

「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・  
自動走行システム」

自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決  
の方向性に関する調査・検討における次世代都市交  
通システム正着制御に係るセンシング技術に関する  
調査検討

平成 29 年 3 月 10 日

先進モビリティ株式会社

## まえがき

「戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における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「磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術」を愛知製鋼株式会社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 28 年度科学技術イノベーション創造推進委託費による委託業務として、先進モビリティ株式会社が実施した平成 28 年度「戦略的イノベーション創造プログラム (S I P)・自動走行システム」自動走行システムの実現に向けた諸課題とその解決の方向性に関する調査・検討における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

第1章	センシング技術の調査	1
1-1	高日射反射塗料による相対位置検出技術	1
1-1.1	高日射反射塗料による相対位置検出技術の概要	1
1-1.2	実施方法	1
1-1.3	評価結果	4
1-2	車載ライダーによる相対位置検出技術	14
1-2.1	車載ライダーによる相対位置検出技術の概要	14
1-2.2	実験装置および実施方法	14
1-2.3	車載LiDARによる自車位置検出技術の性能評価	18
1-3	磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術	25
1-3.1	磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術の概要	25
1-3.2	磁気マーカ間の自己位置推定	27
1-3.3	磁気マーカと磁気センサユニットの製作	32
1-3.4	磁気マーカと磁気センサユニットの性能評価	35
1-4	画像認識による位置検出法の検討	39
1-4.1	テンプレートマッチング画像処理アルゴリズム	39
1-4.2	テンプレートマッチング法による走行位置推定法のアルゴリズム	40
1-4.3	カメラ画像から走行位置の算出	41
1-4.4	課題	42
1-5	レーザー光の路面反射による位置検出法の検討	43
1-5.1	レーザー光の路面反射による自車位置検出の概要	43
1-5.2	実験方法	43
1-5.3	評価	44
1-6	センシング技術の実用性評価	48
第2章	実車による正着制御の評価	50
2-1	正着制御実験車の製作	50
2-2	車載ライダーを用いた正着制御の評価	56
2-2.1	実車評価の前提条件	56
2-2.2	実車による正着実験評価	59
第3章	まとめ	61

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「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）・自動走行システム」の一環として行っている事業の一つで、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に関する調査検討を行ったものである。

次世代都市交通システム（ART:Advanced Rapid Transit）にはバス停への正着制御が求められるが、車道外側線を経路誘導に用いる手法では、道路上の障害物等により白線が覆われたり、劣化による欠落などによる不安定要素がある。このため、固定化された路面上の白線や表示等に頼らない、障害物や欠落などへの対応を含め、よりロバスト性が高く柔軟な正着制御用経路誘導技術を調査、検討する。

## 第1章 センシング技術の調査

### 1-1 高日射反射塗料による相対位置検出技術

#### 1-1.1 高日射反射塗料による相対位置検出技術の概要

通常道路区画線は白色あるいは黄色であるが、バスの正着制御用としてバス停付近に白色や黄色の誘導線を引くことは、バス以外の車両にとっての安全上の問題があるため実現が難しい。そのため、可視光外で反射する透明もしくは路面色の塗料やシート等を用いて位置や経路を特定する方法が考えられている。

今年度は、アスファルト路面とほぼ同色（灰色）で、太陽光を強く反射する高日射反射塗料を塗った区画線を赤外線カメラで認識することによって、相対位置を検出できる可能性があるか、基礎的な技術検討を行った。

#### 1-1.2 実施方法

##### ① 塗料

上塗り塗料として、日射反射率が高い（遮熱性能の高い）塗料を採用した。また日射反射率をさらに高めるため白色の下塗りを追加した仕様も製作した。その結果、日射反射率は、白色下塗りありの場合で 47.6%、下塗りなしの場合で 43.6%

となった。

- ・ 上塗り： アトムハードカラーEM速乾 N-40色（珪砂混合）
- ・ 下塗り： アトムハードカラーEM速乾 白色（珪砂混合）
- ・ 日射反射率： 下塗りあり=47.6% 下塗りなし=43.6%

② 区画線の種類および敷設場所

区画線の仕様として、下塗りの有無で2種類、塗装幅で3種類の合計6種類の区画線を、関連する実験で借用している産業技術総合研究所つくば北サイト内に敷設した。

塗装幅は、通常の区画線で使われている15cm幅以外に、周辺のアスファルト路面からの熱影響が小さくなると思われ、停止線や横断歩道等で公道でも使われている30cm幅と45cm幅を加えた3種類を設定した。区画線の種類を表1-1.2-1、敷設場所を図1-1.2-1に示す。

仕様	下塗り	上塗り	塗装幅 (cm)	塗装延長 (m)	日射反射率
A	白色	N-40色 (明度 38.74)	15	30m	47.6%
B			30	10m	
C			45	10m	
D	なし		15	10m	43.6%
E			30	10m	
F			45	10m	

表 1-1.2-1 区画線の種類

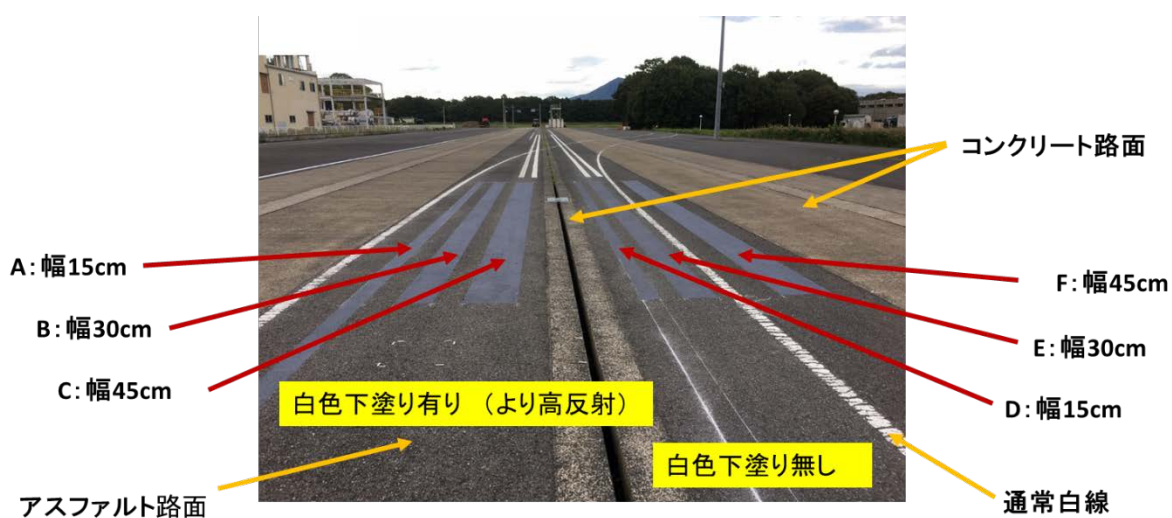


図 1-1.2-1 敷設場所

### ③ 赤外線カメラ

使用した赤外線カメラは、日本アビオニクス製の赤外線カメラ「サーモギア G100EX」で、最小検知温度差は $0.04^{\circ}\text{C}$ の性能を持っている。

本赤外線カメラは赤外画像と可視画像を同時に撮影して比較ができるようになっており、撮影した画像は付属のSDファイルに保存され、付属のソフトを用いることによってオフラインで解析できる。撮影した画像は、 $320 \times 240$ の画素からできている。画素単位の温度データをCSVファイルに出力できる。



図 1-1.2-2 赤外線カメラ

### ④ 撮影環境

高日射反射塗料を塗った区画線は太陽光を強く反射するため、基本的には周辺のアスファルトより低温になる。よって温度差が大きく出る秋の晴天日の昼間から、温度差が出にくい冬の曇天日の夕方まで様々な環境条件で撮影（データ取得）を行った。また、雨天や夜間のデータも取得した。

### 1-1.3 評価結果

#### 1-1.3.1 赤外線カメラの画像評価

##### ① 白色下塗りの有無の違い

当初の予想通り、白色下塗りをを行った区画線の方が太陽光を強く反射するため温度が低くなり、下塗りを行わなかった区画線よりも周辺のアスファルトとの温度差が明確に出ることが判明した。また、コンクリート路面及び通常の白線は、反射率が高いため、高日射反射塗装面との識別は難しいことが判明した。

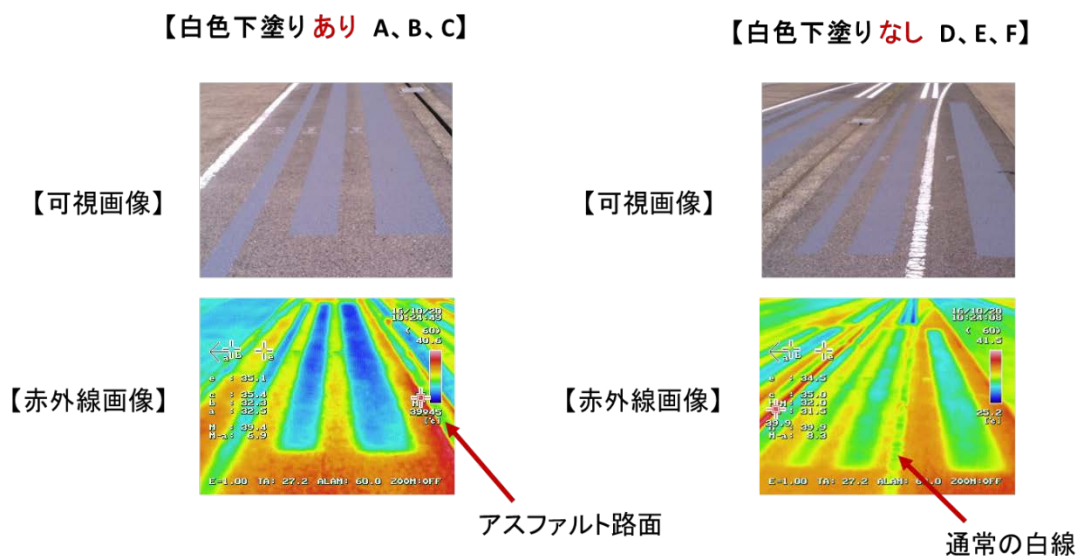


図 1-1.3.1-1 白色下塗り有無による温度差の違い

② 【秋・晴天時・昼間】の画像例

秋の晴天時・昼間は、温度差があり（約4度）、区画線のエッジ（端）が明確に識別できる。

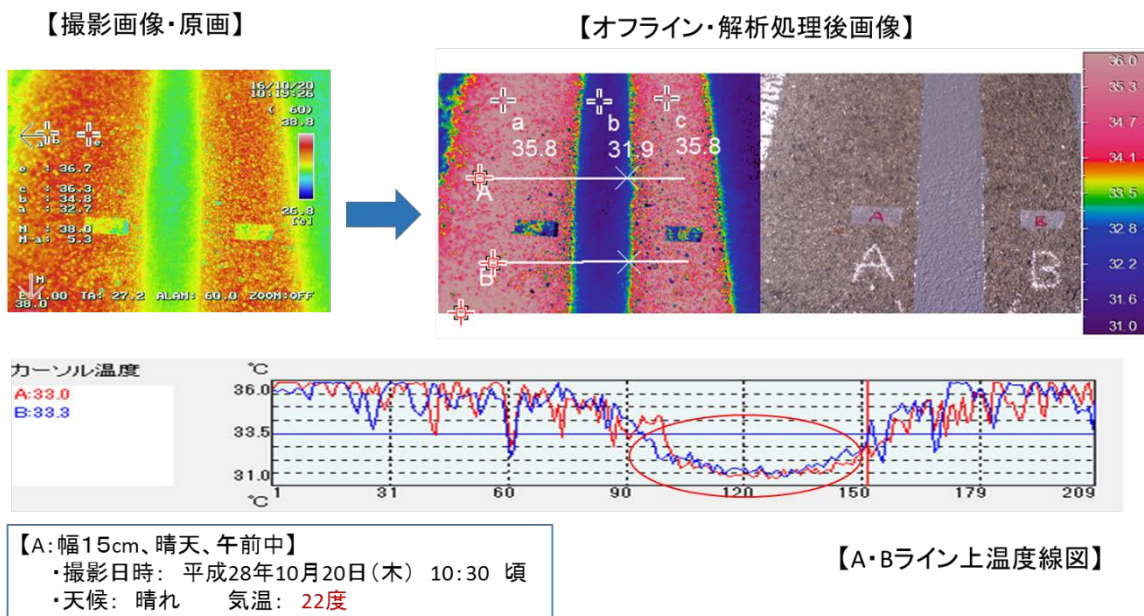


図 1-1. 3. 1-2 【秋・晴天時・昼間】の画像例



③ 【秋・晴天時・夕方】の画像例

晩秋の晴天時・夕方では、温度差は小さいが（約1度）、区画線内の温度が均一なため、エッジの識別は可能である。

また、温度差が小さくなると温度の逆転現象が出る傾向があり、通常は周辺より温度が低いはずの高日射反射塗料を塗った区画線の方が周辺より若干温度が高くなる傾向がある。

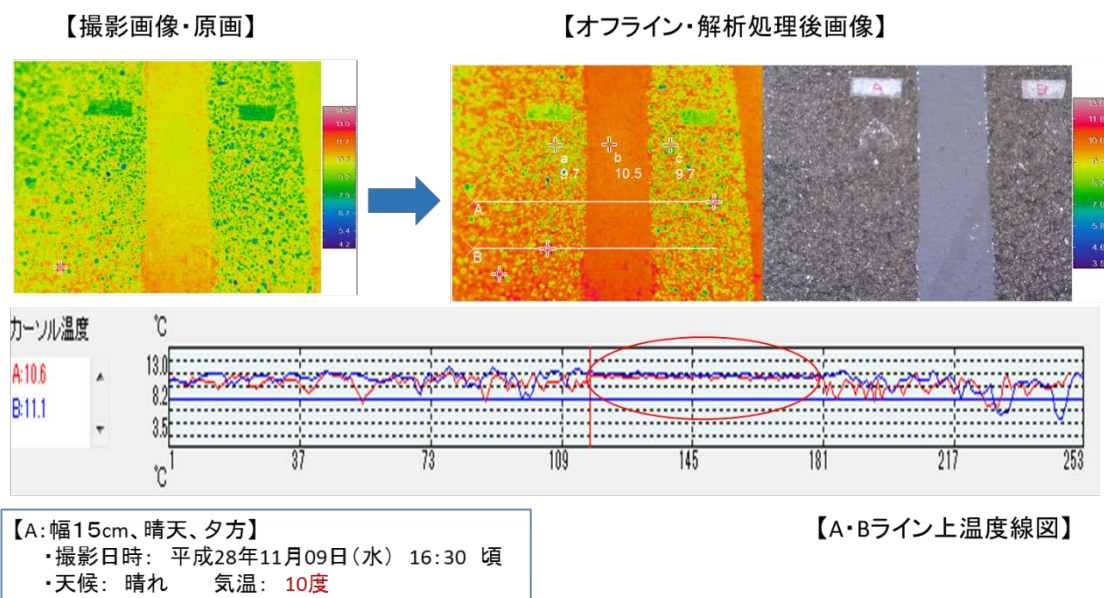


図 1-1. 3. 1-3 秋・晴天時・夕方の画像例

④ 【秋・晴天時・日没直後】の画像例

晩秋の晴天時・日没直後では、温度差はほとんどないが、区画線内の温度が均一なため、エッジの識別は可能である。本事例では、下記可視画像では区画線が認識不能のように見えるが、肉眼では認識できた。

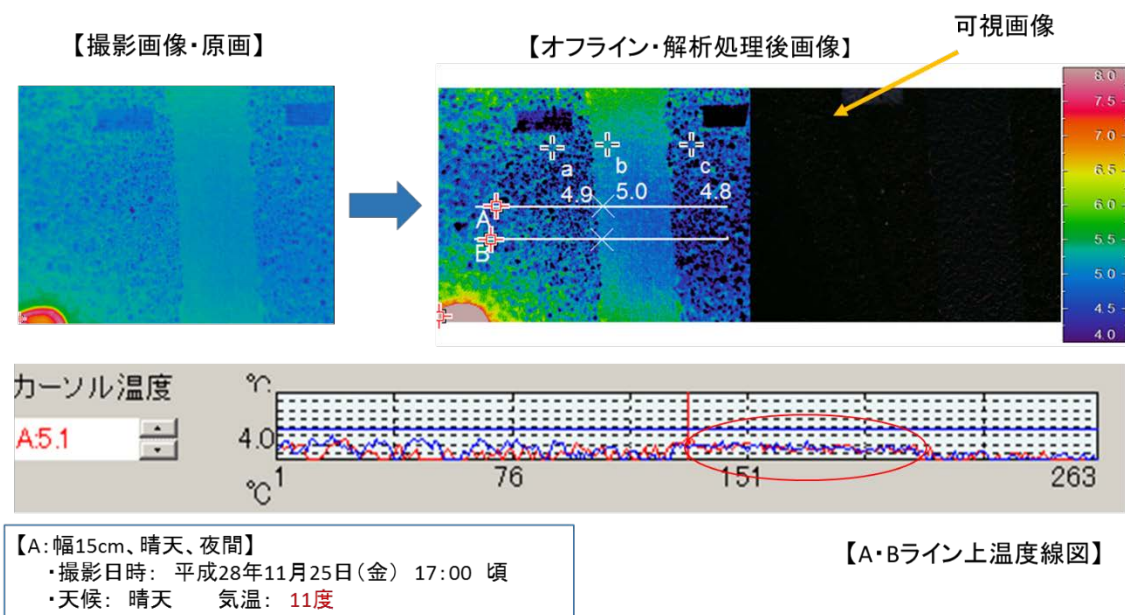


図 1-1.3.1-4 秋・晴天時・日没直後の画像例

⑤ 【冬・晴天時・夜間】の画像例

冬季の夜間（真夜中）では、温度差がほとんどないが、区画線内の温度が均一なため、エッジの識別は可能である。

（ヘッドライトの光成分が影響したかどうかは不明）



図 1-1.3.1-5 夜間撮影風景

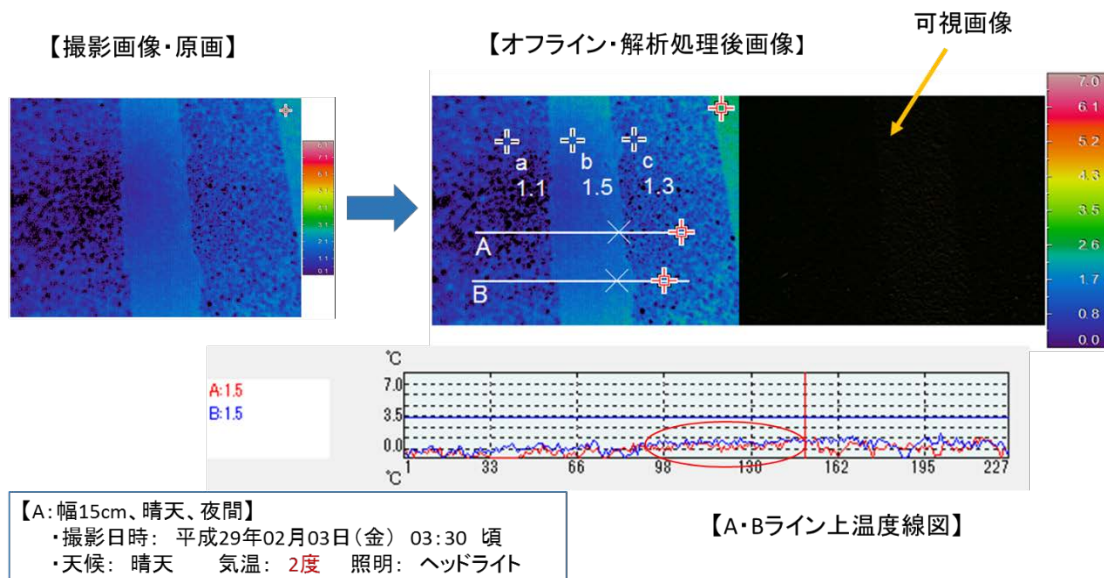


図 1-1.3.1-6 冬・晴天時・夜間の画像例

⑥ 【冬・雨天時・昼間】の画像例

雨天時には、温度差が小さい上に路面上の水分により温度の境界がぼやけてしまうため、区画線の候補エリアは見つかるもののエッジの識別は難しい。撮影時は小雨であったが、大雨の場合はさらに識別が難しくなると思われる。

