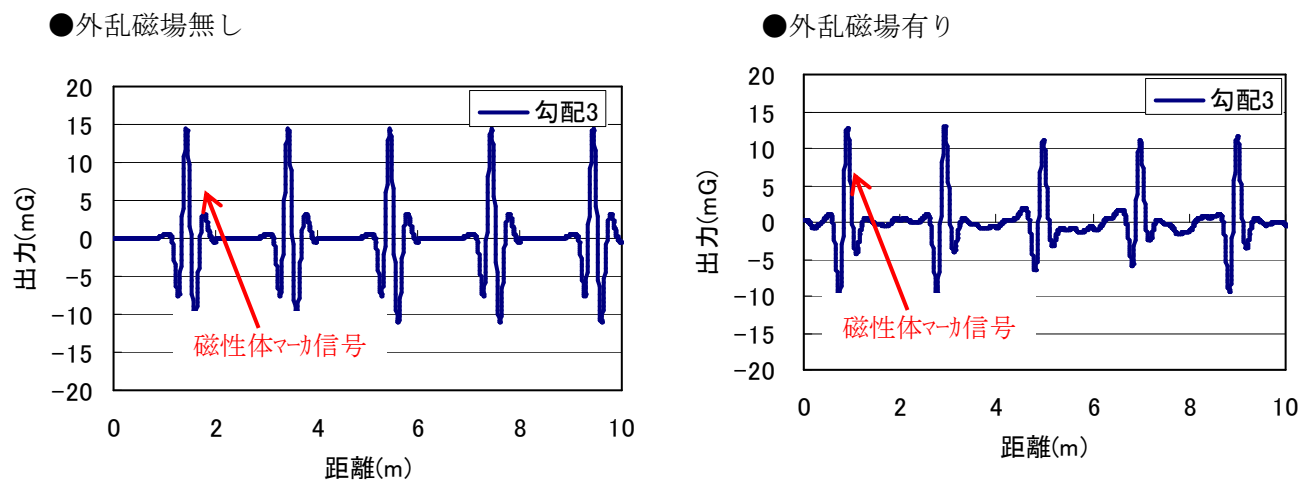


図 2.3-13 フィルタ処理後出力

ステップ④ 偏差量算出

磁性体マーカ信号毎に 9ch のセンサ出力を横軸をセンサ配置 (50mm ピッチ) としてプロット
出力値が 0 となる車幅方向位置を偏差量として算出

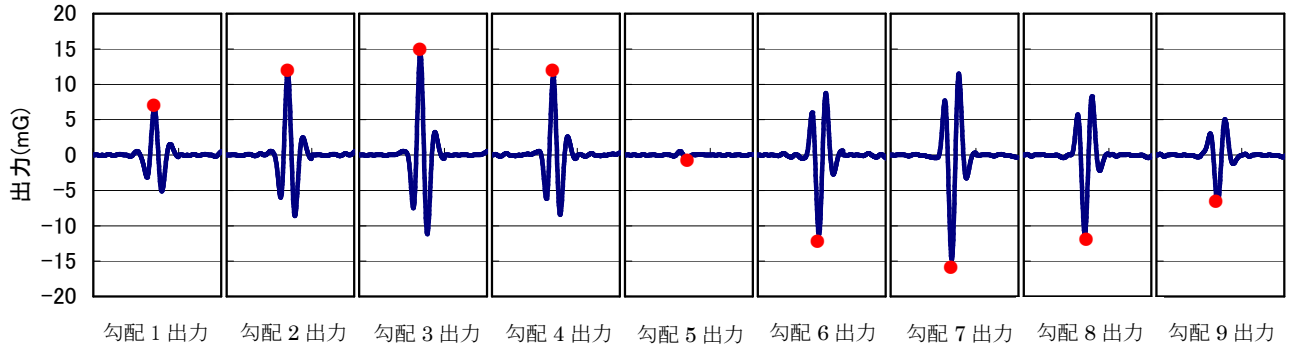


図 2.3-14 磁性体マーカ検出時の各センサ出力

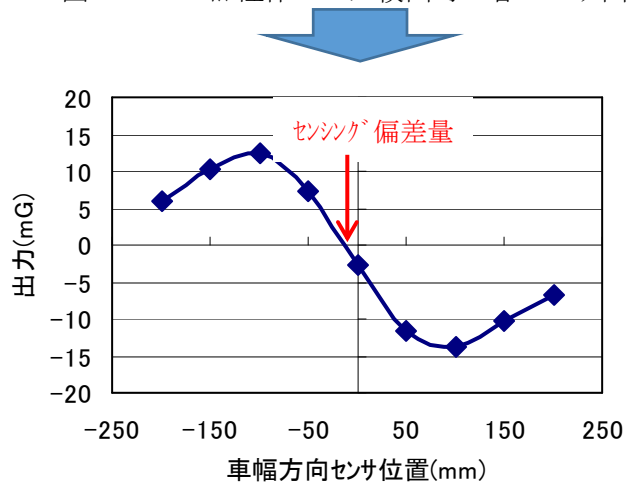


図 2.3-15 横偏差算出

2.3.2 性能評価

2.3.2.1 実験概要

磁性体マーカを敷設した路上に設置した軌道に沿って、磁気センサシステムを搭載した台車を移動させて、検出された偏差量と実軌道との差を計測する。

2.3.2.2 実験条件

- ・磁性体マーカ、磁気センサシステム間距離：200mm
- ・路面：アスファルト路、コンクリート路（鉄筋）
- ・磁性体マーカ設置偏差：0、30、60、90、120、150、180mm

2.3.2.3 評価結果

①アスファルト路評価結果

マーカ位置 (mm)	計測値 (mm)			誤差 (mm)		
	1 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
0	1.4	1.1	-1.3	-1.4	-1.1	1.3
30	29.0	29.9	29.3	1.0	0.1	0.7
60	59.2	62.7	62.1	0.8	-2.7	-2.1
90	86.2	87.1	86.5	3.8	2.9	3.5
120	117.0	119.4	118.3	3.0	0.6	1.7
150	149.9	150.0	150.1	0.1	0.0	-0.1
180	179.3	178.4	179.9	0.7	1.6	0.1
Ave	-	-	-	1.1	0.2	0.7
max	-	-	-	3.8	2.9	3.5
min	-	-	-	-1.4	-2.7	-2.1
Range	-	-	-	5.2	5.5	5.6

表 2.3-2 アスファルト路評価結果

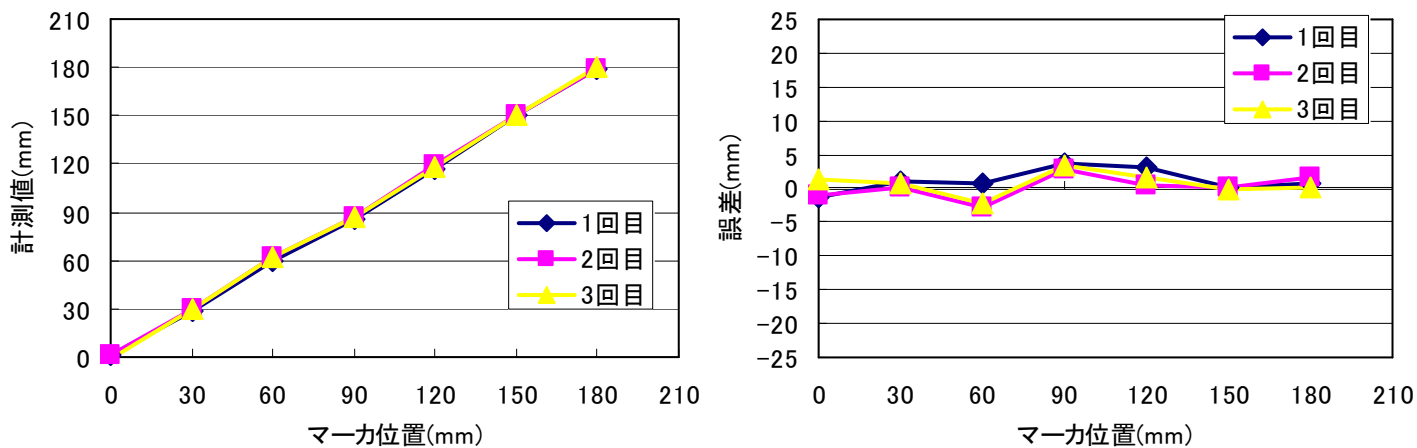


図 2.3-16 アスファルト路評価結果

② コンクリート路（鉄筋）評価結果

表 2.3-3 コンクリート路評価結果

マーカ位置 (mm)	計測値 (mm)			誤差 (mm)		
	1 回目	2 回目	3 回目	1 回目	2 回目	3 回目
0	2.0	1.9	0.9	-2.0	-1.9	-0.9
30	30.8	31.6	32.3	-0.8	-1.6	-2.3
60	62.6	61.6	61.9	-2.6	-1.6	-1.9
90	86.2	90.1	90.3	3.8	-0.1	-0.3
120	119.8	119.6	119.4	0.2	0.4	0.6
150	148.0	148.3	150.6	2.0	1.7	-0.6
180	180.6	179.2	175.6	-0.6	0.8	4.4
Ave	-	-	-	0.0	-0.3	-0.1
max	-	-	-	3.8	1.7	4.4
min	-	-	-	-2.6	-1.9	-2.3
Range	-	-	-	6.3	3.6	6.7

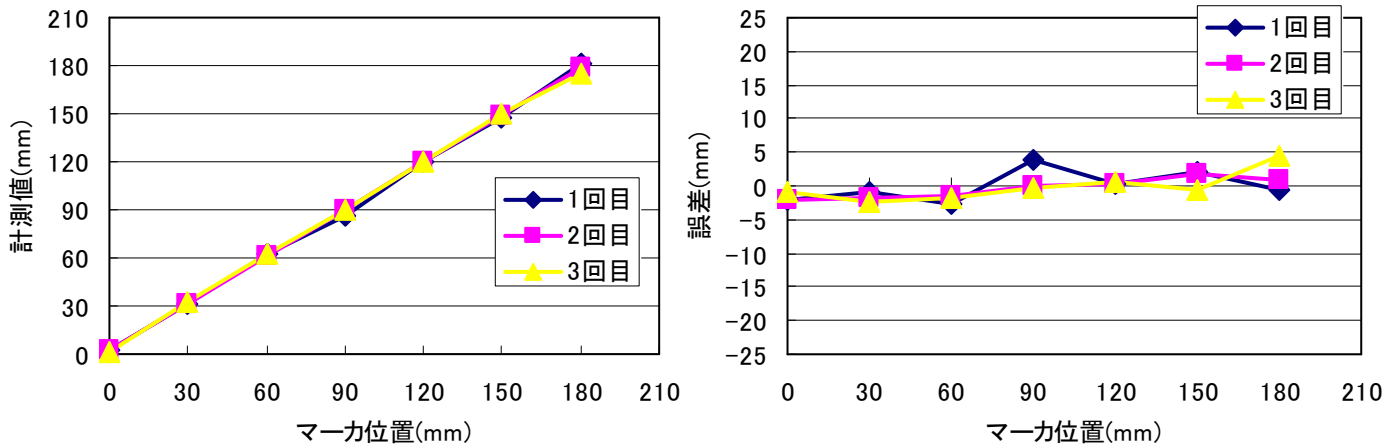


図 2.3-17 鉄筋コンクリート路評価結果

2.3.2.4 まとめ及び考察

- ・アスファルト路、コンクリート路共に、磁性体マーカの検出誤差は±5mm以下であった。
- ・厚さ1mmと路面への施工性に優れ、きわめて低磁力の磁性体マーカとMIセンサーを用いた磁気センサーシステムとの組合せによる磁気誘導方式の有用性を十分に示す結果が得られたと考える。
- ・今後、検出誤差を引き起こす要因、影響度より、本方式の計測精度を調査する必要がある。

2.4 位置特定用パターン学習方式

バスベイに図形パターンを敷設し、ドライバーのハンドル手動操作による正着を行った時の成功時と失敗時を教師として、成功時および失敗時に走行した図形パターンを機械学習することにより正着制御をおこなう操舵制御ロジックを検討する。ロボットや自動運転自動車の機械学習には、教師なしオンライン学習である強化学習（例えば、Q-学習[1]やDeep Reinforcement Learning[2]等）を利用することが期待されるが、これらの機械学習を正確に、効率良く実行するには、行動価値観数を学習する前処理にて、ノイズに頑健な入力信号の取得が必須である。

2.4.1 図形認識および制御アルゴリズム検討

バス停の手前数 10 [m] から正着するまでの最後の数 [cm] のバス位置情報を精度良く算出する認識するためには、一般にセンサ側を複数装備し、各々認識システムを構築することが考えられるが、本事業では、一つのカメラに対して複数の環境認識手法を切り替える手法について検討する。近距離の認識については、バス停路面には図形パターンを塗布可能であるなど環境整備が容易であること、および、バス正着場所には物体の侵入がなく（もしくは、侵入物の有無は別システムで監視されており）正着制御中は図形パターンに隠れが発生しないことを仮定する。検討の結果、近距離では、ARToolkit [3] を利用したバス位置推定の実現可能性について検討する。また、遠方の位置推定については、先行車両を含む路上の所領の様子や、気象の変動等にも頑健である必要がある。そこで、遠方における位置推定については、画像集合を用いて畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network：CNN）の学習を行う。CNN の構成を図 2.4-1 に示す。CNN は、入力された画像に対して局所的な畳み込みを段階的に行ってことで特徴を徐々に統合するものである。図中の Convolution が畳み込みであり、図形の局所的な特徴を抽出する。また、図中の Subsampling は、位置ずれを補正するものである。これらを多段に配置することで、初めは非常に局所的な特徴のみが抽出されるが、徐々にそれら特徴を組み合わせたより複雑な特徴が抽出されることになる。図中の Full Connection は、主に識別処理のために用いられるものであり、今回は用いていない。また、今回は Convolution と Subsampling の組を 2 段配置する構成として検討した。

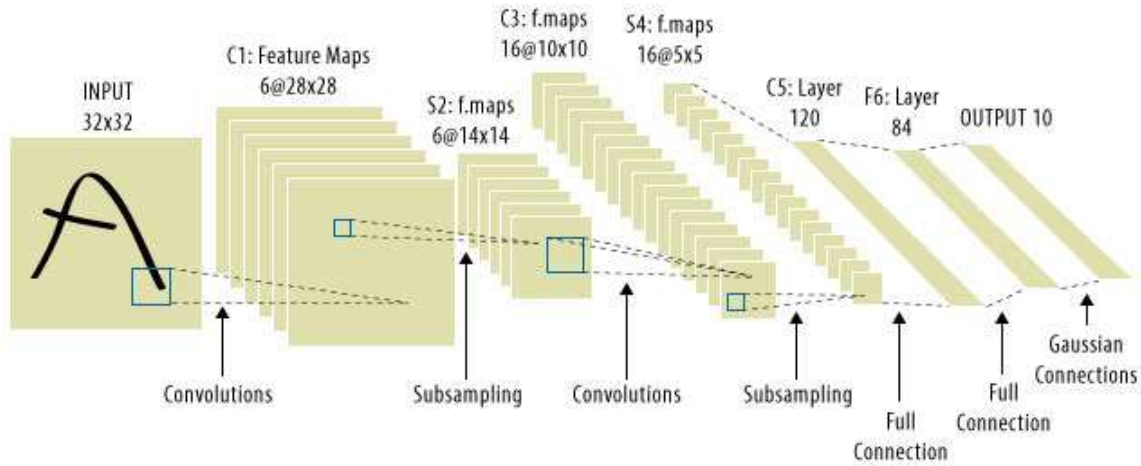


図 2.4-1 : 使用した CNN の構成 (<http://systemdesign.altera.com/can-you-see-using-convolutional-neural-networks/>) .

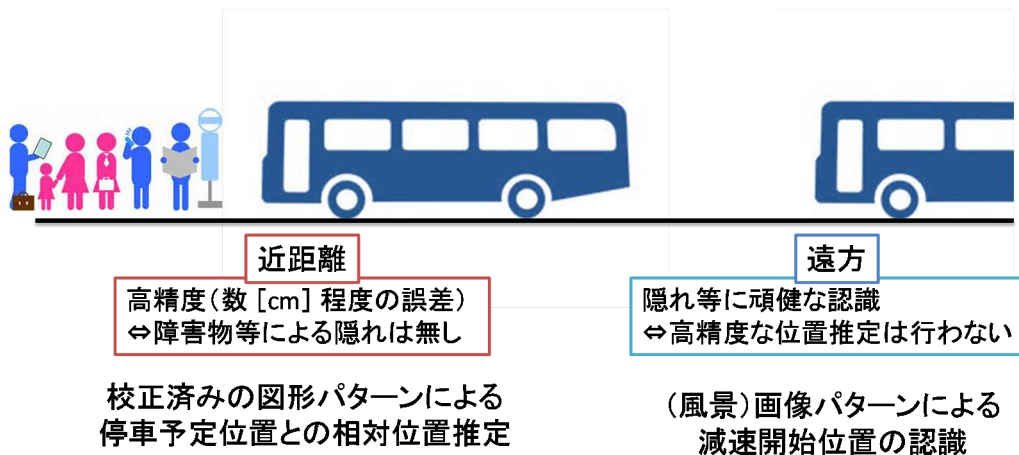


図 2.4-2 : バス正着場所までの距離に基づく一認識技術の切り替え概略

本検証では、下記ア～ウの 3 項目に特化して実現可能性を調査する。

ア. 図形パターンの検討

正着制御における複数の走行軌跡に対して異なる図形イメージが撮像可能な図形パターンを検討する。1 事例として東京オリンピックロゴマークを用いた図形パターンを検討する。

イ. 正着制御のための図形パターンから得られる位置情報の精度に関する検証

正着の成功結果と失敗結果を教師データとして機械学習に利用するには、それぞれの系列におけるバスの軌跡を正確に測定する必要がある。本実験では、正着開始から停止までの通過中の図形パターンをニューラルネットを用いて機械学習する方法を検討する。

本方式の検証は台車を用いて室内環境下でロジックの原理動作の確認をおこなう。

ウ. 屋外画像の CNN による学習を行い、位置推定への適用可能性を検証する。

参考文献

- [1] C. JCH Watkins and P. Dayan, “Q-learning”, Machine learning, 8(3-4):279-292, 1992.
- [2] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra, M. Riedmiller, “Playing Atari with Deep Reinforcement Learning”, arXiv:1312.5602v1, 2013.
- [3] 株式会社エムソフト “ARToolkit”, <http://www.msoft.co.jp/ar/> (2016年2月アクセス)

2.4.2 性能評価

カメラを図形パターン（AR マーカー）に対して縦方向，横方向に動かし，様々な距離での図形パターン（図 2.4-3 参照）認識に基づく距離推定の精度を調査した．まずは，想定される実シーン（バスにカメラを搭載）の 10 分の 1 のスケールで実験を行った（図 2.4-4 参照）．図形パターンに対して縦方向 1m の地点から 20cm 刻みで距離の計測を行った．また，横方向に 30cm ずらした場合でも同様の実験を行った．図形パターンの大きさは縦横 20cm でカメラの設置高さは 28cm である．以下の 3 種類の図形パターンを用いてそれぞれ距離の計測を行った．カメラから入力された動画をキャプチャし，30 フレーム分の計測結果から，図形パターンごとの各位置における縦方向（図形パターンまでの距離），横方向（図形パターンからの横ずれ）、高さ方向（カメラ設置高）の平均誤差とその標準偏差を算出した．

