


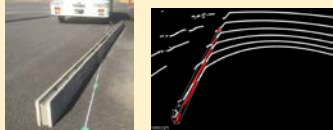
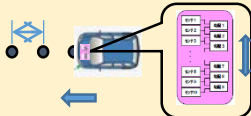

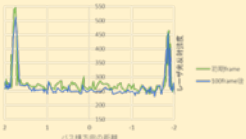
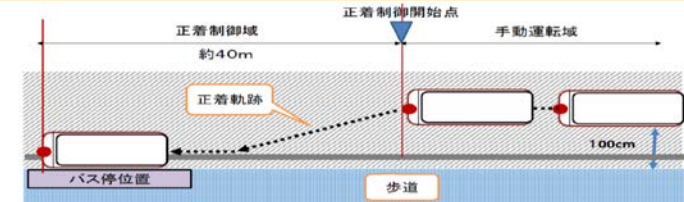
「SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)・自動走行システム」

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

【全体総括】 実施内容

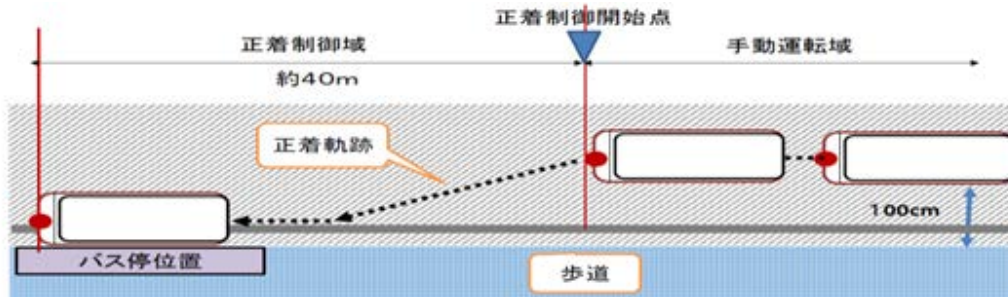
正着制御に係るセンシング技術の調査検討	実施内容	イメージ図
① センシング技術調査 1)可視光外の透明(もしくは路面色)反射する塗料やシート等による位置・経路特定	高日射反射塗料による位置・経路特定技術検討 (高日射反射塗料)	
2)バス停周辺地物の画像認識による位置学習・経路特定	ライダーの点群データによる位置・経路特定技術検討 (車載ライダー)	
3)RFIDやBLEビーコンのような電子道標を活用した位置検出・経路特定	磁気マーカと車載センサによる位置・経路特定技術検討 (磁気マーカと車載センサ)	
4)路面上に恣意的に設けたランダムパターンの学習による位置・経路特定	バス停付近に描画されたオリンピックシンボルマークを画像認識して位置特定する方法の検討 (画像認識)	
5)路面汚れやタイヤ痕等の自然発生ランダムパターンの学習による位置・経路特定	レーザ光による路面反射パターンにより位置を特定する方法の検討 (レーザー光の路面反射)	
② 正着制御評価 ■テラス型バス停における正着性能評価	上記5つの中から実現性の高い位置検出法を1つ(車載ライダー方式)を選出し、実車による正着制御性を評価	

【全体総括】 調査結果

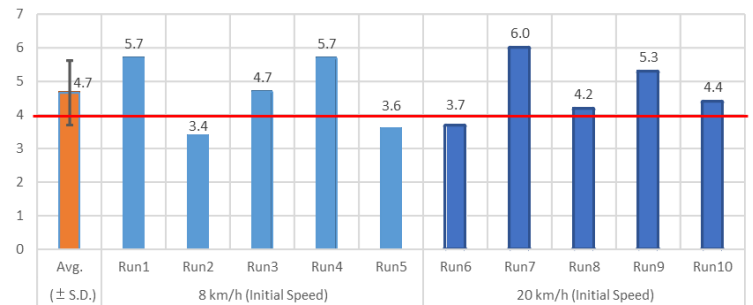
■ センシング技術の調査 (5方式⇒1方式を選出)

位置検出技術	位置検出 (正着部)	位置検出 (アプローチ)	保守性	ロバスト性 (自然環境)	コスト (インフラ、車両)	総合評価
1)高日射反射塗料	△	○	△	X (雨天)	△ (赤外線カメラ)	△
2)車載ライダー	○ (縁石)	X (縁石以外)	○	○	○ (LIDARは共用)	◎
3)磁気マーカと車載センサ	△	○	△	○	△	○
4)画像認識	X	△	△	△ (夜間、雨天)	○	△
5)レーザ光の路面反射	X	X	△	X (雨天)	○ (LIDARは共用)	X

■ 実車による正着制御の評価 (車載ライダー方式)



結果: 車載ライダー方式により、正着目標 $4\text{cm} \pm 2\text{cm}$ を達成 (正着部)
課題: アプローチ部(交差点等)は、別方式を組み合わせる必要あり



Final gap (Door and Line stone) [cm]

1. 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
- 1-2 車載ライダーによる相対位置検出技術
- 1-3 磁気マーカと車載センサを用いた位置検出技術
- 1-4 画像認識による位置検出法の検討
- 1-5 レーザ光の路面反射による位置検出法の検討

2. 実車による正着制御の評価

実施方法

アスファルトと同色の高日射反射塗料にて正着誘導線を敷設し、アスファルト面と誘導線の温度差を赤外線カメラにて検出し、正着誘導線を認識する

塗料2種類(下塗り有無) * 幅3種類 = 計6種類 の区画線を敷設

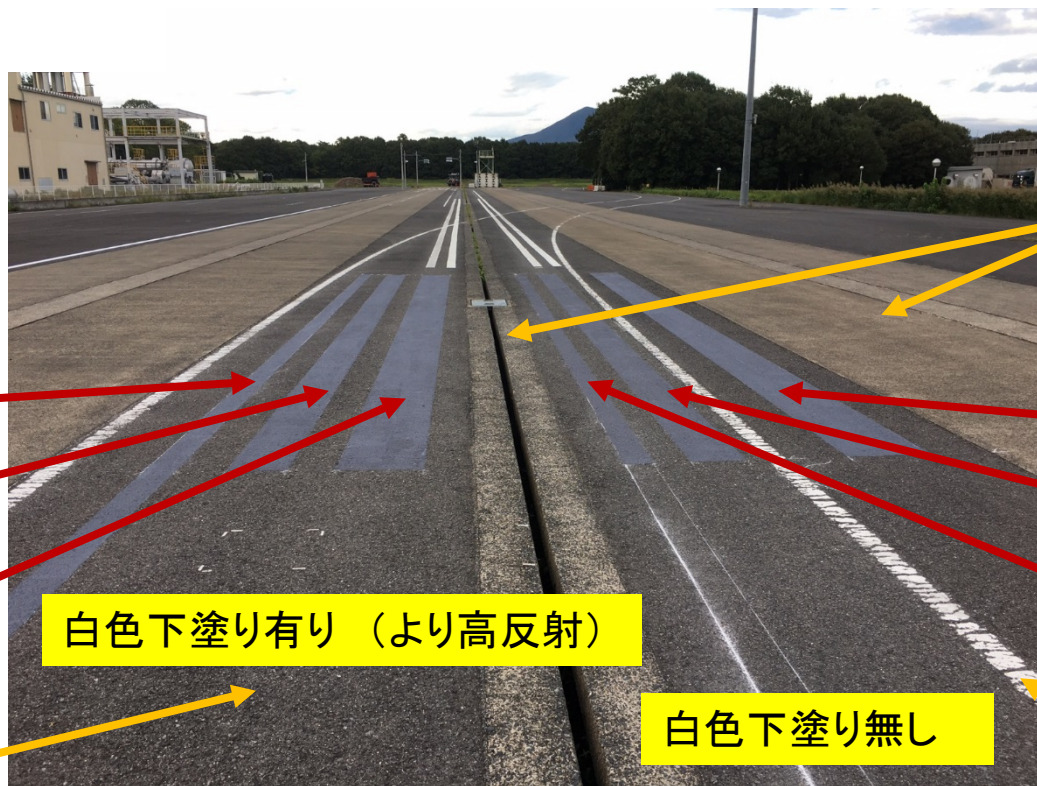


A: 幅15cm

B: 幅30cm

C: 幅45cm

アスファルト路面



白色下塗り有り (より高反射)

白色下塗り無し

コンクリート路面

F: 幅45cm

E: 幅30cm

D: 幅15cm

通常白線

●高日射反射区画線長さ: 各10m(Aのみ30m)

●赤外線カメラ: 日本アビオニクス製サーモギアG100 EX (最小検知温度差0.04 °C)

評価結果 《全般》

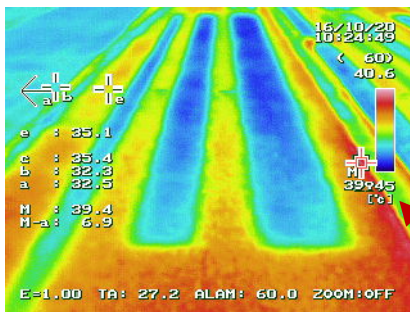
- **白色下塗りあり(A、B、C)の方が反射率が高いため、温度差が明確に出る**
 - ・コンクリート路面及び通常の白線は、反射率が高いため、識別し難い