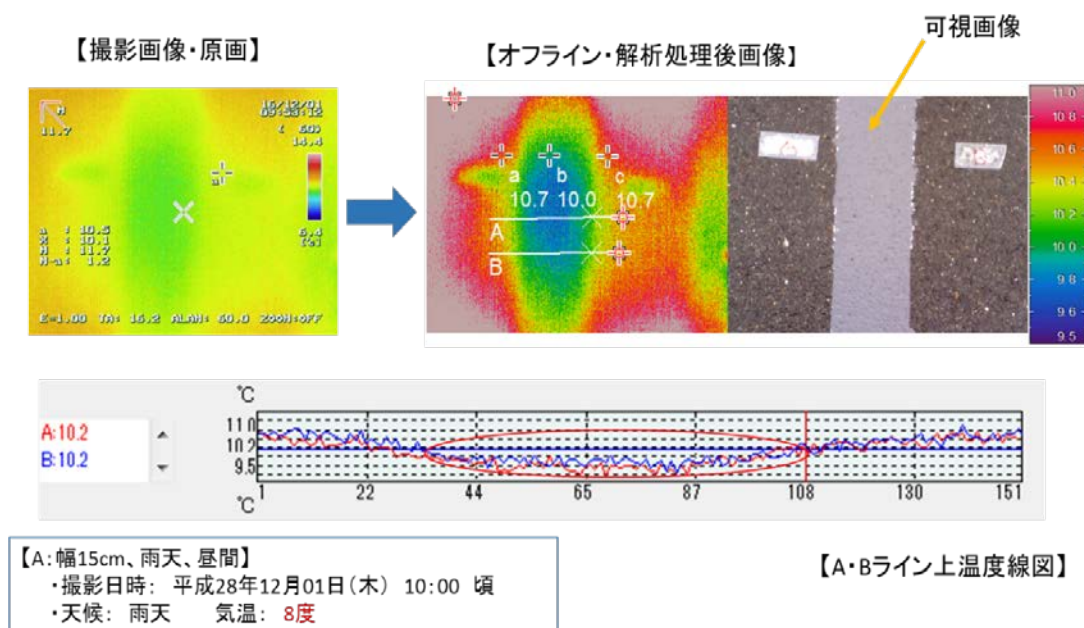


図 1-1.3.1-6 冬・雨天時・昼間の画像例

⑦ 赤外線カメラの画像評価結果の整理

- ・ 区画線の種類では、反射率が高まる《白色下塗りがある方》が、また塗装幅の種類では、周辺の温度差の影響を受けにくい《幅が広い方》が識別しやすい。
- ・ 《コンクリート路面》及び《通常の白線》は、もともと反射率が高いため、高日射反射塗料区画線との識別が難しい。
- ・ 《夕方》、《日没直後》、《夜間》は、周辺との温度差がなくなるため、温度差での識別は難しくなるが、区画線内の温度が均一であれば、画素データのソフト処理にて識別できる。
- ・ 《雨天》時は、舗装面の水分により温度分布がぼやけるため、区画線のエッジ検出は難しい。
- ・ 《白色下塗りがある方》の区画線の場合、通常の区画線幅と同じ《車線幅 15cm》の区画線でも《雨天》以外は、エッジが識別可能である。

### 1-1.3.2 画像認識ソフトによる区画線エッジ検出の可能性検討

#### ① 区画線認識アルゴリズムの概要

アスファルトと区画線の温度差を利用し、微分演算によって区画線のエッジ線を検出する。具体的には、ソーベルフィルタを用いて温度勾配のある温度画像中の点を抽出し、ハフ変換によってエッジ直線を検出する。最終的には複数のエッジ直線の中から区画線の両端のエッジ直線となるペアを、温度変化のパターンや2直線の傾きや位置関係を利用して選択する。ソフトを試作して評価した結果を次項にしめす。

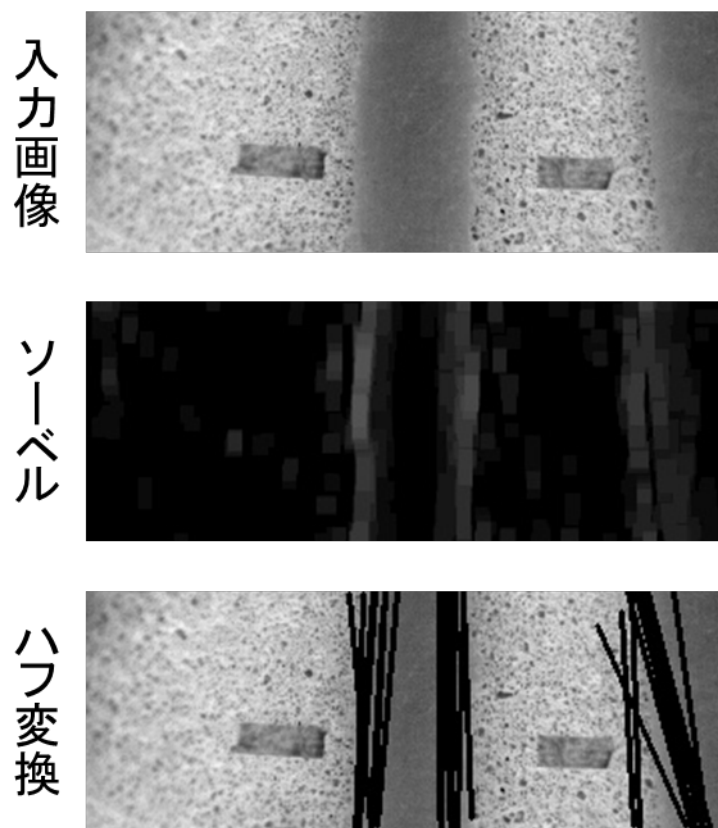


図 1-1.3.2-1 ソーベルフィルタ、ハフ変換を適用した結果の画像例

② 【秋・晴天時・昼間】の画像に対する区画線認識結果

右側のエッジ直線の位置が左に寄っているのが見て取れる。気温が高い日中は区画線のエッジ付近の温度が高く、エッジがぼやけるため、区画線のエッジ認識位置が本来のエッジ位置より内側に寄る傾向があると考えられる。

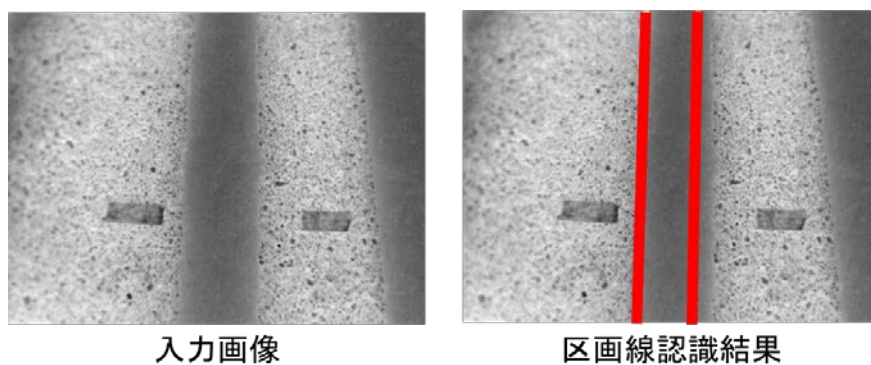


図 1-1.3.2-2 秋・晴天時・昼間の区画線認識結果

③ 【秋・晴天時・夕方】の画像に対する区画線認識結果

区画線のエッジがはっきりと出ているため、本来のエッジ位置に近い位置で区画線が認識できている。

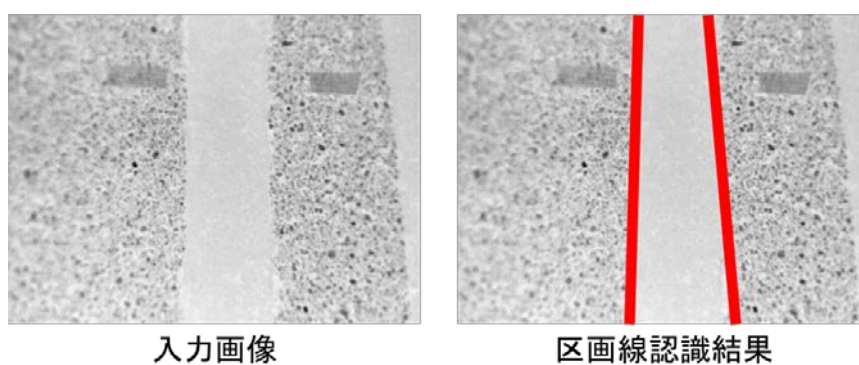


図 1-1.3.2-3 秋・晴天時・夕方の区画線認識結果

④ 【秋・晴天時・日没直後】の画像に対する区画線認識結果

入力画像中のエッジがはっきりと見て取れるが、エッジがギザギザになっている部分があるため、区画線の認識結果が本来のエッジに比べて傾いたと考えられる。

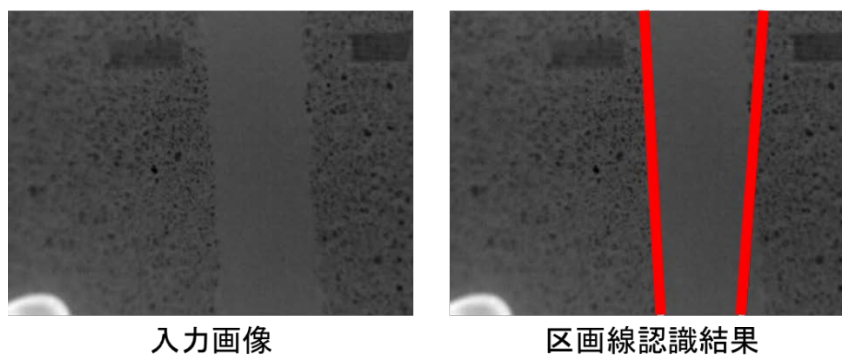


図 1-1.3.2-4 秋・晴天時・日没直後の区画線認識結果

⑤ 【秋・晴天時・夜間】の画像に対する区画線認識結果

【秋・晴天時・夕方】の画像に対する区画線認識結果と同様、区画線のエッジがはっきりと出ているため、本来のエッジ位置に近い位置で区画線が認識できている。

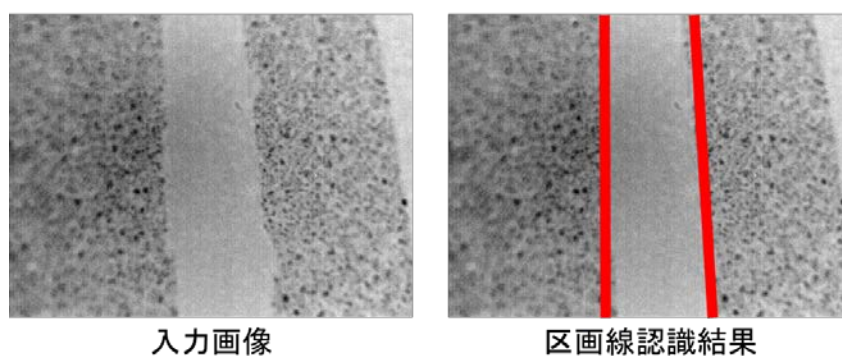


図 1-1.3.2-5 秋・晴天時・夜間の区画線認識結果

## ⑥ 区画線認識結果の整理

- ・ 気温が高い日中の時間帯は、区画線のエッジ付近が周辺の温度影響を受けやすいため、区画線のエッジ認識位置が区画線の内側にずれることがある。
- ・ 入力画像内のエッジがギザギザになっていると直線の検出結果が不安定になるため、正しいエッジ直線を特定できない。
- ・ 上記2つの課題に対して、今後は赤外線カメラの取り付け位置(距離、角度等)と区画線の幅(15cm等)を考慮することで認識の曖昧さを改善できる可能性がある。

### 1-1.3.3 評価結果のまとめ

#### ① 雨天以外は、赤外線カメラにて高日射反射塗料区画線のエッジを識別できる。

評価は、周辺アスファルトとの温度差の影響が少ない車線幅 30cm 及び 45cm に対しても行ったが、通常の区画線と同じ車線幅 15cm でも、雨天以外は赤外線カメラにてエッジの識別ができることが判明した。(白色下塗りありの場合)

#### ② 高日射反射塗料区画線は、周辺との温度差が小さくなると周辺より温度が高くなる傾向がある。

気温が高い日中においては、高日射反射塗料区画線は日射を強く反射するため、周辺のアスファルトより温度が低くなるものの、夕方や夜間などで温度差が小さくなると、温度が逆転し、区画線の方が温度が高くなる傾向がある。この理由について塗料メーカーと議論した結果、遮熱性能の高い塗料が塗装されているので、舗装に蓄熱されたものが電磁波として放射される状況において、これを舗装内部に向けて反射し、舗装からの放熱を抑制しているのではないかという推論が得られた。

これが定常的に起こる現象だとすると、赤外線カメラで撮影した画像から区画線のエッジを検出する際に、必ずしも周辺より温度が低いエリアを探すという検出条件では成立しないため、これを踏まえた検出条件の検討が課題となる。

#### ③ 画像認識ソフトによるリアルタイムでのエッジ検出は可能と思われるが、課題も多い。

オフラインでの画像認識ソフト(試作版)による解析により、夜間を含めた赤外線画像から区画線のエッジを検出することに成功した。

可視カメラでの白線認識システム(輝度差による認識)と同様にリアルタイム処理にて赤外線画像を認識することを想定した場合の課題としては、a)区画線の検出ロジック(温度差、車線幅等での検出条件)の改良がまず挙げられるが、その他、b)検出条件に適応した高日射反射塗料区画線の製作(塗料の調整等)、c)区画線の



磨耗・劣化による温度特性変化への対応、d)温度差がある時にエッジがぼやける（エッジがシャープに出ない）ことへの対応、e)赤外線カメラのコスト（現状数十万円以上）等の課題がある。

- ④ 現段階では、自動走行用あるいはバスの正着制御用区画線としての利用は難しい。自動走行やバスの正着制御は、昼夜、天候を問わず認識可能な技術が求められるため、現段階では、《雨天》時での認識ができない本方式の利用は難しいと考えられる。

## 1-2 車載ライダーによる相対位置検出技術

### 1-2.1 車載ライダーによる相対位置検出技術の概要

バス停付近に設置した複数のランドマークポールをライダー（以下 LiDAR）で認識し、バスからバス停ランドマークポールまでの相対距離を検出するとともに、あらかじめ測位したバス停ランドマークポールの位置座標とあわせることで自車位置座標を算出し、バス停へ接近する。また、バス停に存在する縁石を LiDAR で認識し、バスから縁石までの横方向の距離を検出することで最終的な正着制御を行う。

### 1-2.2 実験装置および実施方法

#### ① LiDAR

本実験では日本信号製の LiDAR である「FX8 型測距センサ」(以下 FX8) と Velodyne 製の LiDAR である「VLP-16」を使用した。以下に各 LiDAR の仕様を記載する。

#### FX8 仕様

- ・ 測距範囲：0.3m - 15m
- ・ 視野範囲：水平 60° × 垂直 50°
- ・ 角度分解能：水平 0.93° × 垂直 1.32°

#### VLP-16 仕様

- ・ 測距範囲：1m - 100m
- ・ 視野範囲：水平 360° × 垂直 30°
- ・ 角度分解能：水平 0.2° × 垂直 2.0°



FX8



VLP-16

図 1-2. 2-1 FX8 と VLP-16 外観

本実験では、FX8 と VLP-16 をバス前面に取り付けた状態で実験を行った。図 1-2. 2-2 に取り付けの様子をしめす。FX8 は 3 台使用し、角度を変えて取り付けることでバス前方 180° を測距可能とした。



図 1-2. 2-2 LiDAR 取り付け後

② バス停ランドマークポール認識に基づく自車位置検出

ア) バス停ランドマークポール認識に基づく自車位置検出法の概要

バス停付近に設置したランドマークポール2本をLiDARで認識し、相対位置(x, y)を検出する。また、2本のランドマークポールをバス停に設置する際にポールの位置座標(X, Y)をRTK-GPSを用いて測位しておく。この相対位置(x, y)と座標(X, Y)の組から式1-2.2-1、式1-2.2-2により自車位置座標を算出する。

式 1-2.2-1

$$\begin{pmatrix} X_{bus} \\ Y_{bus} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \end{pmatrix}$$

ただし、n = 1 or 2

式 1-2.2-2

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{x_1 - x_2}{y_1 - y_2} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{X_1 - X_2}{Y_1 - Y_2} \right)$$