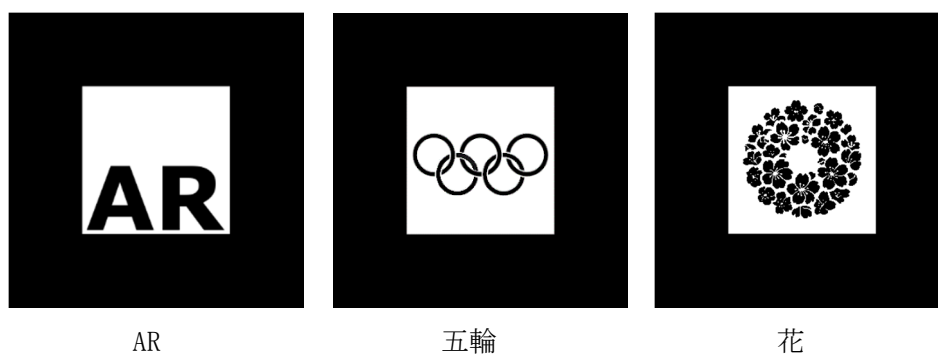


図 2.4-3 実験に用いた図形パターン（AR マーカー）

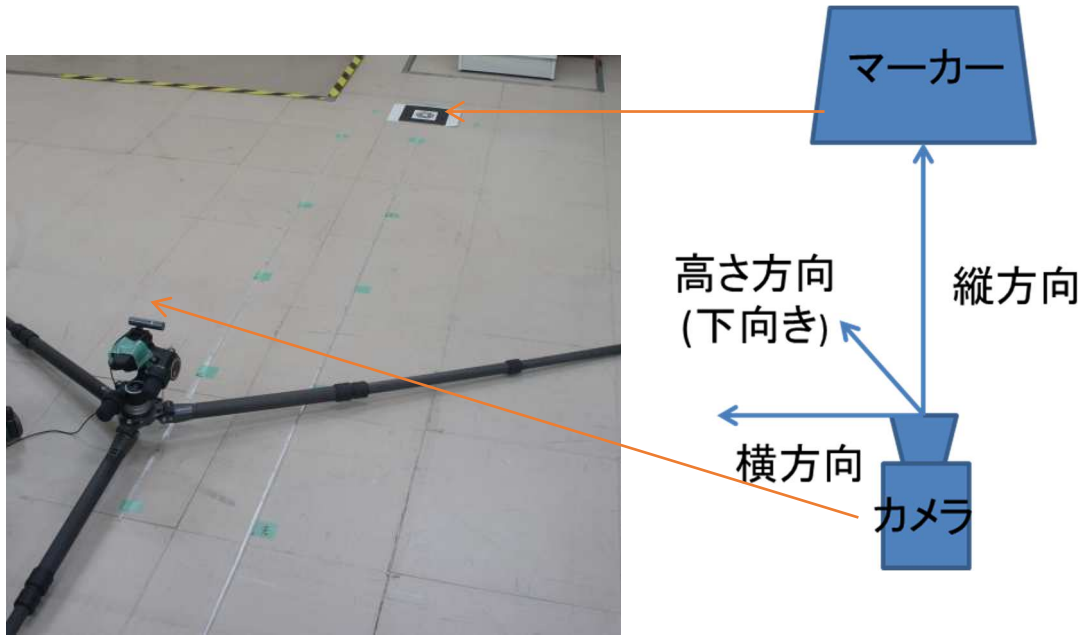


図 2.4-4 10分の1スケールの屋内実験の様子

以下の表に各位置における縦方向(図形パターンまでの距離)、横方向(図形パターンからの横ずれ)、高さ方向(カメラ設置高)の30フレーム分の平均誤差と標準偏差を事項以降の表にまとめる。

図形パターン 20cm×20cm 横ずれなし・縦方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	0.00±0.00024	0.01±0.00025	0.01±0.00035
1.2m 地点	0.01±0.00036	0.00±0.00069	0.01±0.00197
1.4m 地点	0.00±0.00093	0.01±0.00073	0.00±0.00083
1.6m 地点	0.00±0.00199	0.00±0.00096	0.00±0.00132
1.8m 地点	0.01±0.00232	0.00±0.00248	0.01±0.00252
2m 地点	0.02±0.00415	0.00±0.00223	0.01±0.00394

図形パターン 20cm×20cm 横ずれ 30cm・縦方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	計測不可	計測不可	計測不可
1.2m 地点	0.00±0.00191	0.00±0.00360	0.01±0.00097
1.4m 地点	0.01±0.00130	0.01±0.00180	0.01±0.00124
1.6m 地点	0.00±0.00325	0.02±0.00208	0.02±0.00202
1.8m 地点	0.01±0.00486	0.02±0.00245	0.03±0.00317
2m 地点	0.05±0.00762	0.04±0.00509	0.04±0.00614

※1m 地点は図形パターンがカメラの画面内に納まらないため計測不可

図形パターン 20cm×20cm 横ずれなし・横方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	0.00±0.00003	0.00±0.00003	0.00±0.00004
1.2m 地点	0.01±0.00004	0.01±0.00003	0.00±0.00010
1.4m 地点	0.02±0.00006	0.03±0.00005	0.01±0.00006
1.6m 地点	0.02±0.00009	0.02±0.00006	0.00±0.00012
1.8m 地点	0.02±0.00013	0.02±0.00018	0.02±0.00013
2m 地点	0.02±0.00019	0.04±0.00013	0.02±0.00019

図形パターン 20cm×20cm 横ずれ 30cm・横方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	計測不可	計測不可	計測不可
1.2m 地点	0.01±0.00045	0.02±0.00080	0.02±0.00026
1.4m 地点	0.02±0.00028	0.02±0.00038	0.03±0.00027
1.6m 地点	0.03±0.00069	0.03±0.00049	0.03±0.00037
1.8m 地点	0.04±0.00074	0.03±0.00040	0.06±0.00061
2m 地点	0.04±0.00107	0.07±0.00076	0.06±0.00126

※1m 地点は図形パターンがカメラの画面内に納まらないため計測不可

横ずれなし・高さ方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	0.00±0.00007	0.01±0.00007	0.00±0.00010
1.2m 地点	0.01±0.00008	0.01±0.00007	0.01±0.00014
1.4m 地点	0.02±0.00016	0.02±0.00013	0.02±0.00014
1.6m 地点	0.04±0.00029	0.04±0.00013	0.04±0.00020
1.8m 地点	0.06±0.00029	0.06±0.00030	0.06±0.00031
2m 地点	0.08±0.00043	0.08±0.00023	0.08±0.00041

横ずれ 30cm・高さ方向の平均誤差と標準偏差(平均±標準偏差) 単位 m

	AR	五輪	花
1m 地点	計測不可	計測不可	計測不可
1.2m 地点	0.01±0.00041	0.01±0.00072	0.01±0.00022
1.4m 地点	0.02±0.00024	0.02±0.00031	0.02±0.00023
1.6m 地点	0.04±0.00051	0.04±0.00033	0.03±0.00030
1.8m 地点	0.05±0.00061	0.05±0.00031	0.05±0.00040
2m 地点	0.07±0.00073	0.07±0.00049	0.07±0.00066

※1m 地点は図形パターンがカメラの画面内に納まらないため計測不可

ア. 図形パターンの検討に対する考察

いずれのマーカでもほぼ同じ精度で位置推定が実現されており、イベントに合わせた敷設図形パターンを採用することは十分可能であると言える。

イ. 正着制御のための図形パターンから得られる位置情報の精度に関する検証

照明条件が整えられた環境であり、図形パターンの観測が容易である実験ではあったが、以上の結果から下記の通り考察される。

- 横ずれなしの状況、つまり画像中心に図形パターンが得られている状況においては、レンズ歪も少なく良好な結果が得られた。
- 横ずれした際はレンズ歪による影響と図形パターンのアフィン歪との影響により、やや誤差が大きくなる傾向にある。
- カメラの高さ方向の推定は精度が非常に悪い。これは、離散化誤差の影響を最も受ける方向であるためであり、精度を向上させるには、図形パターンとカメラ光軸とをなるべく垂直に交わるように設置するか、路面に敷設する際はバス（カメラ）方向に対して長い図形パターンを採用するなどの考慮が必要となる。

実験の結果、おおよそ 20m 程度図形パターンに接近した状態でも誤差 1m 以内で位置推定が可能であり、図形パターンとの距離が 10m ほどに縮むと、誤差数 cm での位置推定は十分可能となると考えられる。

ウ. 屋外画像の CNN による学習を行い、位置推定への適用可能性を検証する。

降水、積雪、駐停車などの要因で路上に敷設された図形パターンが利用できない場合を想定して、バスベイ周辺の風景に基づく位置推定を検証する。車載カメラを想定して、バス前方の画像を模した画像を取得した。画像の取得には、市販のデジタルカメラを利用した。図 2.4-5 は、それらの一例を示している。



図 2.4-5 取得した画像の例

ここでは第一段階として、約 100 枚の画像を用意して、これら画像集合から当該バスベイ周辺風景の特徴を取り出すことを目的とした。今回の実験では、画像が約 100 枚と少なめで、また、段数を 2 としたこともあり、抽出された特徴としては非常に局所的なエッジまたはコーナーのみであり、位置を推定するのみ十分な特徴が抽出されたとは言えない。

位置を高精度に推定するためには、バスの前方のみにカメラを配置することは不十分であると考えされており、現在、側面にカメラを設置した想定で画像の取得を進めている（図 2.4-6）。前方、側面の双方の画像を適切に組み合わせて精度向上の可能性に関して検証を進めている。



図 2.4-6 カメラをバス側面に配置することを想定した画像

第3章 正着制御ロジックの検討

3.1 正着制御ロジックの検討

評価実験に用いる正着制御ロジックの基本構造を図 3.1-1 に示す。正着制御ロジックはFF(フィードフォワード)操舵制御部とモデルベース FB(フィードバック)制御部から構成される。FF 操舵制御部は正着を行う走行軌跡座標を走行するために、起点からの走行距離に対してあらかじめ決められた操舵角度を制御するものである。このFF用操舵角度はシミュレーションやドライバーの教師データをもとに決定される。

FF用操舵角の事例として、図 3.1-2 に正着用目標走行軌跡、図 3.1-3 にこの目標走行軌跡に対するドライバーの教師データを基に作成したFF 操舵角をしめす。

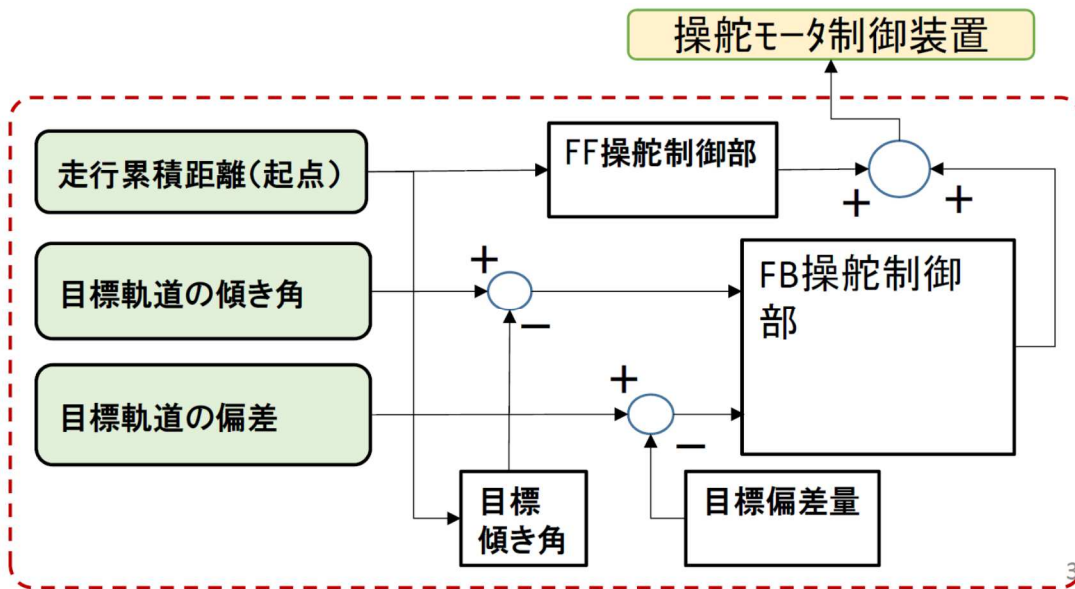


図 3.1-1 正着制御ロジック基本構造

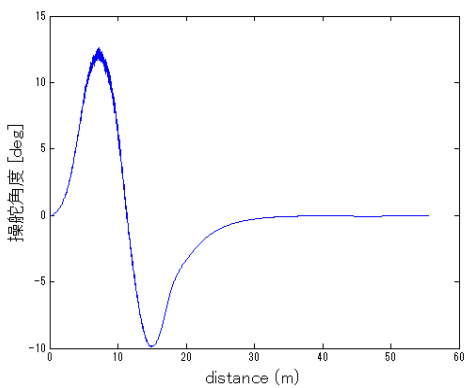


図 3.1-3 FF 操舵制御事例



図 3.1-2 正着用目標軌跡事例

一方モデルベース FB 制御では目標軌道との横方向誤差および FF 操舵量を決定する場合に決定される目標走行軌道を追従するための傾き角と実際の車両の傾き角の誤差をゼロにする様に操舵角度が制御される。操舵モータ制御装置にはモデルベースの FB 操舵制御量と FF 操舵制御量の合算した操舵量が出力される。

又、モデルベース FB 制御には目標軌跡を追従するためのパスフォロイング制御モデルを使用している。図 3.1-4 にパスフォロイング制御モデルの制御式を示す。

$$\theta = \frac{K_f l_f - K_r l_r}{K_f v} \gamma + \frac{Mv}{2K_f} \omega_c \quad \begin{cases} \omega_c = -K_2 e_2 v_r - K_3 \sin e_3 \\ v_r = v \cos e_3 \end{cases}$$

図 3.1-4 パスフォロイング制御モデル

ここで式中、M：車両重量、V：車両速度、 γ ：ヨーレート、Kf：コーナリングフォース係数、E2：横偏差量、E3：傾き角誤差、K2：横偏差 FB ゲイン、K3：傾き角誤差 FB ゲインである。K2、K3 は実車を用いて FB 制御を行い、誤差がゼロになるよう調整を行う。

3.2 シミュレーション検討

3.2.1 車両運動モデルの検討

走行車線から分進ないし幅寄せしてバス停縁石に横づけする車両操向制御のための横運動モデルについて検討する。バス停への接岸は、道路に張出しているテラス型バス停へ直進して接岸或いは離岸する場合を除き、必ず円弧を描き接岸或いは離岸するので車両前端（或いは後端）が描く軌跡と後車軸が描く軌跡の回転半径差を押さえること、その回転半径差が车速依存で変化することを押さえることが肝要である。バス停への接岸隙間が与えられると車体全長が弦の長さ、円弧の高さが接岸隙間に対応するから、车速依存で変化する回転半径差を押さえることができ、その回転半径の制御に適した車両運動モデルが求められる。連節バスでは回転半径に対応する連節角を伴うので、連節角をゼロにして接岸する接岸軌跡の検討が必要になる。车速依存で変化する連節角を制御する車両運動モデルが求められる。

車両の横運動は車両質量の横方向の慣性力とタイヤが発生する摩擦力のつり合い関係で決まる。慣性力は、車両質量と横加速度の積。横加速度は车速の二乗を回転半径で除した物理量である。タイヤの摩擦力は、コーナリングフォースと呼び、その力の大きさはタイヤが横方向に滑る速度を回転方向に進む速度で除した横すべり角に比例する。そのコーナリングフォースの立ち上がり勾配の大きさをコーナリングパワと呼び、コーナリングパワをタイヤ荷重で除した物理量をコーナリング係数（所謂、摩擦係数に相当）と呼ぶ。

ここでは、慣性力と摩擦力の“力のつり合い”で記述される運動モデルから、バス停縁石形状に沿うための軌跡を描く幾何モデルへ連続移行するモデルが求められる先ず車両運動モデルの単車モデル続いて連節車モデルについて以下に述べる。

(1) 車両運動モデルの単車モデル

前後 2 軸車の平面 2 自由度モデルを図に示す。車両前後方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とし、x 軸は前方が正、y 軸は左方が正、z 軸は上方が正として、その正方向に向かっての右回転を正とする所謂右手右ねじの法則に準拠する ISO 座標系を用いる。

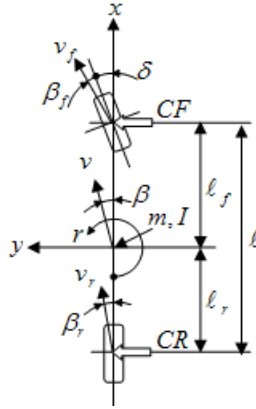


図 3.2.1-1 前後 2 軸の単車の平面 2 自由度モデル

横方向のつり合い式

$$mv(r + \dot{\beta}) + CF + CR = 0 \dots (1)$$

回転のつり合い式

$$I\dot{r} + CF \cdot l_f - CR \cdot l_r = 0 \dots (2)$$

補助方程式

$$CF = K_f \beta_f \dots (3)$$

$$CR = K_r \beta_r \dots (4)$$

$$\beta_f = \beta + l_f r/v - \delta \dots (5)$$

$$\beta_r = \beta - l_r r/v \dots (6)$$

ここに、 m は車両質量、 v は車速、 r は車両のヨーレート、 β は車両横すべり角、 β_f, β_r は前輪、後輪のタイヤ横すべり角、 CF, CR は前輪、後輪のコーナリングフォース、 K_f, K_r は前輪、後輪のコーナリングパワーである。

前軸のコーナリング係数を C_{cf} 、後軸のコーナリング係数を C_{cr} とし、前軸の軸重を N_f 、後前軸の軸重を N_r とすると、(3)(4)式は次のようになる。

$$CF = K_f \beta_f = C_{cf} N_f \beta_f \dots (7)$$

$$CR = K_r \beta_r = C_{cr} N_r \beta_r \dots (8)$$

(1)式に(5)～(8)式を代入する。

$$mv(r + \dot{\beta}) + C_{cf}N_f(\beta + \ell_f r/v - \delta) + C_{cr}N_r(\beta - \ell_r r/v) = 0$$

$$\{mv + C_{cf}N_f \ell_f/v - C_{cr}N_r \ell_r/v\}r + (mv)\dot{\beta} + (C_{cf}N_f + C_{cr}N_r)\beta - C_{cf}N_f \delta = 0 \dots (9)$$

(2)式に(5)～(8)式を代入する。

$$I\dot{r} + \ell_f C_{cf}N_f(\beta + \ell_f r/v - \delta) - \ell_r C_{cr}N_r(\beta - \ell_r r/v) = 0$$

$$I\dot{r} + \{C_{cf}N_f \ell_f^2/v + C_{cr}N_r \ell_r^2/v\}r + \{\ell_f C_{cf}N_f - \ell_r C_{cr}N_r\}\beta - \ell_f C_{cf}N_f \delta = 0 \dots (10)$$

式(9)と式(10)が導出した単車バスの運動モデルである。

バス停に横づけする際の車両の動きは車速依存で変化する(図 3.2.1-2)。車速上昇に伴い半径(R)の中心位置は前進し、それに伴い横すべり角(β)は正から負へと変化して走行軌跡が変化する。

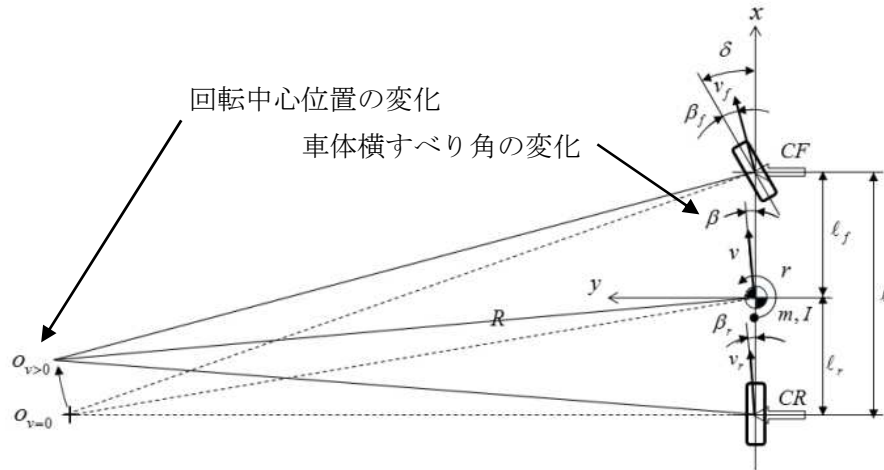


図 3.2.1-2 バス停に横づけするときの車両姿勢 (β) と回転半径 (R)