【白色下塗りあり A、B、C】

【可視画像】



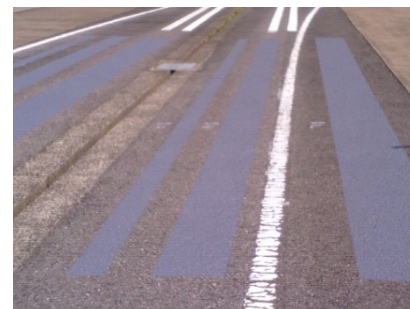
【赤外線画像】



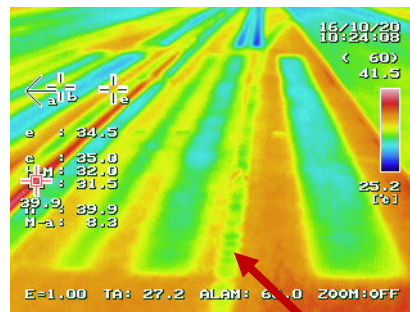
アスファルト路面

【白色下塗りなし D、E、F】

【可視画像】



【赤外線画像】

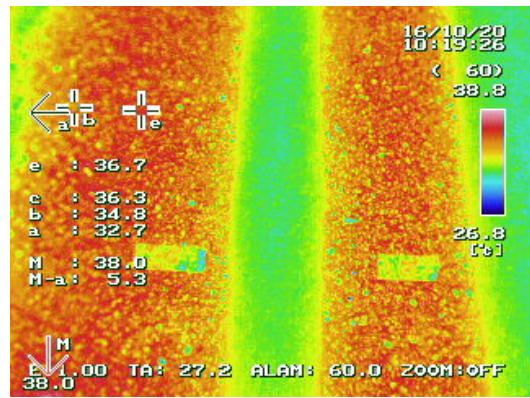


通常の白線

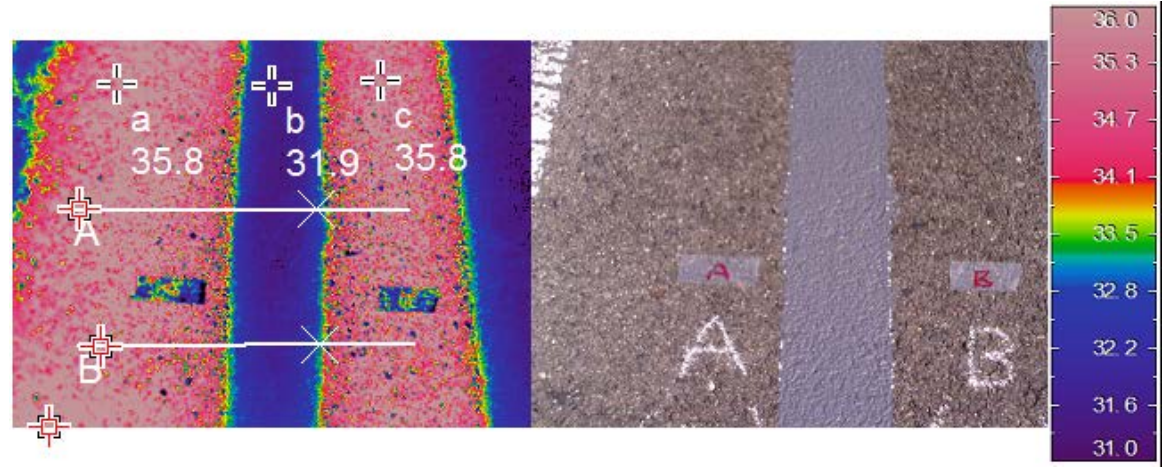
評価結果 《晴天・昼間》

- 晴天の昼間で、温度差があり(約4度)、エッジが明確に識別できる
 - ・周辺からの温度影響を受けやすいため、エッジの境界線は少しぼやける

【撮影画像・原画】

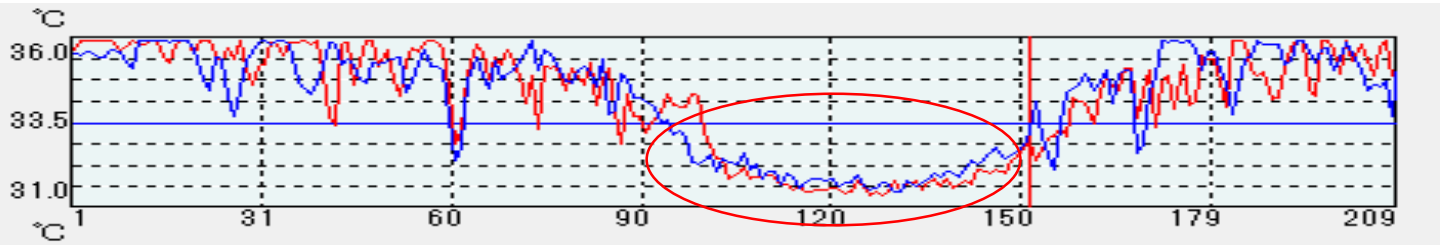


【オフライン・解析処理後画像】



カーソル温度

A: 33.0
B: 33.3



【A:幅15cm、秋・晴天・昼間】

・撮影日時: 平成28年10月20日(木) 10:30 頃
・天候: 晴れ 気温: 22度

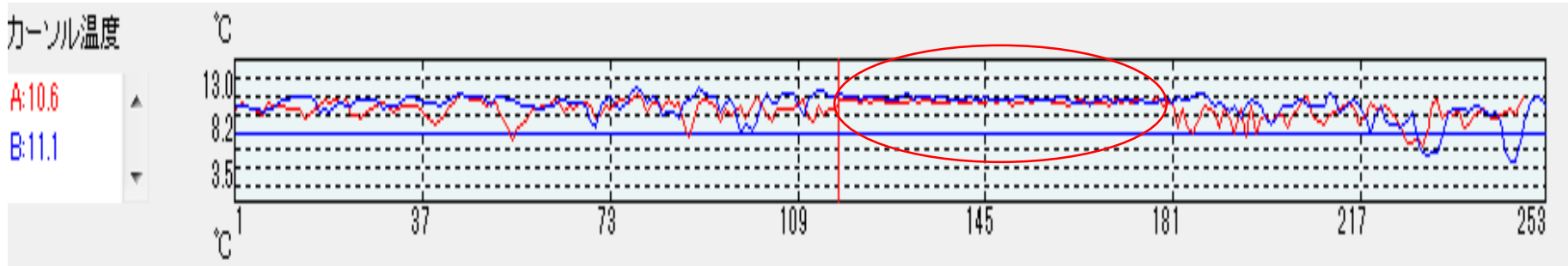
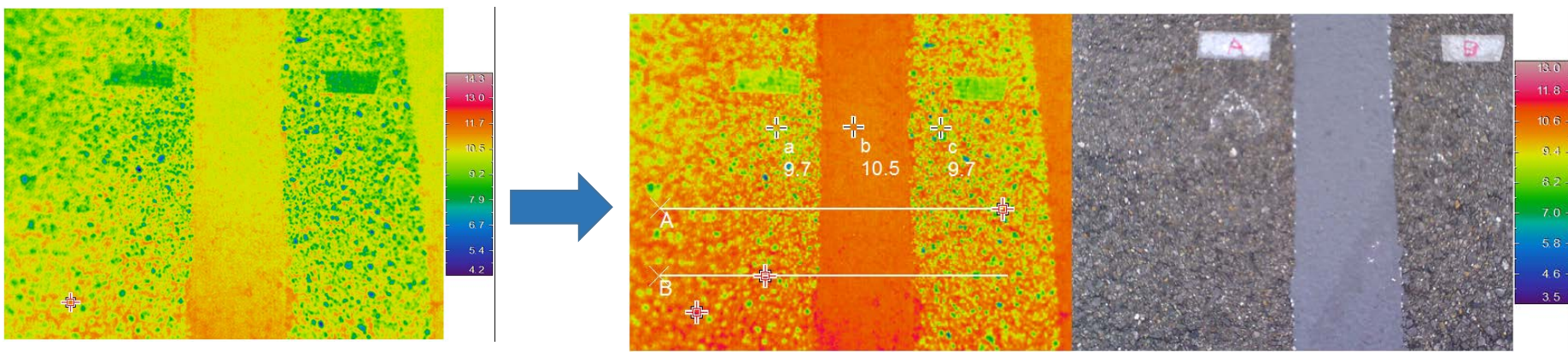
【A・Bライン上温度線図】

評価結果 《晴天・夕方》

■ 晩秋の夕方で、温度差が小さいが(約1度)、区画線内の温度が均一なため、エッジは識別可能である

【撮影画像・原画】

【オフライン・解析処理後画像】



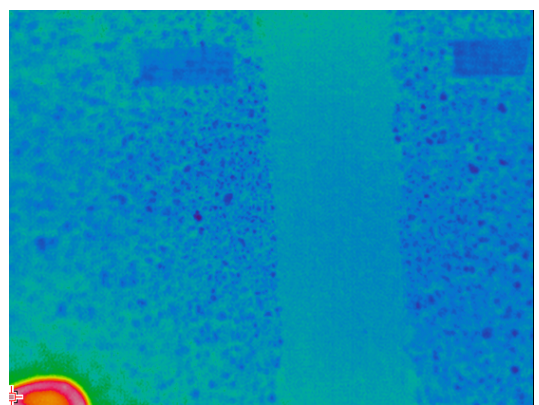
【A: 幅15cm、秋・晴天・夕方】
 ・撮影日時: 平成28年11月09日(水) 16:30 頃
 ・天候: 晴れ 気温: 10度

【A・Bライン上温度線図】

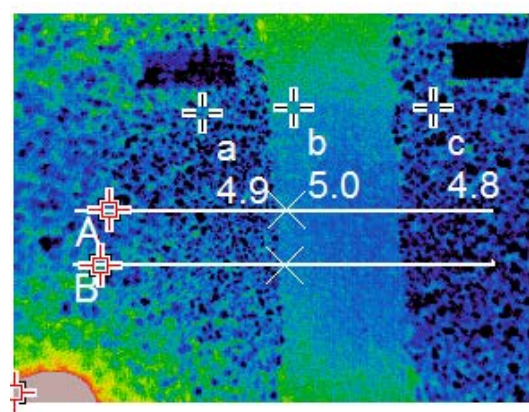
評価結果 《晴天・日没後》

■ 日没後で温度差はほとんどないが、区画線内の温度が均一なため、エッジは識別可能である

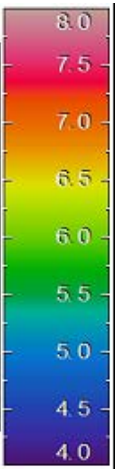
【撮影画像・原画】



【オフライン・解析処理後画像】

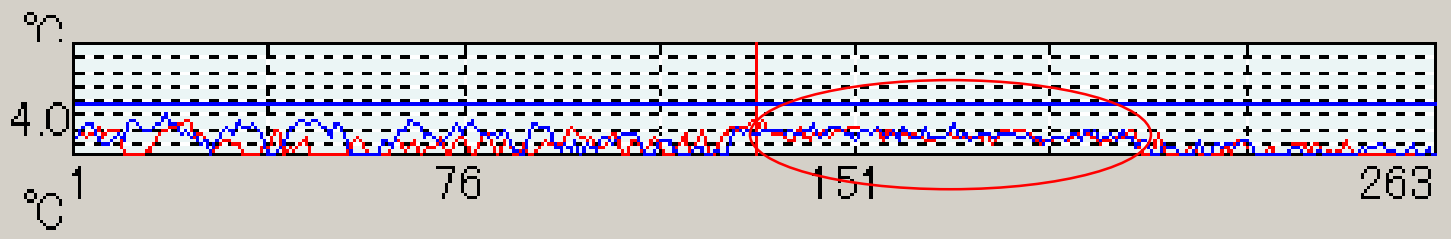


可視画像



カーソル温度

A:5.1



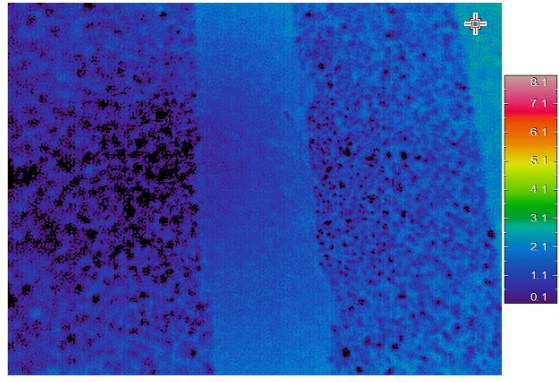
【A:幅15cm、秋・晴天・日没後】
 ・撮影日時：平成28年11月25日(金) 17:00 頃
 ・天候：晴天 気温：11度

【A・Bライン上温度線図】

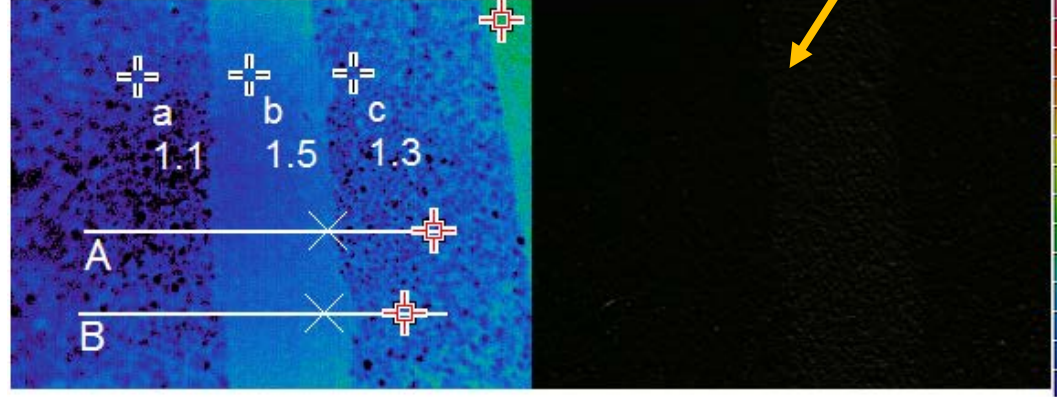
評価結果 《晴天・夜間》

■ 夜間(真夜中)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、エッジは識別可能である (ヘッドライト照射による影響は不明)

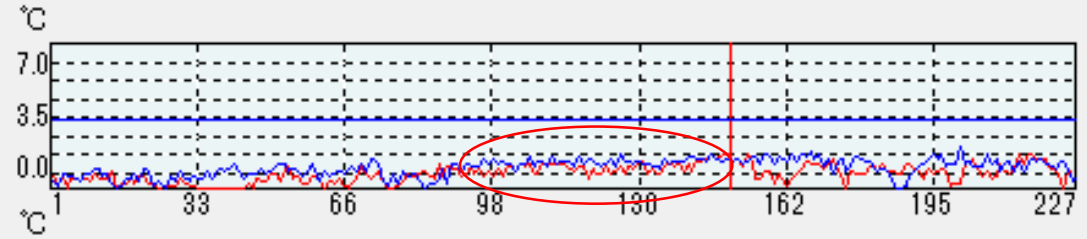
【撮影画像・原画】



【オフライン・解析処理後画像】



A:1.5
B:1.5



【A:幅15cm、冬・晴天・夜間】

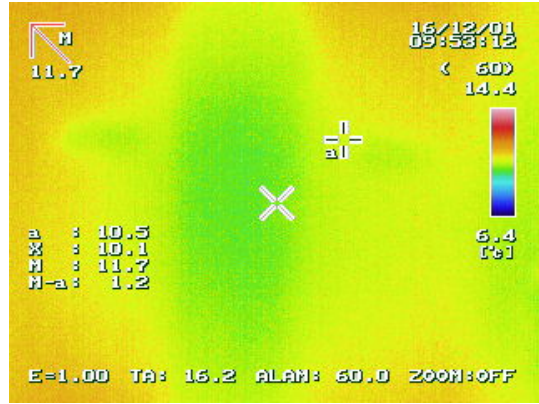
- ・撮影日時: 平成29年02月03日(金) 03:30 頃
- ・天候: 晴天 気温: 2度 照明: ヘッドライト

【A・Bライン上温度線図】

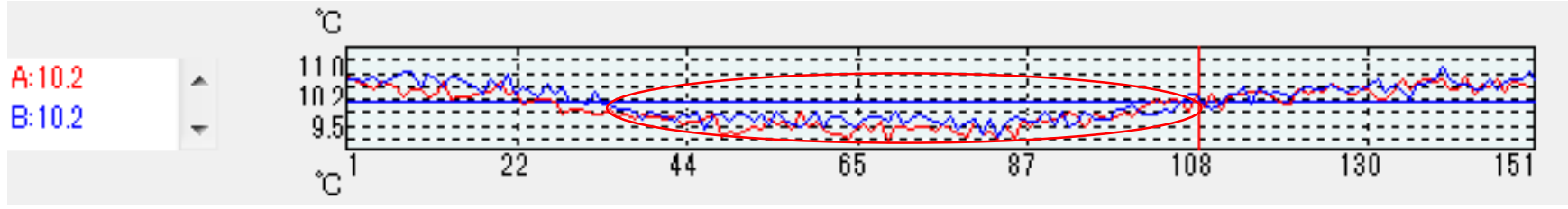
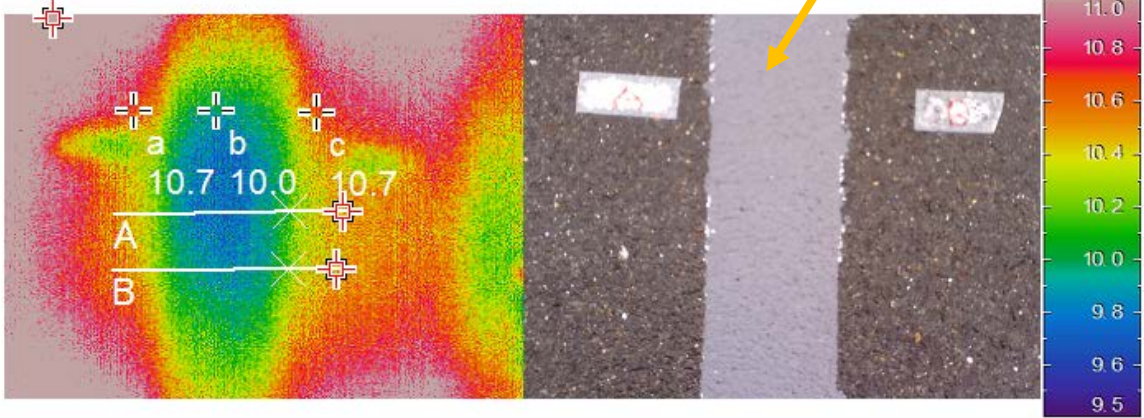
評価結果 《雨天》