式1-2.2-2の角度 $\theta$ はLiDAR座標系とGPS座標系のずれ角を表す。図1-2.2-3に各パラメータの関係図を示す。

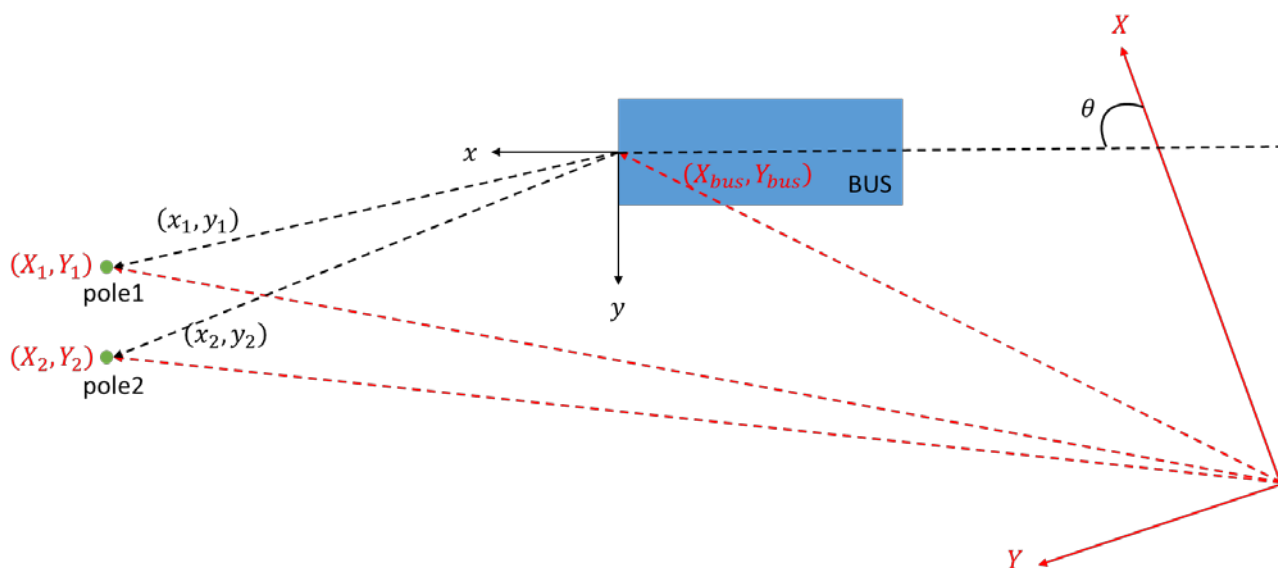


図 1-2.2-3 自車位置検出に用いるパラメータの関係図

## イ) 実験環境

本実験では FX8 の測定可能距離 15m 内での位置検出性能評価を行った。バス停ランドマークポールが細すぎると LiDAR で認識できない可能性があるため、FX8 と VLP-16 のどちらの LiDAR でも 15m 先から認識できる幅 45cm、高さ 90cm のものを用意した。本実験では図 1-2.2-4 に示すように 2 本のポールを設置し、ポール間の間隔は 1m とした。



図 1-2.2-4 バス停ランドマークポール

## ③ 縁石認識に基づく相対位置検出

### ア) 実験環境

道路構造令で定められた縁石の高さは 15cm から 25cm となっているため、本実験では高さ 19cm のコンクリートブロックを産業技術総合研究所つくば北サイト内に並べて仮想のバス停とした。本実験では縁石に対する車体の角度と車体から縁石までの距離を変更し、停車状態での相対位置検出精度を評価した。



図 1-2.2-5 正着目標となる縁石

#### イ) 縁石認識アルゴリズム概要

- LiDAR からの入力点群より路面平面を検出し、立体物の点群を抽出
- 各点の法線ベクトルを算出し、法線方向から縁石候補となる点群を抽出
- クラスタリング処理
- RANSAC アルゴリズムを用いた直線検出により縁石の位置・傾きを算出

### 1-2.3 車載 LiDAR による自車位置検出技術の性能評価

#### ① バス停ランドマークポール認識に基づく自車位置検出

##### ア) 評価方法

車両に取り付けた RTK-GPS により測位した座標を車両位置の真値とし、LiDAR により検出した車両位置と比較して評価する。ただし、LiDAR と RTK-GPS とでは車両への取り付け位置が異なるため、取り付け位置の偏差量を LiDAR により検出した車両位置に足し合わせたものを最終的な車両位置検出結果とした。本実験では図 1-2.3-1 に示す a, b の距離を変化させて測定した。

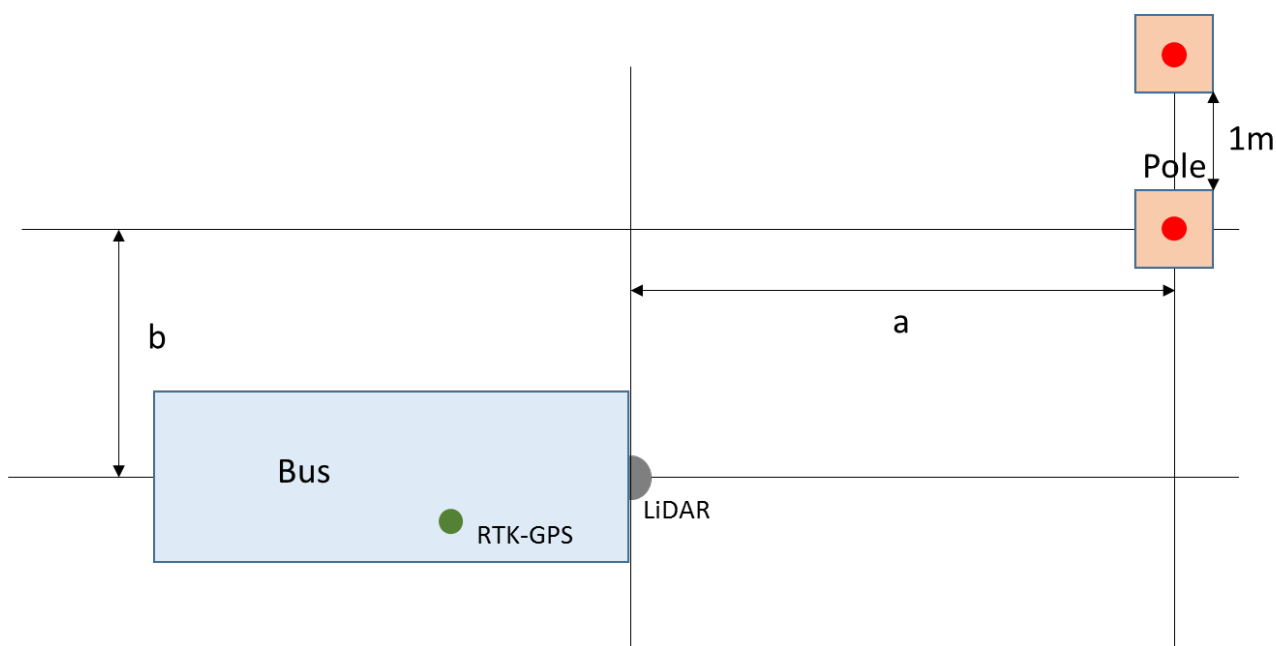


図 1-2.3-1 バスとバス停ランドマークポールとの位置関係

イ) 評価結果

バス停ランドマークポールからの相対位置を変えてLiDARにより自車位置を検出した結果をRTK-GPSにより測位した自車位置と比較した。結果を以下の表に示す。各表題に記載した a, b の値は図 1-2.3-1 に示す距離を表しているが、この距離は目安量であり正確な距離を示したものではない。各表中の X, Y は位置座標を表しており、単位は[m]である。error の項目はLiDARにより検出した位置座標とGPSにより測位した位置座標との誤差を表している。

表 1-2.3-1 VLP-16 による自車位置検出結果(a=5[m], b=2.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19474.34	19474.38	-0.04
Y	-17312.85	-17313.07	0.22

表 1-2.3-2 VLP-16 による自車位置検出結果(a=10[m], b=2.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19470.26	19470.33	-0.07
Y	-17309.92	-17309.86	-0.06

表 1-2.3-3 VLP-16 による自車位置検出結果(a=15[m], b=2.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19466.27	19466.34	-0.07
Y	-17306.94	-17306.88	-0.05

表 1-2.3-4 VLP-16 による自車位置検出結果(a=5[m], b=3.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19473.77	19473.80	0.03
Y	-17313.82	-17313.91	0.09

表 1-2.3-5 VLP-16 による自車位置検出結果(a=10[m], b=3.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19469.66	19469.80	-0.14
Y	-17311.14	-17310.89	-0.25

表 1-2.3-6 VLP-16 による自車位置検出結果(a=15[m], b=3.3[m])

	VLP-16 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19465.80	19465.90	-0.10
Y	-17308.17	-17308.03	-0.14

表 1-2.3-7 FX8 による自車位置検出結果(a=5[m], b=2.3[m])

	FX8 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19474.65	19474.38	0.27
Y	-17312.73	-17313.07	0.34

表 1-2.3-8 FX8 による自車位置検出結果 (a=10[m], b=2.3[m])

	<b>FX8 [m]</b>	<b>GPS [m]</b>	<b>error [m]</b>
X	19470.58	19470.33	0.25
Y	-17310.30	-17309.86	-0.44

表 1-2.3-9 FX8 による自車位置検出結果 (a=15[m], b=2.3[m])

	<b>FX8 [m]</b>	<b>GPS [m]</b>	<b>error [m]</b>
X	19466.87	19466.34	0.53
Y	-17307.21	-17306.88	-0.33

表 1-2.3-10 FX8 による自車位置検出結果 (a=5[m], b=3.3[m])

	<b>FX8 [m]</b>	<b>GPS [m]</b>	<b>error [m]</b>
X	19474.08	19473.80	0.28
Y	-17313.86	-17313.91	0.05

表 1-2.3-11 FX8 による自車位置検出結果 (a=10[m], b=3.3[m])

	<b>FX8 [m]</b>	<b>GPS [m]</b>	<b>error [m]</b>
X	19470.04	19469.80	0.24
Y	-17311.41	-17310.89	-0.52



表 1-2. 3-12 FX8 による自車位置検出結果(a=15[m], b=3.3[m])

	FX8 [m]	GPS [m]	error [m]
X	19466.56	19465.90	0.66
Y	-17308.11	-17308.03	-0.08

ウ) 評価結果のまとめ

- ・ VLP-16 による位置検出誤差は最大で 0.25[m]、FX8 では 0.66[m]
- ・ FX8 に比べて VLP-16 の位置検出精度が高い

エ) 考察

今回の実験では FX8、VLP-16 どちらの LiDAR に関しても操舵制御に利用する値としては位置検出誤差が大きすぎる結果となった。原因としては、LiDAR によるポール位置の認識誤差とそこから算出される LiDAR 座標系と GPS 座標系とのずれ角の認識誤差が合わさって、車両位置の検出結果が大きくずれたと考えられる。この誤差を限りなく小さくするためには、ポール間の距離を大きく離すことでポール位置の認識誤差による座標系間のずれ角への影響を小さくする方法が考えられるが、バス停付近に設置することを考えると大きく離れた距離でランドマークポールを設置するのは難しい。また、ポール間の距離を離すことで LiDAR からポールまでの距離も離れるため、ポール位置の認識誤差が大きくなる恐れがある。

VLP-16 に比べて FX8 による車両位置検出精度が低い理由としては、FX8 の角度分解能が低く、幅 45cm のポールに対して数点の測距しかできないため、ポールの位置認識精度が悪く、そこから算出する車両位置検出結果が著しく悪くなったと考えられる。

今後の対策として、ポール間の距離を今回の設置間隔 1m より離れた距離（例：2m, 3m）とし、VLP-16 センサを用いることである程度の精度向上が期待できる。

② 縁石認識に基づく相対位置検出

ア) 評価方法

本実験では車体側面と縁石との角度、車体から縁石までの距離を変えて停車状態における角度と距離の検出精度を評価した。ここで、車体から縁石までの距離は車両前方 3m の地点における車両中心から縁石までの距離とした。図 1-2. 3-2 に本実験での評価項目となる正着時の角度 $\theta$ と距離 $d$ をしめす。

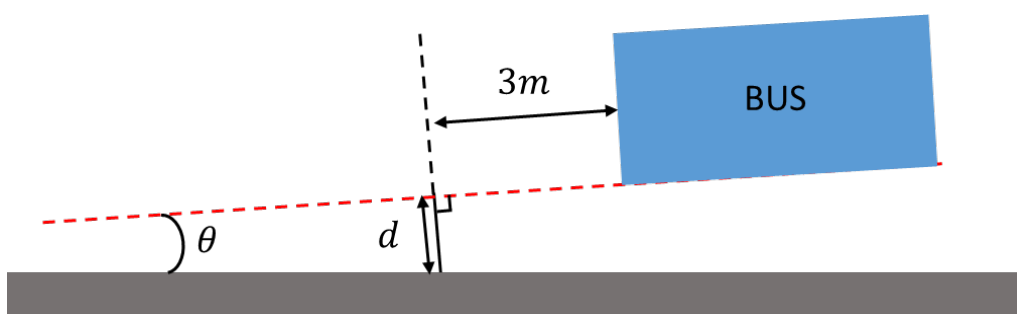


図 1-2. 3-2 角度 $\theta$ と距離 $d$

イ) 評価結果

図 1-2. 3-2 にしめす角度 $\theta$ と距離 $d$ を変えた 4 つの正着パターンにおける角度 $\theta$ と距離 $d$ の検出結果を実測値と比較した。

表 1-2. 3-13 正着パターン 1 ( $d = 1.40[m]$ ,  $\theta = 1.1[deg]$ )

実測値	FX8(差)	VLP-16(差)
$d = 1.40[m]$	-0.02	0.01
$\theta = 1.1[deg]$	-0.7	0.3

表 1-2. 3-14 正着パターン 2 ( $d = 1.11[m]$ ,  $\theta = 5.6[deg]$ )

実測値	FX8(差)	VLP-16(差)
$d = 1.11[m]$	-0.04	0.00
$\theta = 5.6[deg]$	-0.9	0.3

表 1-2. 3-15 正着パターン 3 ( $d = 2.30[m]$ ,  $\theta = -5.3[deg]$ )

実測値	FX8(差)	VLP-16(差)
$d = 2.30[m]$	-0.08	0.00
$\theta = -5.3[deg]$	0.5	0.4

表 1-2. 3-16 正着パターン 4 ( $d = 2.36[m]$ ,  $\theta = 1.5[deg]$ )

実測値	FX8(差)	VLP-16(差)
$d = 2.36[m]$	-0.10	0.01
$\theta = 1.5[deg]$	0.5	0.7

## ウ) 評価結果のまとめと考察

評価結果から、FX8による検出は距離 $d$ に関して最大で10cmずれている。角度 $\theta$ に関しては最大で0.7度のずれが生じている。VLP-16による検出は距離 $d$ に関して1cmの精度で検出できている。角度に関しては最大で0.7度のずれであった。

FX8に比べてVLP-16を用いた場合の距離検出精度が高い理由としては、VLP-16センサの水平角度分解能が0.2度と高いため、近くの縁石と遠方の縁石とで点の粗密に差が生じにくく、RANSACアルゴリズムによる直線検出の際に遠方の縁石点群も考慮した直線検出がなされたためと考えられる。一方FX8の水平角度分解能は0.93度と低いため、近くの縁石点群は密になり遠方の縁石点群は粗になる。よってRANSACアルゴリズムによる直線検出の際に近くの縁石点群のみで縁石のエッジ直線を推定してしまい、検出結果が悪くなったと考えられる。

## 1-3 磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術

### 1-3.1 磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術の概要

#### 1-3.1.1 磁気マーカによる位置検出

磁気マーカと車載センサを用いた位置検出方法では正着のための目標走行軌跡に沿って磁気マーカを配列する。配列された磁気マーカ毎にマーカの設置位置がRTK-GPSを用いて測位され、正着制御開始を1番として配列順番に全ての磁気マーカの測位情報を車載の磁気マーカセンサに記憶する。

従ってバスが磁気マーカ上を通過するごとに、磁気マーカの配列順番により磁気センサは走行位置を検出することが可能となる。

また車両中心が磁気マーカの直上を通過しない場合、車両中心と磁気マーカの横方向ずれ量は磁気センサを用いて検出され、検出されたずれ量と磁気マーカの測位情報より車両の走行位置、正確には磁気センサ中心位置の位置座標が検出される。これにより車両が磁気マーカの直上を通過しない場合も車両が磁気マーカを通過した時点で正確に走行位置を検出することができる。

図 1-3.1.1-1 に磁気マーカの配列、図 1-3.1.1-2 に磁気マーカと磁気センサの位置関係をしめす。なお、検討した磁気センサおよび磁気マーカの詳細については1-3.3項に記載する。