式(9)と式(10)の加速度項 $\dot{\beta}$ と \dot{r} をゼロとおいて整理すると式(11)および式(12)になる。

$$\beta = \frac{\frac{\ell_r}{l} + \frac{\ell_f \ell_r}{l^2} - m \frac{\ell_f}{C_{cr}N_r l^2} v^2}{1 + m \frac{C_{cr}N_r \ell_r - C_{cf}N_f \ell_f}{C_{cf}N_f C_{cr}N_r l^2} v^2} \delta \dots (11)$$

$$R = \left(1 + m \frac{C_{cr}N_r \ell_r - C_{cf}N_f \ell_f}{C_{cf}N_f C_{cr}N_r l^2} v^2 \right) \frac{l}{\delta} \dots (12)$$

バス停接岸軌跡は、車速を式(12)の回転半径で除した値(ヨーレート)の積分値と式(11)の車体横すべり角の和を積分して、その余弦成分が前後方向、正弦成分が横方向への位置変化として求められる。

(2) 車両運動モデルの連節車モデル

連節車の定常円旋回は図 3.2.1-3 になる。図 3.2.1-3 の連節角 δ_{12} を図 3.2.1-2 の実舵角 δ と見做すと“単車・連節車の相似モデル”になる。即ち、“連節角 δ_{12} を制御して、後車両の軌跡を算出するモデル”になる。

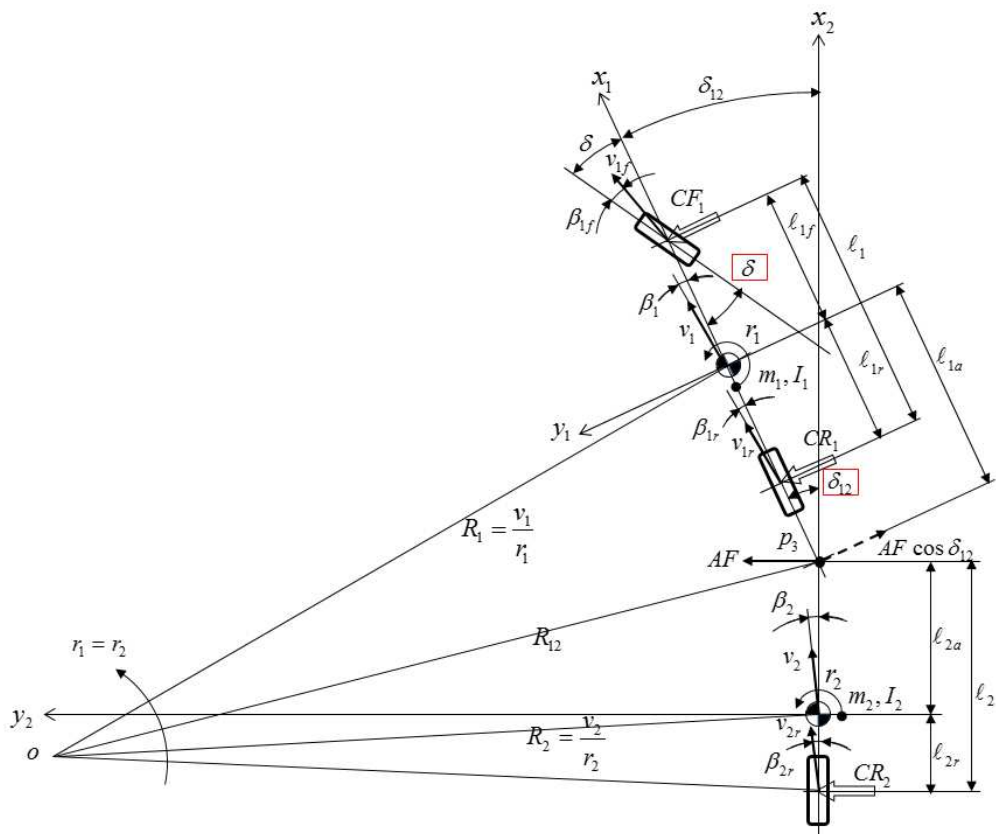


図 3.2.1-3. 連節車の定常円旋回

前車両と後車両の連節点（ p_3 ）に、後車両から旋回横力が作用するから、前述の単車モデルの後部に連節点横力を加えると前車両の運動モデルになり、単車モデルの前輪コーナリングフォース（CF）を連節点横力に置換すると後車両の運動モデルになる。前車両と後車両それぞれの回転半径（ R_1 、 R_2 ）と横すべり角（ β_1 と β_2 ）は単車に準じて導出される。後車両の回転半径 R_2 を与えると、後車両の横すべり角（ β_2 ）が式(13)、前車両の回転半径（ R_1 ）が式(14)、横すべり角（ β_1 ）が式(15)、実舵角（ δ ）が式(16)になり、連節角（ δ_{12} ）が式(17)になる。

$$\beta_2 = \left(\ell_{2r} + \frac{m_2 v_2^2 \ell_{2a}}{C_{2r} N_{2r} \ell_2} \right) \frac{1}{R_2} \dots (13)$$

$$\frac{1}{R_1} = \frac{\frac{m_2 v_2^2 \ell_{2r}}{\ell_2} - C_{1r} N_{1r} \frac{m_2 v_2^2 \ell_{2r}}{C_{1r} N_{1r} \ell_{1r} \ell_2} \ell_{1a}}{C_{1r}^2 N_{1r}^2 \ell_{1r} - C_{1r} N_{1r} \ell_{1r} + m_1 v_2^2} \frac{1}{R_2} \dots (14)$$

$$\beta_1 = \frac{\frac{m_2 v_2^2 \ell_{2r}}{\ell_2}}{C_{1r} N_{1r} + \left(-C_{1r} N_{1r} \ell_{1r} + m_1 v_2^2 \right) \frac{C_{1r} N_{1r} \ell_{1r}}{C_{1r} N_{1r} \ell_{1r}^2 + \frac{m_2 v_2^2 \ell_{2r}}{\ell_2} \ell_{1a}}} \frac{1}{R_2} \dots (15)$$

$$\delta = \ell_{1f} \frac{1}{R_1} + \beta_1 \dots (16)$$

$$\delta_{12} = \ell_{1a} \frac{1}{R_1} - \beta_1 + \ell_{2a} \frac{1}{R_2} + \beta_2 \dots (17)$$

3.2.2 目標軌跡を辿るための実舵角と操舵角の算出

操舵系の線形モデルは図 3.2.1-4 になる。このモデルの運動方程式は式(18)になる。

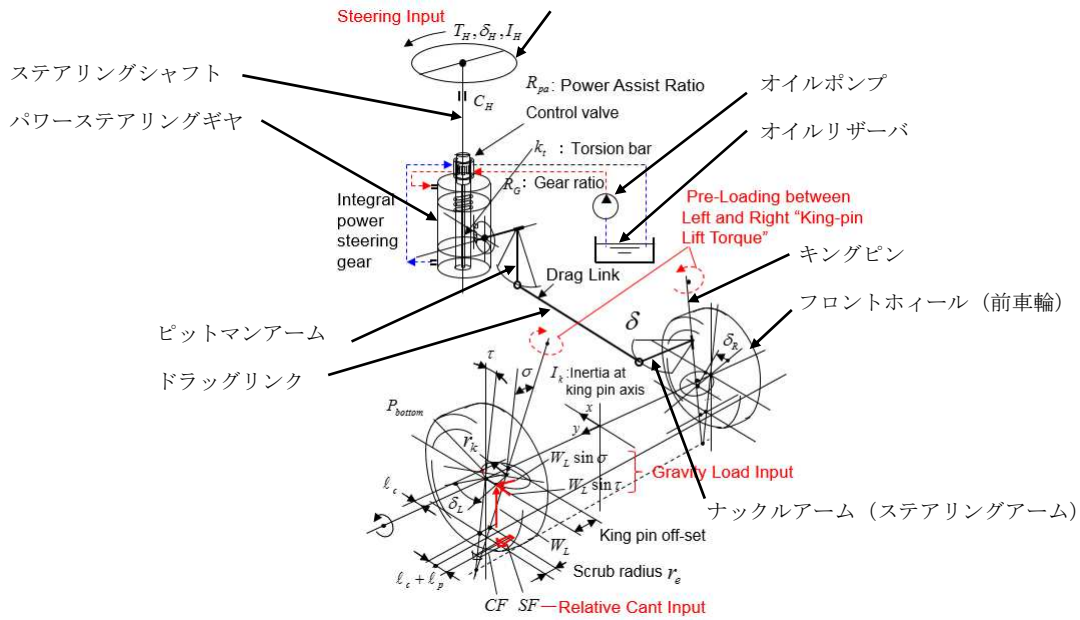


図 3.2.1-4. 操舵系のモデル

$$\begin{aligned}
\ddot{\delta} = & \frac{1}{I_k}(\ell_c + \ell_p)K_f\beta_f + \frac{1}{I_k}(\ell_c + \ell_p)K_f\ell_f\frac{1}{v}\cdot r - \frac{1}{I_k}C_{kp}\dot{\delta} \\
& + \frac{1}{I_k}\left\{(\ell_c + \ell_p)K_f - R_G^2k_t(1 + R_{pa}) + R_kW_f\sqrt{CA^2 + KA^2}\right\}\delta \\
& + \frac{1}{I_k}R_Gk_t(1 + R_{pa})\delta_H \\
& + \frac{1}{I_k}W_f\left\{(\ell_c + \ell_p) - R_k\sqrt{CA^2 + KA^2}\frac{CA}{KA}\cdot RTF\right\}\xi \dots\dots(18)
\end{aligned}$$

ここに、

I_k :キングピンまわり慣性モーメント

ℓ_c :前輪のキャストトレール

ℓ_p :前輪タイヤのニューマチックトレール

ℓ_f :車両重心から前軸までの距離

K_f :前輪タイヤコーナリングパワ

β_f :前輪タイヤ横すべり角

r :ヨーレイト

v :車速

C_{kp} :キングピンまわり減衰係数

k_t :パワーステアリングのトーションバのねじりばね定数

R_G :パワーステアリングギヤのギヤレシオ

δ :前輪実舵角

δ_H :ハンドル角

R_{pa} :パワーステアリングのパワーアシスト比

R_k :前輪タイヤオフセット

W_f :前軸荷重

CA :キャスト角

KA :キングピン角

RTF :左右輪間の荷重移動率

ξ :相対カント角 (道路のカント角に道路曲率と車速の影響を考慮した相対値)

式(18)の $\beta, \frac{r}{v}, \dot{\delta}, \delta, \delta_H, \hat{\xi}$ の各変数の定数項をくくって簡単記述すると式(19)(20)になる。

$$\ddot{\delta} = a_{\beta}\beta + a_r \frac{r}{v} - a_{\delta 1}\dot{\delta} + a_{\delta 2}\delta + a_{\delta H}\delta_H + a_{\xi}\hat{\xi} \dots\dots(19)$$

$$\delta_H = \frac{1}{a_{\delta H}} \left(\ddot{\delta} + a_{\delta 1}\dot{\delta} - a_{\delta 2}\delta - a_{\beta}\beta - a_r \frac{r}{v} - a_{\xi}\hat{\xi} \right) \dots\dots(20)$$

定常円旋回とし、路面の傾斜(カント)を無視すると式(20)は式(21)になる。

$$\delta_H = \frac{1}{a_{\delta H}} \left(-a_{\delta 2}\delta - a_{\beta}\beta - a_r \frac{r}{v} \right) \dots\dots(21)$$

式(21)に実舵角 δ 、横すべり角 β 、ヨーレイト r を代入して δ_H を求めて、これを制御目標ハンドル角とする。

3.2.3 モデルの実車同定

(1) バス停への接岸目標軌跡と実際

バス停への接岸隙間が与えられると車体全長が弦の長さ、円弧の高さが接岸隙間に対応する(図 3.2.3-1)。連節バスでは、回転半径に対応する連節角を伴うので連節角をゼロにする接岸軌跡の検討が必要になる。

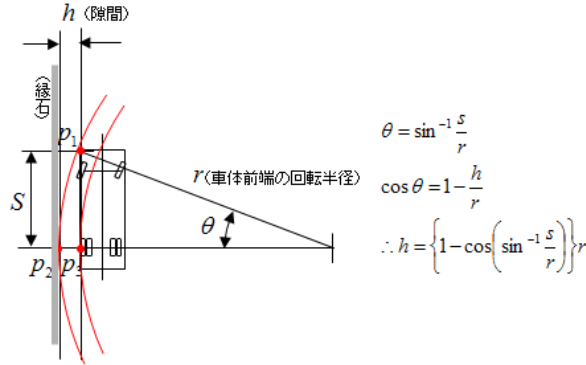
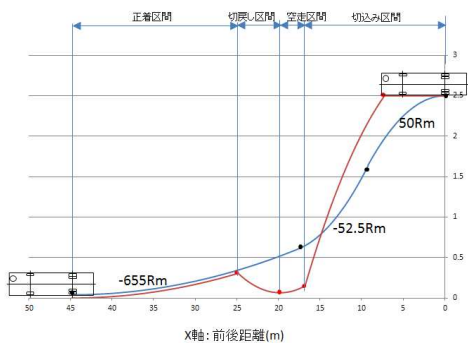
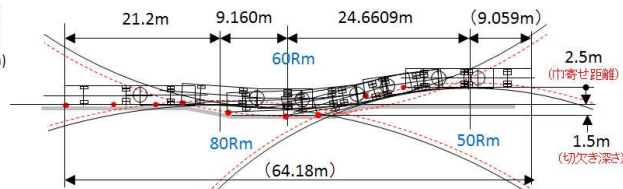


図 3.2.3-1 バス停縁石とバス車体との隙間と回転半径の関係

図 3.2.3-2 に単車バスの場合と連節バスの場合の“バス停への接岸目標軌跡の決まり方”を示す。単車の場合には図 3.2.3-1 から目標隙間を 4cm に置くと回転半径は 655Rm になる。その回転半径に走行車線から巾寄せして乗移る。その際の車速を 20km/h とし横加速度を不快を感じないとされる 0.06G 以下に抑えると、巾寄せ軌跡の曲率半径は 50Rm になる。図 3.2.3-2 の(1)の青線が後軸左輪の接岸軌跡になり、その後軸左輪に対応する車体前部左端の軌跡は茶線になる。連節車の場合、巾寄せ軌跡の曲率半径は単車と同じであるが、連節角をゼロにして接岸する必要から後車両の後軸左輪の軌跡を縁石延長線に沿わせる必要がある。そのため前車両は縁石内側に入り込む必要があり、前車両の前部左端との干渉を避けるための縁石切欠きが必要になる。この縁石切欠きに前車両の前部を入れて抜け出る過程で後車両と整列して連節角ゼロになる。図 3.2.3-2 の(2)になる。縁石切欠きの傾斜線に接岸するクサビ型のバス停もある。



(1) 単車バスの接岸軌跡の決まり方



(2) 連節バスの接岸軌跡の決まり方

図 3.2.3-2 バス停への接岸軌跡の決まり方

図 3. 2. 3-2 (2) の連節バスの軌跡の実車同定結果を図 3. 2. 3-3 に示す。青線が後車両の後軸左輪の軌跡、赤線が前車の前部左端の軌跡である。2.5m 巾寄せして 1.5m の切欠き部に入り抜け出して赤線・青線が整列して停車している。バス停侵入開始位置から停車位置までの距離が 65m になった。目標軌跡と実車軌跡との整合が確認された。

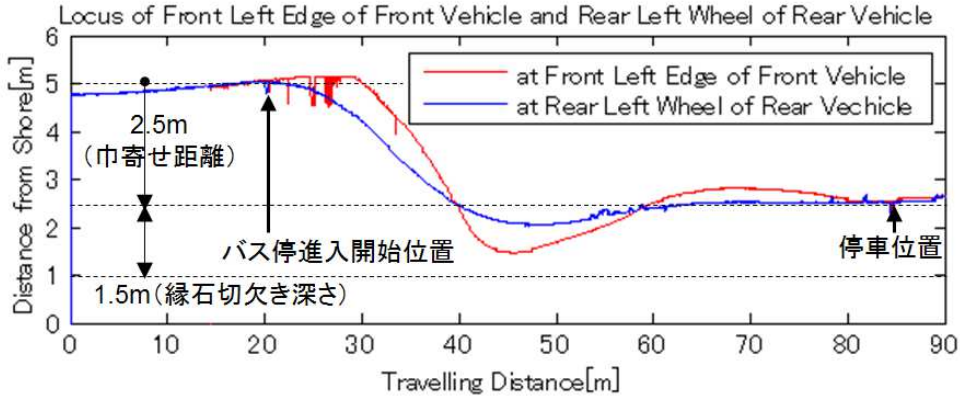


図 3. 2. 3-3 連節バスの接岸軌跡の実験同定結果

(2) シムリンクモデルの作成

導出した車両運動モデルの実車整合性を検討するためのシムリンクモデル（連節バス）を図 3. 2. 3-4 に示す。3. 2. 1 の (2) で導出した車両モデルに実車の対地速度、ヨーレイトを代入して、モデルに実車と同じ実舵角、連節角が生じて実車と同じ軌跡を描くかを検討するシムリンクである。図 3. 2. 3-3 に示した実車の軌跡とモデルの軌跡を比較照合して、モデルと実車との整合性を検討するシムリンクモデルである。

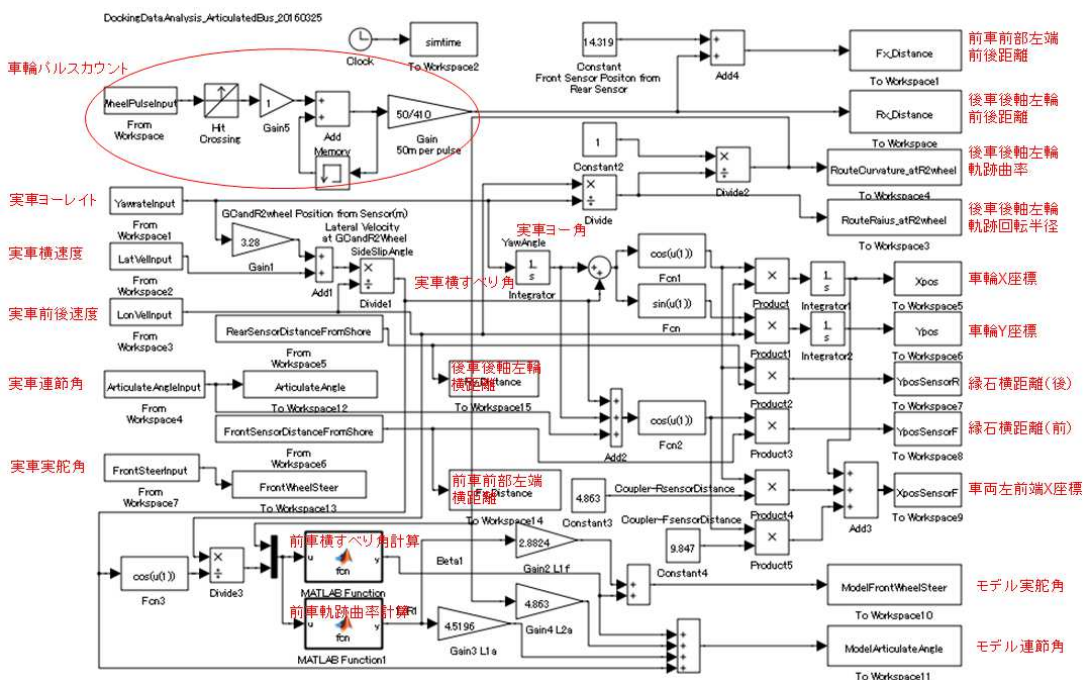


図 3. 2. 3-4 バス停への接岸軌跡の実車同定シムリンクモデル（連節バス）

3.2.4 正着制御シミュレータの製作

正着制御は、フィードフォワード制御とフィードバック制御との組み合わせにより実現される。正着制御におけるセンサなどの制御システムを構成する機器の応答性や精度、機能等の要求仕様を策定するため、MATLAB Simulink を用いて車両運動モデル、制御モデル、道路モデルから構成される自動運転シミュレータを設計した。また、フィードフォワード制御量（正着のための操舵角度）については、実際の車両の運転結果から設計する手法と、シミュレーションにより設計する手法がある。ここでは、正着のための操舵角度をシミュレーションにより設計するため、3.2.1 項で設計された車両運動モデルを利用したシミュレータの設計を行った。