■ 雨天時は、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検出できるものの、エッジの識別は難しい

【撮影画像・原画】



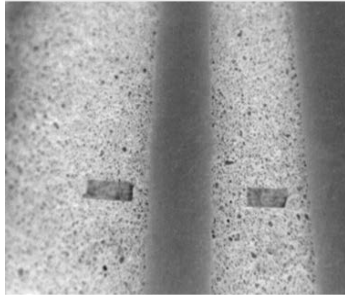
【オフライン・解析処理後画像】



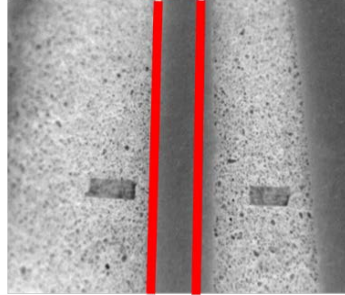
【A:幅15cm、冬・雨天・昼間】
 ・撮影日時: 平成28年12月01日(木) 10:00 頃
 ・天候: 雨天 気温: 8度

【A・Bライン上温度線図】

■ 画像認識ソフト(試作版)によりエッジの検出に成功した



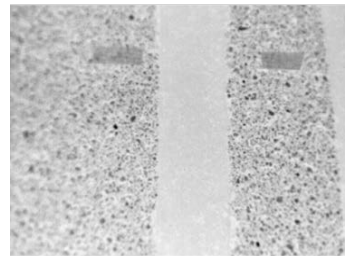
入力画像



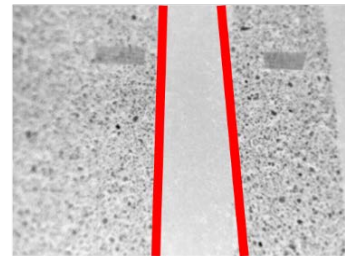
区画線認識結果

【秋・晴天時・昼間】の画像

温度差が大きい日中は、区画線は明確に識別できるものの、エッジ付近の温度が周辺の影響を受けやすいため、**エッジの認識位置が内側に寄る傾向がある**



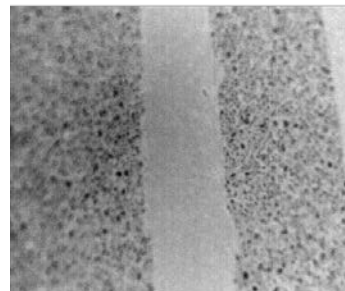
入力画像



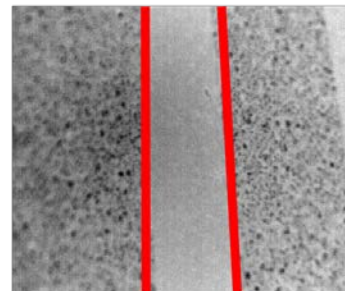
区画線認識結果

【秋・晴天時・夕方】の画像

温度差は小さいが、**本来のエッジに近い位置で区画線が認識できている**



入力画像



区画線認識結果

【冬・晴天時・夜間】の画像

温度差は小さいが、**本来のエッジに近い位置で区画線が認識できている**

評価結果 《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**
 - ・区画線の種類では、《白色下塗りがある方》、《幅が広い方》が識別しやすいが、雨天以外は、《白色下塗りがある方》+《車線幅15cm》で識別可能
 - ・《コンクリート路面》及び《通常の白線》は、高日射反射塗料区画線との識別がし難い
 - ・温度差が出やすい《昼間》は、識別がしやすいが、エッジ周辺は周りの温度影響を受けやすいため、区画線の幅が狭く認識されやすい
 - ・《夕方》、《日没後》、《夜間》は、温度差がなくなるが、画素データのソフト処理により識別できる
 - ・温度差が小さくなると、周辺より温度が高くなる逆転現象がおきやすい
 - ・《雨天》時は、水分により温度の境界がぼやけるため、区画線のエッジの識別は難しい

評価結果 《まとめ-2》

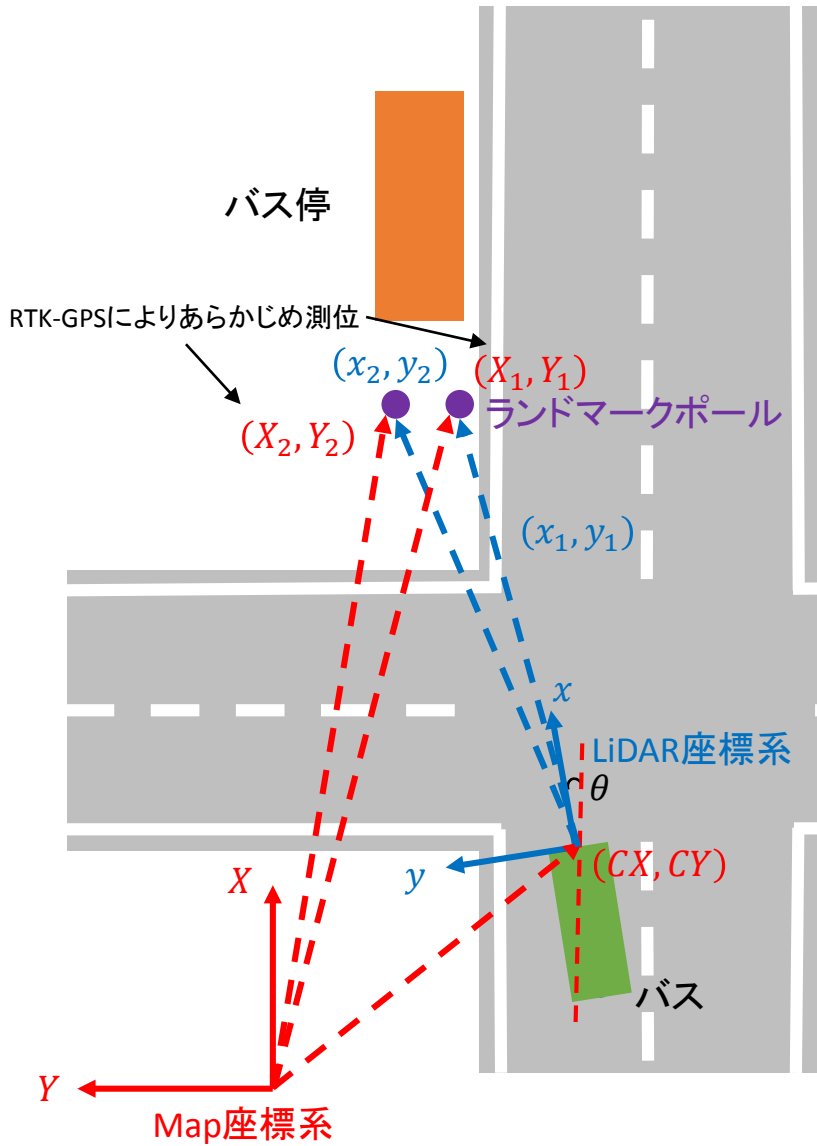
■ 画像認識ソフトによるリアルタイムでのエッジ検出は可能と思われるが、課題も多い

- ・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
- ・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)
- ・区画線の磨耗・劣化による温度特性変化への対応
- ・エッジ周辺の温度が徐々に変わる(エッジがシャープに出ない)ことへの対応
- ・赤外線カメラのコスト(現状数十万円以上)

■ 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は、昼夜、天候を問わずに実現可能な技術が求められるため、《雨天》時は認識ができない本方式での実施は難しいと思われる

概要



RTK-GPSにより測位したポール的位置座標 (X_n, Y_n) と LiDARにより検出したポールからの相対位置 (x_n, y_n) により自車位置 (CX, CY) を算出



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

FX8 (日本信号)

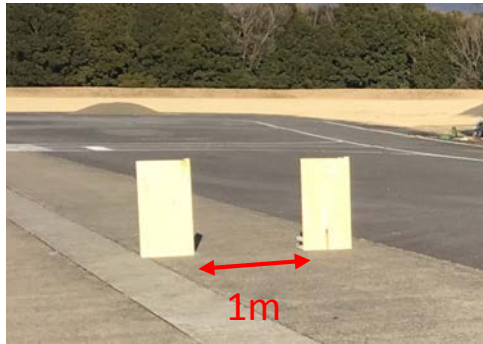


測距範囲: 0.3 - 15[m]
 視野範囲: 水平 360° × 垂直 30°
 角度分解能: 水平 0.02° × 垂直 0.2°

VLP-16 (Velodyne)

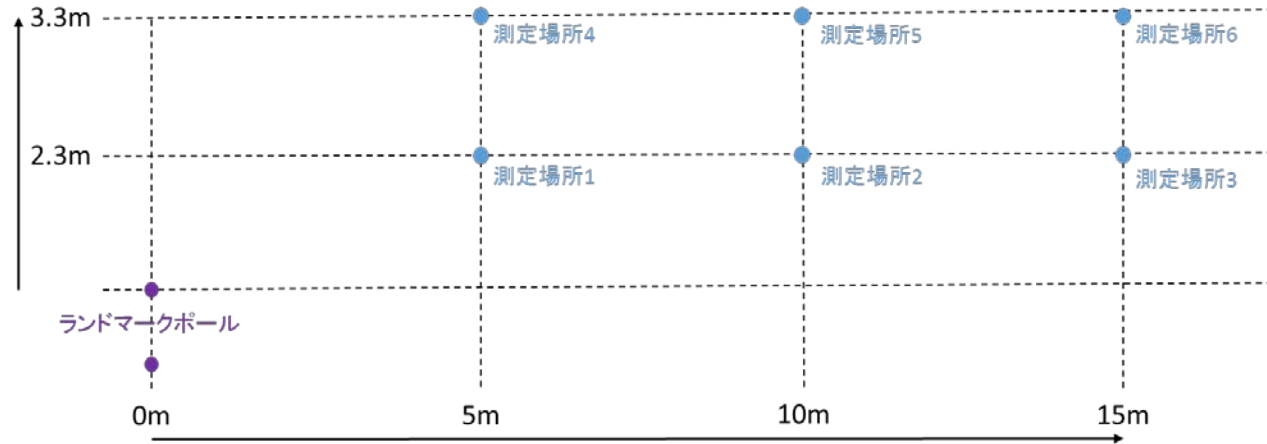
実施方法 《ポール認識》

- ・ 高さ90cm, 幅45cmの板を間隔1mで設置
- ・ 計6箇所においてLiDARで測距し, 車両位置を検出
- ・ 車体に取り付けたRTK-GPSを真値として比較



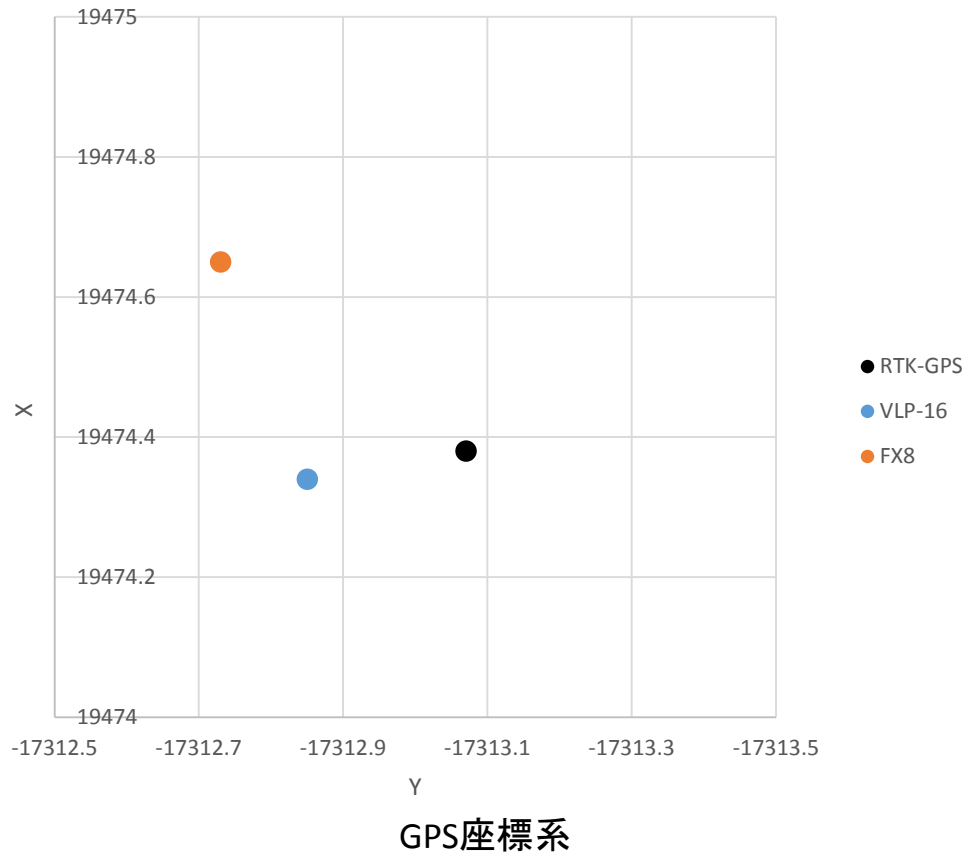
ランドマークポール

幅: 45[cm]
高: 90[cm]