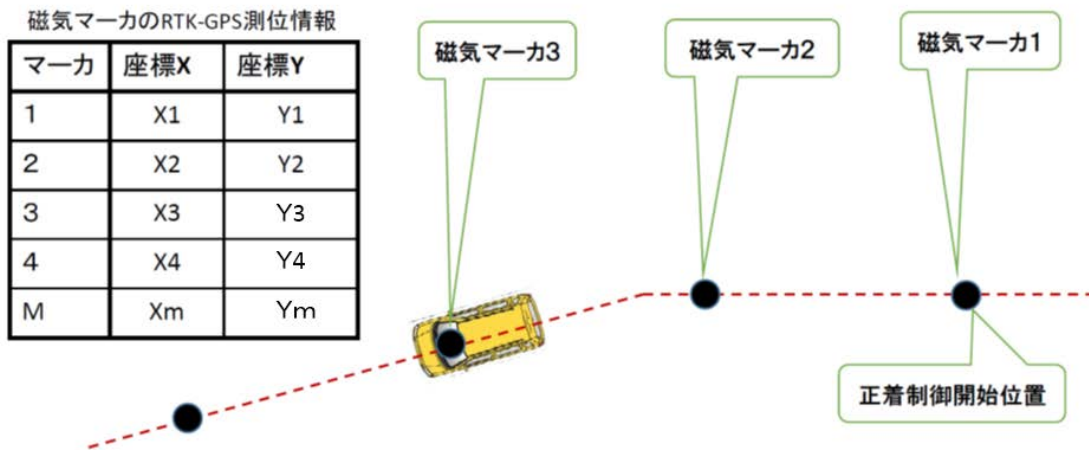


図 1-3. 1. 1-1 磁気マーカの配列

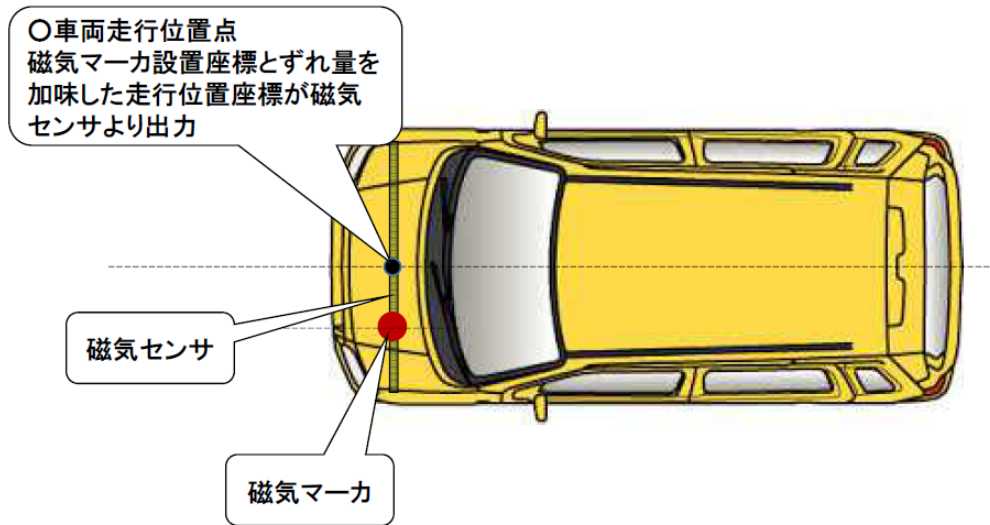


図 1-3. 1. 1-2 磁気マーカと磁気センサ出力

### 1-3.2 磁気マーカ間の自己位置推定

磁気マーカ通過時、車両走行位置は磁気センサより出力されるが、次の磁気マーカを通過するまで車両走行位置は更新されない。このため、磁気センサからの車両走行位置を初期値として、次の磁気センサまでの走行位置は車両に搭載された速度センサとジャイロセンサ（主にヨーレート情報）を用いて慣性航法を用いて推定される。

慣性航法による自己位置推定方法や精度については以下に記載する。

#### ① 慣性航法の概要

本手法では、磁気マーカ通過時に正確な車両の位置とヨー角を検出し、磁気マーカ間の車両位置とヨー角は慣性航法により推定する。慣性航法は、車載センサにより計測した車速とヨーレートを使って自己位置を推定する手法である。概要図を図 1-3.2-1 に示す。

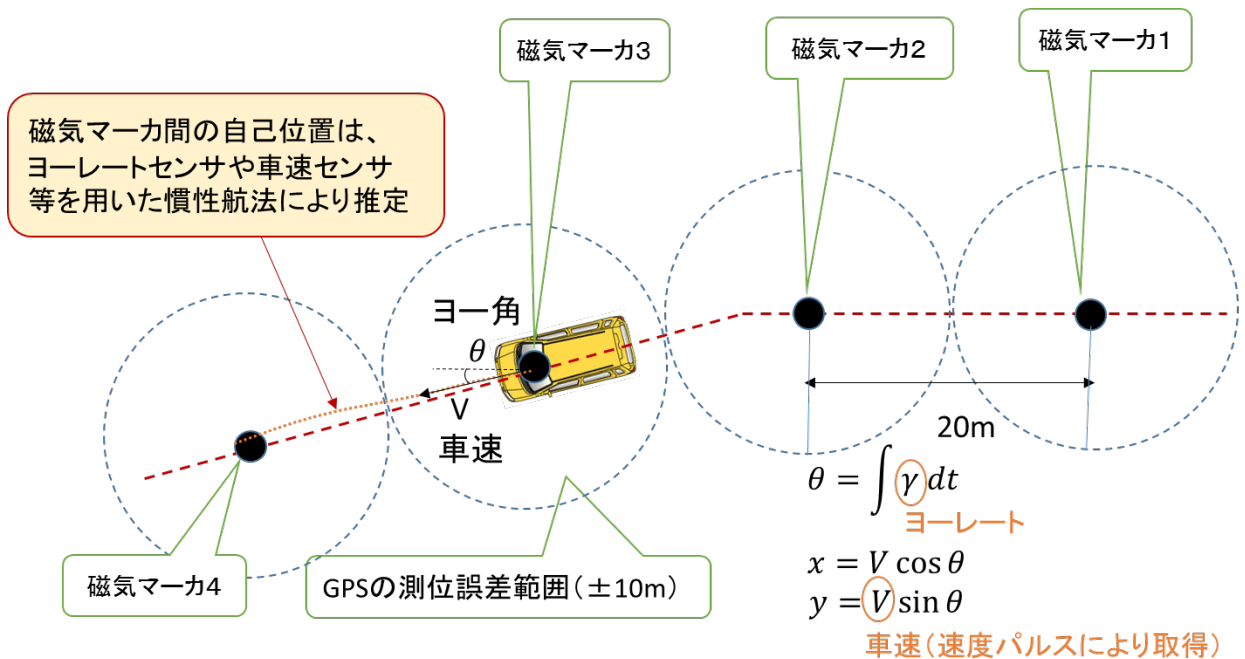


図 1-3.2-1 磁気マーカ間の慣性航法

ア) 慣性航法に用いるセンサ補正

車速は車両にあらかじめ搭載されている速度センサのパルスから算出し、ヨーレートは重心位置に搭載した、車載用ヨーレートセンサ（量産品）および高精度ジャイロセンサ（多摩川精機 TAG264）の2種類のセンサにより計測し、比較する。ヨーレートセンサを実際に車両に取り付けた様子を図 1-3. 2-2 に示す。

ヨーレートの補正係数は、車両を1周円旋回させた際のヨー角から算出する。車載用ヨーレートセンサおよび高精度ジャイロセンサの補正結果を図 1-3. 2-3 に示す。



図 1-3. 2-2 慣性航法に用いるセンサ（車両重心位置に設置）

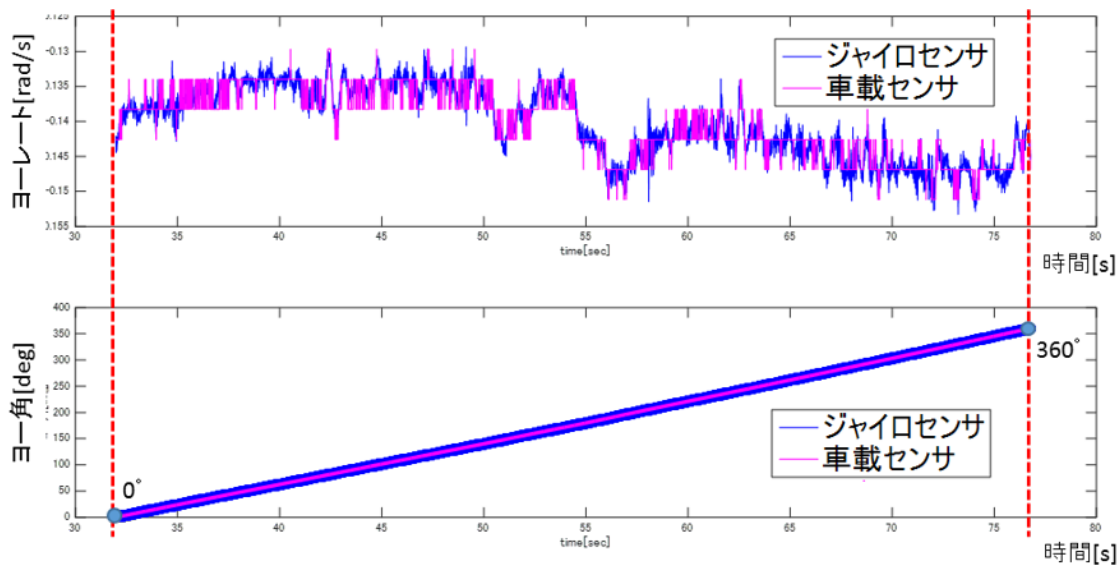


図 1-3. 2-3 慣性航法に用いるセンサ（車両重心位置に設置）

イ) 実験方法

テラス型（直線型）バス停への正着を想定し、約 30m（32m）先にあるバス停に 2.5m 幅寄せした際の、慣性航法による自己位置推定誤差を検証する。リファレンスは RTK-GPS により計測した車両の絶対座標とする。

ウ) 慣性航法による自己位置の推定結果

図 1-3.2-4 および図 1-3.2-5 に、30m 先のバス停に正着するまでの自己位置の推定軌跡および、正着時の推定誤差をしめす。3 回の実験の推定誤差平均値は 30cm 程度であったため、正着時の自己位置を慣性航法により推定すると、30m 走行する間に 30cm 程度の誤差が生じることがわかった。また、車載用ヨーレートセンサはジャイロセンサに比べてやや推定精度が劣るが、大きな差はないことがわかった。

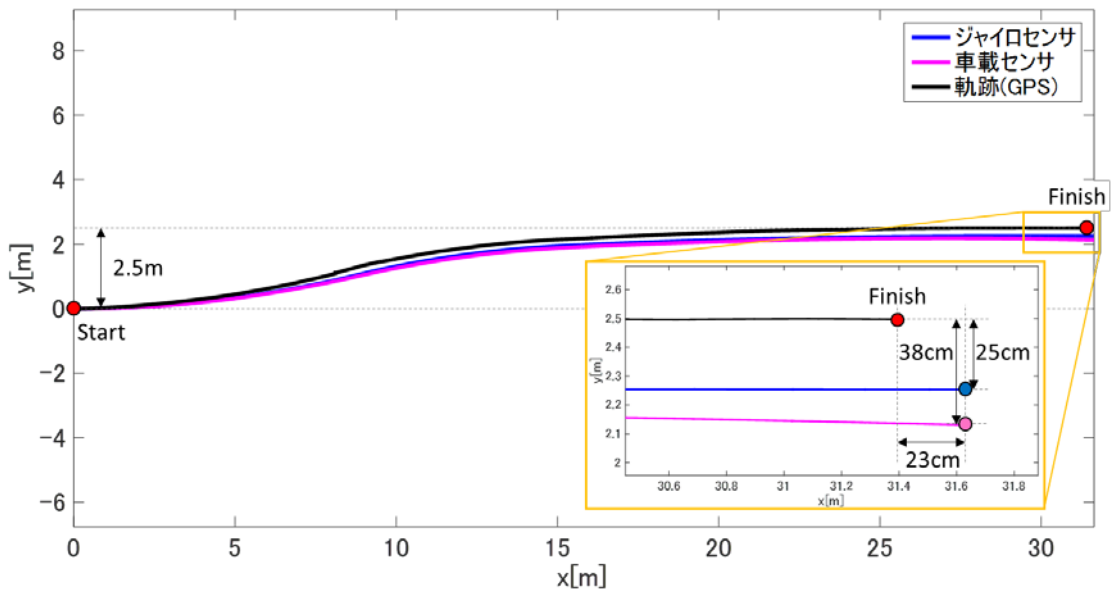


図 1-3.2-4 30m 間の自己位置推定軌跡（N=1 回目）



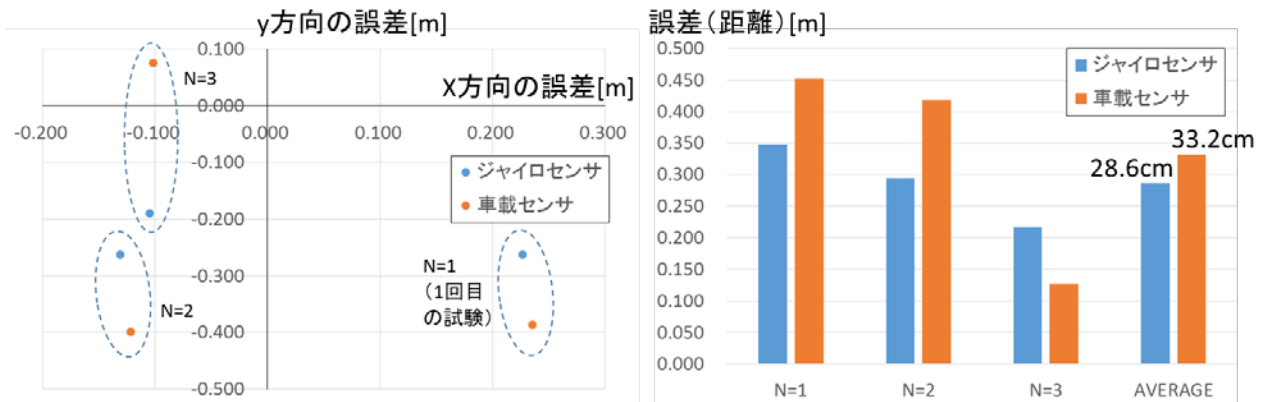


図 1-3.2-5 30m 間の自己位置推定誤差

次に、ヨーレート (Y) の大きい領域と小さい領域での推定誤差を比較するため、図 1-3.2-6 のように領域を 2 つに分けて推定誤差を再度算出したところ、図 1-3.2-7 のように、ヨーレートの大きい領域では、15m 先の自己位置推定誤差が 30cm 程度と大きく、それに対して小さい領域では 10cm と誤差が小さいことがわかった。これにより、ヨーレートの大きい領域が終わる場所に磁気マーカを 1 つ設置して位置とヨー角を補正することで、バス停付近の自己位置推定誤差を小さくすることができると考えられる。

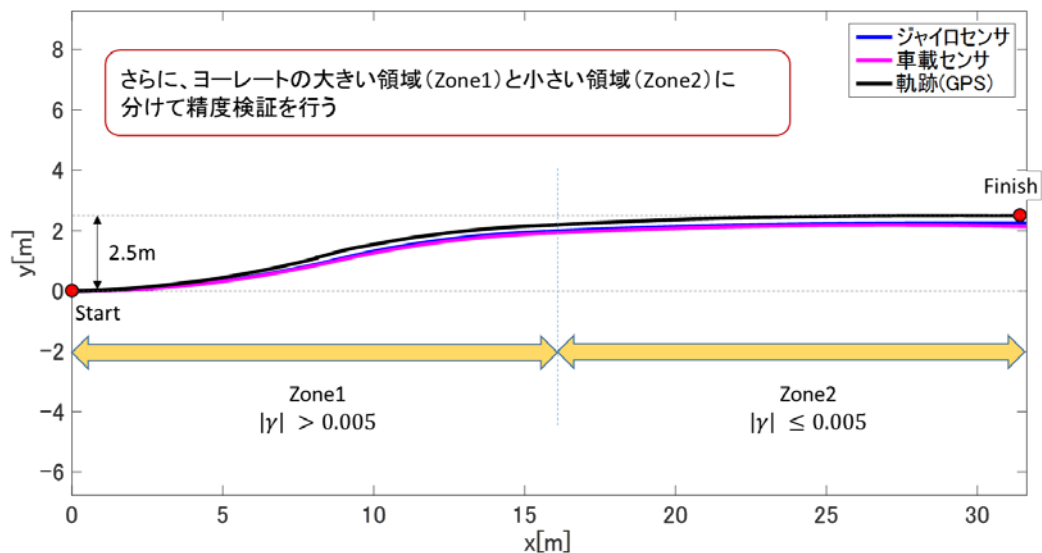


図 1-3.2-6 15m 間の自己位置推定軌跡

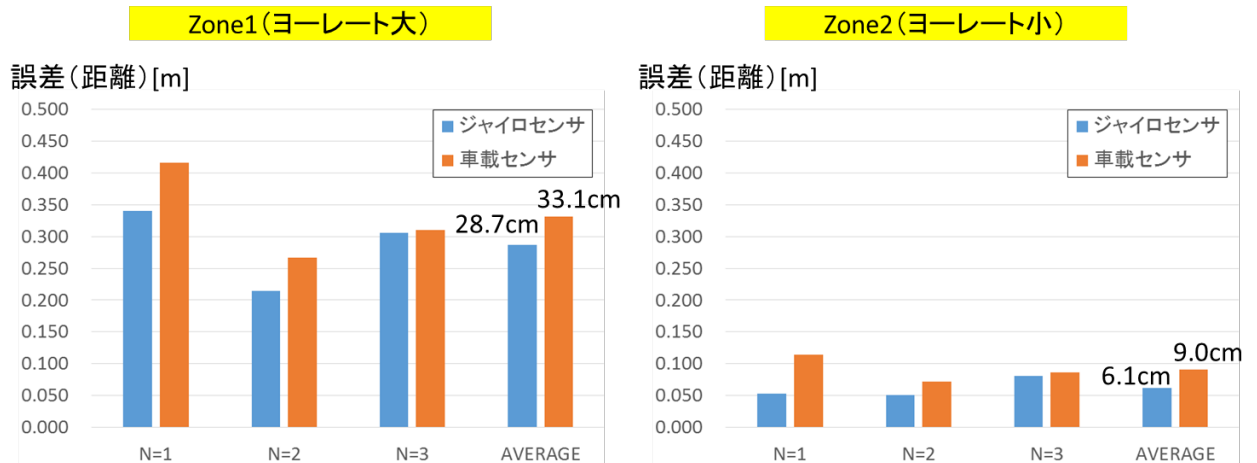


図 1-3. 2-7 15m 先の自己位置推定誤差

図 1-3. 2-8 のようにさらに領域を細かく分けて自己位置推定を行ったところ、バス停での推定誤差は 5cm 程度まで小さくできることがわかった。ただし、この値は磁気マーカにおいて誤差を 0 にリセットした場合であり、現実的には連続性を考えると瞬間的には 0 にできないため、バス停正着時の推定誤差は 5cm より大きくなる。また、このときの磁気マーカの設置間隔は 8m 程度であり、磁気マーカの設置コストやメンテナンスを考慮すると現実的な間隔とは言い難い。