正着制御では、車両運動の詳細モデルを基に設計された操舵制御モデルを用いる。操舵制御モデルでは、車両運動モデルとして図 3.2.4-1 に示すような等価二輪モデルを用いる。ここで、横すべり角は実測できないため、ヨーレートセンサなどから推定する必要があるが、この値は誤差を含み制御性能に悪影響を与えるため、この値を用いる必要がなくなるという利点がある。そのため、操舵制御においては、横すべりなしの等価二輪モデルを用いる。

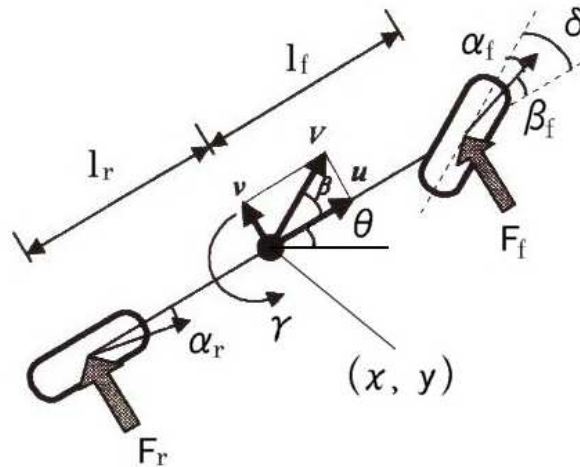


図 3.2.4-1 等価二輪モデル

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

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

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

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

操舵制御系は、Path Following 制御の概念に従っている。Path Following 制御とは、仮想的に設けられた参照軌道上を走行する参照車両の描く軌跡を実車両に追従させる制御である。これは緊急時などにも対応するため、操舵制御系と速度制御系を分離するためである。参照車両の車両モデルを等価二輪モデルとすると、図 3.2.4-2 のように参照車両から実車両を見たときの絶対座標及び偏向角として e_1 、 e_2 、 e_3 を定義すると次式のようにになる。但し、添字の r が付いているものが参照車両における各種の変数を表す。

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

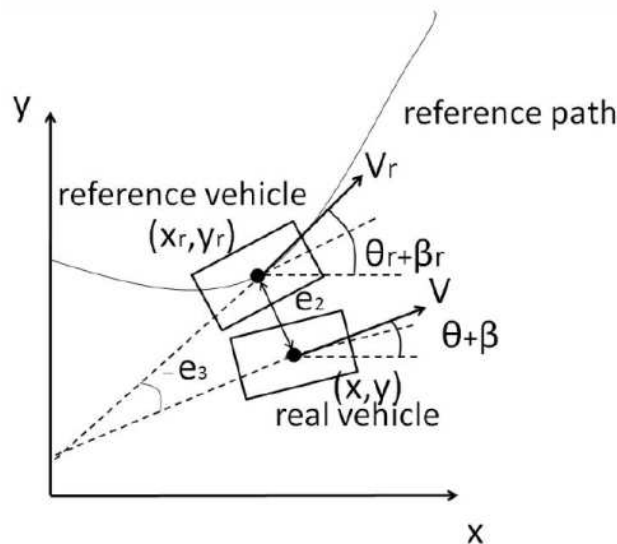


図 3.2.4-2 Path Following 制御

また、 e_1 、 e_2 、 e_3 の時間微分は次式のようにになる。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

シミュレータの設計は、図 3.2.4-3 のように 3.2.2.1 項で記述した車両運動モデルと式 (8) の操舵制御部を連結することにより行っている。本シミュレータでは、レーダ系のセンサを追加したり、MATLAB Simulink のツールボックスを利用したりすることにより、高精度な正着制御シミュレータを構築した。また、正着制御シミュレータでは、実車挙動の再現に向けてハンドルと実タイヤ角に関するモデルを組み込んだり、実験車両の情報をパラメータに反映したりするなどの改良を行った。

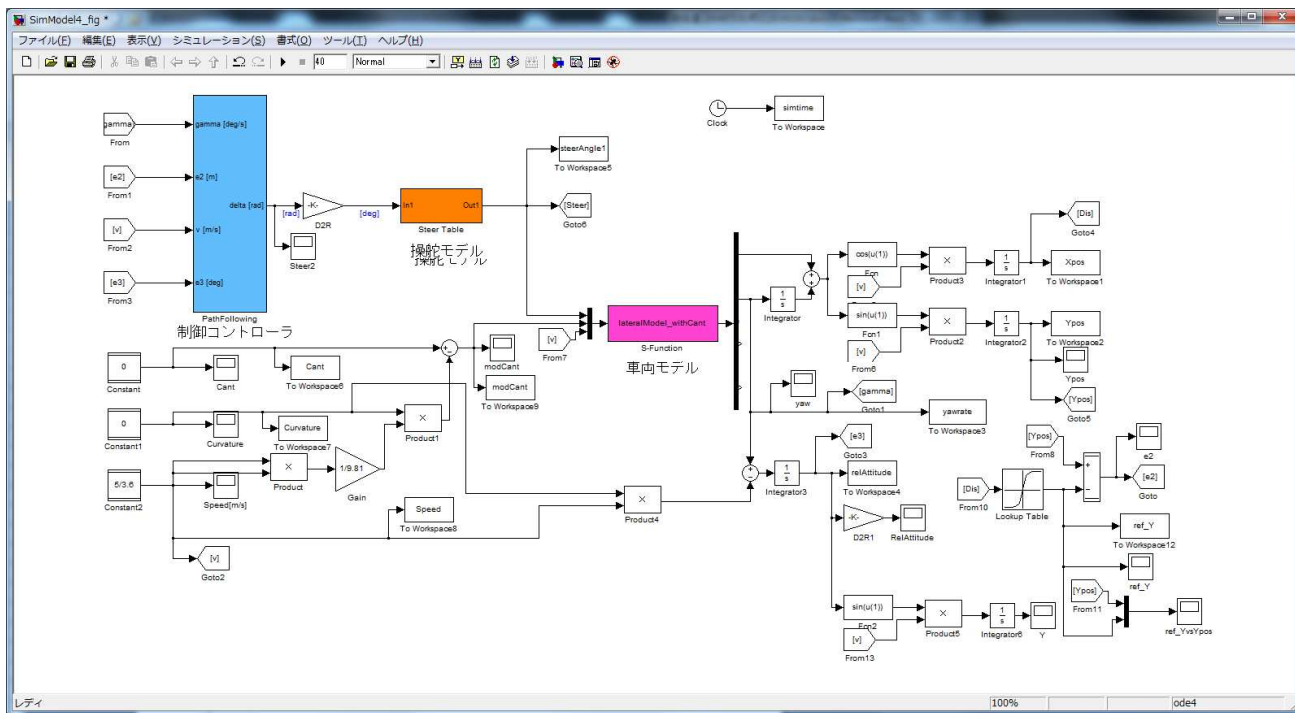


図 3.2.4-3 正着制御用シミュレータ

3.2.5 シミュレータによる操舵角度の算出

本稿では、設計したシミュレータを用いたフィードフォワード制御量となる操舵角度の算出について述べる。通常のフィードフォワード制御とフィードバック制御を組み合わせた制御では、モデル化誤差や外乱などの影響により生じたフィードフォワード制御の誤差に対して、フィードバック制御による補正を行う。フィードフォワード制御の設計については、3.2.4項で述べたように実車を用いた計測実験結果や幾何的に求めた値を用いるのが一般的である。ここで、目標軌跡に対してフィードフォワード制御を用いず、フィードバック制御だけを用いたシミュレーションの結果からフィードフォワード制御量となる操舵角度を求める手法を提案する。フィードバック制御では、誤差が生じて初めて修正のための操舵が入力されるため、位相については遅れが生じるが、誤差に対する修正操舵量および波形については正しい操舵角度に近くなるものと想定する。今回、正着制御において想定した目標軌跡を図3.2.5-1に示す。

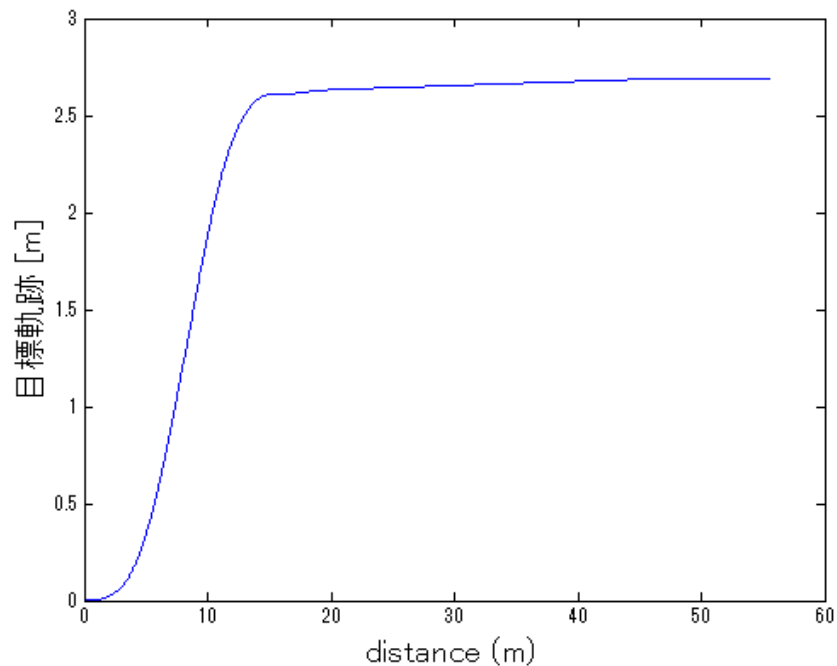


図 3.2.4-1 正着のための目標軌跡

図 3. 2. 5-1 の目標軌跡に対してフィードバック制御のみを用いた場合の走行軌跡を目標軌跡と合わせて図 3. 2. 5-2 に示す。また、このときの制御入力となる操舵角度を図 3. 2. 5-3 に示す。さらに、実車を用いて、同様の軌跡に対して正着を行った時の操舵入力の結果を図 3. 3. 5-4 に示す。

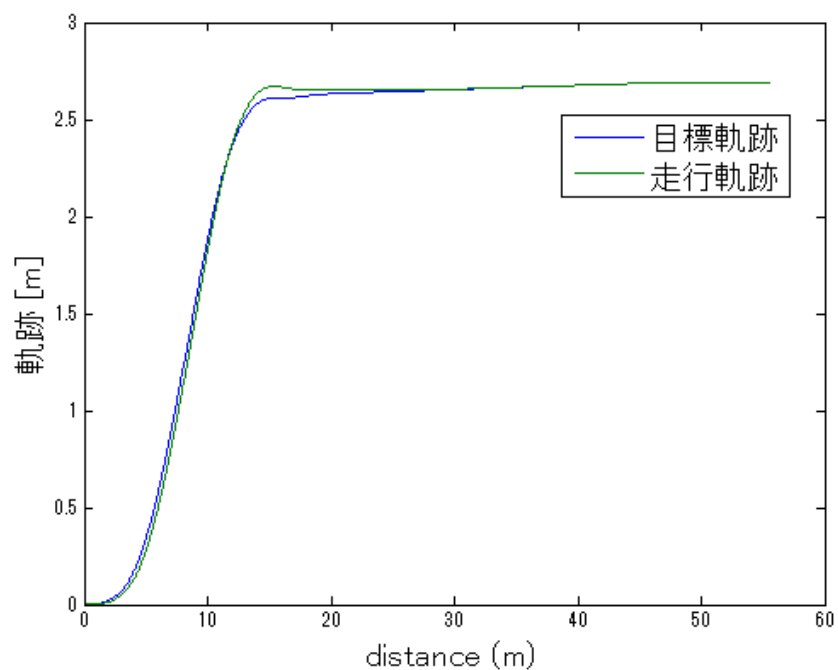


図 3. 2. 5-2 シミュレーション結果 (目標軌跡と走行軌跡)

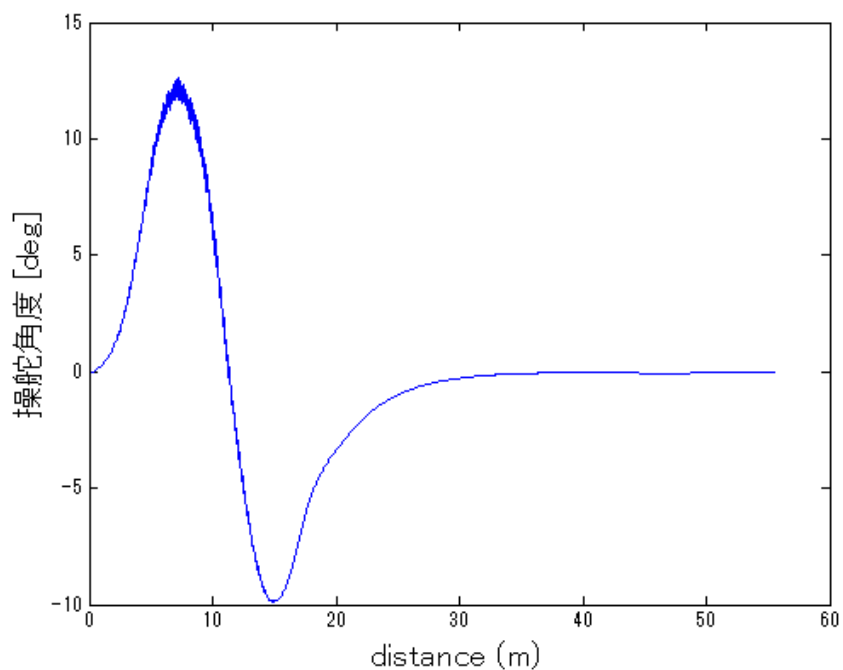


図 3. 2. 5-3 シミュレーション結果 (操舵入力)

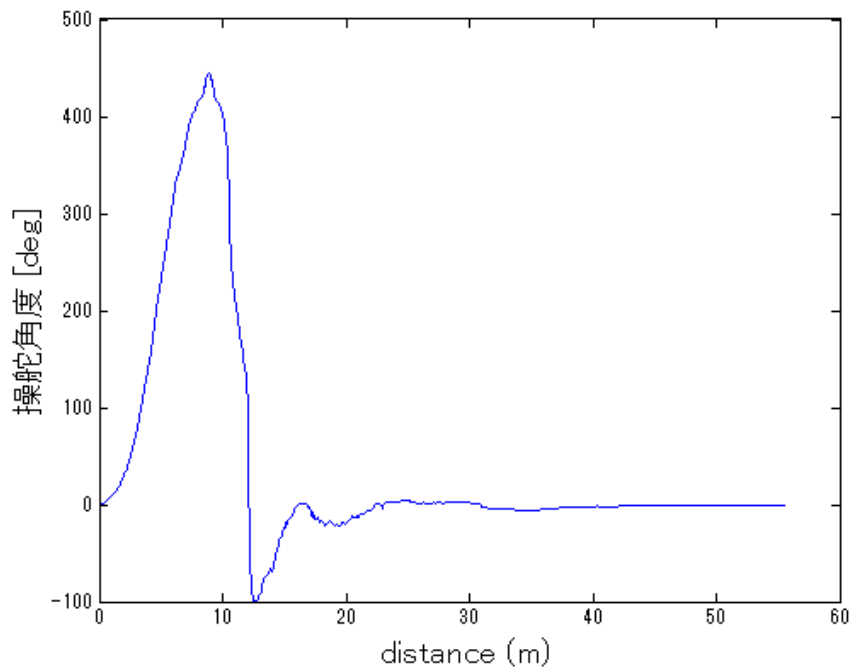


図 3.2.5-4 実車走行実験の結果（操舵入力）

図 3.2.5-3 および図 3.2.5-4 を比べると、操舵角の絶対量については違いがあるものの、同様の波形であることが確認できた。絶対量の誤差については、実車の運動モデルの各パラメータに対する同定実験前であったため、今回のシミュレーションでは式(8)の K_f の値を予想値を採用したことによるモデル化誤差が影響していると考えられる。今後、同定実験のパラメータを反映させることで、シミュレーションにより正しいフィードフォワード制御量を設計できることが期待される。

第4章 正着評価

4.1 実験車の概要

日野自動車株式会社殿が保有する自動走行実験車（単車バス・連節バス）を用いて正着制御を行うため、ソニー株式会社及び弘前大学にて検討した白線認識装置等を組み込んだ正着制御実験車を製作した。