6箇所での測定

測定場所1における自車位置検出結果

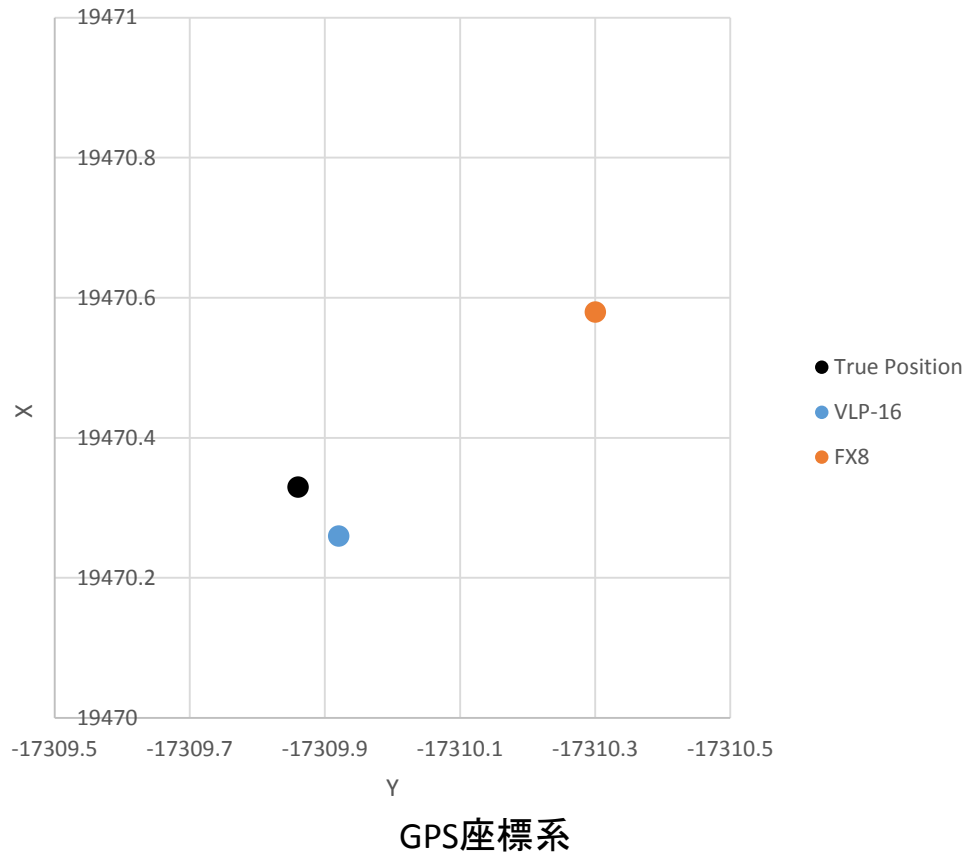


※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

	FX8	VLP-16
X	0.27	-0.04
Y	0.34	0.22

測定場所2における自車位置検出結果

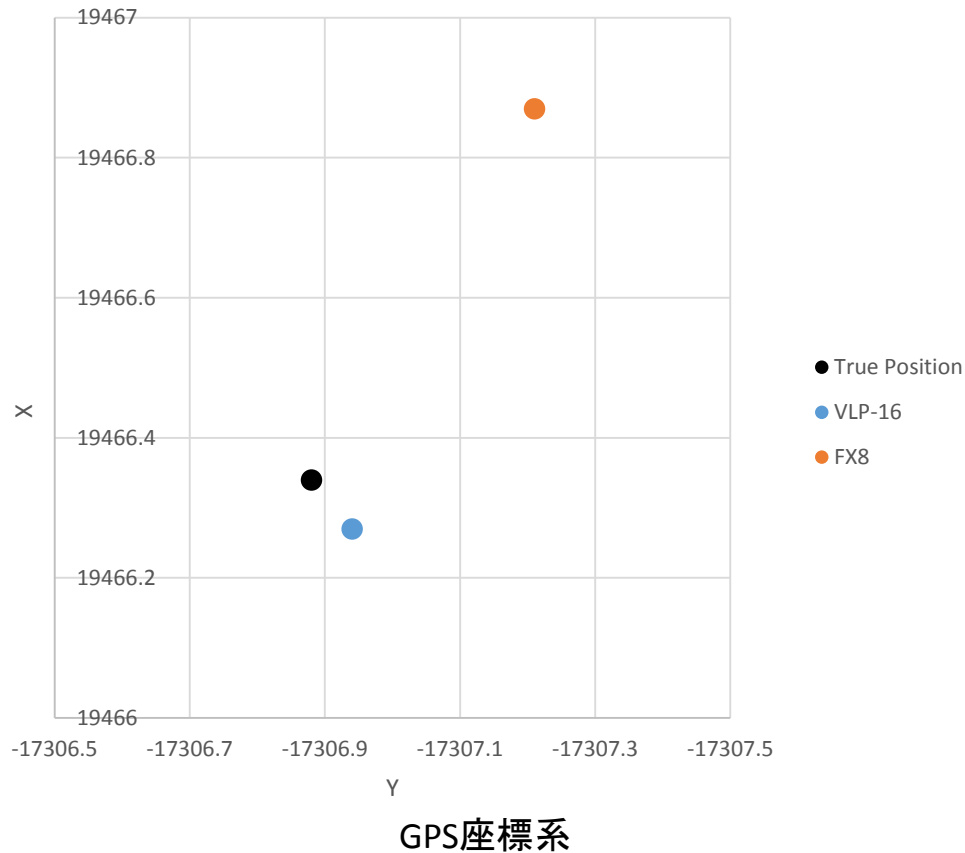


※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

	FX8	VLP-16
X	0.25	-0.07
Y	-0.44	-0.06

測定場所3における自車位置検出結果

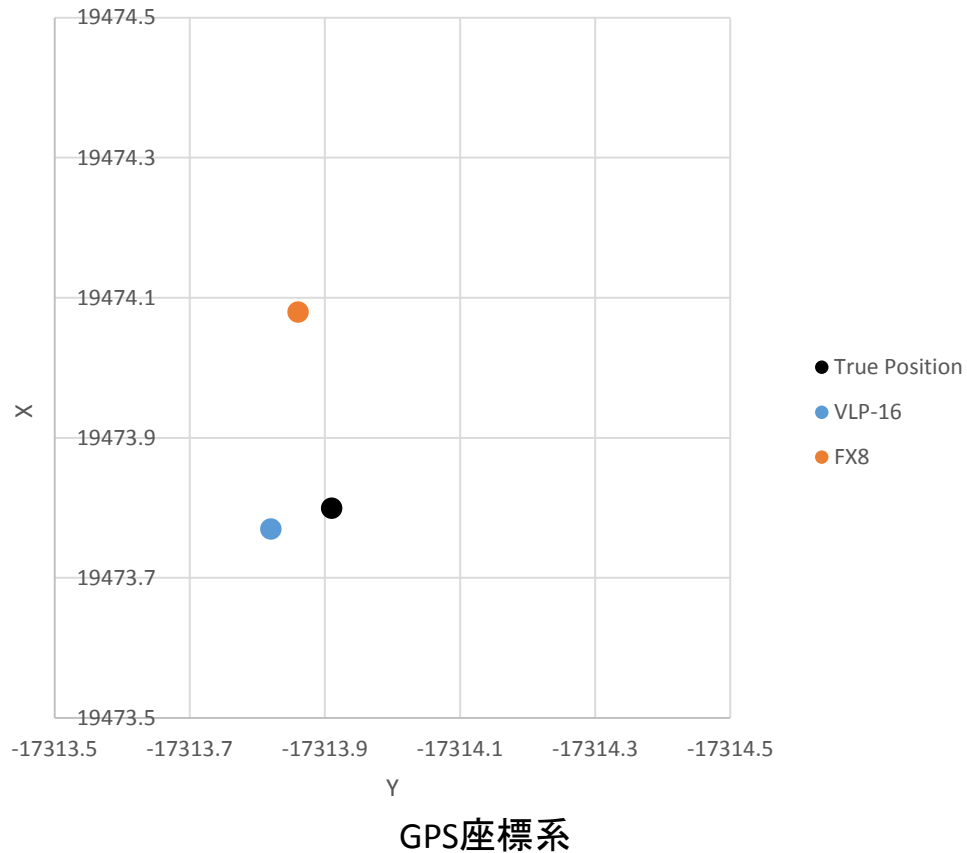


※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

	FX8	VLP-16
X	0.53	-0.07
Y	-0.33	-0.05

測定場所4における自車位置検出結果

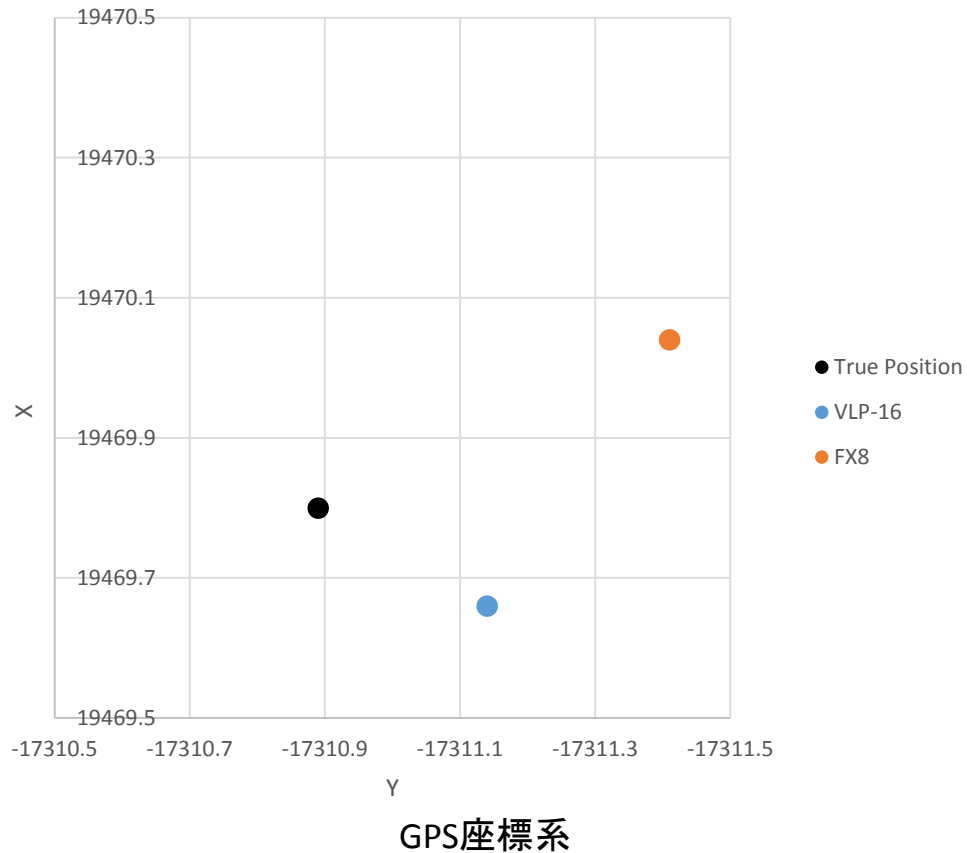


※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

	FX8	VLP-16
X	0.28	0.03
Y	0.05	0.09

測定場所5における自車位置検出結果

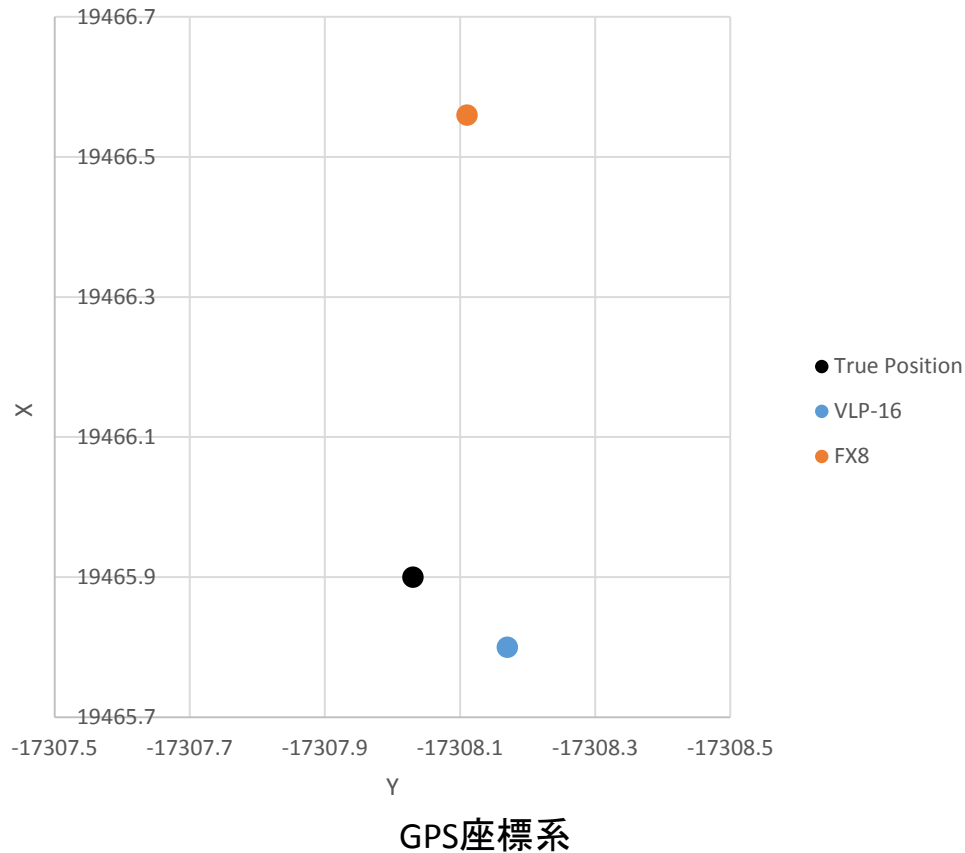


※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

	FX8	VLP-16
X	0.24	-0.14
Y	-0.52	-0.25

測定場所6における自車位置検出結果



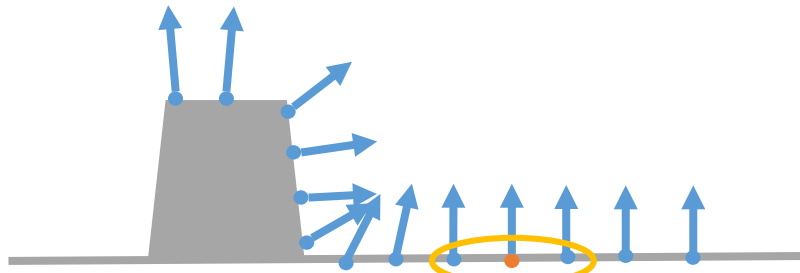
※ 比較対象: RTK-GPSにより測位した位置座標

RTK-GPSによる測位結果との誤差[m]

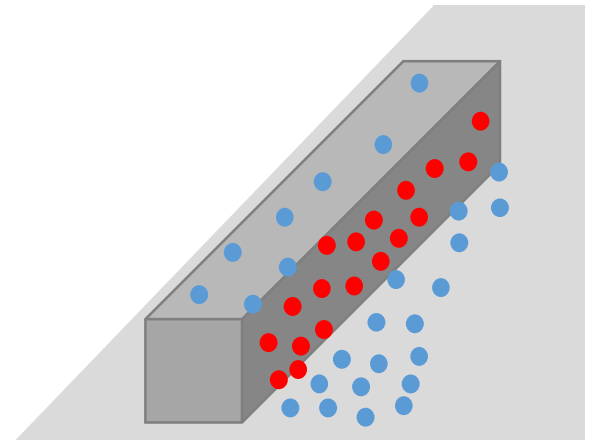