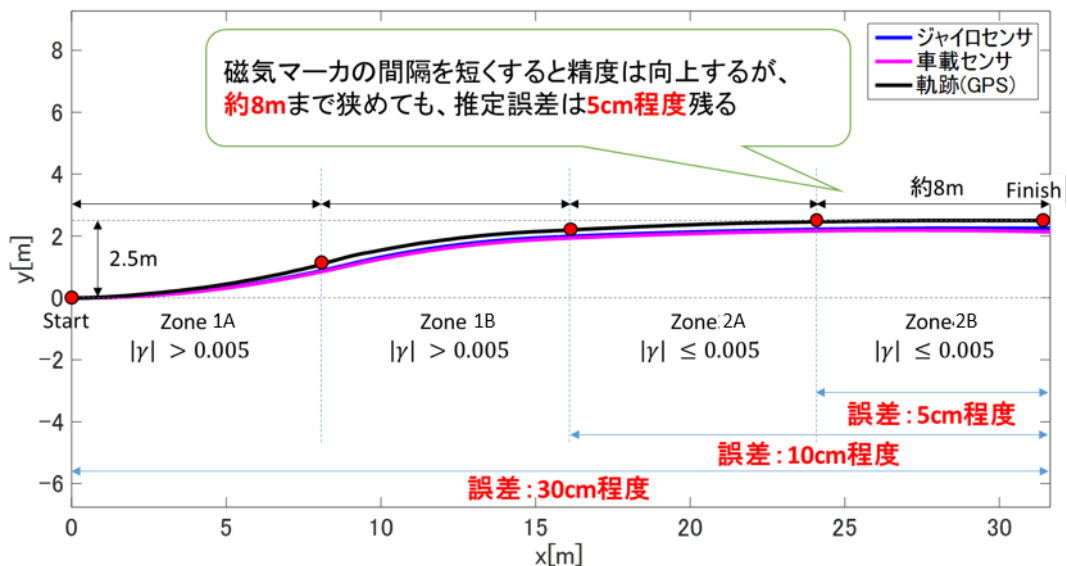


図 1-3. 2-8 8m 間の自己位置推定軌跡と誤差

### 1-3.3 磁気マーカと磁気センサユニットの製作

#### 1-3.3.1 磁気マーカ作製

道路表面に設置が可能で、施工性に優れる扁平形状の表面設置型磁気マーカと道路内に埋設し、耐久性に優れる円柱形状の埋設型磁気マーカの2種類を設計、試作した。なお、着磁方向はどちらも上下面の方向の単極着磁とし、路面から高さが200mm（計測位置）での磁気分布が同等となるように設計を行った。

磁気マーカ形状及び磁石特性を以下に示す。

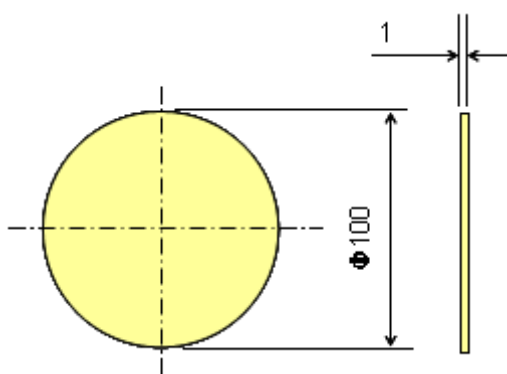


図 1-3.3.1-1 表面設置型磁気マーカ形状

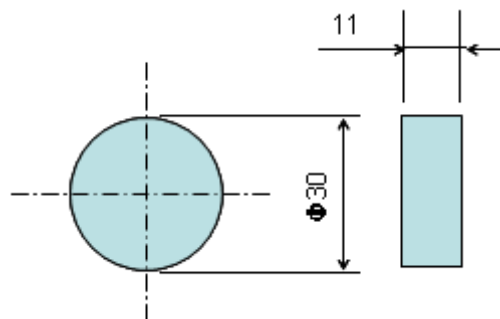


図 1-3.3.1-2 埋設型磁気マーカ形状

表 1-3.3.1-1 磁石特性

項目	表面設置型	埋設型
磁石種類	フェライトラバーマグネット	フェライトプラスチックマグネット
形状	Φ100×1t	Φ30×11t
磁石粉末	ストロンチウムフェライト	ストロンチウムフェライト
メインポリマー	CPE	PPS
Br	260mT	258mT
bHc	175kA/m	170kA/m
BHmax	11.9kJ/m <sup>3</sup>	13.0kJ/m <sup>3</sup>

道路表面からの高さ 200mm（計測位置）におけるそれぞれの磁気分布を以下にしめす。

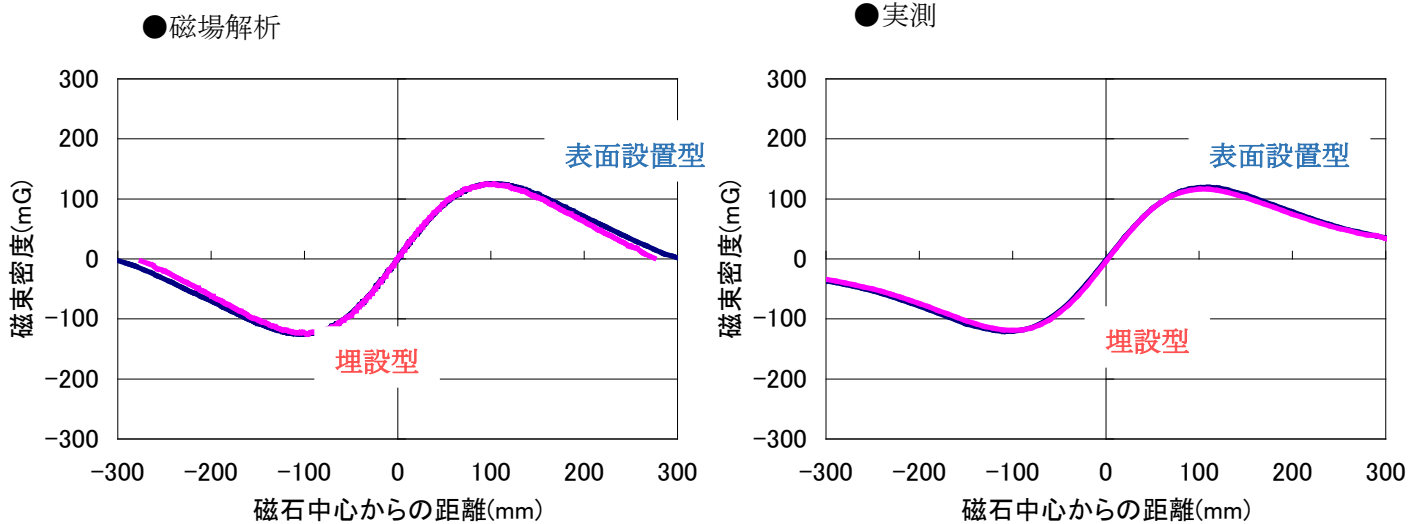


図 1-3.3.1-3 磁気分布

### 1-3.3.2 磁気センサユニット作製

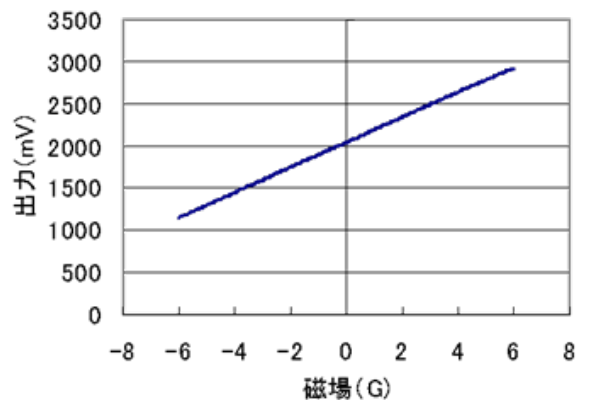
高感度磁気センサ（MI センサ）を車幅方向に 50 mmピッチで配置し、一様磁場をキャンセルするための差動増幅回路、演算処理用マイコンを搭載した磁気センサユニットを試作した。

磁気センサユニットに用いた MI センサの磁気特性を以下に示す。

表 1-3.3.2-1 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
$\sigma$ ノイズ	10kHz以下	0.8 mG
ノイズ密度	@1Hz	0.1 $\mu$ G $\sqrt$ Hz

図 1-3.3.2-1 磁気センサ出力特性



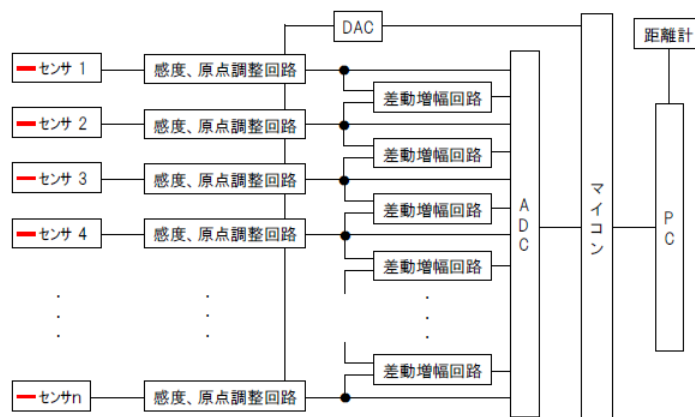


図 1-3. 3. 2-2 磁気センサユニットブロック図

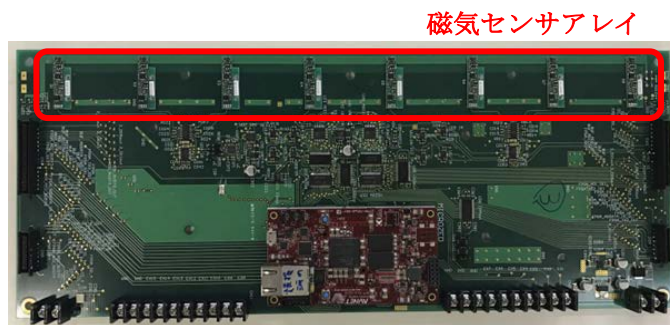


図 1-3. 3. 2-3 磁気センサユニット外観写真

### 1-3.4 磁気マーカと磁気センサユニットの性能評価

#### 1-3.4.1 車両走行角調査結果

##### ① 実験概要

路上に設置した 2 つの磁気マーカを結ぶ線分と任意の角度で路上に敷設した軌道に沿って磁気センサユニットを移動させ、それぞれの磁気マーカの横偏差量と磁気マーカ設置距離より算出される走行角の計測を行い走行角の測定精度を調査する。

##### ② 実験条件

- ・ 磁気マーカ、センサユニット間距離：200mm
- ・ 磁気マーカ設置間隔：2,000mm
- ・ 磁気マーカ設置角：0～6 deg @0.14deg

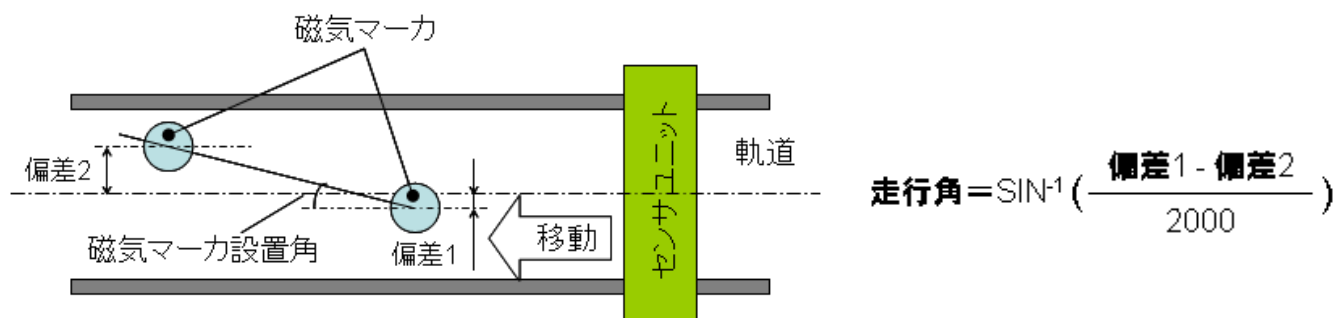


図 1-3.4.1-1 走行角計測イメージ図

③ 測定結果

- ・ 車両走行角調査の結果、測定誤差は $\pm 0.2^\circ$  以下であった。

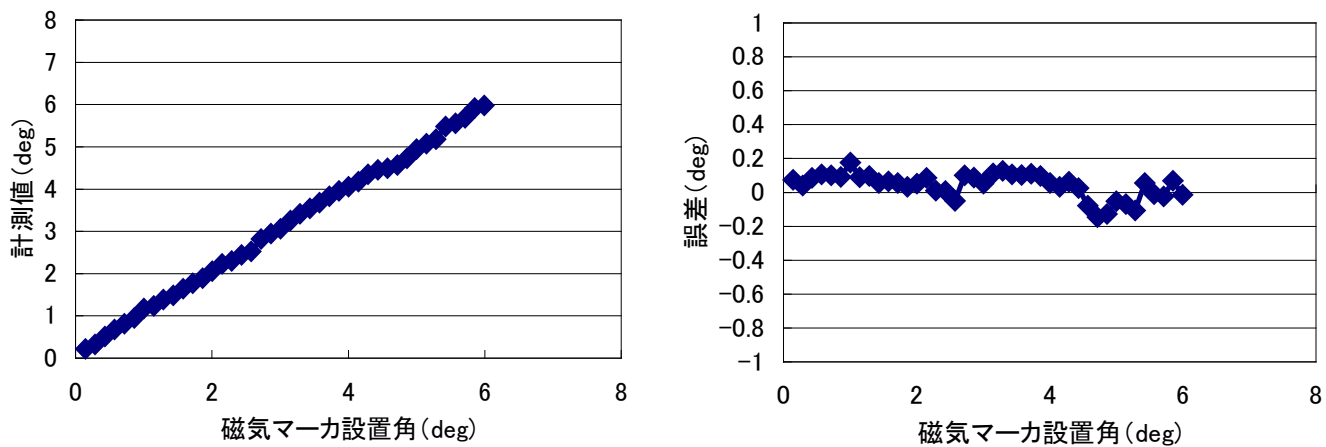


図 1-3. 4. 1-2 走行角評価結果

#### 1-3.4.2 磁気マーカ耐久性評価結果

埋設型磁気マーカの耐久性を評価する為、回転ラベリング試験を実施して磁力の変化及び路面の外観観察を実施した。

##### ① 磁気マーカ施工方法（試料調整）

アスファルトに電動ドリルで穴を削孔 → 穴に磁気マーカを設置  
→ 充填剤にて磁気マーカの固定及び穴埋め（磁気マーカは路面から 10mm 埋設）

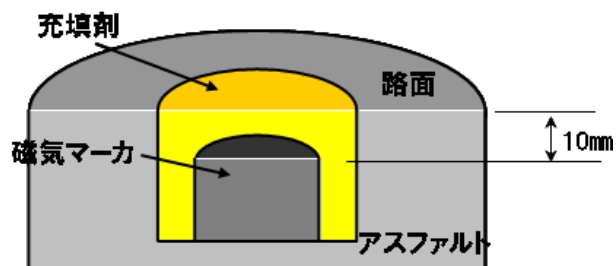
##### ② 試験条件

- ・ 充填剤：クイックガードS、スーパーセット、アスクリートキット
- ・ 試験条件：表 I-3-3 参照
- ・ 試料数：各水準 N=3

表 1-3.4.2-1 試験条件

項目	条件
走行回数	12万回
テーブル速度	20 km/h
タイヤ種類	E250
輪荷重	1.47 kN
タイヤ空気圧	157 kN
シフト幅	± 50mm
散水	有り(2 L / 分)

図 1-3.4.2-1 埋設型施工イメージ図





③ 試験結果

- ・ 磁力変化率調査結果：各充填剤とも磁力変化は、ほぼ見られなかった。
- ・ 外観観察結果：各充填剤ともに12万回の試験で、変化は見られなかった。

図 1-3.4.2-2 磁力変化率調査結果

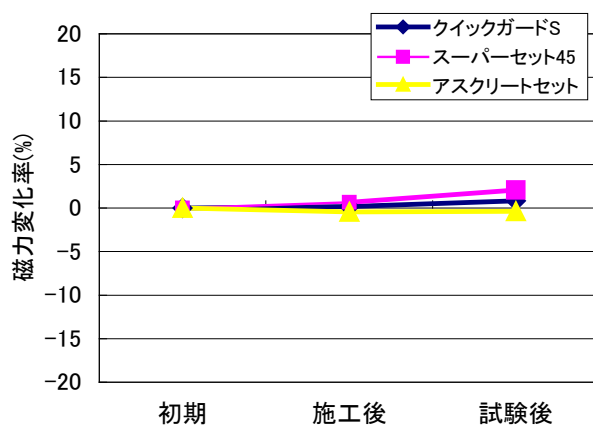


表 1-3.4.2-2 目視観察結果

種別	走行回数 番号	目視観察状況			
		5,000回	40,000回	80,000回	120,000回
クイック ガードS	1	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	2	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	3	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
スーパー セット45	1	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	2	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	3	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
アスクリート セット	1	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	2	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し
	3	変化無し	変化無し	変化無し	変化無し

#### 1-4 画像認識による位置検出法の検討

道路面に描画された図形等より画像認識技術を用いて走行位置を推定する方法において、本調査では、テンプレートマッチング画像処理技術を応用した走行位置推定法について検討を行ったので、以下の検討結果について報告する。

##### 1-4.1 テンプレートマッチング画像処理アルゴリズム

テンプレートマッチング法とは 2 個の画像がある場合、この画像がどれほど一致しているかを定量的に評価する方法である。図 1-4.1-1 にテンプレートマッチング画像処理アルゴリズムを示す。

例えば左側の画像 1 のある局所領域 A を切り出す。通常は 3×3 又は 4×4 の画素からなる正方形領域が用いられる。これを仮にテンプレート画像 B1 と呼ぶ。画像 1 のテンプレート B1 を右側画像 2（これを仮に参照画像と呼ぶ）の任意の局所領域 Br との一致度を算出する。一致度の算出は以下の式 1-4.1-1 で行われる。