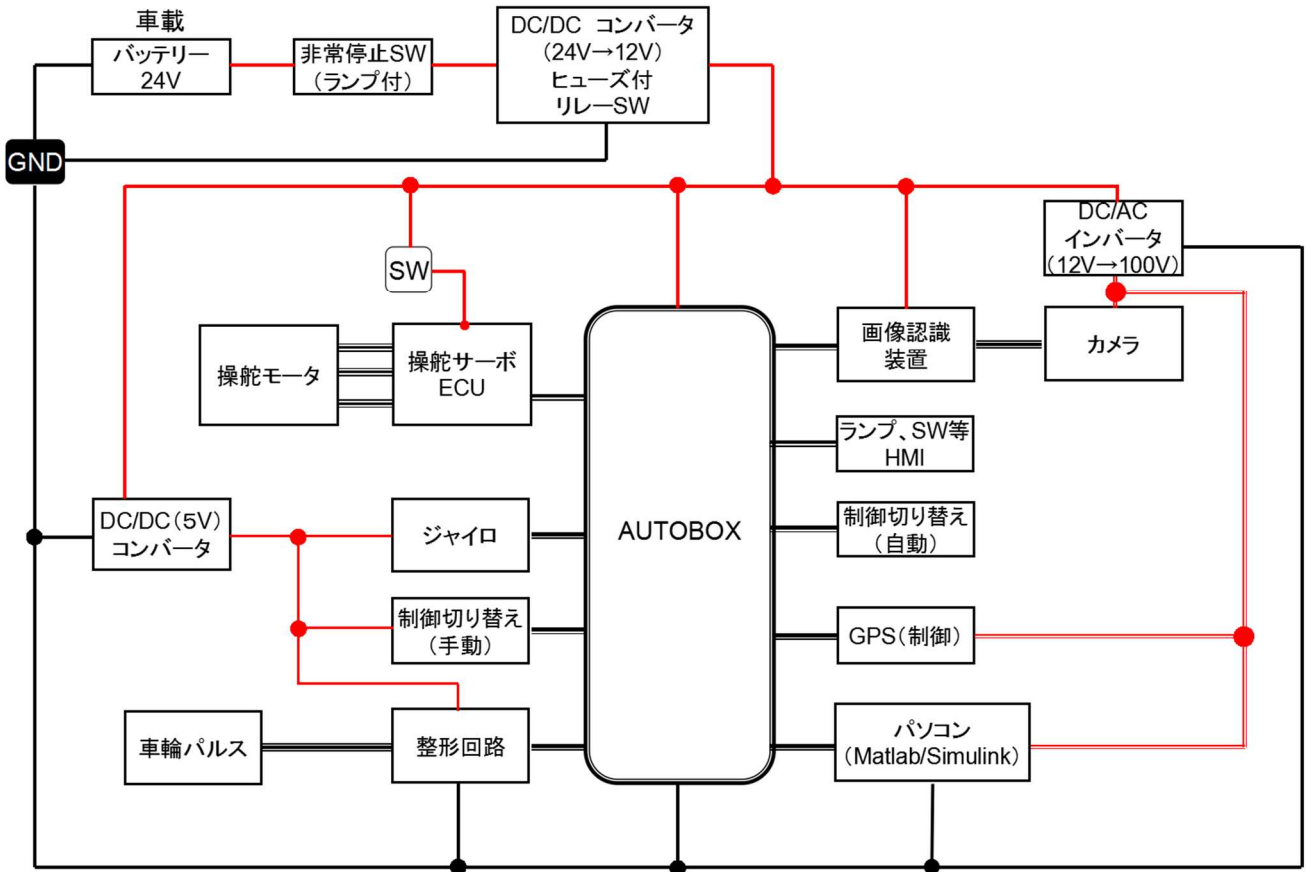


図 4.1-1 システムの構成概要図

実験車に搭載した正着制御システムの構成概要図を図 4.1-1 に示す。自動運転に必要なとなる、入力情報（白線認識カメラ及び画像処理装置、GPS 等による位置情報、車両情報等）、操舵アクチュエータ及びコントローラにより制御システムを構築する。正着制御コンピューターは dSPACE 社の AUTOBOX を用いる。また、Mathworks 社の Matlab/Simulink を用いて、制御ソフトを設計する。本システムでは、MATLAB/Simulink で設計された制御モデルのブロック線図を AUTOBOX にコンパイルしておき、各種センサから得られる情報より操舵制御に必要な制御指令値を計算し、CAN を通じて操舵 ECU へと制御指令値が送られ、操舵制御を行う。

dSPACE 社の AUTOBOX は処理の役割を担うプロセッサボード及び必要の I/O ボードから構成される。表 4. 1-1 に AUTOBOX の構成及び説明を示す。

表 4. 1-1 AUTOBOX の構成

ボード	用途	基本仕様・特長	備考
DS1005	プロセッサ	<ul style="list-style-type: none"> 動作周波数 1GHz Simulink 完全サポート PHS バスで高速接続 最大 18 割り込み可 	<ul style="list-style-type: none"> 処理 CPU
DS5001	I/O パルス解析	<ul style="list-style-type: none"> 時間分解能 25ns サンプルリングレート最大 40MHz パルス幅：25ns～53.68s パルスの周期・波数の取得 	<ul style="list-style-type: none"> 車速パルス
DS4201S	I/O シリアル	<ul style="list-style-type: none"> RS232C、RS422、RS485 対応可 クロック周波数：最高 24MHz パリティビット：偶数・奇数・なし チャンネル×4 	<ul style="list-style-type: none"> 画像処理装置の入力（白線偏差） GPS
DS4302	I/O CAN	<ul style="list-style-type: none"> コントロールプロトタイプ 独立チャンネル×4 J1939 規格対応 	<ul style="list-style-type: none"> 操舵 ECU ジャイロ入力
DS2201	I/O A/D D/A	<ul style="list-style-type: none"> 独立型 A/D コンバータ×20 D/A コンバータ×8 デジタル I/O ×16 10 ビット分解能 	<ul style="list-style-type: none"> 制御開始指令 HMI

DS1005 は動作周波数 1GHz の PowerPC 750GX プロセッサを搭載している、PHS 及び PHS++バス経由で複数の I/O ボードに直接接続が可能ということである。DS1005 は Real-Time interface 経由で、Matlab/Simulink から簡単にプログラミングができる。また、マルチプロセッサシステムの設定も専用の RTI-MP ブロックにて可能となる。ソルバーオプションやシミュレーション時間などのシミュレーションパラメータを変更するダイアログや C コードを生成するプログラムには、Simulink 環境から直接アクセスができる。従って、今回のシステムは、Matlab/Simulink においてシステムを作成、Simulink から AUTOBOX の専用コードを生成し、DS1005 にプログラミングするという仕組みである。

プロセッサボード DS1005 以外に、実験車に使用する I/O ボードは DS5001、DS4302、DS4201、DS2201 が含む。DS5001 は 25ns の分解能でデジタル信号を取得できる 16 の入力チャンネルを備えている。ボードは各信号の立ち上がりエッジと立ち下がりエッジとして取得するため、車速パルス等のデジタル信号の周波数、位相、デューティ比等の取得することで、車速の検出ができる。DS4302 は独立した 4 チャンネルの備えた CAN 通信ボードである。本システムにおいて、主に操舵 ECU との通信に使用する。今後はジ

ジャイロセンサ等の使用も予定している。DS4201-S は AUTBOX と外部デバイス間のシリアル通信（RS232C、RS422、RS485 等）用 I/O ボードである。シリアル通信方式はボードにあるそれぞれのドライバーICにより設定できる。本システムにおいて、主に画像認識装置や GPS との RS232C の通信方式を使用している。DS2201 はアナログ入力（A/D）及びアナログ出力（D/A）の I/O ボードである。それぞれは独立した 16 チャンネルと 8 チャンネルが有する。A/D ボードは HMI において、制御開始指令等に用いる。D/A ボードは HMI において、自動制御の状態、警告、指示等の出力に用いる。

4.1.1 単車バス

(1). 単車バスの概要

単車バスは都市型の大型路線バスの実営業車を用いている。図 4.1.1-1 に実機の外観を示す。乗降扉は前扉（引扉）及び中扉（グランドスライド扉）であり、前乗・中降の乗降方式である。



図 4.1.1-1 使用実機外観（単車）

図 4. 1. 1-2 に単車バスの寸法図を示す。車体全長は 10525[mm]、車幅は 2490[mm]、ホイールベースが 4800[mm]である。また、旋回軌跡図は、直角に旋回する際に必要な道路幅を示す。

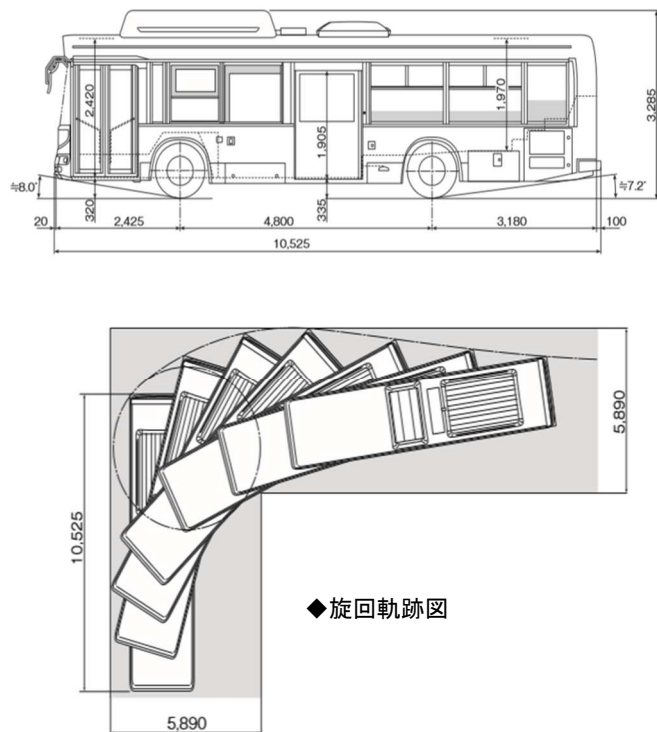


図 4. 1. 1-2 使用実機寸法及び旋回軌跡図（単車） 出典：日野自動車株式会社 HP

http://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve_63hu.pdf

(2) システムの構成

図 4.1.1-3 に実験車の搭載システムを示している。まず、長さ 1500mm、幅 600mm のラックを三段に分ける。最下段に DC/DC コンバータ、DC/AC インバータ、予備バッテリー等の電源関係装置を設置し、中段に AUTOBOX、整形回路、DC/DC コンバータ (5V)、画像認識装置からなる制御システムを設置し、最上段に各種センサ、液晶表示器等を設置している。



図 4.1.1-3 実験車の搭載システム

搭載システムは車載用であるために、電源が 12V 要されるので、バスの 24V 電源から DC/DC コンバータを用い、12V へ変換して供給する。DC/DC コンバータは独立の 2 系統があり、2 系統とも 12V・60A の容量を持っている。また、12V を DC/AC インバータを用いて AC100V の電源へ変換する。画像処理装置は 12V 仕様の小型車載画像工業 PC を用いている。カメラからの画像を画像処理装置に入力し、画像認識ソフトを用い、白線を認識したうえ、白線位置を検出し、車線偏差を計算する。さらに、計算された車線偏差を制御システムへ入力し、自動操舵させる。また、測位精度の性能検証のために、高精度な測位を行う義損の RTK-GPS を装置も購入し、AUTOBOX へ位置情報を入力するという構成である。

図 4.1.1-4 に制御システムのパネスを示す。上図はコネクタパネルの設計図であり、下図は実際の製作物である。第一本目は電源スイッチ及び動作ランプとなる。左から、AUTOBOX のメイン電源スイッチ、操舵 ECU の IG 信号のスイッチ、画像処理装置の電源スイッチ、5V の電源スイッチ及び制御起動の信号スイッチという順に、設計してある。2 本目から 4 本目は AUTOBOX の I/O ボードのインタフェースパネルとな

る。2本目は車輪パルスを取得するDS5001ボードのインターフェースであり、3本目は画像認識装置からの出力を入力するシリアル通信及び操舵ECUのCAN通信パネルである。4本目は、アナログ入力及びパラレルアナログ出力パネルである。最後に、12V電源の入力コネクタ及び5V電源の供給端子台も設けている。

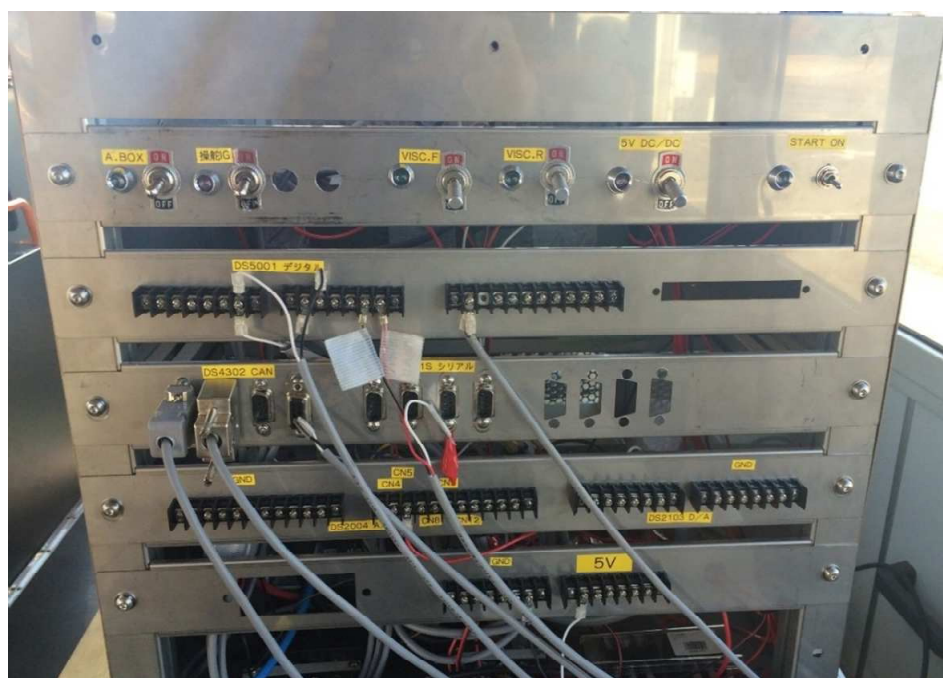
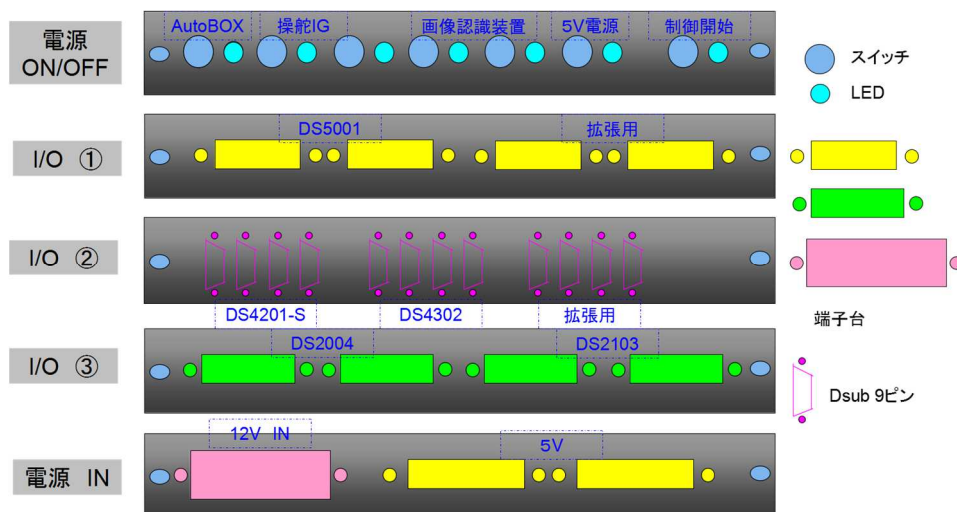


図 4.1.1-4 コネクタパネル

(3) 操舵アクチュエータ

本システムは、センサから得られる情報を用い、操舵に必要な制御指令値を計算し、CAN 通信により、操舵制御装置（操舵 ECU）へ制御指令値が送られ、ステアリング部に取り付けられたモータを制御することにより、自動操舵制御を行うことを想定している。そのため、従来の車両のコラムを取外し、モータ付きのコラムをステアリング部に取り付けを行った。



図 4.1.1-5 取り付けの様子

実際に取り付けした様子は図 4.1.1-5 に示した。操舵 ECU の電源は DC/DC コンバータよりの 12V を用いる、リレー及び IG 信号は AUTOBOX のコネクタパネルの IG コネクタにつながり、SW 操作によりモータとの通信を開閉する。9 ピン D_SUB の制御信号はコネクタパネルの CAN コネクタにつながり、AUOBOX の I/O ボード DS4302 と通信する。

(4) カメラ取り付け

本システムでは、公共交通である ART 正着制御検討手法の一つとして、カメラから正着誘導マーカである白線を認識し、位置を検知したうえ、車体との偏差を算出する。この偏差を用いて FB 操舵制御による正着方式である。白線誘導マーカによる正着制御方式は白線の認識位置について、車体側面より真下検知及び前方検知という二方式を検討することを想定したが、側面に取り付けた場合に、正着の要求されている精度 ($4\text{cm}\pm 2\text{cm}$) では、白線の検知ができなくなるので、本システムでは車体前方検知という方式でカメラを取り付けした。

前方検知カメラより白線誘導マーカ方式においては、カメラはダッシュボードの上に、車体中心付近位置に設置し、前方 5m 先が検知できるように俯瞰的に画角を調整します。また、HDR カメラの性能を評価するために、HDR カメラ及び既存の NTSC カメラ共に取り付けした。図 4.1.1-6 に示す。



図 4.1.1-6 HDR カメラ及びNTSC カメラの取り付け例

図 4.1.1-7 に取り付けしたカメラの画像一例を示す。



図 4.1.1-7 カメラ画像の一例

4.1.2 連節バス

(1) 連節バスの概要

ステアリングアクチュエータ及び走行制御システムを有する連節バス実験車を用いて、正着制御で検討した白線認識装置を組み込んで、正着制御実験車を製作した。

実験車は全長 18m の車体 2 連の連節バスである。先頭車両の後方に連節関節を用いて後方車両と連結された構造で、先頭車両が前後 2 軸、中間及び最後部の車両は後方 1 軸となっている。エンジンの配置は、先頭車両の床下にミッドシップエンジンとして置き後部車両を牽引するものと、最後部車両にリアエンジンがある。また、最後部車両にエンジンが設置された車両の場合、内輪差が通常のバスよりも大きいと、交差点などで旋回時に接続バスの旋回の内側に入る時は注意を要するという特徴がある。

(2) システムの構成

図 4.1.2-1 に実験車の構成を示している。単車と同様に、制御システムの入力情報として、車両情報はジャイロセンサや車輪パルスセンサから取得する。また、白線誘導マーカを検知し、位置情報を取得するために、車前方に白線認識カメラを取り付けた。車の先頭車両に正着制御システムを配置する。

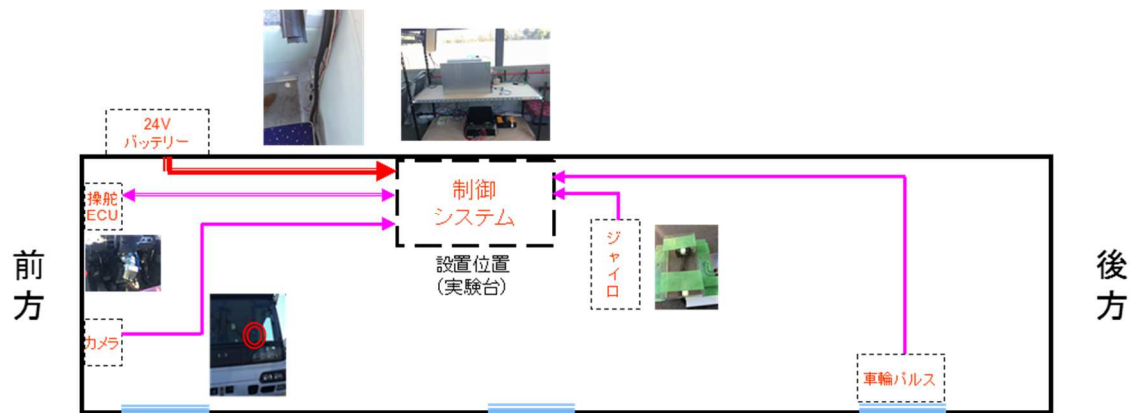


図 4.1.2-1 実験車の構成

図 4.1.2-2 に示すように、搭載システムは車載用であるために、電源が 12V 要されるので、バスの 24V 電源から DC/DC コンバータを用い、12V へ変換して供給する。また、12V を DC/AC インバータを用いて AC100V の電源へ変換する。画像処理装置は 12V 仕様の小型車載画像工業 PC を用いている。カメラからの画像を画像処理装置に入力し、画像認識ソフトを用い、白線を認識したうえ、白線位置を検出し、車線偏差を計算する。さらに、計算された車線偏差を制御システムへ入力し、自動操舵させる。また、測位精度の性能検証のために、高精度な測位を行う義損の RTK-GPS を装置も購入し、AUTOBOX へ位置情報を入力するという構成である。