	FX8	VLP-16
X	0.66	-0.10
Y	-0.08	-0.14

実施方法 《縁石認識》

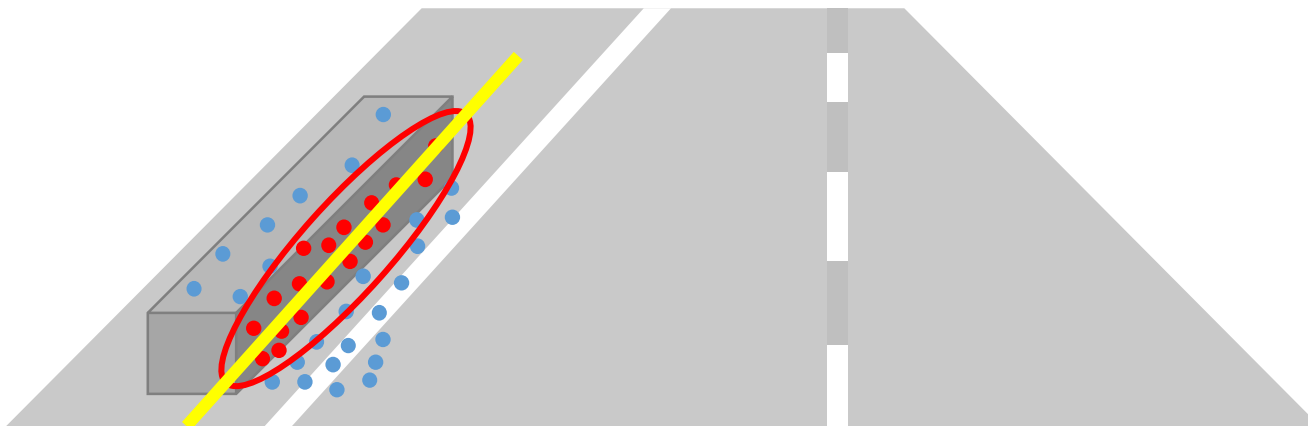
LiDARによる縁石認識



近傍点から各点の法線方向を算出



法線の向きから縁石候補点群抽出



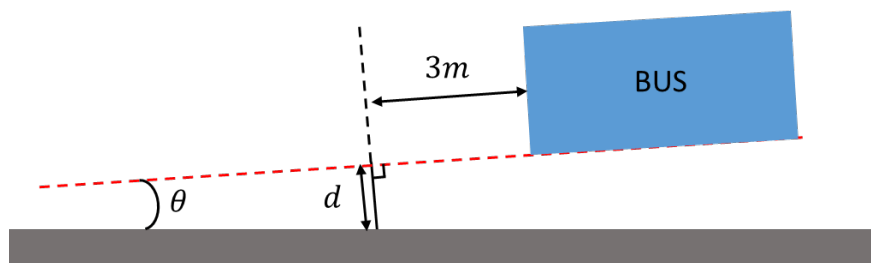
直線検出により縁石までの距離と車体に対する傾きを算出

評価結果 《縁石認識-1》

高さ19cmのコンクリートブロック群をLiDARで認識し車両前方3mにおける横偏差量 d と角度 θ を検出



停車状態で測定



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

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

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

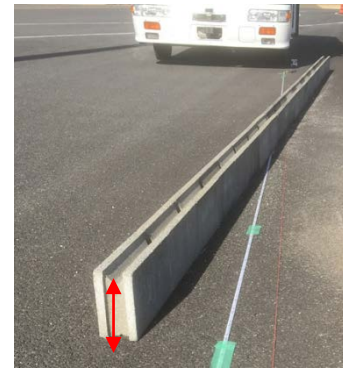
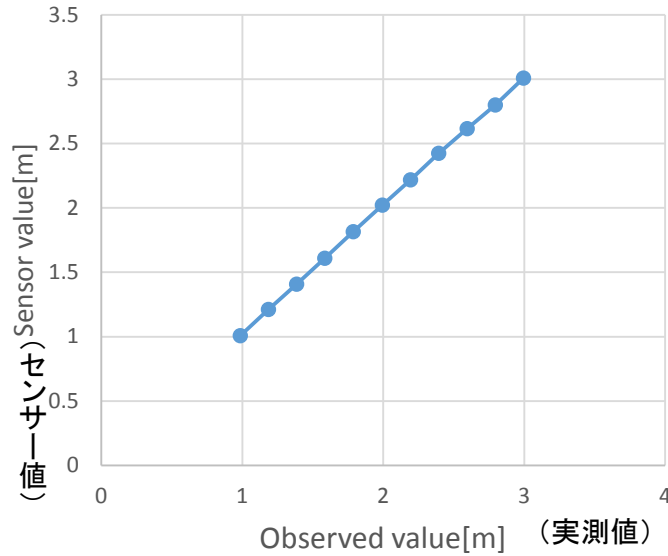
実測値	FX8	VLP-16
$d = 2.36[m]$	-0.10	0.01
$\theta = 1.5[deg]$	0.5	0.7

VLP-16の横偏差の最大検出誤差は1cm, 角度の最大検出誤差は0.7度

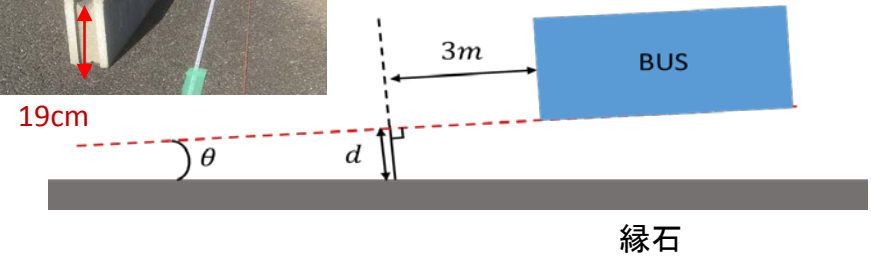
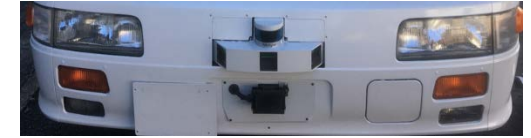
評価結果 《縁石認識-2》

台車試験(d)

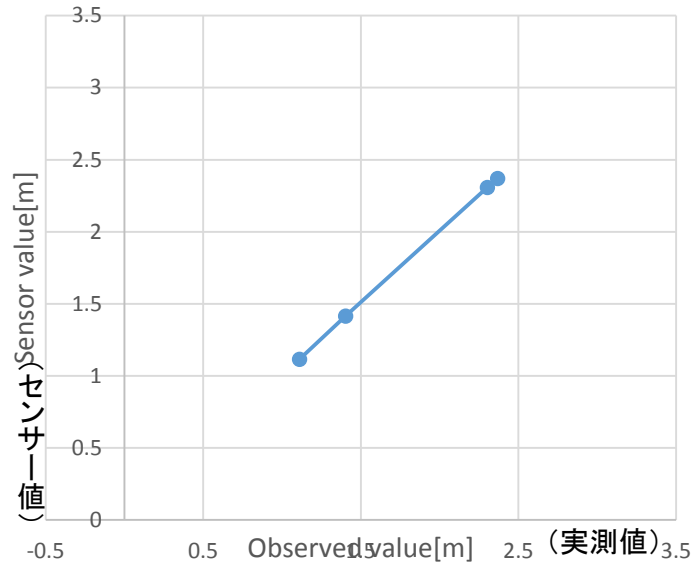
最大検出誤差は、横偏差(d)が1cm、角度(θ)が0.7度



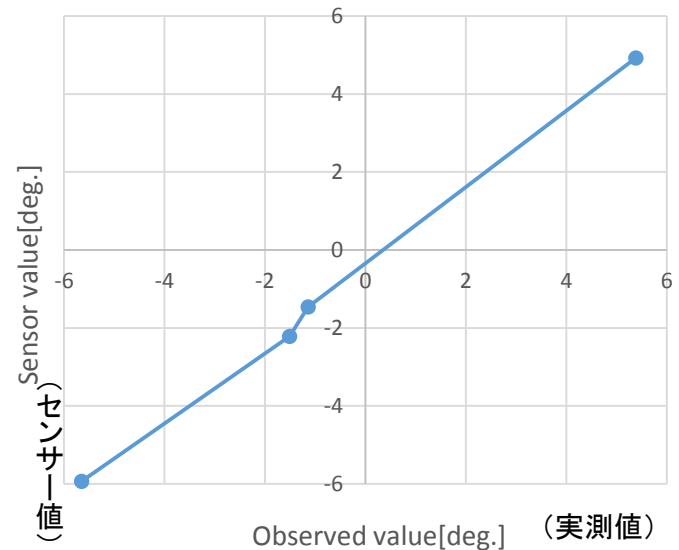
※ 停車状態で測定



実車試験(d)



実車試験(θ)