式 1-4.1-1

$$\text{一致度} = \sum \text{参照画像} |Br - B1|$$

次にこの一致度算出を参照画像の全画像領域にわたり算出し、領域全ての誤差を求めることにより、画像の一致度を求めることが可能となる。

この方法を応用して、ステレオマッチング画像処理では物体までの距離を求めたり、オプティカルフローと呼ばれる方法で物体の移動速度や移動方向を算出する。

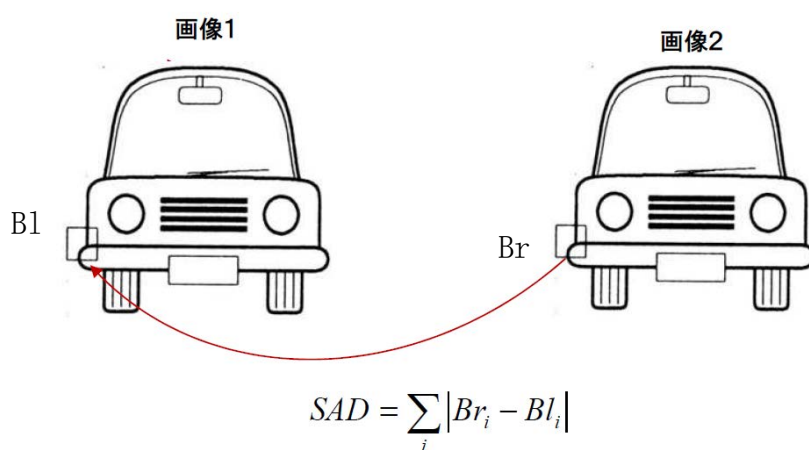
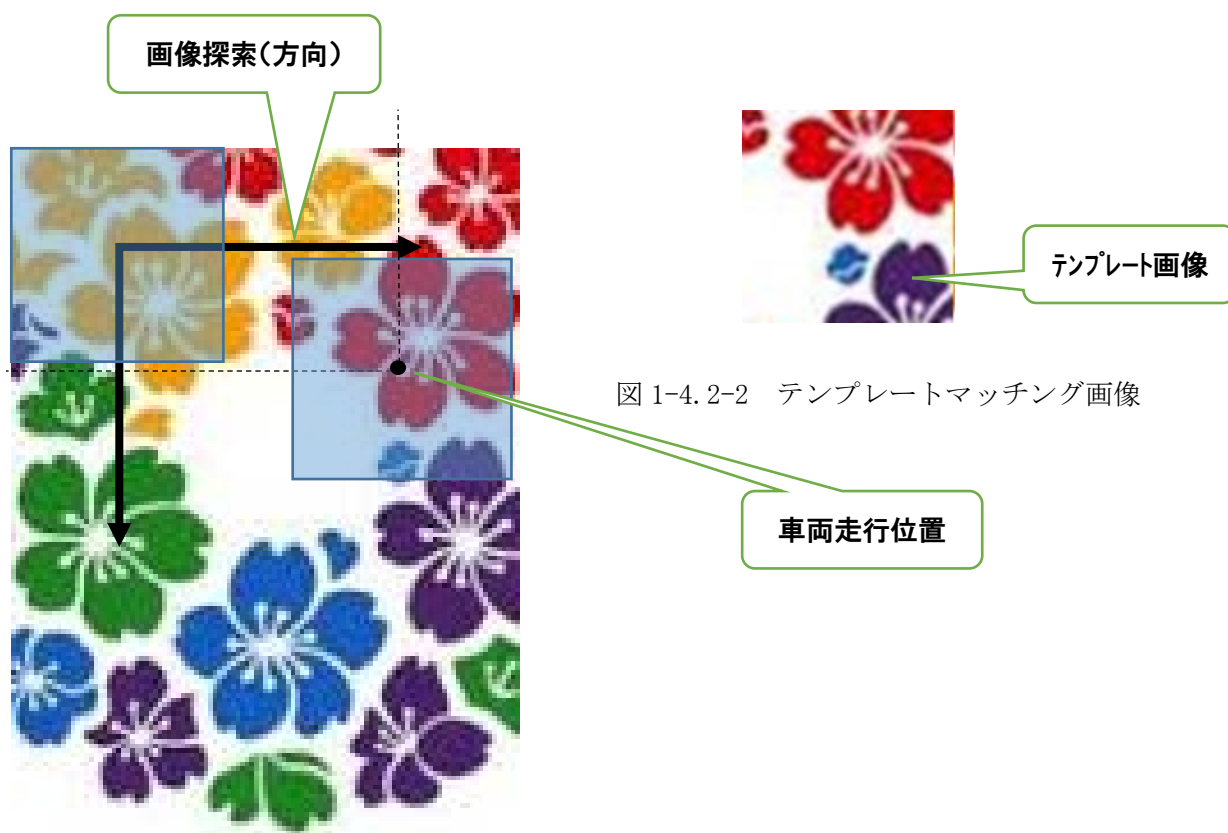


図 1-4.1-1 テンプレートマッチング画像処理アルゴリズム

## 1-4.2 テンプレートマッチング法による走行位置推定法のアルゴリズム

1-4.1 項で記したテンプレートマッチング技術を用いて走行位置を検出する位置検出アルゴリズムをしめす。

正着区間の道路に図 1-4.2-1 のような道路描画画像が描画されているとする。また図 1-4.2-2 は車両に搭載されたカメラより撮像された画像の中心部をしめすもので、テンプレートマッチング画像である。テンプレートマッチング処理を用いて、車載カメラからの部分画像をテンプレート画像が道路描画画像のどの位置と一致するかを探索し、全探索の中で最も一致した位置が現在の走行位置となる。



UKYO ● 20  
APPLICANT CITY

図 1-4.2-1 道路描画画像

### 1-4.3 カメラ画像から走行位置の算出

カメラで物体を撮像した場合、カメラ像は物体の実際の大きさとは異なる。従って、カメラで撮像した画像から実際の道路のディメンジョンを求めるためにはカメラ画像から道路のディメンジョンに変換する（以後カメラ座標—道路座標変換と呼ぶ）必要がある。図 1-4.3-1 にしめすように、カメラが道路面から高さ H、俯角  $\theta$  で取り付けられている場合、カメラ座標と道路座標の関係は以下の式 1-4.3-1 で表される。

そこでこの関係式より、カメラ画像を道路画像に変換して、走行位置を求める必要がある。

図 1-4.3-2 に通常の道路をカメラで撮像したカメラ画像から式 1-4.3-1 を用いて道路座標に変換した道路画像をしめす。

この結果、横方向は高精度で変換されるが、前後方向の精度はカメラから遠くなるほど低下する。高精度に変換するにはカメラを道路面に対し、垂直にとり付ける必要がある。

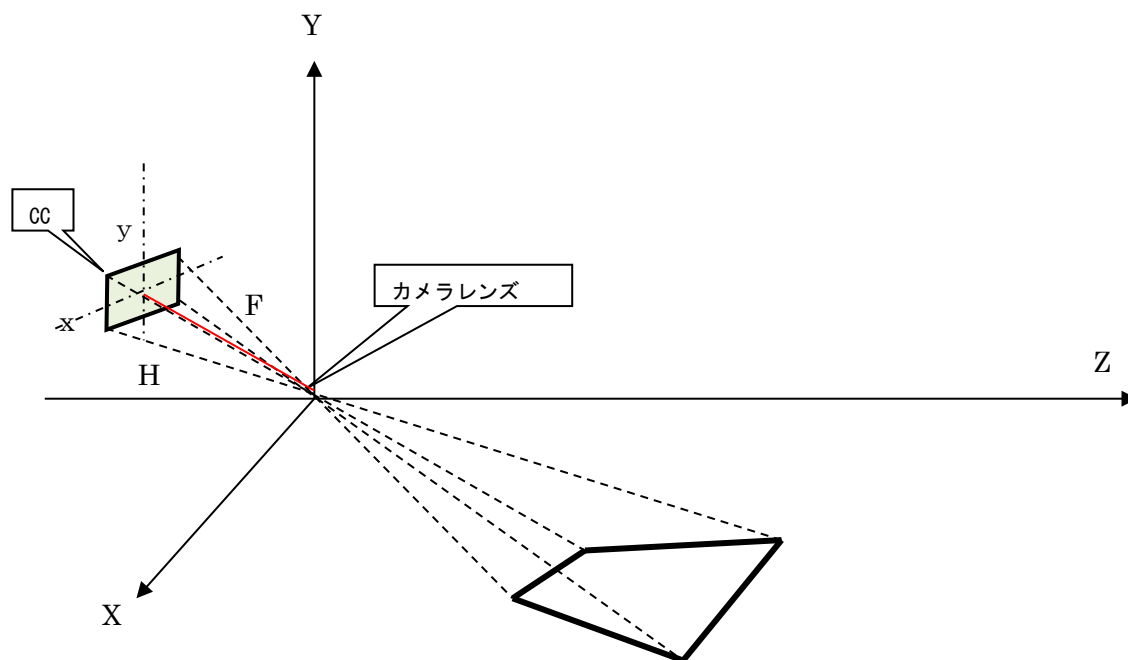


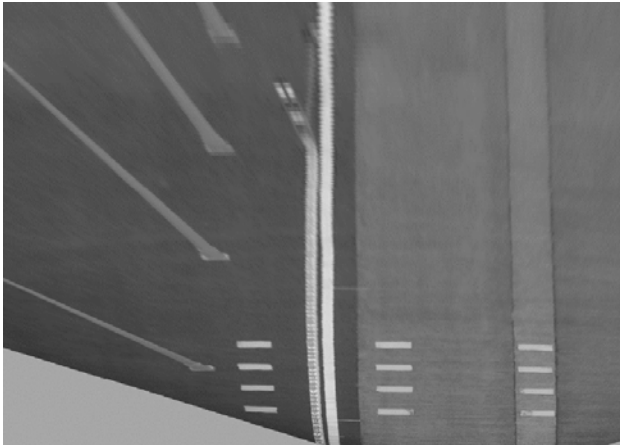
図 1-4.3-1 カメラ座標—道路座標関係図

$$\begin{aligned} x &= F \times X / (Z \cos \theta + Y \sin \theta) \\ y &= F (Y \sin \theta - Z \cos \theta) / (Z \cos \theta + Y \sin \theta) \end{aligned}$$

式 1-4.3-1 カメラ座標と道路座標の関係式



カメラ像 (カメラ座標)



道路変換画像 (道路座標)

図 1-4. 3-2 カメラ画像および道路変換画像

#### 1-4. 4 課題

上記道路図形の画像認識により走行位置を推定する方法において以下の課題が想定される。

- ① 正着道路画像の取得である。カメラ画像を精度高く平面道路座標に変換するには式 1-4. 3-1 に示すようにカメラを道路面に垂直に装着に撮像するとともに、カメラ画像は正着制御画像の一部のみ撮像しているため、全画像を撮像するには車両を移動しながら撮像し、これを精度良くつなぎ合わせる必要がある。
- ② 正着道路画像を取得する時間と正着制御時のカメラ画像取得時は異なっており、撮像時の照度変化が発生する。  
このため、正着道路画像の輝度に合うように正着制御時、カメラで撮像した画像の正規化が必要となる。
- ③ 座標変換精度の確保である。座標変換にはカメラの設置高さや取り付け角度を正確に計測する必要があるが、車載状態でこの計測を行うことは現実的には困難で

ある。

そこで、この変換を高精度に行うための変換方法を別途検討する必要がある。

## 1-5 レーザ光の路面反射による位置検出法の検討

### 1-5.1 レーザ光の路面反射による自車位置検出の概要

LiDAR を用いることで得られる情報には周辺物体までの距離情報とレーザ光の反射強度がある。この反射強度は物体までの距離や物体の形状、材質により変化する。この特性により、路面を LiDAR で観測すると場所によって路面の凹凸や白線、縁石の有無、雑草の生え方に違いがあるため、反射パターンが変化すると考えられる。そのため、事前に作成した路面反射 Map と走行中に観測した路面反射データのマッチングをとることで、Map 中の自車位置を検出可能になることを期待する。

今年度は路面状況の違う複数の箇所を LiDAR で観測し、レーザ光の反射パターンから自車位置を特定できる可能性があるか、基礎的な技術検討を行った。

### 1-5.2 実験方法

産業技術総合研究所つくば北サイト内の 3 箇所（A 地点、B 地点、C 地点）において路面のレーザ光反射データを取得した。実験には日本信号製の LiDAR である FX8 型測距センサを使用した。

#### ① 測定場所

路面のレーザ光反射データを取得した 3 箇所（A 地点、B 地点、C 地点）の路面状況を図 1-5.2-1 に示す。A 地点、B 地点の路面は主にアスファルトのみで構成されており、C 地点には白線が存在する。



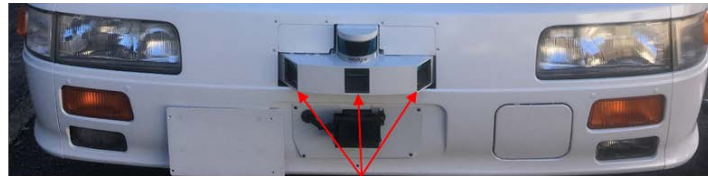
図 1-5.2-1 測定場所の路面状況

## ② LiDAR

実験に使用した LiDAR は日本信号製の FX8 型測距センサである。今回の測定では、バス前面に FX8 を 3 つ取り付け、バス前方 180° を測定した。また、測定中のバスは停車状態であり、エンジンはかけたままとした。



FX8型測距センサ



FX8(×3)で前方180°を測定

図 1-5. 2-2 FX8 型測距センサとバスへの取り付けの様子

## 1-5. 3 評価

各測定場所 (A, B, C 地点) において測定したレーザ光反射データに対してバス前方 2m、4m の距離に位置する情報を抽出し、縦軸にレーザ光反射高度、横軸にバスに対する横方向の距離をとったグラフを作成して比較する。

### ① A 地点

バス前方 2m、4m のレーザ光反射強度を図 1-5. 3-1、図 1-5. 3-2 にしめす。図中の青色実線はデータ測定を開始したときの初期 frame のデータであり、橙色破線は 100frame 後のデータである。2 つのデータから、同じ場所で異なる時間に計測したデータであっても差異が生じることが分かる。これはエンジンによる車体の微小な振動が影響していると考えられる。

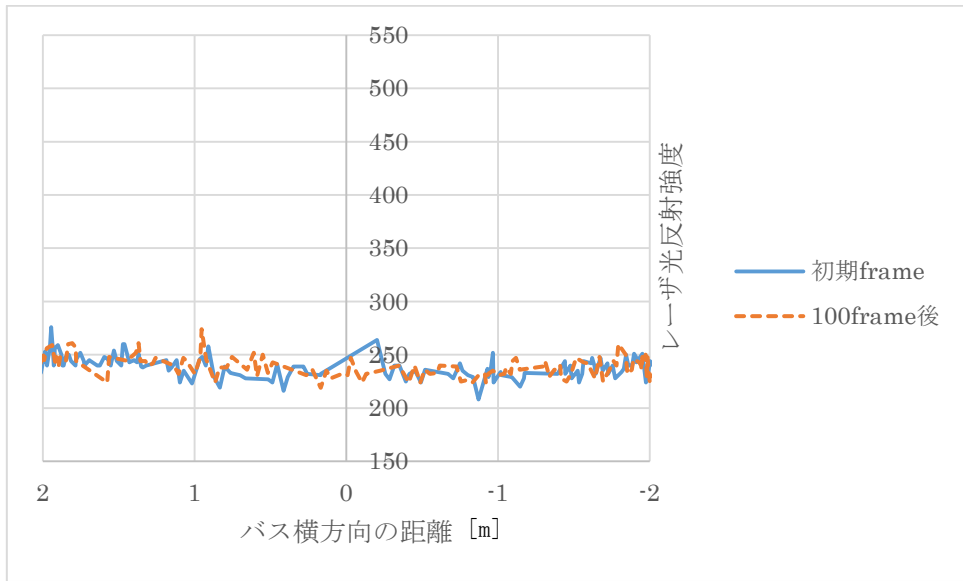


図 1-5.3-1 A 地点、バス前方 2m のレーザー光反射強度

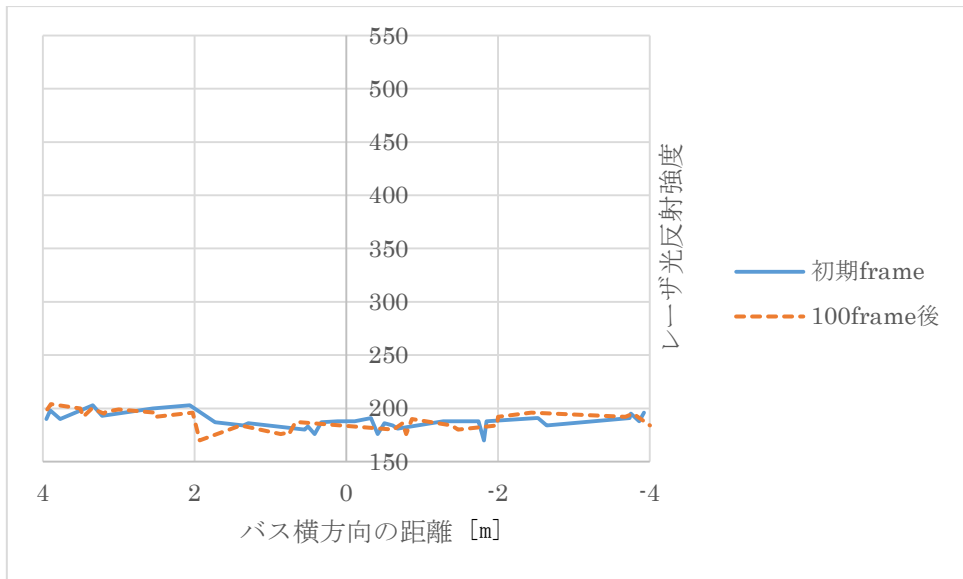


図 1-5.3-2 A 地点、バス前方 4m のレーザー光反射強度



② B 地点

バス前方 2m、4m のレーザ光反射強度を図 1-5.3-3、図 1-5.3-4 にしめす。図中の青色実線はデータ測定を開始したときの初期 frame のデータであり、橙色破線は 100frame 後のデータである。A 地点同様、同じ場所であっても時間が異なるとデータに差異が生じている。