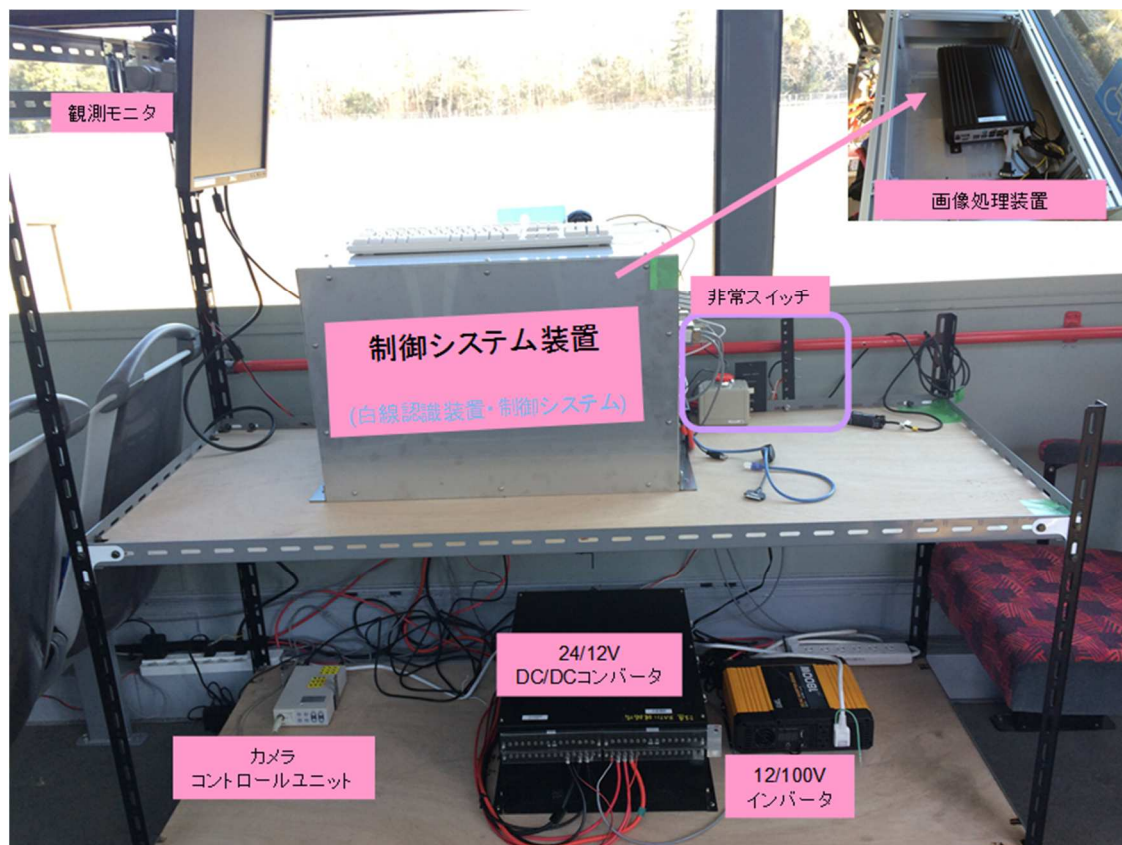


図 4.1.2-2 実験車の正着制御システム

図 4.1.2-3 にコネクタパネルの詳細仕様を示す。

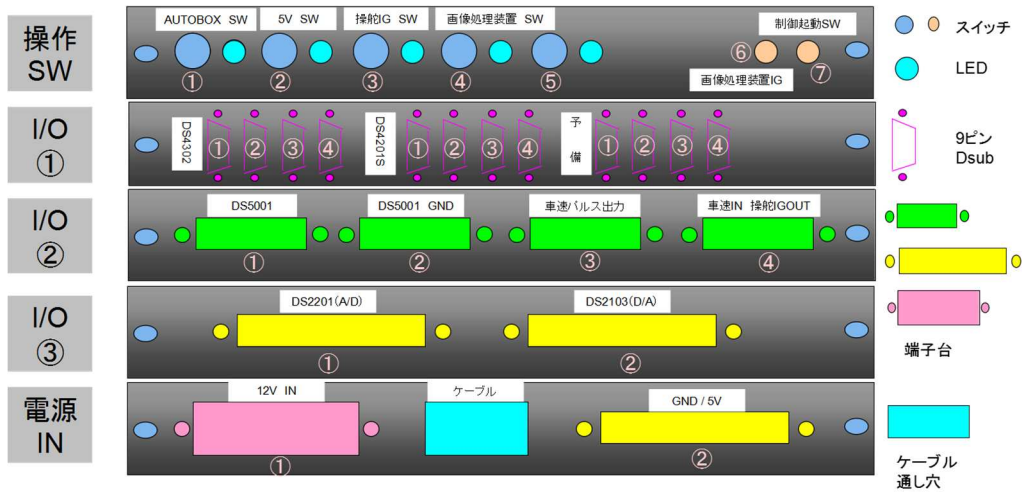


図 4.1.2-3 コネクタパネル

上図はコネクタパネルの設計図で、第一本目は電源スイッチ及び動作ランプとなる。左から AUTOBOX のメイン電源スイッチ、5V の電源スイッチ、操舵 ECU の IG 信号のスイッチ、画像処理装置の電源スイッチ及び制御起動の信号スイッチという順に、設計してある。2 本目から 4 本目は AUTOBOX の I/O ボードのインタフェースパネルとなる。I/O①は CAN 通信の DS4302 (AUTOBOX の I/O ボード) のコネクタパネルと、シリアル通信の DS4201S (AUTOBOX の I/O ボード) のコネクタパネルとなる。I/O②の端子台①と②は車輪パルスを取得する DS5001 ボードのインターフェースであり、端子台③は車の車速パルスを整形回路にて整形された出力インターフェースである。端子台④は車の車速パルスの入力及び操舵 ECU の IG 出力である。I/O③においては、端子台①はアナログ入力インターフェースであり、端子台②はアナログ出力インターフェースである。最下段の端子台①は制御システム装置の電源 (12V) 端子で、端子②は内部に設置した 12V から 5V へ変換する DC/DC コンバータの 5V 出力端子台である。また、AUTOBOX と制御 PC との通信のための LAN ケーブル、観測モニタとの DVI ケーブルは中間のケーブル通し穴に通して接続する。図 4.1.2-4 に制御システム装置の I/O パネルの写真を示す。

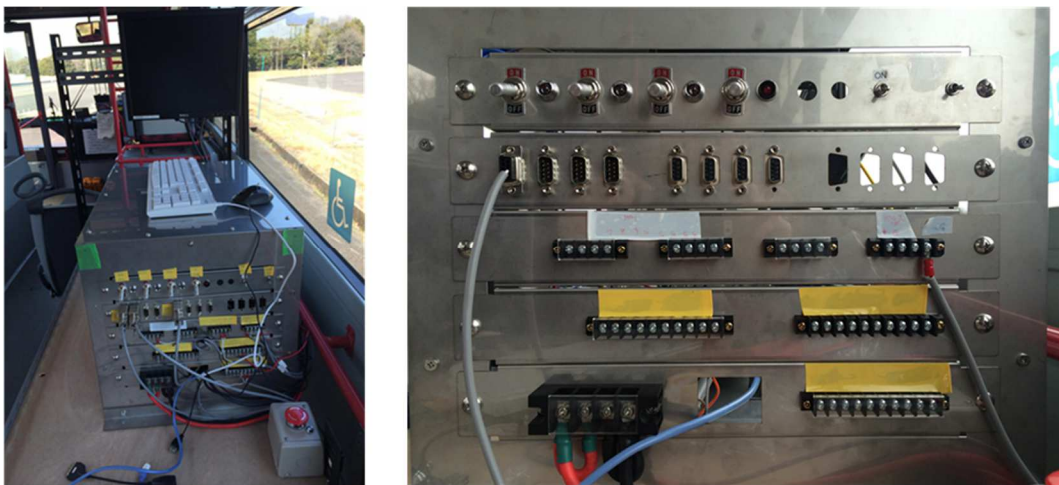


図 4.1.2-4 制御システム装置の I/O パネル

(3) 操舵アクチュエータ

単車バスと同様に、システムの入力情報として、センサから得られる情報を用い、操舵に必要な制御指令値を計算し、自動操舵指示角として、CAN 通信で操舵制御装置（操舵 ECU）へ制御指令値が送られ、ステアリング部に取り付けられたモータを制御することにより、自動操舵制御を行う。



図 4.1.2-5 操舵アクチュエータ

実際に取り付けした様子は図 4.1.2-5 に示した。操舵 ECU も単車バスに搭載した物と同じで、操舵 ECU の電源は DC/DC コンバータよりの 12V を用いる。9 ピン D_SUB の制御信号はコネクタパネルの CAN コネクタにつながり、AUOBOX の I/O ボード DS4302 と CAN 通信する。

(4) カメラ取り付け

連節バスにおいて、白線誘導マーカを検知する白線認識カメラは前方検知のみを検討した。単車バスと同様に、ダッシュボードの上に、車体中心付近位置に設置し、前方5~10m先が検知できるように俯瞰的に画角を調整した。図4.1.2-6に取り付けしたカメラの画像一例を示す。



図 4.1.2-6 カメラの取り付け例

図 4.1.2-7 カメラの画像の一例を示す。



図 4.1.2-7 カメラ画像の一例

4.2 バス停形状および正着目標軌跡

図 4.2-1, 4.2-2 および 4.2-3 に代表的なバス停形状であるストレート型, バスベイ型およびクサビ型をそれぞれ示す。同図の青枠および赤枠は正着前および正着後のバスの位置を示している。クサビ型はバスベイ型において, 切り込みの長さを広く取れない場合に, 正着を容易にできるように工夫されたものであり, 新型バスベイ型とも呼ばれている。本プロジェクトでは, ストレート型とクサビ型の正着性能を評価している。ストレート型とクサビ型に関するバス停形状と正着目標軌跡に関してはそれぞれ 4.2.1 項および 4.2.2 項にて詳しく述べる。

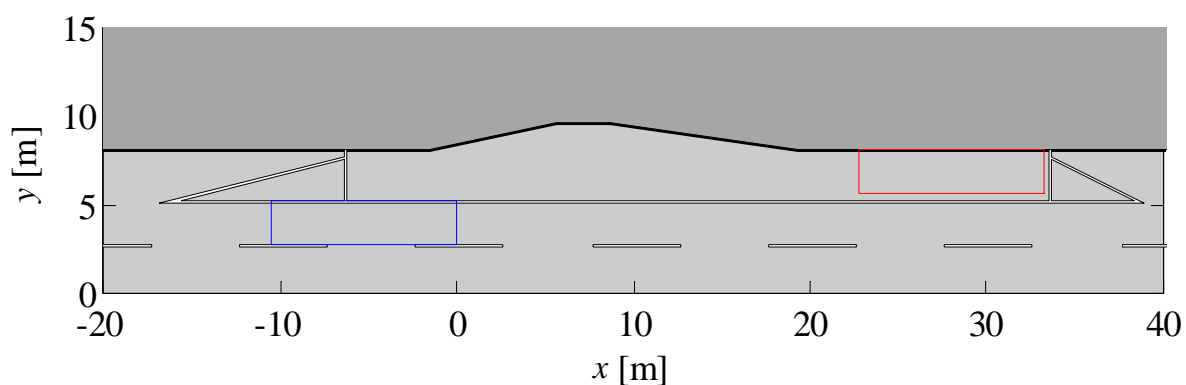


図 4.2-1 ストレートバス停形状

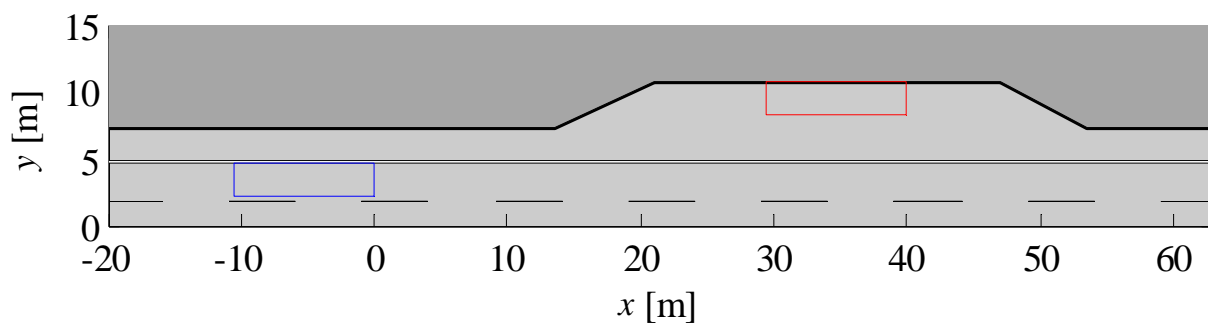


図 4.2-2 バスベイバス停形状

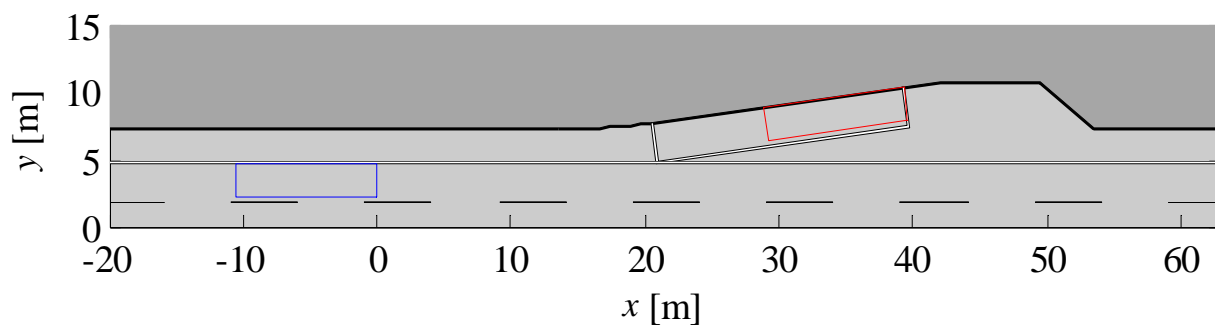


図 4.2-3 クサビバス停形状

4.2.1 ストレートバス停形状および正着目標軌跡

ストレート型のバス停における車両前面中央部の正着目標軌跡を図 4.2.1-1 に示す。同図の紫色の線がバスの正着目標軌跡である。同図において、バスは x 軸の正の方向に走行する。バスの正着は $x=0$ [m] の位置で開始される。ストレート型のバス停への正着はその過程において、バスの前面左端が歩道に干渉する。よって、ストレート型のバス停では正着時にバスが干渉する部分の歩道が狭くなっている。バスは正着の前後で y 軸方向に 2.5m 変位する。バスが正着を開始してから停止するまでには、進行方向 (x 軸方向) に約 33m を要する。

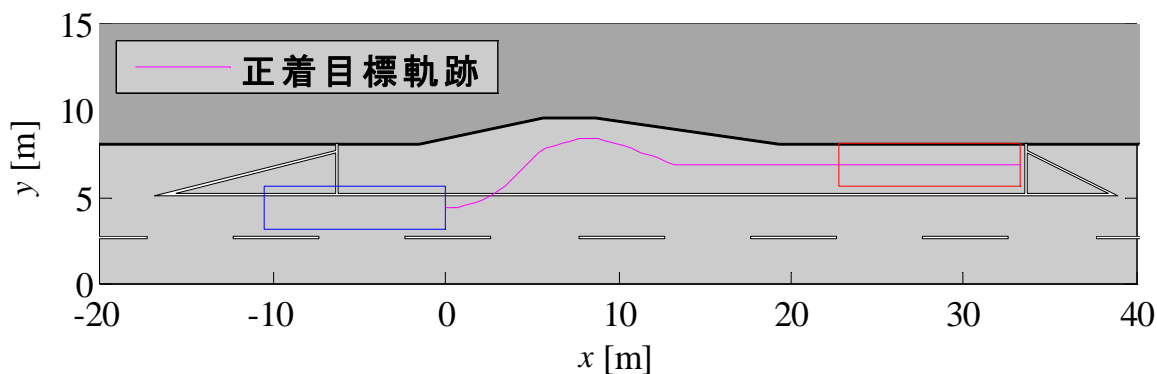


図 4.2.1-1 ストレートバス停形状および正着目標軌跡

4.2.2 クサビバス停形状及び正着目標軌跡

クサビ型のバス停における車両前面中央部の正着目標軌跡を図4.2.2-1に示す。図4.2.1-1と同様に、紫色の線がバスの正着目標軌跡である。同図においても、バスは x 軸の正の方向に走行し、 $x=0$ [m]の位置で正着が開始される。クサビ型のバス停はバスが車道から斜めに切り込んで停車できるように設計されており、バスは進行方向(x 軸方向)に対して、8度歩道側に傾いて停車する。クサビ型のバス停では、ストレート型とは異なり、正着開始後はほぼ直線走行するという特徴がある。

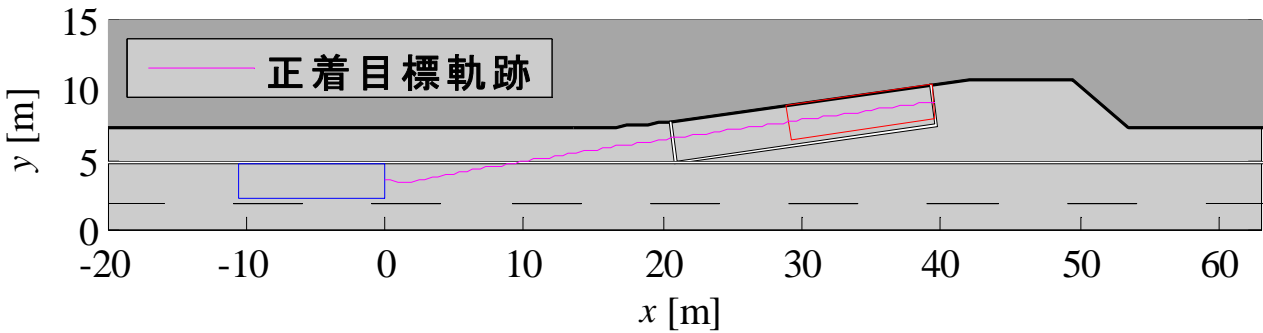


図 4.2.2-1 クサビバス停形状および正着目標軌跡

4.3 正着性能評価

前章にて検討してきた位置標定方式のうち、白線着誘導マーカ方式を用いて、正着性能の評価実験を行った。

4.3.1 白線誘導マーカ方式による正着性能評価概要

事前に調査したバス停形状の正着目標軌跡をもとに道路上に白線で目標軌跡を設置し、その白線を誘導マーカとし、正着制御を行った。

4.3.2 正着性能評価コース作成

正着性能評価のため目標軌跡を道路上に設置する。目標軌跡には下記の積水樹脂(株)製 ガラスビーズ入りジスライントープ(幅:15cm)を使用した。



図 4.3.2-1 積水樹脂(株)製 ガラスビーズ入りジスライントープ

コース設置には国立研究開発法人 産業技術総合研究所様にご協力いただき、つくば北にある衝突実験場内にコースを設置した。設置状況を図 4.3.1.1-2 に示す。



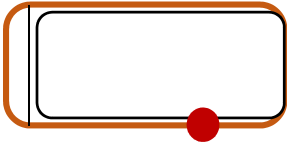
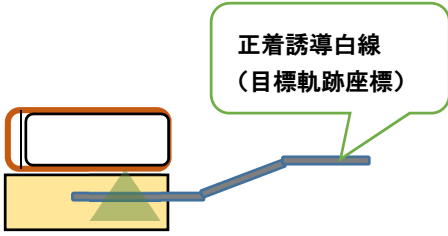

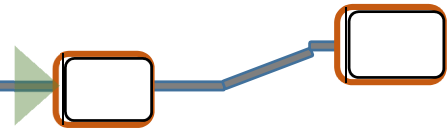


図 4.3.2-2 正着性能評価コース

図はストレートバス停形状の正着性能評価コースである。バス停の縁石位置にはコーンを設置している。設置するコースは前節で示したストレートバス停形状、クサビバス停形状とバスが直進したまま停車するテラスバス停形状の3種類を設置した。