概要 《磁気マーカ間の自己位置推定》

$$\theta = \int \underbrace{\gamma}_{\text{ヨーレート}} dt$$

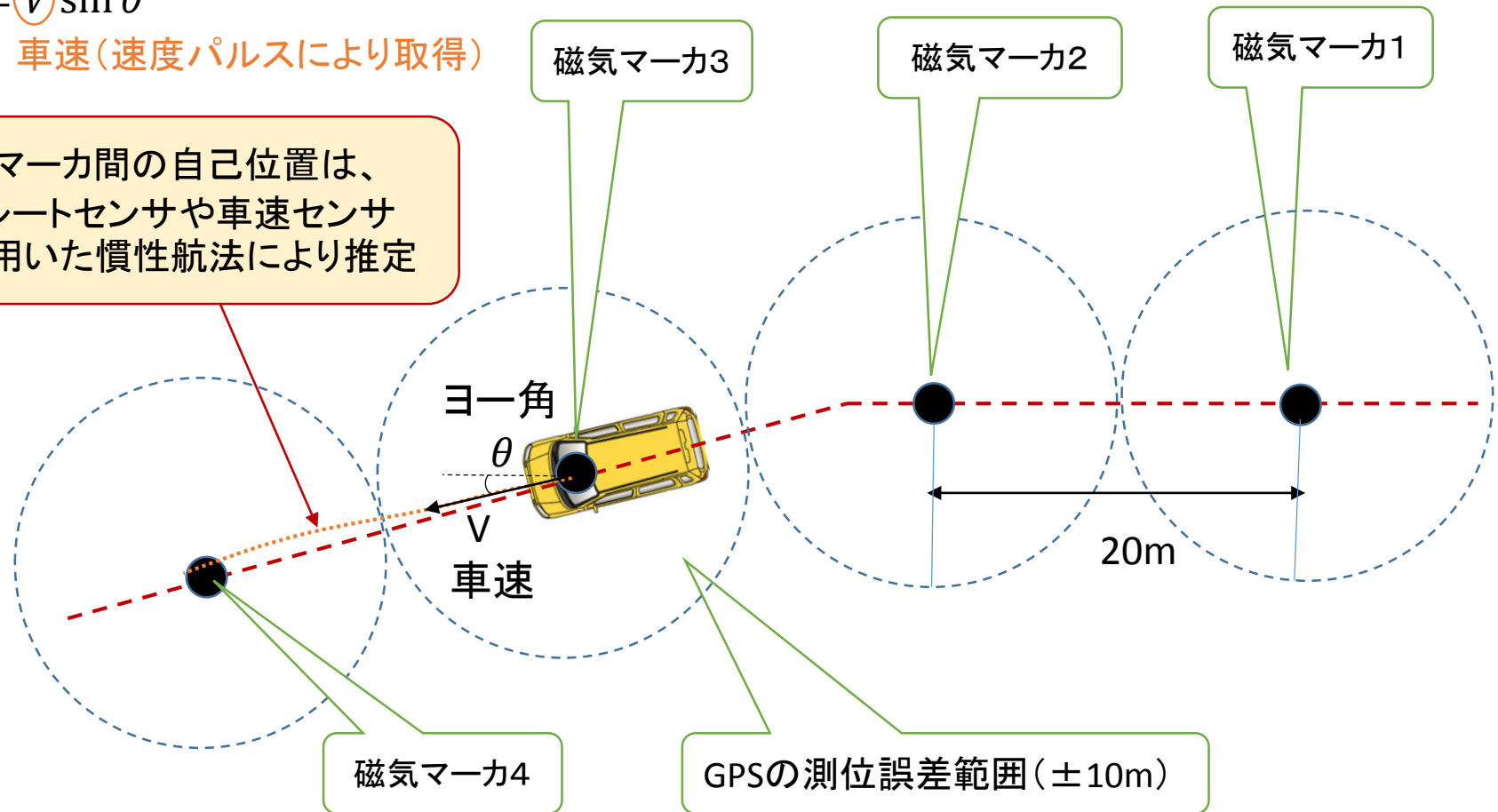
$$x = V \cos \theta$$

$$y = \underbrace{V}_{\text{車速}} \sin \theta$$

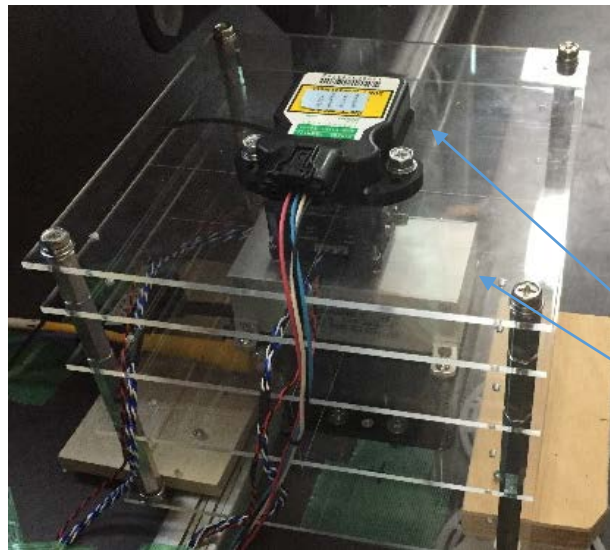
車速(速度パルスにより取得)

磁気マーカ通過時、GPSの測位情報とマーカ番号およびマーカテーブルより現在のマーカ番号と位置座標を検出

磁気マーカ間の自己位置は、ヨーレートセンサや車速センサ等を用いた慣性航法により推定

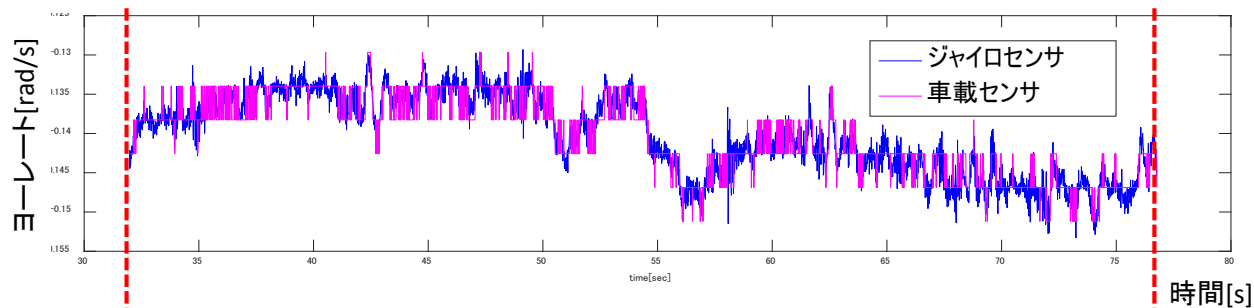


実施方法 《磁気マーカ間-1》



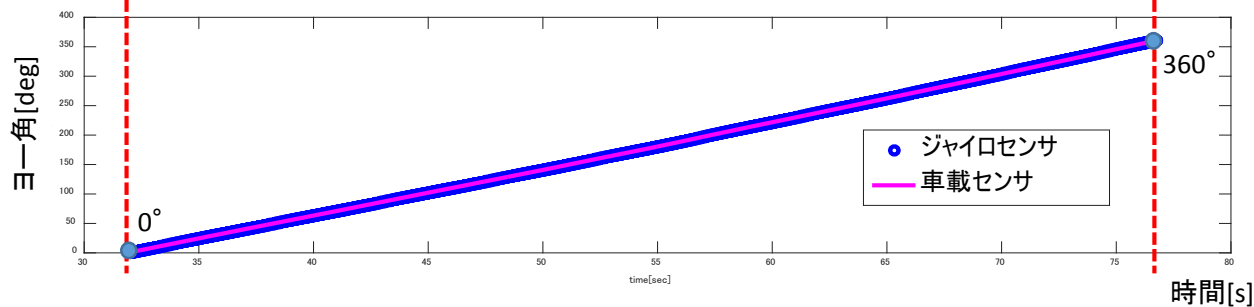
より安価なセンサによる慣性航法の可能性を検証するため、**車載用ヨーレートセンサ(量産品)**と**高精度ジャイロセンサ**をそれぞれ使用した慣性航法の精度を比較

- ・**車載用ヨーレートセンサ(量産品)**によりヨーレートを計測
- ・**高精度ジャイロセンサ(多摩川精機)**をリファレンスとして使用



【車載センサの補正方法】

- ・停車時にゼロ点を検出
- ・円旋回を1周したときのヨー角が 360° になるよう補正ゲインを算出



【補正結果】

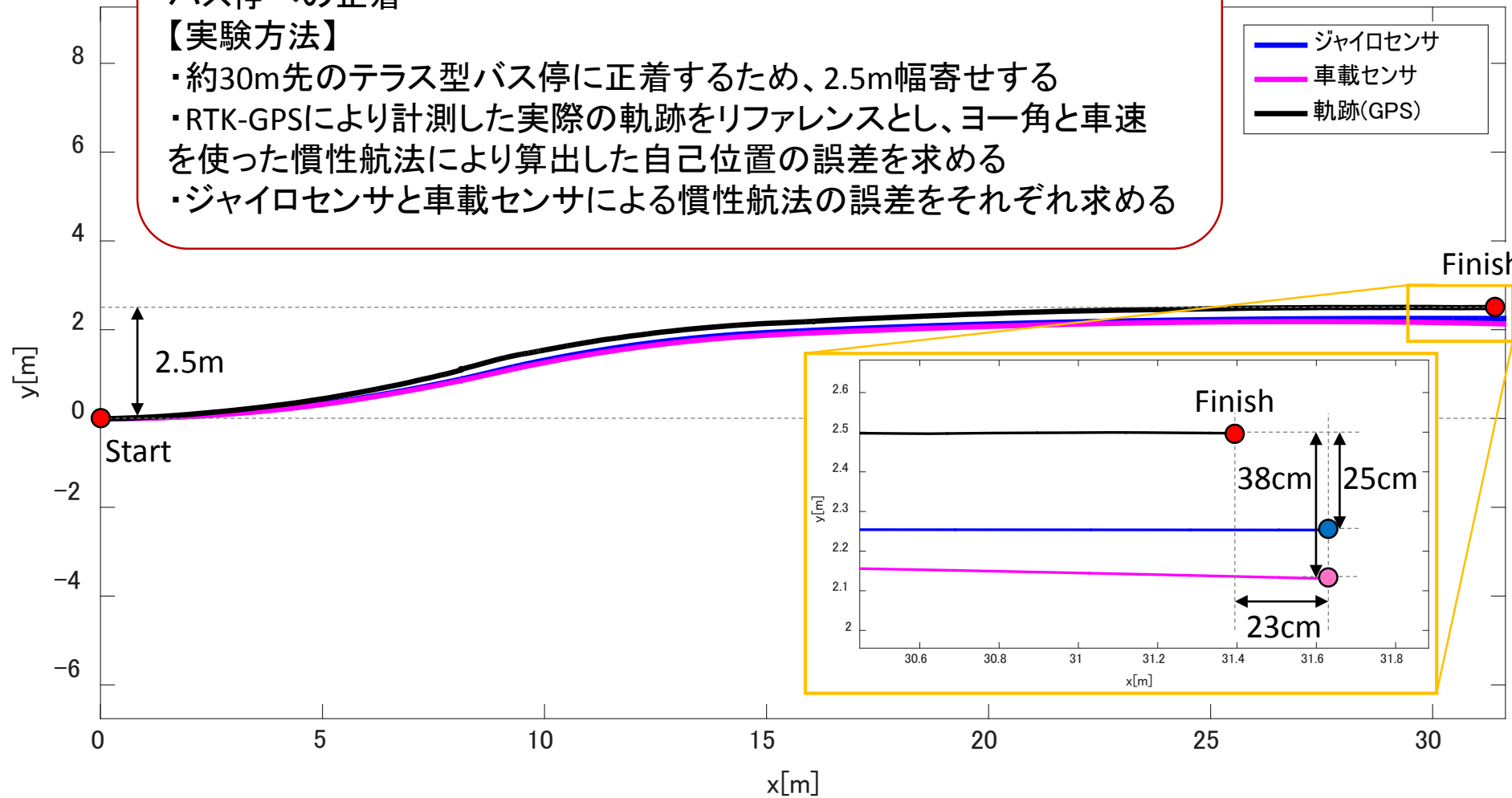
$$\text{ゲイン} = 360 / 1459 = 0.2467 [^\circ]$$

実施方法 《磁気マーカ間-2》

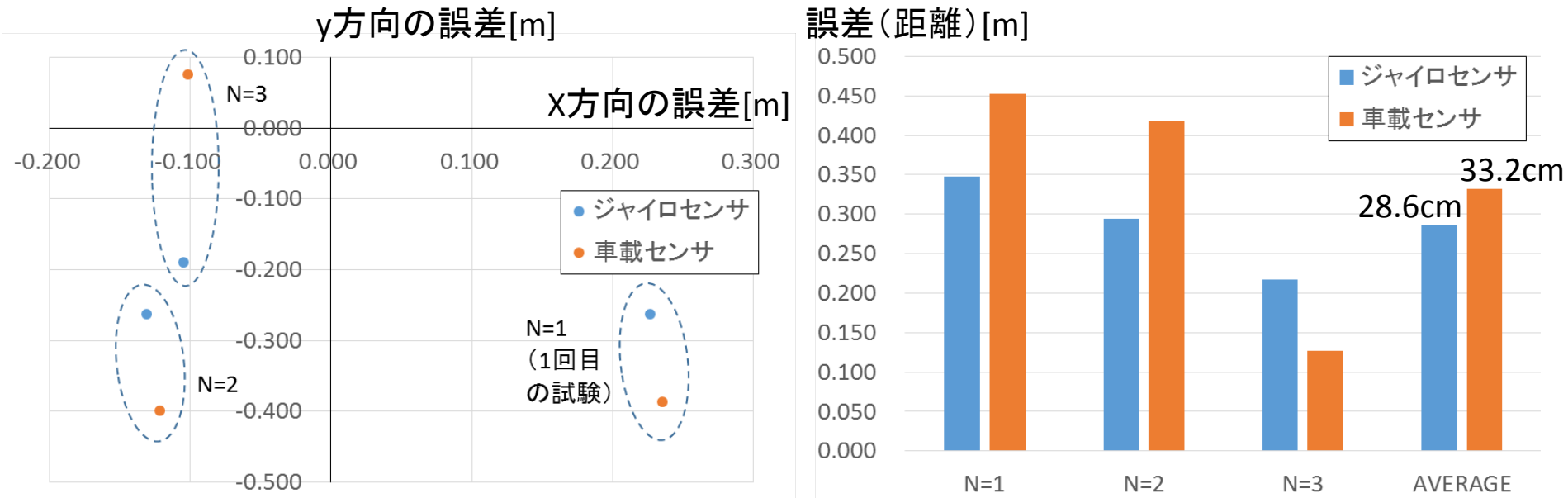
バス停への正着

【実験方法】

- ・約30m先のテラス型バス停に正着するため、2.5m幅寄せする
- ・RTK-GPSにより計測した実際の軌跡をリファレンスとし、ヨー角と車速を使った慣性航法により算出した自己位置の誤差を求める
- ・ジャイロセンサと車載センサによる慣性航法の誤差をそれぞれ求める