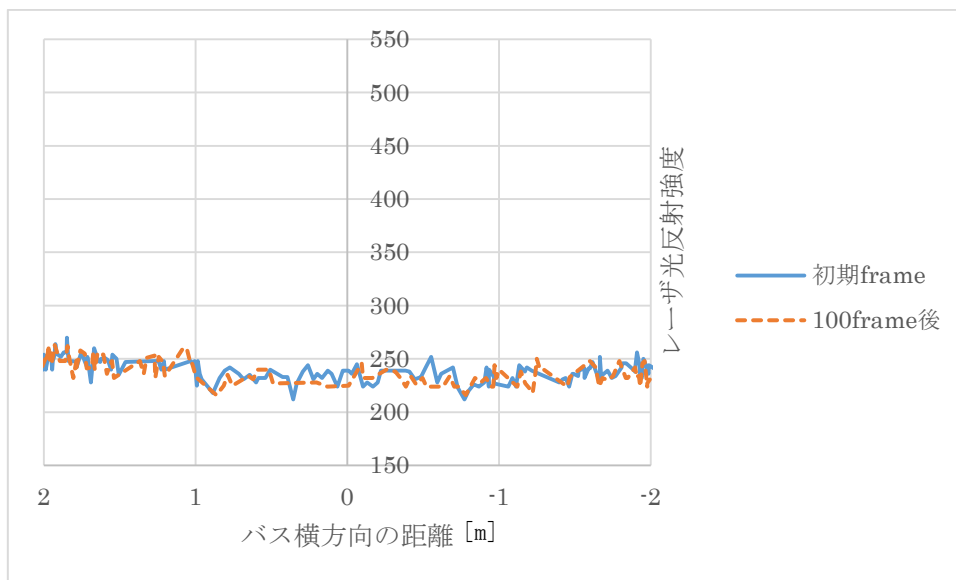


図 1-5.3-3 B 地点、バス前方 2m のレーザ光反射強度

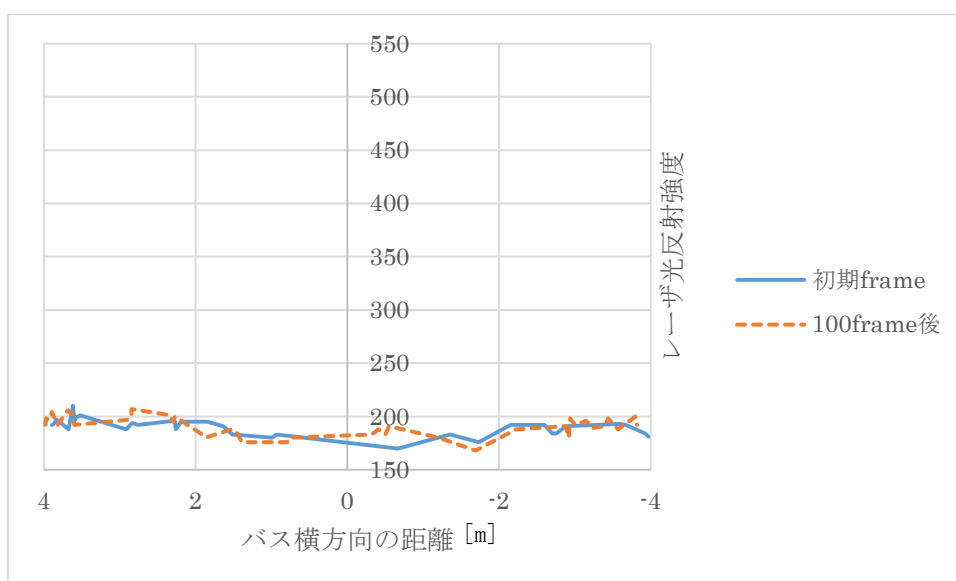


図 1-5.3-4 B 地点、バス前方 4m のレーザ光反射強度

③ C 地点

バス前方 2m、4m のレーザ光反射強度を図 1-5.3-5、図 1-5.3-6 にしめす。図中の青色実線はデータ測定を開始したときの初期 frame のデータであり、橙色破線は 100frame 後のデータである。C 地点はバスの左右に白線が存在するため、左右 2m 近辺でレーザ光反射強度が著しく高くなっている。

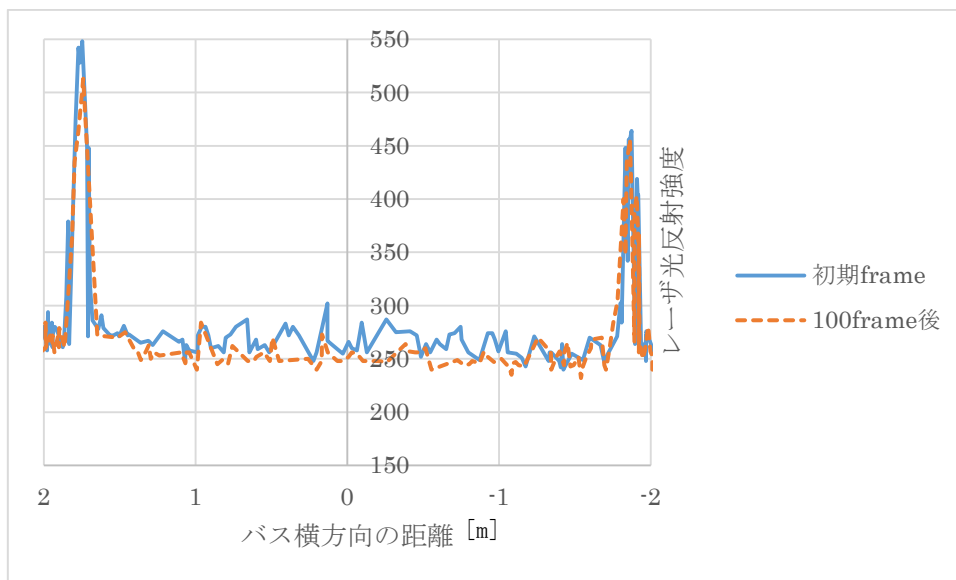


図 1-5.3-5 C 地点、バス前方 2m のレーザ光反射強度

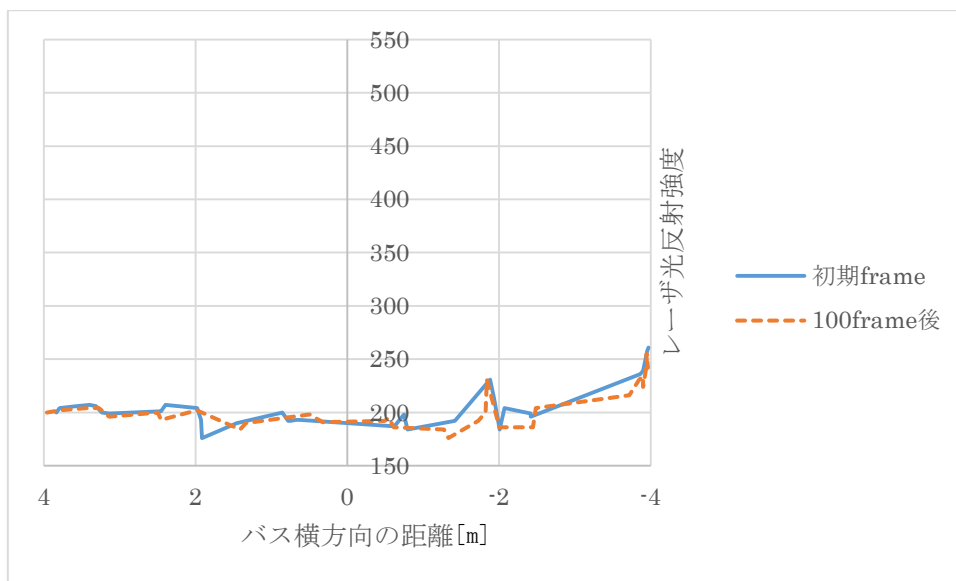


図 1-5.3-6 C 地点、バス前方 4m のレーザ光反射強度

#### ④ 評価結果とまとめ

- ・ 同じ場所で測定した場合でも異なる時間で測定したデータには微小な差異が生じる。
- ・ A 地点、B 地点での測定結果を比較してみると、アスファルト面のみのデータには大きな差が見て取れないため、アスファルト面の微小な凹凸により場所を区別するのは困難である。
- ・ C 地点での測定結果より、白線とアスファルト面とでレーザ光反射強度に大きな違いが生じているため、様々な材質のもの（アスファルト、白線、コンクリート縁石、雑草）が観測できる状況の方が車両位置検出に優位と考えられる。ただし、複数材質が観測できる状況であっても同じ風景が続く場合は場所の識別は困難となる。

以上の結果より、FX8 では測定範囲が狭く、そこに含まれる路面上の材質も限られるため、車両の位置検出は困難である。ただし、測定範囲が広く解像度の高いLiDAR であれば車両の位置検出ができる可能性がある。

#### 1-6 センシング技術の実用性評価

a) 高日射反射塗料と赤外線カメラによる位置検出技術、b) 車載ライダーによる位置検出技術、c) 磁気マーカと車載センサによる位置検出技術、d) 画像認識による位置検出技術、e) レーザ光の路面反射による位置検出技術の 5 種類の位置検出方式について、位置検出方法、位置検出精度の性能検証や性能予測を行った。

一部検出法については、実機による評価までは至らなかったが、問題点や技術的課題を洗い出すことができた。そこで、5 種類の位置検出方式について、性能や精度等に加え、コストや保守性面を含めた実用化の可能性について相対的な実用性評価を行った。

評価結果を表 1-6-1 にしめす。ライダーによる位置検出方式と磁気マーカ方式の実現性は高いと考えられる。一方、他の 3 方式は技術実現性や耐久性、対自然環境性に課題が多く実現性は低いと思われる。

しかし、ライダーによる位置検出方式と磁気マーカ方式の両者とも、単独では要求仕様を満たしておらず、実導入においては、アプローチ区間は磁気マーカ方式、正着区間はライダーの組み合わせが有望と思われる。

表 1-6-1 各位置検出方式の相対的評価

		方式Ⅰ	方式Ⅱ	方式Ⅲ	方式Ⅳ	方式Ⅴ
位置 検 出 方 法	検出原理	高日射反射塗料によるレーンマーカ部の温度分布パターン認識	路側の 3 次元距離情報からの位置検出（正着部縁石検出）	磁気マーカの検出およびマーカ間の慣性航法	テンプレートマッチング画像処理	路面の反射率パターンのテンプレートマッチング処理
	センサ	赤外線カメラ	ライダー	磁気センサ・IMU	カメラ	ライダー
	マーカ	高日射反射塗料	道路縁石および路側物体	磁気マーカ	道路面画像パターン	道路表面
位置検出精度 正着部：±1.0cm		△	○	△	×	×
位置検出精度 アプローチ部：±5.0cm		○	×	○	△	×
自 然 環 境	雨天	×	○	○	△	×
	降雪	×	×	○	×	×
	照度 (夜間、薄暮)	○	○	○	×	△
コスト（車載センサ）		×	○（共用）	△	○	○（共用）
コスト（道路側）		△	○	△	○	○
施工性（道路側）		△	○	△	○	○
保守性（道路側）		△	○	△	×	○
耐久性（道路側）		×	○	○	×	×
技術実現性		△	○	○	×	△

## 第2章 実車による正着制御の評価

### 2-1 正着制御実験車の製作

先進モビリティ株式会社が保有する自動運転バスは小型バス「日野リエッセ」をベース車とし、白線検出カメラや画像認識装置、複数の3Dライダ、RTK-GPS、走行制御 ECU が搭載されており、白線検出カメラや画像認識装置、複数の3Dライダ、RTK-GPS、走行制御 ECU が搭載されており、道路区画白線に沿って自動走行する機能を有している。本事業では、この自動運転バスに高精度ヨーレートセンサ及び磁気センサを追加した正着制御実験車を製作する。

図 2-1-1 に本事業で使用する正着制御実験車の外観図をしめす。



図 2-1-1 実験車両外観図

出典：日野自動車株式会社 HP

[https://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve\\_70rx.pdf](https://www.hino.co.jp/etc/designs/hino/images/pdf/service/revolve/hnrevolve_70rx.pdf)

また、本事業に使用する正着制御システムの構成図は図 2-1-2 にしめす。

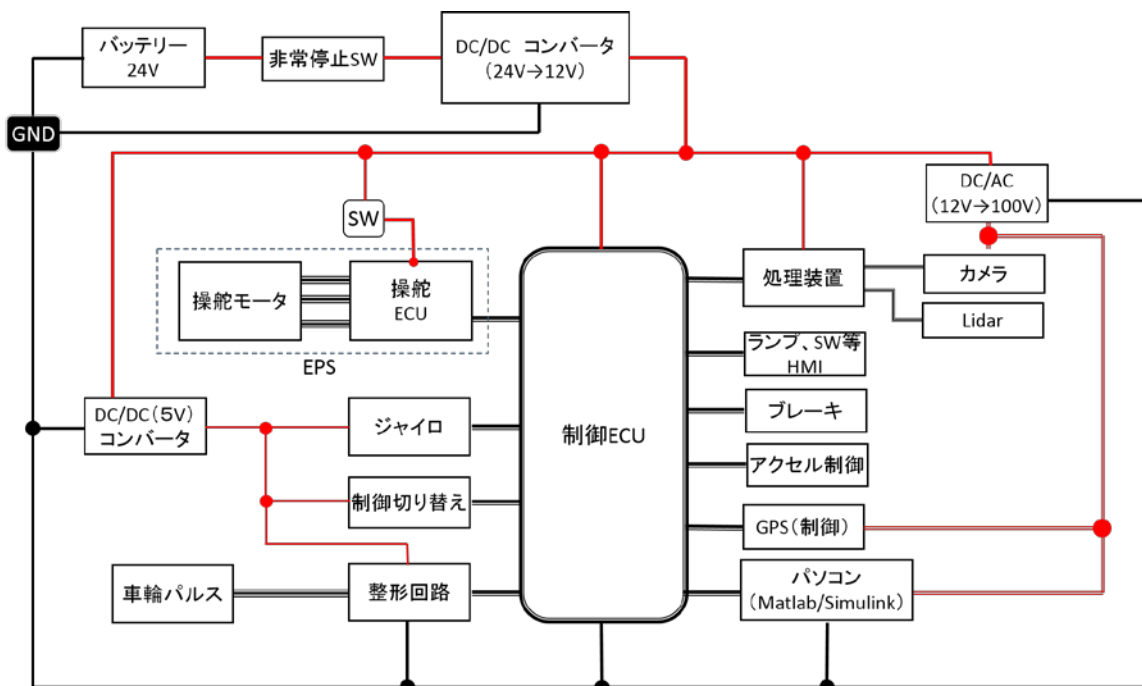


図 2-1-2 正着制御システム構成図

図 2-1-2 にしめすように、自動運転に必要となる、入力情報（ジャイロセンサ、RTK-GPS、3D ライダー、白線認識用カメラ及び車両情報等）と、アクチュエータ（ブレーキ、アクセル、ハンドル等）、センサ処理装置、制御 ECU による正着制御システムを構築する。制御ソフトの設計ツールとして、Mathworks 社の Matlab/Simulink を用いている。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制御 ECU にコンパイルしておき、各種センサから得られる情報により操舵制御に必要な制御指令値を計算し、CAN 通信を通じて EPS（Electric Power Steering：電動パワーステアリング）の操舵 ECU へと制御指令値が送られ、操舵制御を行う。

また、各種センサから得られる情報により、車両の走行目標速度を決め、ブレーキの制御量及びアクセルの制御量をそれぞれのアクチュエータのブレーキ制御 ECU 及びエンジン ECU へ送り、速度制御を行う。

図 2-1-3 に実車の搭載図をしめす。



図 2-1-3 実車搭載図

① 制御 ECU

実験車両の制御 ECU として、dSPACE 社の AUTOBOX 製品を用いている。AUTOBOX は処理の役割を担うプロセッサボード及び必要数の I/O ボードから構成される。

DS1007 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。DS1007 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、DS1007 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 DS1007 以外に、実験車に使用する I/O ボードは DS5001、DS4302、DS4201、DS2002 と DS2103 を含む。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。今後はジャイロセンサ等の使用も予定している。

DS4201-S は AUTOBOX 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 Lidar の処理結果との RS232C の通信方式を使用している。DS2002 と DS2103 はアナログ入力（A/D）及びアナログ出力（D/A）の I/O ボードである。それぞれは独立した 32 チャンネル 32 チャンネルを有する。A/D ボードは車両信号の入力情報を取得する。また、HMI において、制御開始指令等に用いる。D/A ボードはアクセル制御を行うとともに、HMI において、自動制御の状態、警告、指示等の出力に用いる。

表 2-1-1 に AUTOBOX の構成及び説明をしめす。

表 2-1-1 AUTOBOX の構成

ボード	用途	基本仕様・特長	備考
DS1007	プロセッサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>動作周波数 1GHz</li> <li>Simulink 完全サポート</li> <li>PHS バスで高速接続</li> <li>最大 18 割り込み可</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>処理 CPU</li> <li>Ethernet I/O</li> <li>GPS データ</li> </ul>
DS5001	I/O パルス解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>時間分解能 25ns</li> <li>サンプルリングレート最大 40MHz</li> <li>パルス幅：25ns～53.68s</li> <li>パルスの周期・波数の取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>車速パルス</li> </ul>
DS4201S	I/O シリアル	<ul style="list-style-type: none"> <li>RS232C、RS422、RS485 対応可</li> <li>クロック周波数：最高 24MHz</li> <li>パリティビット：偶数・奇数・なし</li> <li>チャンネル×4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>画像処理装置の入力（白線偏差）</li> <li>Lidar 入力</li> </ul>
DS4302	I/O CAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>コントロールプロトコライピング</li> <li>独立チャンネル×4</li> <li>J1939 規格対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>操舵 ECU</li> <li>ジャイロ入力</li> <li>ブレーキ制御</li> </ul>
DS2002	I/O A/D	<ul style="list-style-type: none"> <li>独立型 A/D ×32</li> <li>16 ビット分解能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御開始指令</li> <li>発車指令</li> <li>車両情報</li> </ul>
DS2103	I/O D/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>D/A×32</li> <li>14 ビット分解能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>アクセル制御</li> <li>HMI</li> </ul>



② 操舵アクチュエータ (EPS)

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 (EPS: Electric Power Steering: 電動パワーステアリング) 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。