4.3.3 白線誘導マーカ方式による正着性能評価方法

白線着誘導マーカ方式による正着制御において考えられる制御位置の候補とそれぞれのメリット・デメリットに関して表 4.3.3-1 に示す。

表 4.3.3-1 白線着誘導マーカ方式における制御位置候補

制御位置候補	白線（目標軌跡）の敷設位置	メリット・デメリット
1. 車両後部扉近傍 		○メリット ・後部ドア付近の正着性が向上 ○デメリット ・バス停上での白線敷設が必要
2. 車両先端中心近傍 		○メリット ・常時白線 FB 制御が可能 ○デメリット ・後尾付近の正着性が低下 ・通常路側白線との混在
3. 車両先端左側方近傍 		○メリット ・常時白線 FB 制御が可能 ○デメリット ・後尾付近の正着性が低下

制御位置が車両後部扉付近の場合、車いすでの乗車を行う後部ドア付近の正着精度の向上は望めるが正着時には後輪タイヤで白線を踏んでしまう際、カメラの位置の都合で白線が認識できなくなるため、現状のような道路白線のみでは正着することができずバス停上にも白線の敷設が必要となる。

制御位置が車両先端中心近傍の場合は常に白線をカメラで認識しながら制御が可能ではあるが車体前方の制御のため後部ドア付近の正着精度が落ちる可能性がある。また誘導マーカとなる白線と通常路側白線と混在する部分があり、誤認識につながる可能性がある。

制御位置が車両先端左側方近傍の場合は制御位置が車両先端中心近傍の場合と同様に常に白線をカメラで認識しながら制御が可能だが後部ドア付近の正着精度が落ちる可能性はあるが、誘導マーカとなる白線と通常路側白線を同じにすることができる。

これらの制御位置に関するメリット・デメリットを考えた場合、車両後部扉付近を制御位置にすることは白線の敷設上、実現が困難であると考えられる。また制御位置が車両先端中心近傍の場合は道路中心に誘導マーカになる白線を敷設することに現実性がない。そこで正着評価は制御位置が車両先端左側方近傍の場合を主な方法として行う。

正着性能を評価する際の走行条件および白線の認識条件を表 4.3.1.2-2 に示す。

表 4.3.3-2 走行条件と白線の認識条件

バス停と白線位置	速度条件	制御ロジック	白線認識位置	検出白線距離
ストレート切り込み型 バス停形状 (白線認識位置：左測方)	正着開始時の 速度は 約 10~15km/h	FB 制御+ FF 制御		
クサビバス停形状 (白線認識位置：左測方)	正着開始時の 速度が 約 10~15km/h	FB 制御のみ		
テラス型バス停形状 (白線認識位置：左測方)	正着開始時の 速度が 約 10~15km/h	FB 制御のみ		

制御目標としては車いすの利用者が自力で乗車できることを目標とするため、第 1 章の最大許容隙量の検証結果をもとにバス停とバス後部ドア付近との間隙を 4 cm±2cm になるように制御を行った。

制御ロジックに関しては第 3 章で記述した方式を基本とするがクサビバス停形状およびテラス型バス停形状の走行の際には FF 制御部は使用しない。使用しない理由としてはそれぞれのバス停形状が白線認識のみで走行できるような単純な走行経路のためである。

4.3.4 正着実験方法

図 4.3.4-1、図 4.3.4-2、図 4.3.4-3 にテラス型、クサビ型およびストレート切込み型の各バス停に対する正着制御評価の実験方法を示す。

各実験とも手動運転にて走行レーン中央を走行後、正着開始起点マーカを通過後、自動的に正着制御を開始する。制御開始時の走行速度は約 20~30km/h とし、手動による減速制御をおこない正着開始時には速度を約 10~15m/h までに、バス停進入時には速度を約 7~10km/h までに減速するようにし、最後には停止点にて停止をおこなう。

なお、正着制御開始前車両は走行レーン中央を走行するものと想定して、車両左側面と白線との離隔距離を約 60cm 保持しながら走行し、正着開始後は自動操舵により白線との離隔距離が 4cm になるよう制御をおこなう。

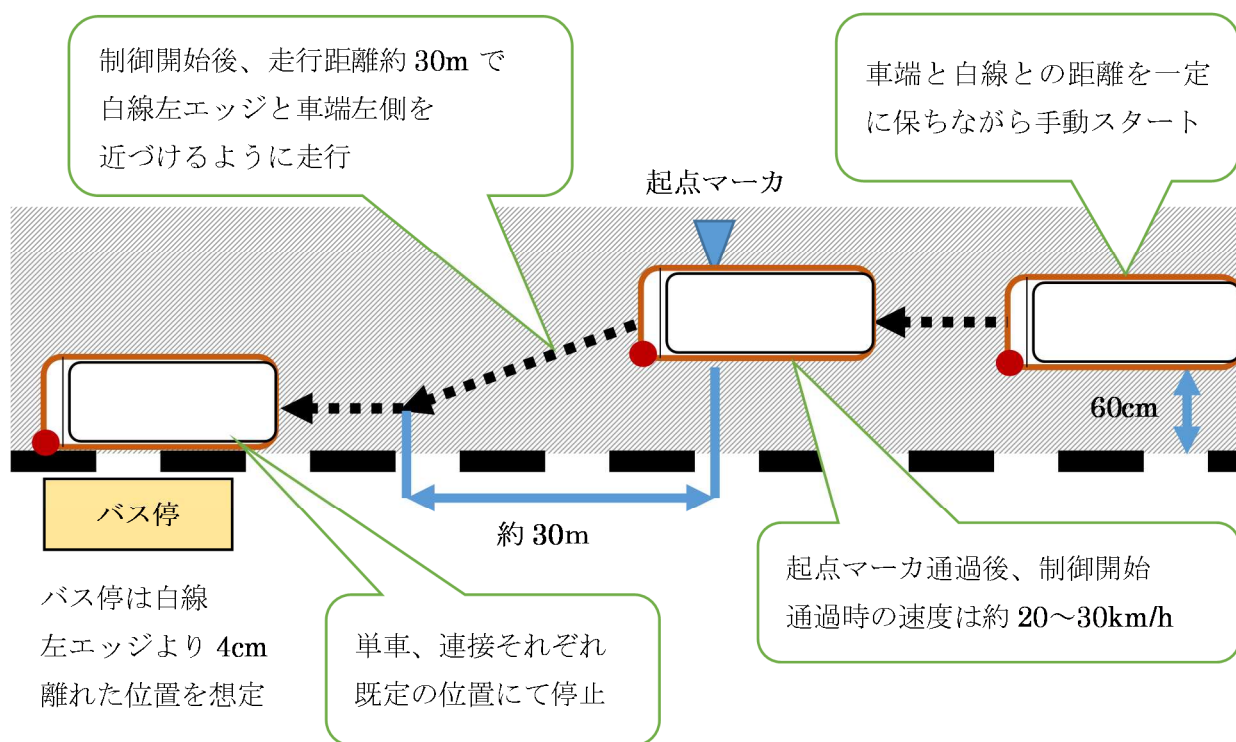


図 4.3.4-1 テラス型バス停想定の上着制御評価実験

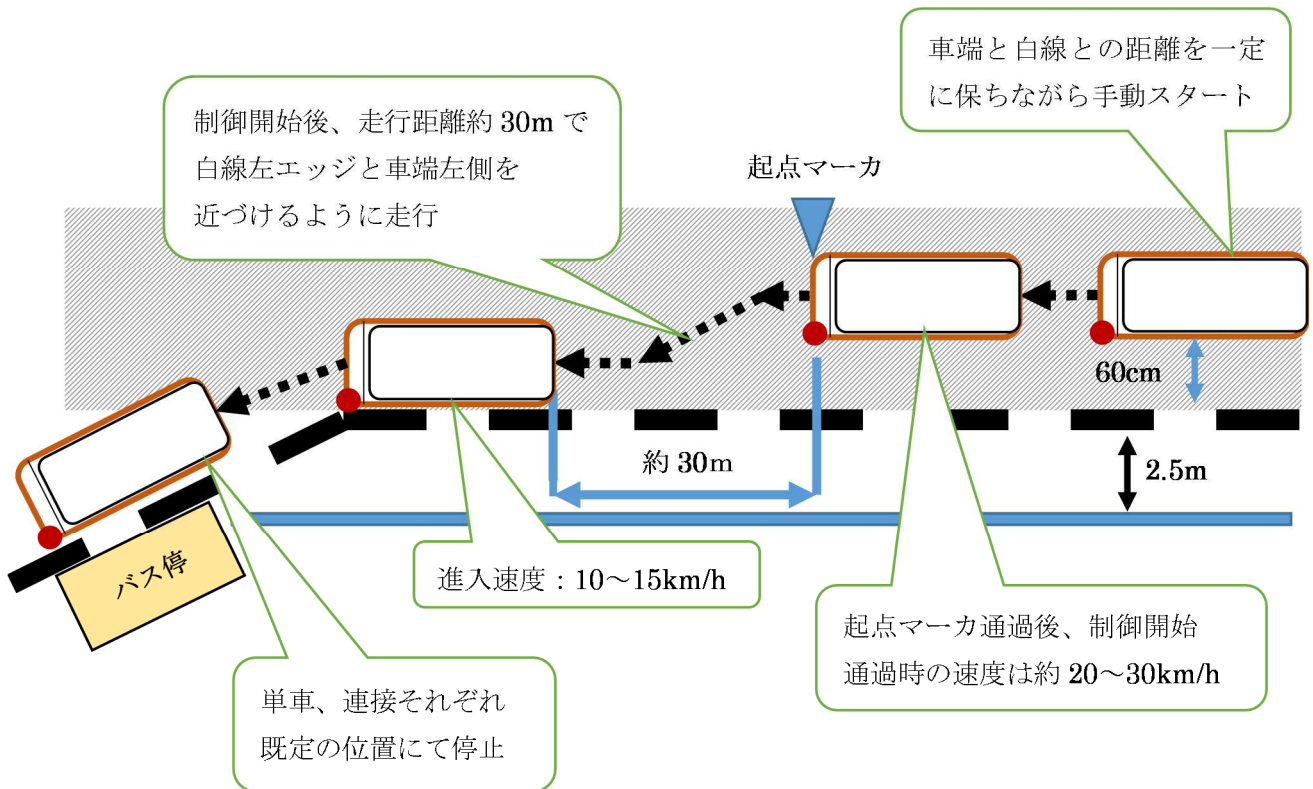


図 4. 3. 4-2 クサビ型バス停想定の上着制御評価実験

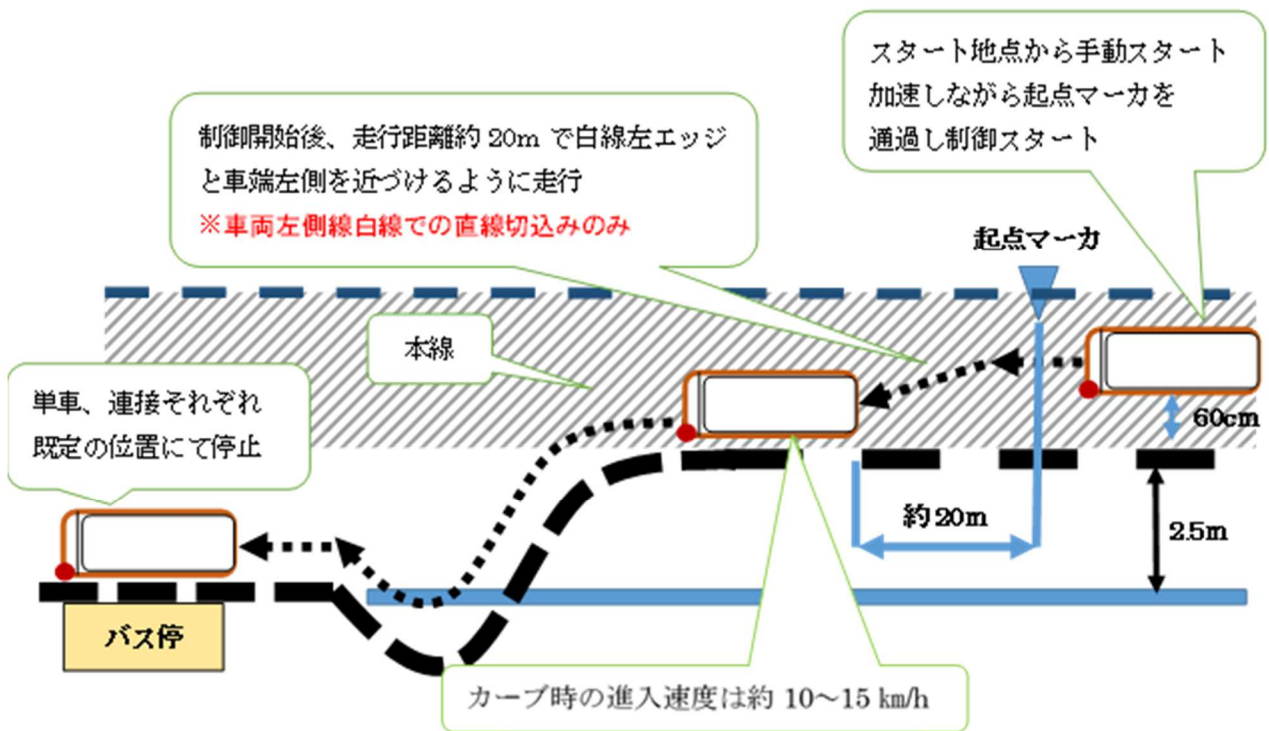


図 4. 3. 4-3 ストレート切込み型バス停想定の上着制御評価実験

4.3.5 HEV 車の白線誘導マーカ方式による正着性能評価

HEV 車による正着性能結果を次に示す。評価する n 数を 5 回としている。また正負の方向はバス停から離れる方向が正、バス停に近づく方向が負となっている。

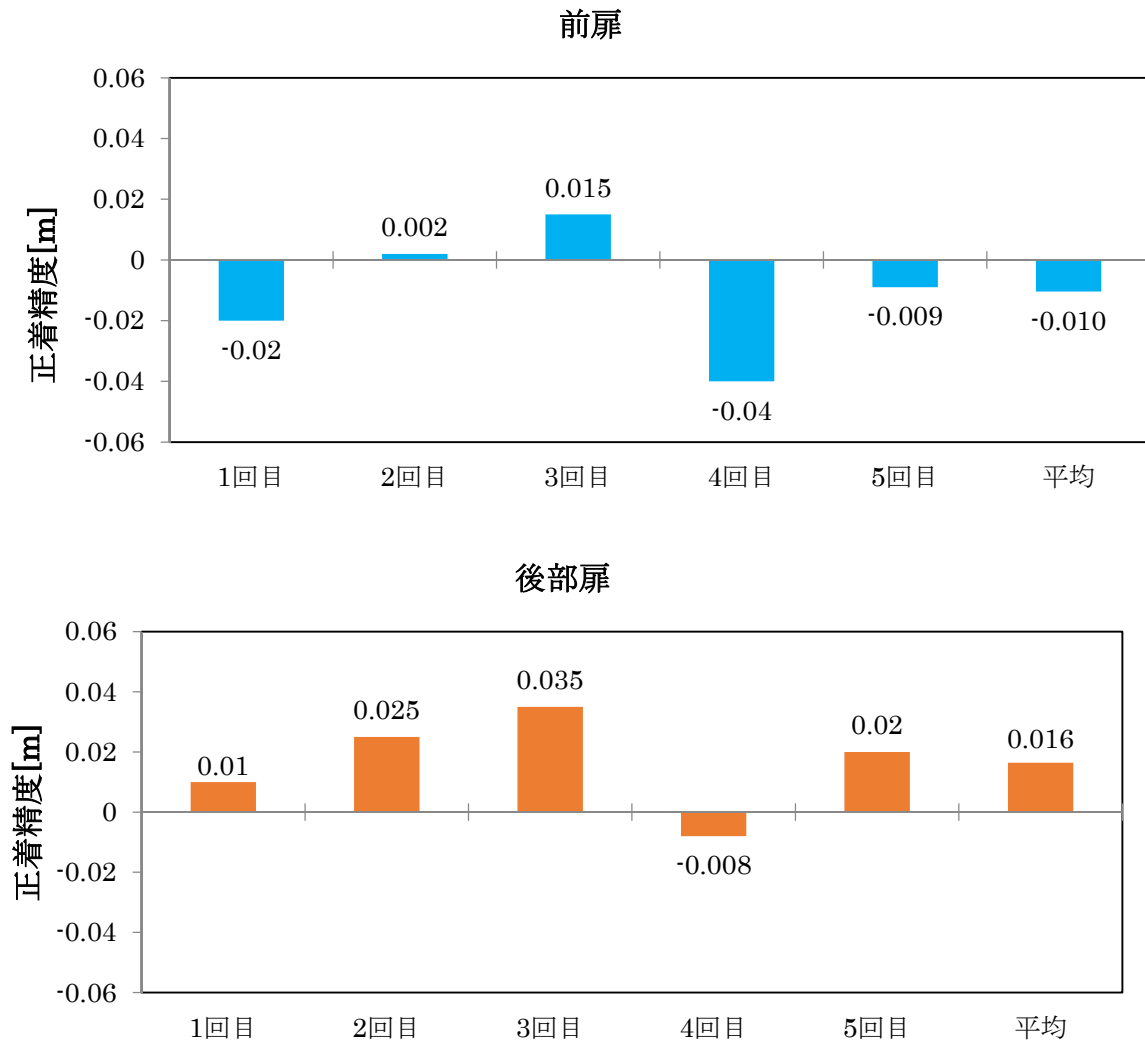


図 5.3.5-1 テラス型バス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

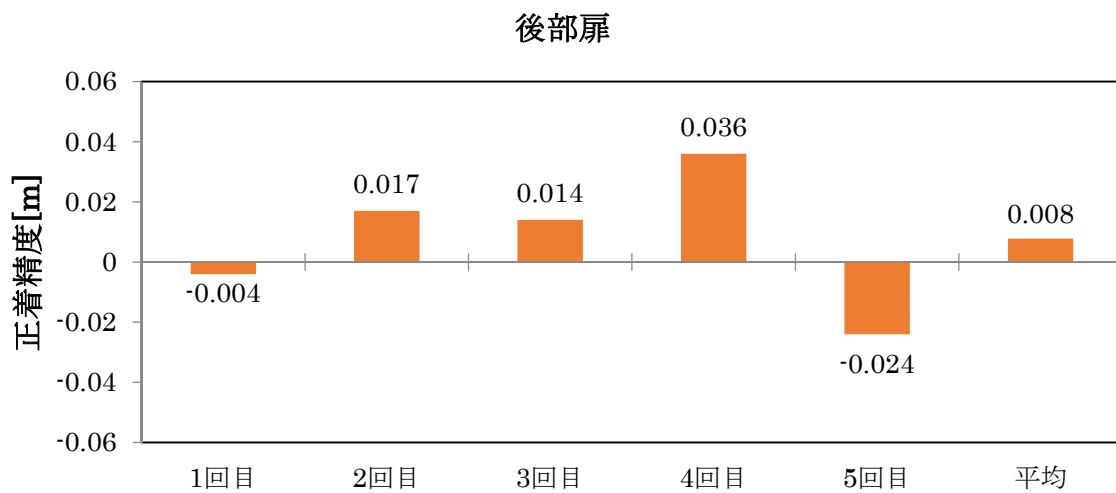
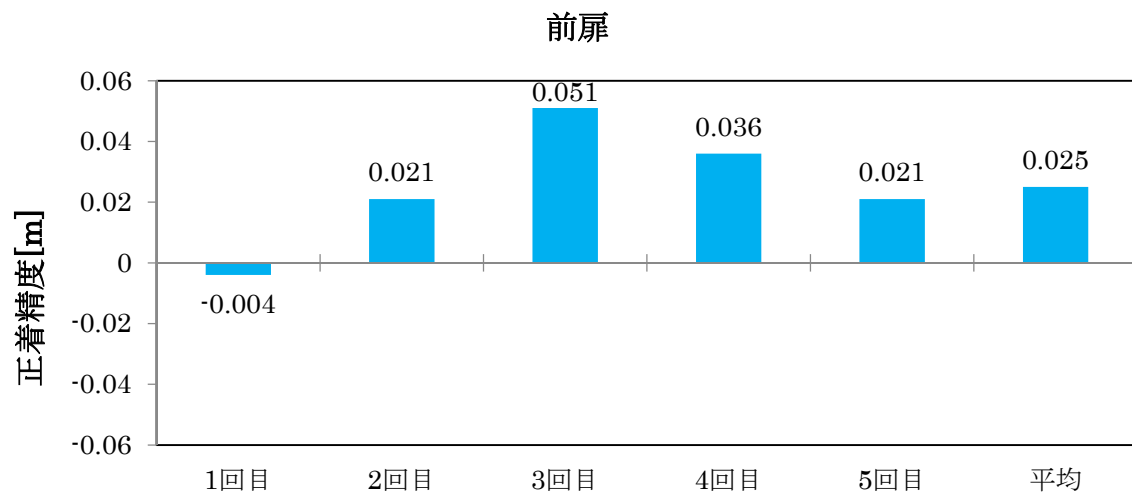