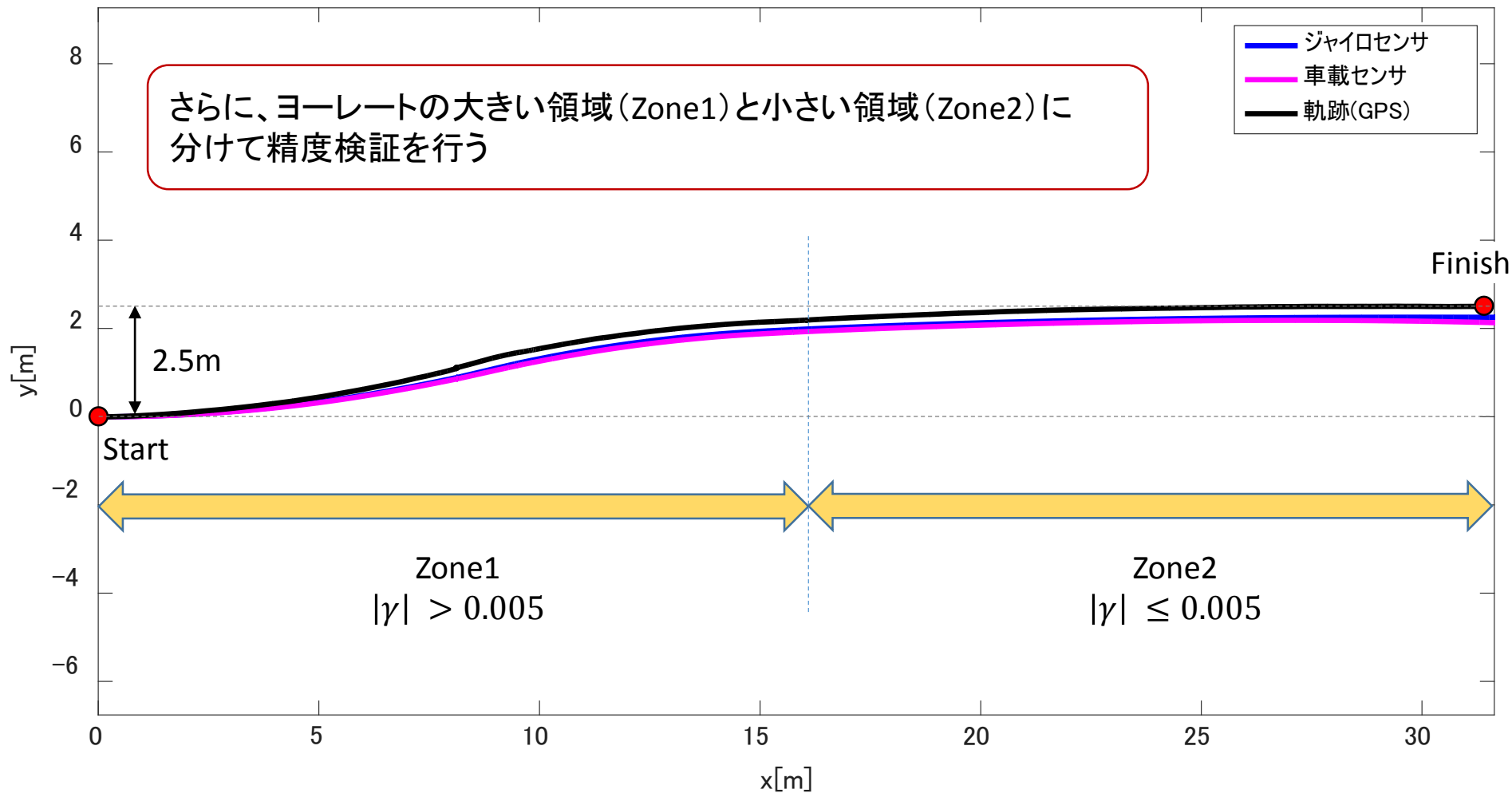
評価結果 《磁気マーカ間-1》



【実験結果】

- ・ヨー角と車速を用いた慣性航法により、30m先のバス停に対して、30cm程度の誤差で軌跡を推定できることがわかった
- ・車載ヨーレートセンサでも、ばらつきはあるが、同様に30cm程度の誤差で推定可能

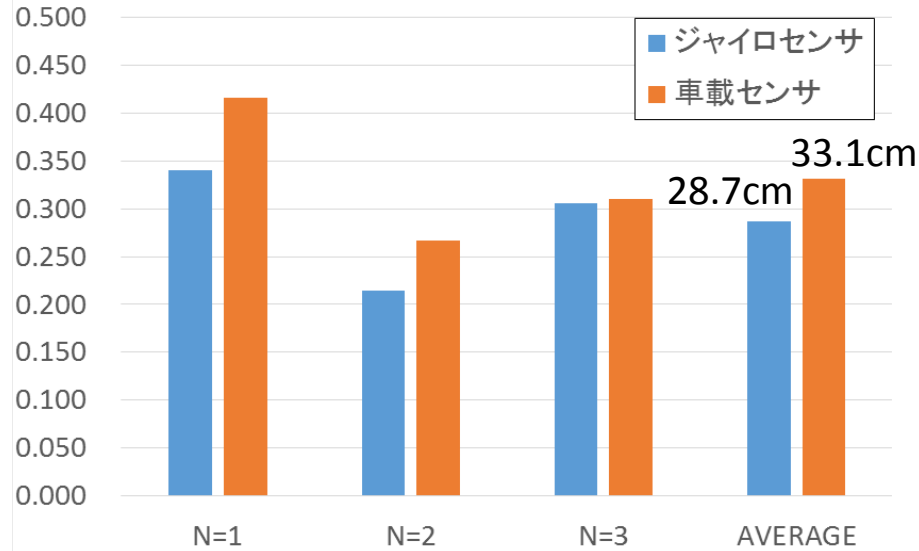
評価結果 《磁気マーカ間-2》



評価結果 《磁気マーカ間-3》

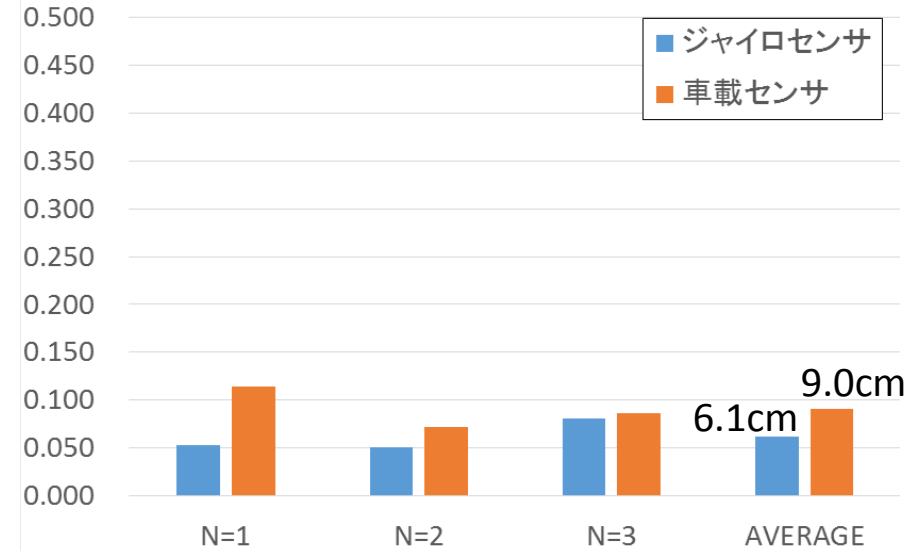
Zone1(ヨーレート大)

誤差(距離)[m]



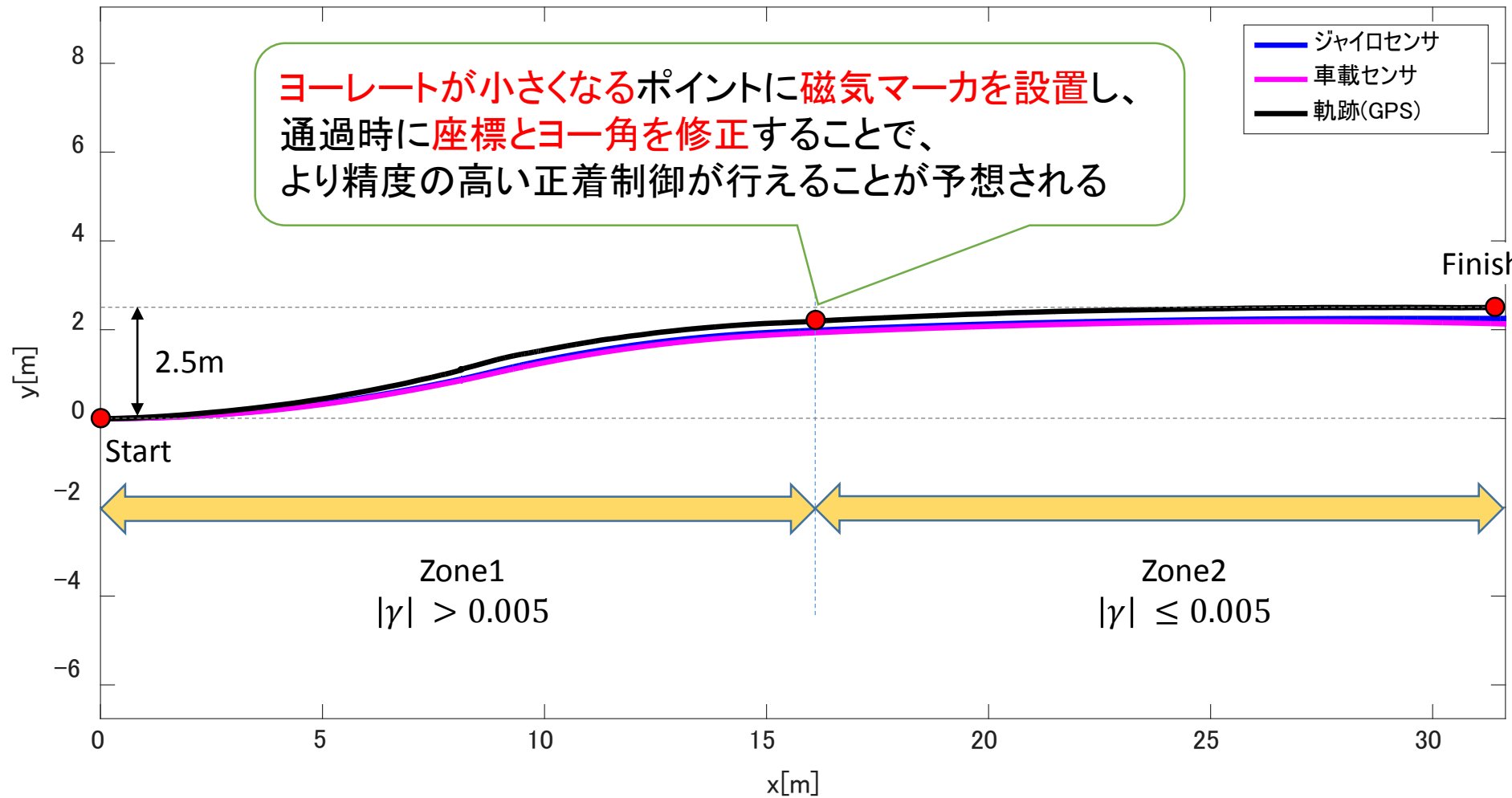
Zone2(ヨーレート小)

誤差(距離)[m]