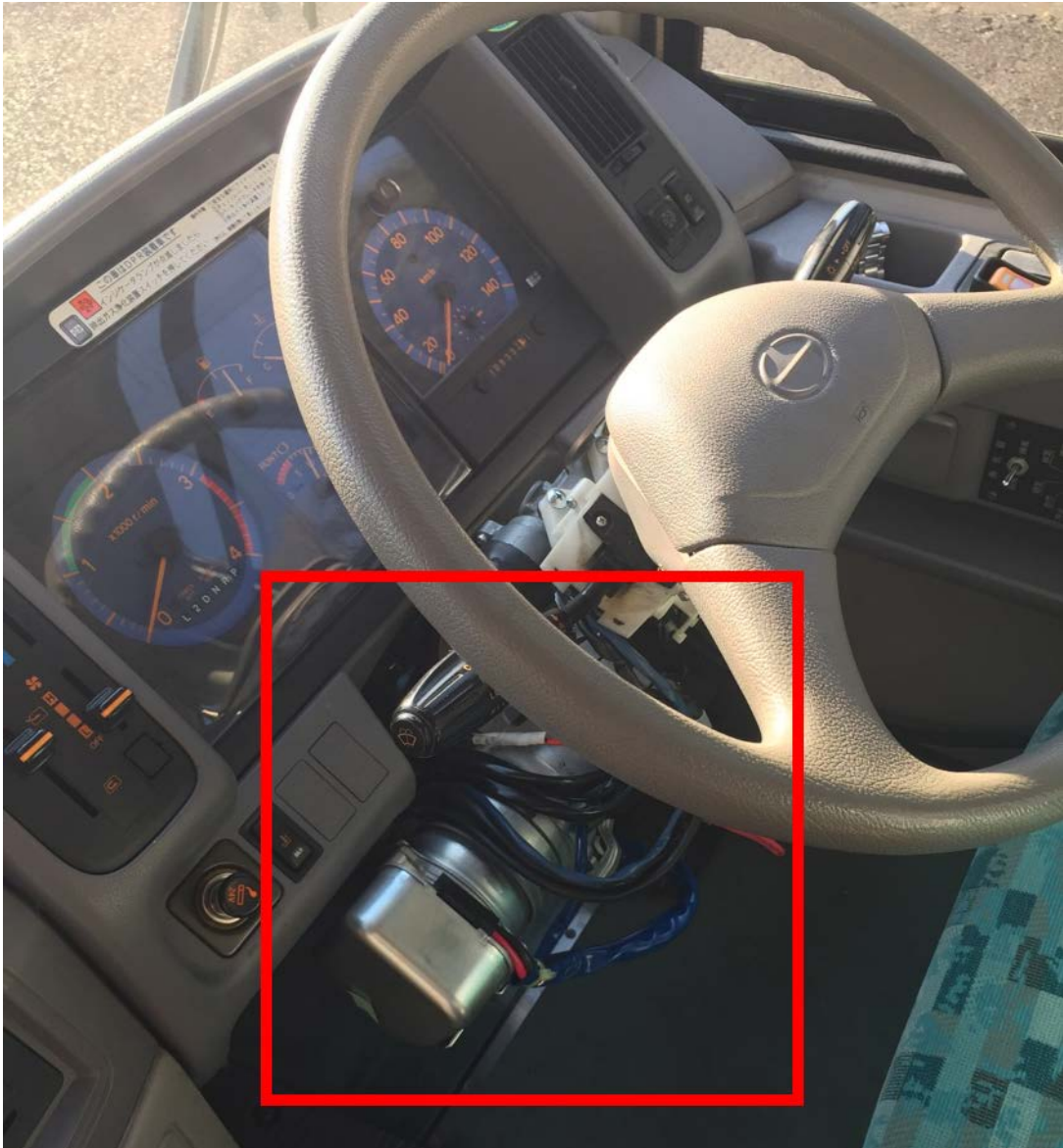


図 2-1-4 EPS の取り付け図

実際に取り付けした様子は図 2-1-4 に示した。EPS 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 CAN 通信を行う。また、機能安全性方面より、オーバーライドなどの機能が付き、非常時に制御 ECU より、自動操舵を切ることができ、人間の手動操作の介入により、自動操舵も切ることができる。

### ③ カメラ

本システムでは、路面の誘導マーカである白線認識用カメラと、画像認識用のカメラは図 2-1-5 にしめすように取り付けした。



図 2.1.5 カメラ

白線認識用車載カメラと画像認識用車載カメラを遮光できるような黒ケースに収納する。それぞれのカメラを適正な角度に設定し、車室内のに設定した。白線認識カメラは画角が横 40 度に設定し、白線位置を検知したうえ、車体との偏差を算出する。この偏差を用いて自動操舵制御を行う。画像認識カメラは画角を横 60 度に設定し、撮られた画像より、画像認識を用いて、車両の走行位置の特定方法を検討した。

#### ④ Lidar

本システムでは、環境認識や縁石検知の評価センシングとして、日本信号製の「FX8 型測距センサ」と Velodyne 製の「VLP-16」を用いている。車両に取り付け様子図 2-1-6 に示す。

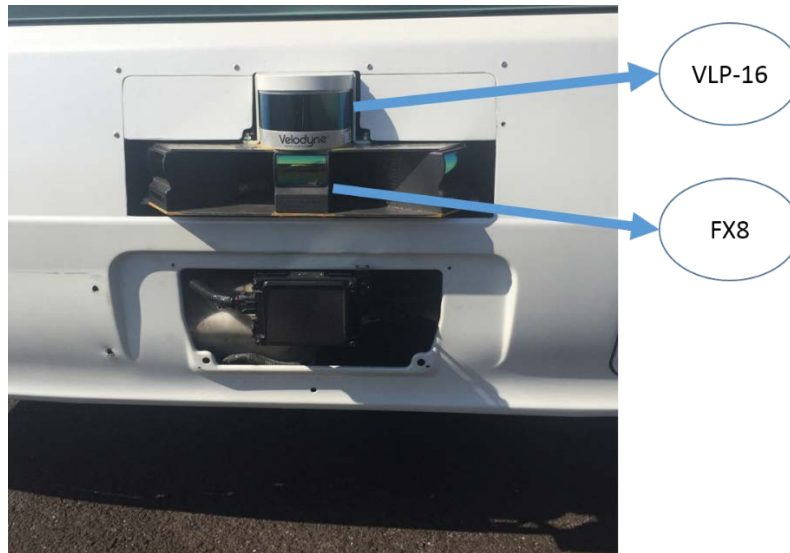


図 2-1-6 LiDAR

VLP-16 の視野角は水平 360 度、垂直 30 度であり、車両中心に 1 台のみを設置すれば、車両前方の前方位を認識できる。一方、FX8 の視野角は水平 60 度、垂直 50 度であるため、車両前方の前方位を認識できるように、車両中心に 60 度間隔に 3 台設置する。また、詳細は 1-2.2 に記載されているので、本節では省略する。

#### 2-2 車載ライダーを用いた正着制御の評価

正着制御に必要な走行位置の検出方法について、5 種類の位置検出方法の調査検討を行った結果、表 1-6-1 にしめすように車載ライダーによる縁石検出方式が最も実用性が高いため、実車を用いて車載ライダーによる正着制御の性能評価を行った。

##### 2-2.1 実車評価の前提条件

###### ① バス停形状

現在用いられているバス停形状として、テラス型（直線型）とバスベイ型およびクサビ型が使用されている。本受託では多くのバス停形状である直線型での正着制御性評価実験を実施した。図 2-2.1-1 に直線型バス形状での正着制御実験のイメージをしめす。

正着制御条件として、手動運転時の走行位置からバス停までの横方向制御量を 1.0m、正着制御開始から停止までの距離を 40m として制御実験を実施した。

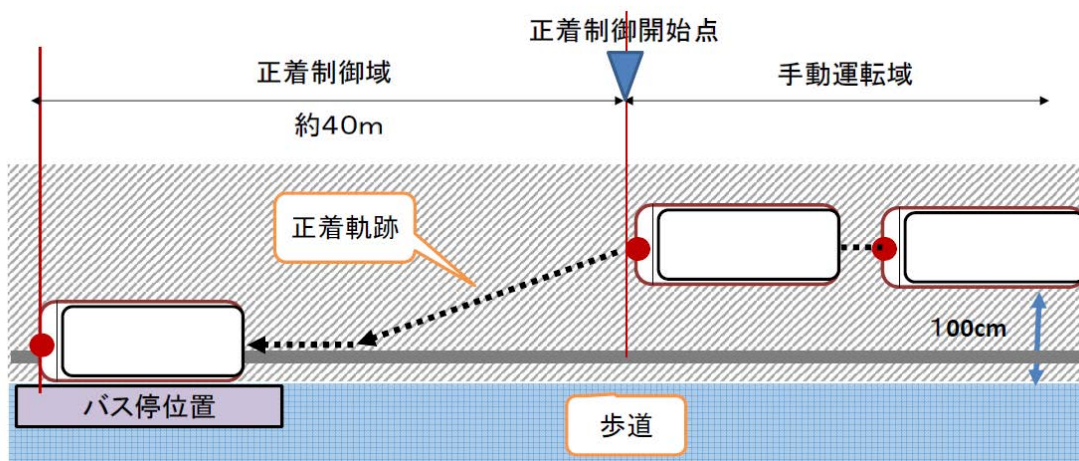


図 2-2.1-1 直線型バス形状での正着制御実験イメージ

② 正着制御システム構成

今回用いた正着制御システム構成を図 2-2.1-2 にしめす。

正着のための走行目標軌跡は車両と縁石間距離を走行累積距離毎のテーブルとして生成した。

また目標傾き角は車両と縁石間距離の走行累積距離毎のテーブルより求め、目標軌跡と同様、走行累積距離毎のテーブルとして生成した。

また正着制御開始点（起点）からの走行累積距離は速度パルスセンサ出力より算出した。

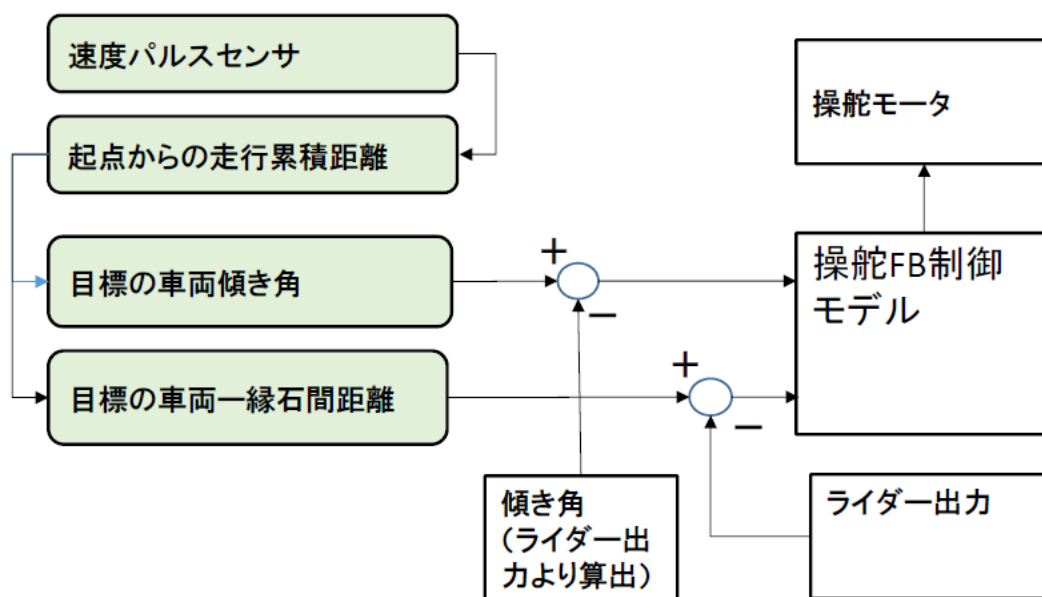


図 2-2.1-2 正着制御システム構成

③ 正着制御アルゴリズム

目標走行軌跡および目標傾き角を制御する操舵制御アルゴリズムとして、パスフォロイング制御アルゴリズムを用いて、正着制御を行った。

式 2-2. 1-1 にパスフォロイング制御アルゴリズムの操舵制御式をしめす。

式 2-2. 1-1 パスフォロイング制御アルゴリズムの操舵制御式

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

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

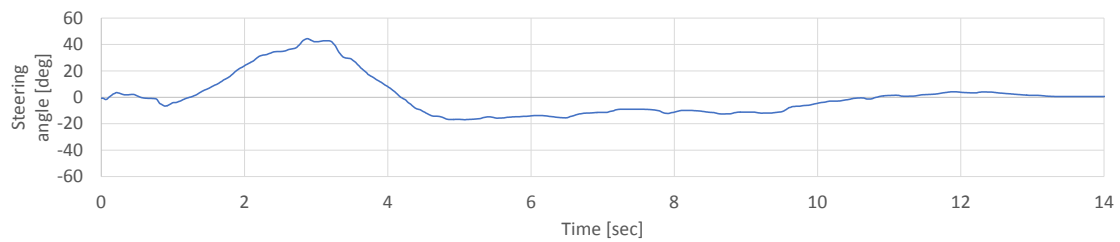
$\omega_c$  は FB 制御部で  $e_2$  は縁石と車両間の横方向誤差量、 $e_3$  は車両と縁石の接線角誤差で  $K_2$  および  $K_3$  は入力誤差に対する FB ゲインで直線にて目標の車線維持性能を達成するよう走行実験にて調整される。

またヨーレート  $\gamma$  に対する補正項は車両運動モデルから導出されたもので発生しているヨーレートをゼロにするための修正操舵角であり、制御安定性を向上するものである。  
なお、 $M$  は車両重量、 $v$  は車両速度をしめす。

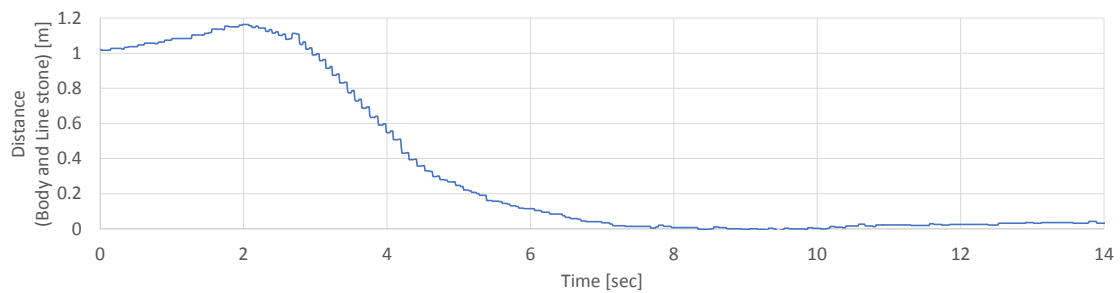
## 2-2.2 実車による正着実験評価

実車における正着実験は、目標正着値（縁石—ドア間距離）を 4 cm とし、正着開始時の速度 8 km/h の場合を 5 回、20 km/h の場合を 5 回として全部で 10 回おこない正着精度を評価した。なお、速度は正着開始と同時にアクセル OFF としてエンジブレーキにより減速し、正着終了地点ではドライバーによるブレーキで停車した。

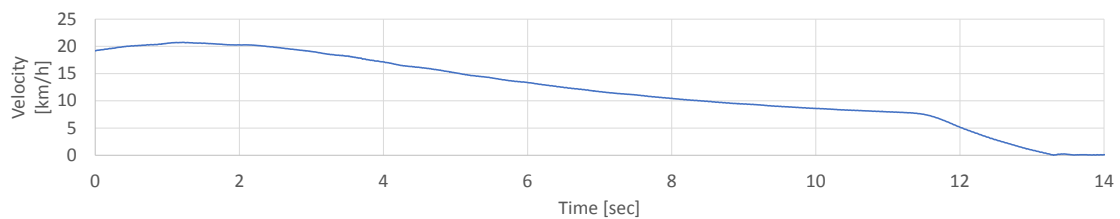
図 2-2.2-1 に正着開始から停止までの操舵角度、縁石—車両間距離および速度をしめす。また、図 2-2.2-2 に正着時（停止時）における 10 回の正着値（縁石—ドア間距離）の分布を、平均値および標準偏差と共にしめす。



① 操舵角度



② 縁石—車両間距離（車載ライダーによる縁石検出結果）



③ 速度

図 2-2.2-1 正着開始から停止までの車両挙動履歴

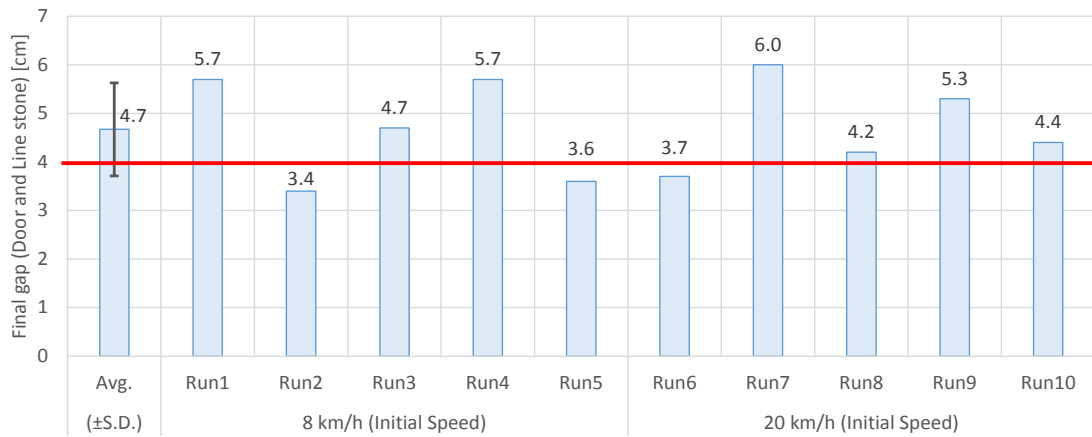


図 2-2. 2-2 正着値（縁石—ドア間距離）

今回の評価の結果、目標正着値 4.0cm に対し、平均で 4.7cm、最大誤差は+2.0cm であり、目標とする誤差範囲±2.0cm を実現できた。

### 第3章 まとめ

ART バスの正着制御に係るセンシング技術について、下記の5種類の方法を検討し、比較することで、その有用性を明らかにすることができた。

a) 高日射反射塗料による相対位置検出技術

気温の高い日中は高日射反射塗料区画線の識別が可能であることを確認できたが、雨天時は識別が難しいこと、昼夜では温度差が逆転すること等、正着制御に用いるには課題が多く残されている。

b) 車載ライダーによる相対位置検出技術

VLP-16による縁石との相対位置検出では、距離の誤差が1cm、角度の誤差は0.7度以内の精度で検出できることがわかった。正着制御目標の±2cmの誤差内に入っており、有用と考えられる。ただし、雨および霧の評価は出来ておらず、今後、評価していく必要がある。

c) 磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術

磁気マーカ間の慣性航法を用いた車両位置推定では、磁気マーカを8m間隔で置いた場合でも、5cm程度の誤差が残ることがわかった。正着制御の目標精度とコストを考えると課題が大きい。

d) 画像認識による位置検出法

照度の違いも含めて様々な環境下において、カメラ座標を精度高く平面道路座標に変換するための手法が確立できておらず、現状では正着制御に使用するのには現実的ではない。

e) レーザ光の路面反射による位置検出法

比較的安価なライダー（FX8）では測定範囲が狭く、同じ材質の路面の微小な凹凸を見分けることは困難であるため、現状では路面反射から車両の位置を検出するのは困難である。

上記5種類のセンシング技術の比較検討により、b) およびc) の実現性が高いことがわかったが、なかでもb) の精度が高いため、b) を用いた実車評価を行った。

実車評価は、40m先のバス停に正着した際の、バス停からの目標距離(40m)に対する誤差を測定した。その結果、正着値は平均で4.7cm、最大誤差は+2.0cmであり、目標とする誤差範囲±2.0cmを実現できることがわかった。