図 5.3.5-2 クサビバス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

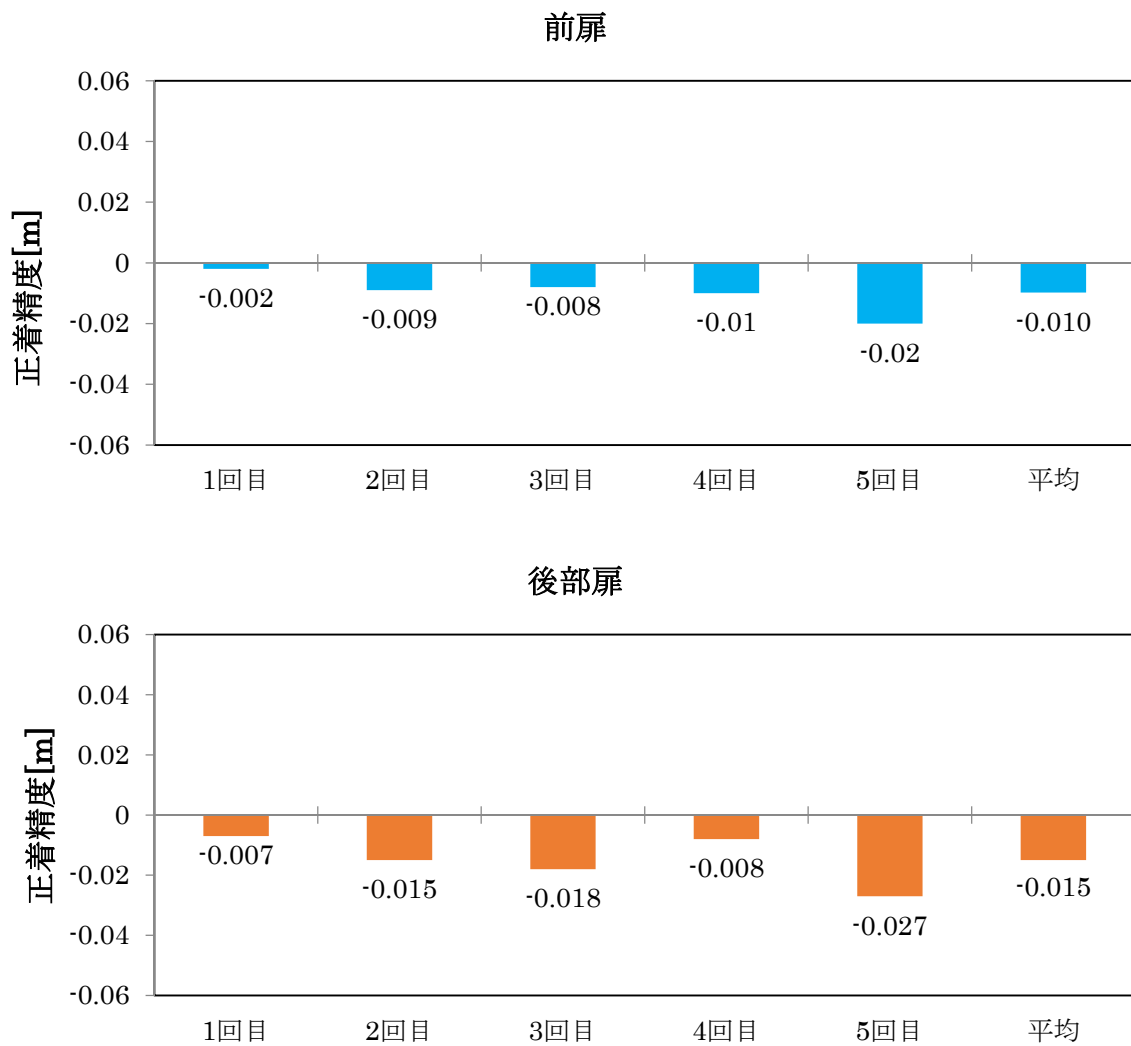


図 4.3.5-3 ストレートバス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

正着時の誤差ではバス停から最も遠ざかった場合で 5.1[cm]、バス停に最も近づいた場合で 4[cm]であった。また停止時は白線と平行して停車することがほとんどなく、前扉と後扉との差が大きい時でテラス型バス停形状の時で 4.5[cm]の差があった。

4.3.6 連節車の白線誘導マーカ方式による正着性能評価

連節車による正着性能結果を次に示す。

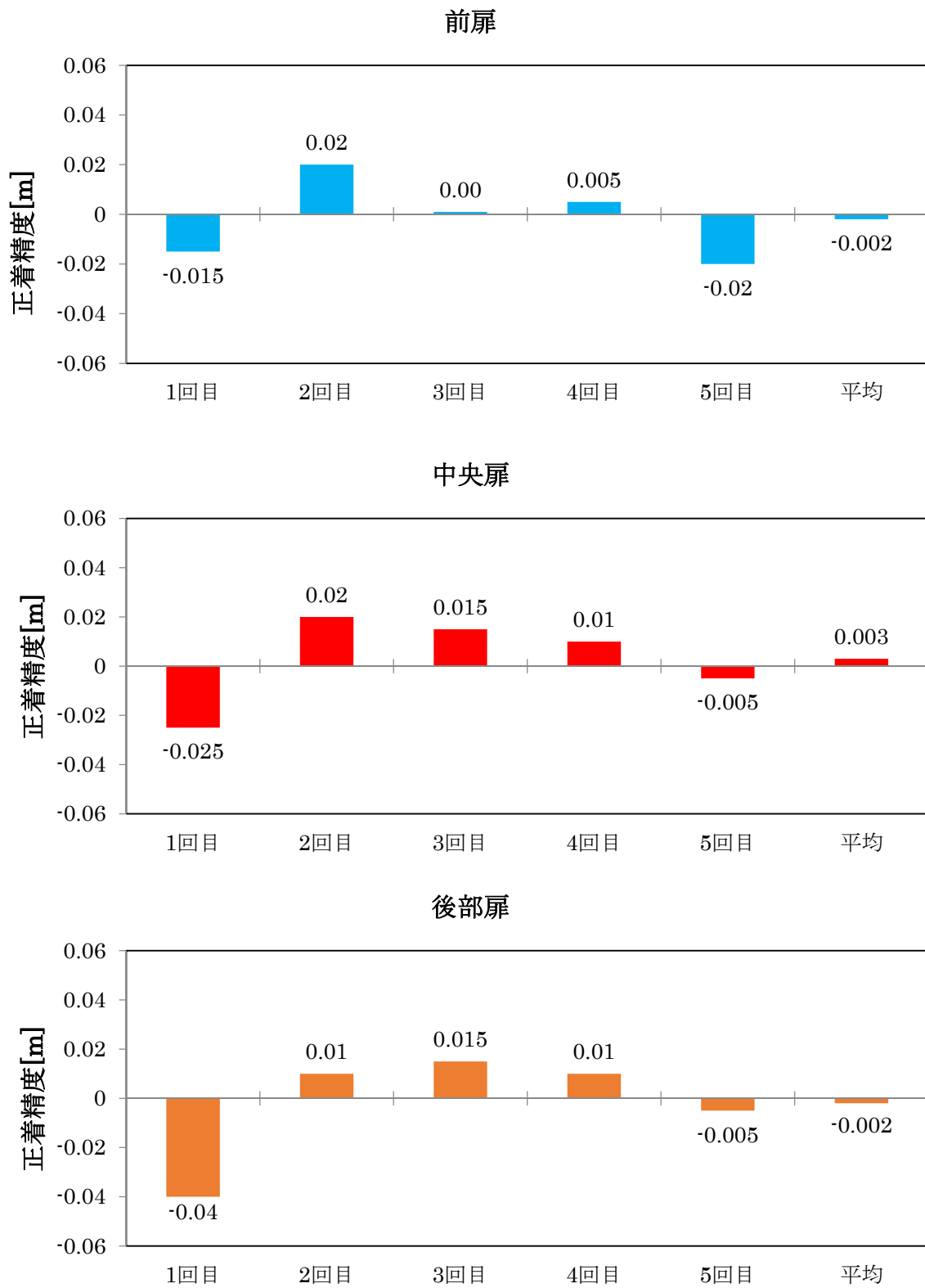


図 4.3.6-1 テラス型バス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

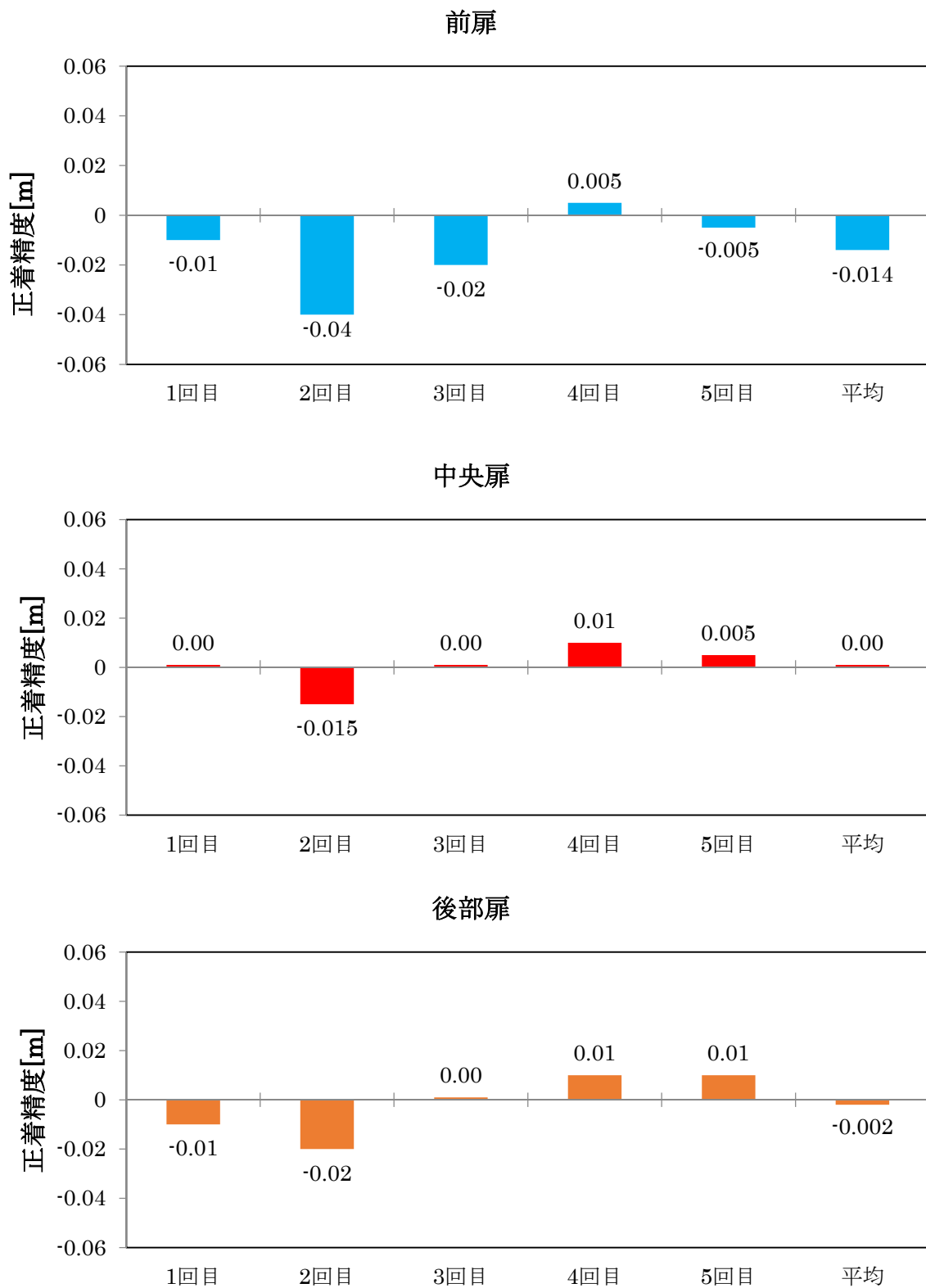


図 4.3.6-2 クサビバス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

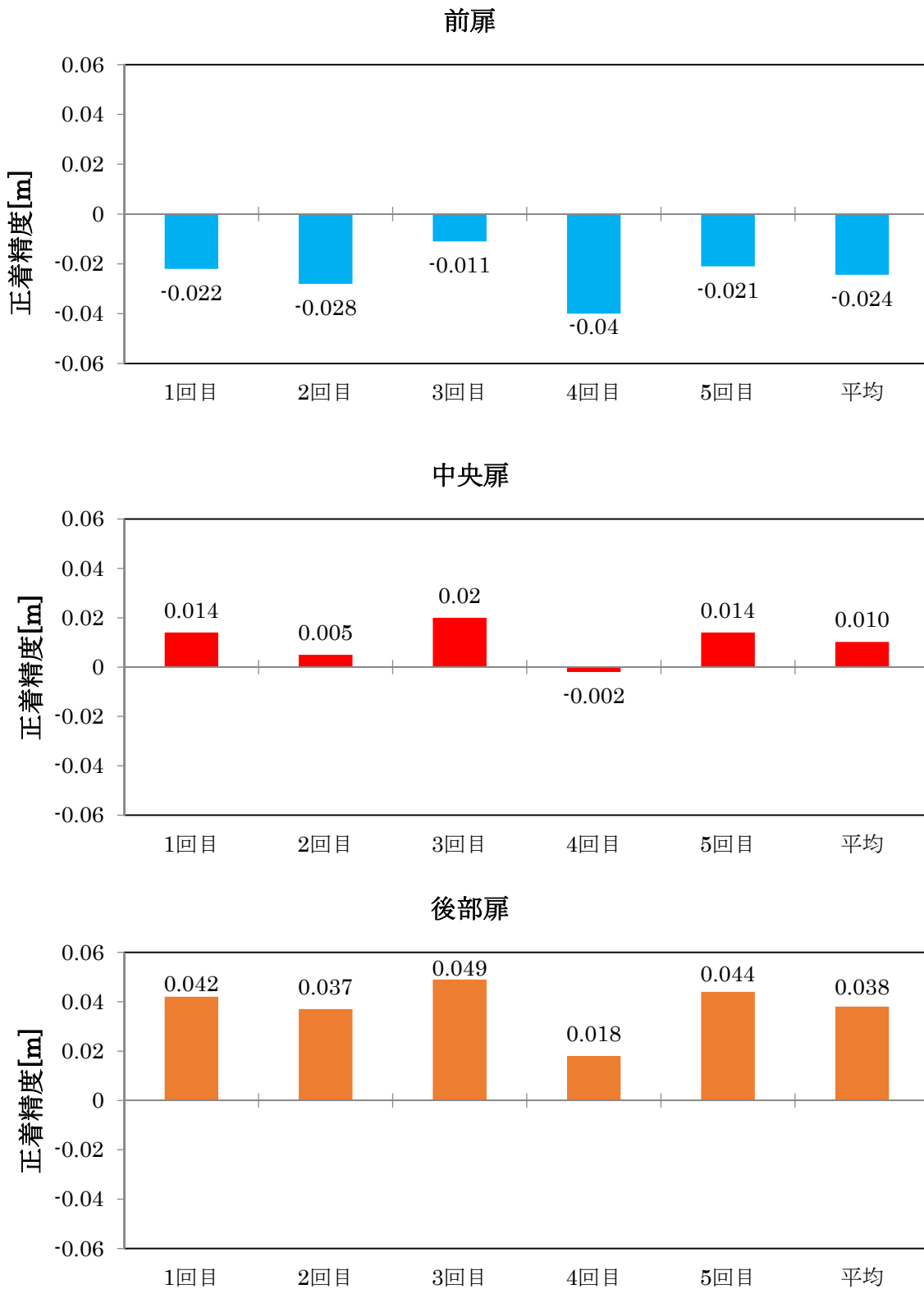


図 4. 3. 6-3 ストレートバス停形状（白線認識位置：左測方）での正着性能評価

4.3.7 実験車による正着性能評価まとめ

表 4.3.7-1 に実験車による白線レーンマーカを用いた正着性能評価結果のまとめを示す。

今回の評価では正着制御精度目標である±2.0 以内に対し、直線切込み、クサビおよびテラスのいずれのバス停形状においても、目標値を達成することができなかった。この要因としては用いたモデルベース制御のパスフォロイング制御は十分機能しているものの、パスフォロイング制御則のなかで横偏差制御に関する制御ゲインと傾き角偏差に関する制御ゲインの最適化が十分行えなかったことが考えられる。正着制御精度の目標値を達成するためには、今後これらの制御ゲインを速度の関数として最適化を図る必要があると考えられる。

		正着精度(cm):左側方白線時			
		車		両	
バス停	扉	単車		連節	
		最大値+方向/-方向	平均(N=5)	最大値+方向/-方向	平均(N=5)
直線切込み	前扉	0 /-2.0	-1.0	-1.1 /-4.0	-2.4
	中央扉			+2.0 /-0.2	1.0
	後部扉	0 /-2.7	-1.5	+4.9 /+1.8	3.8
クサビ	前扉	+5.1 /-0.5	+2.5	+0.5 /-4.0	-1.4
	中央扉			+1.0 /-1.5	0
	後部扉	+3.6 /-2.4	+0.8	+1.0 /-2.0	-0.2
テラス	前扉	+1.5 /-4.0	-1.1	+2.0 /-2.0	-0.02
	中央扉			+2.0 /-2.5	+0.03
	後部扉	+3.5 /-0.8	+1.6	+1.5 /-4.0	-0.02

表 4.3.7-1 白線レーンマーカによる正着性能評価結果まとめ

第5章 まとめ

ART 正着制御技術について、車椅子における要求正着精度や正着制御における制御精度を明らかにすることができた。特に正着制御精度はバス停の形状や正着のための目標走行軌跡に大きく影響されることが判明すると共に、テラス型バス停およびクサビ型バスではFB制御ゲインの最適化により開発目標である $\pm 2.0\text{cm}$ 以内の制御精度を実現できる見通しがたった。一方直線型バス停での切込み軌道では目標の $\pm 2.0\text{cm}$ を達成するには制御アルゴリズムの改良や制御ゲインの最適化が必要であることの知見が得られた。

又、白線マーカとカメラ画像による位置測位技術については予定どおりの成果が得られた。一方GPSや磁気マーカ及び画像パターンによる位置測位技術について、基礎的な知見は得られたが、実用化までにはまだ解決すべき課題が残されていることが明らかになった。

今後バスベイ型バス停への展開を考慮すると、これらの位置測位技術について引き続き開発が必要と考えられる。