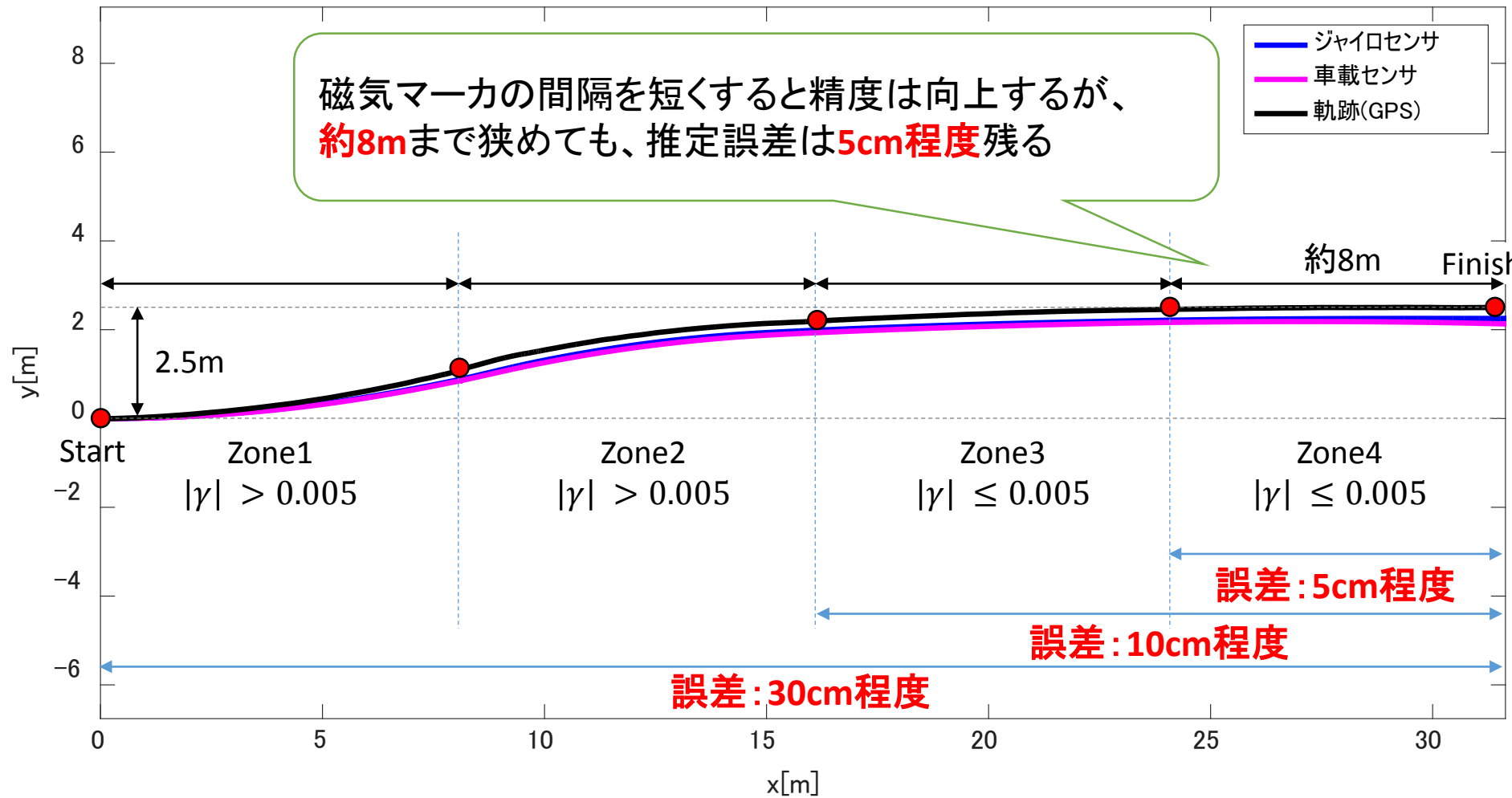


- ・ヨーレートの小さい領域ではほぼ10cm以内の誤差で推定できる
- ・ヨーレートの大きい、横方向の変位が大きい領域を終える場所に磁気マーカを設置し、自己位置を修正することが望ましい

評価結果 《磁気マーカ間-4》



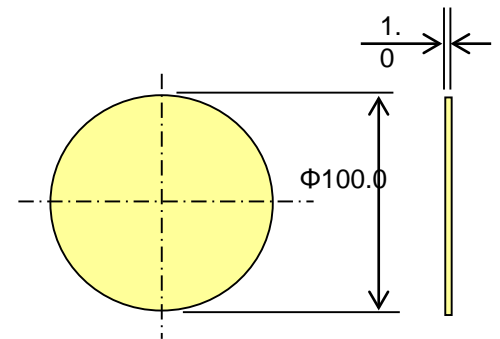
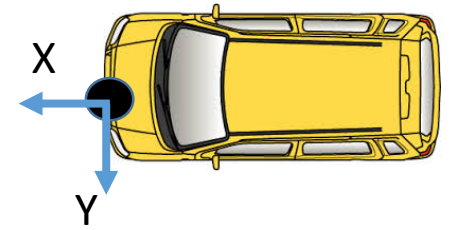
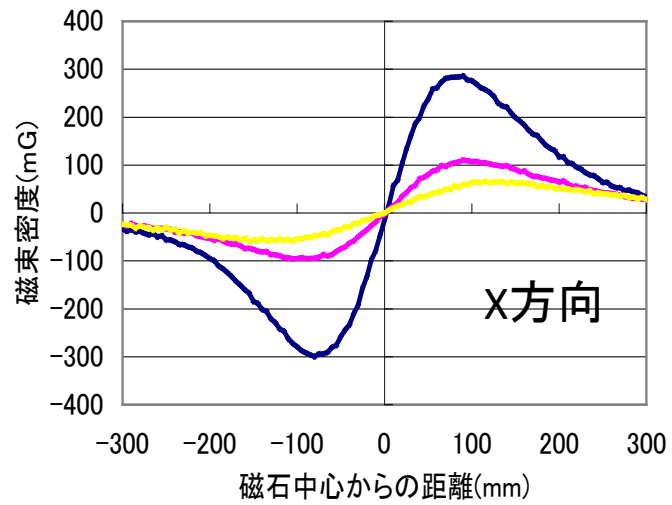
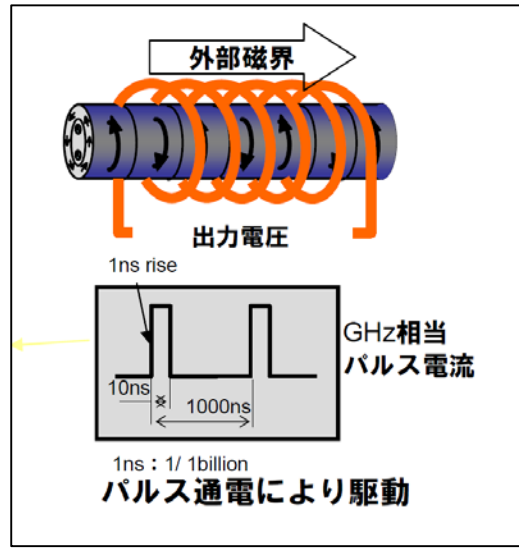
評価結果 《磁気マーカ間-5》



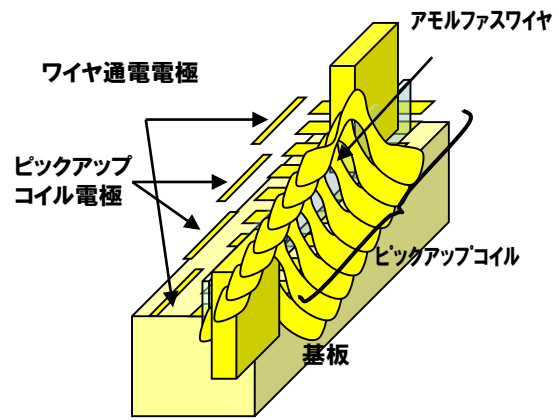
評価結果 《磁気マーカ間-まとめ》

- **車載用ヨーレートセンサ(量産品)**から求めたヨー角と車速を使った慣性航法により、約30m先のバス停に正着したときの自己位置推定は**30cm程度の誤差**
- **高精度ジャイロセンサと車載用ヨーレートセンサ(量産品)**では5cm程度の差
- **ヨーレートの小さい領域**は、大きい領域に比べて**推定精度が高い**
- 磁気マーカの間隔を**約8m**まで狭めても、推定誤差は**5cm程度**残る

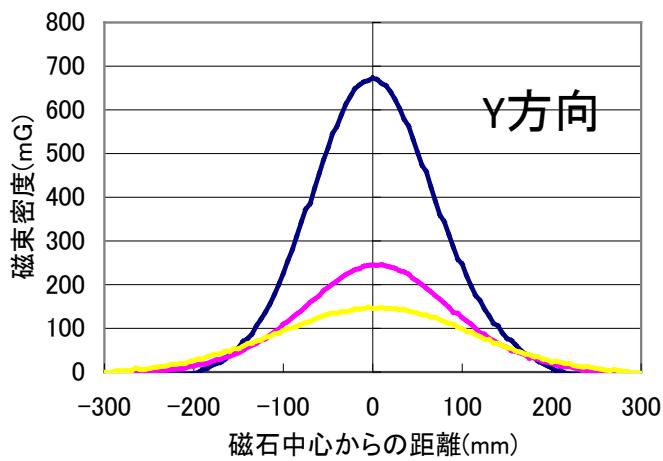
概要 《磁気センサ-1》



フェライト磁粉をゴムに分散させた、微弱磁界発生マーカー



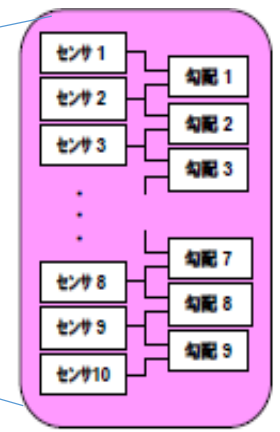
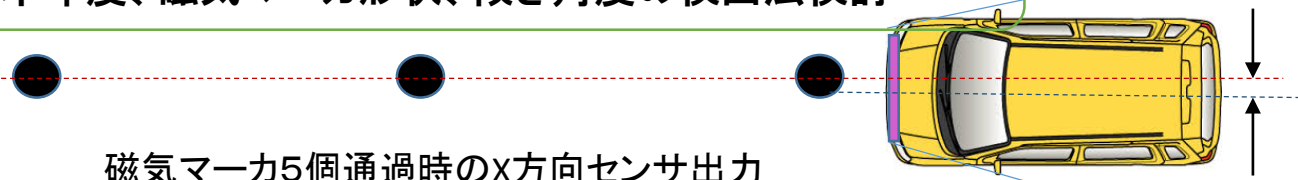
MIセンサ



磁気マーカ特性

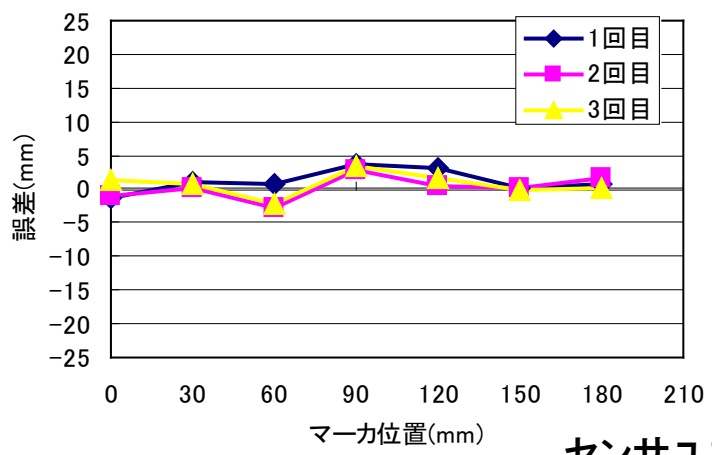
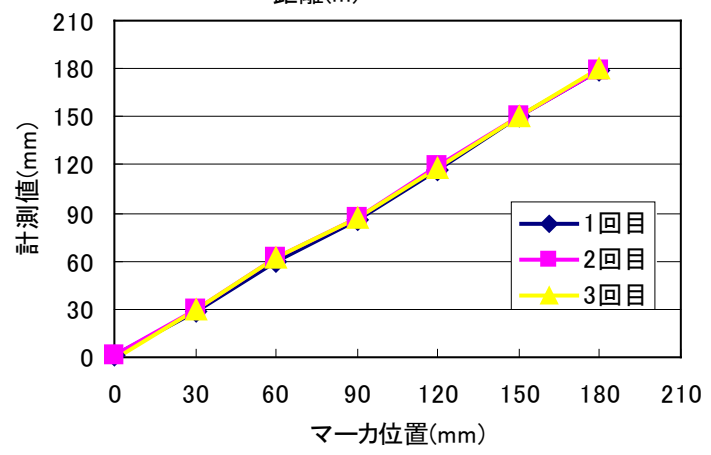
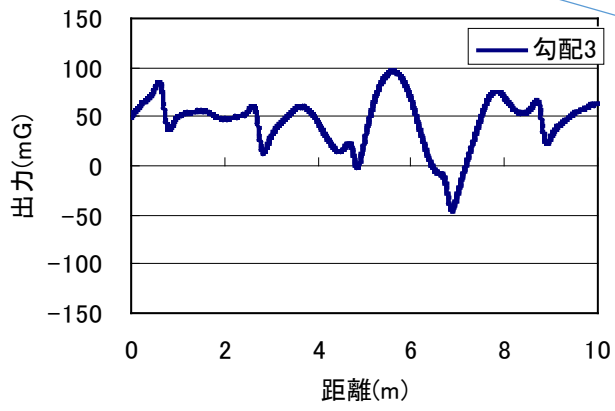
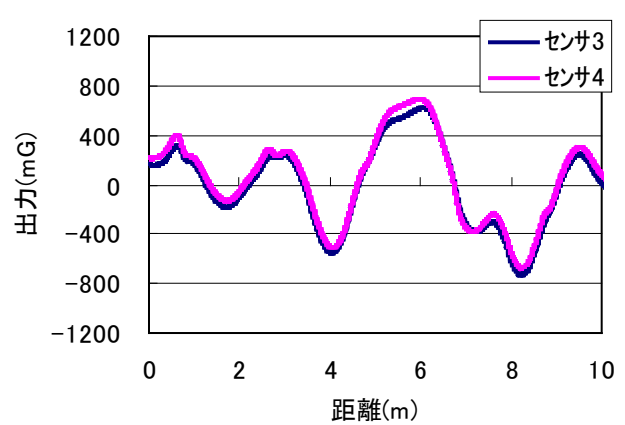
概要 《磁気センサ-2》

- 2015年度の成果:実道にて±0.5cmの検出性能を確認
- 本年度、磁気マーカ形状、傾き角度の検出法検討



センサユニット

磁気マーカ5個通過時のX方向センサ出力

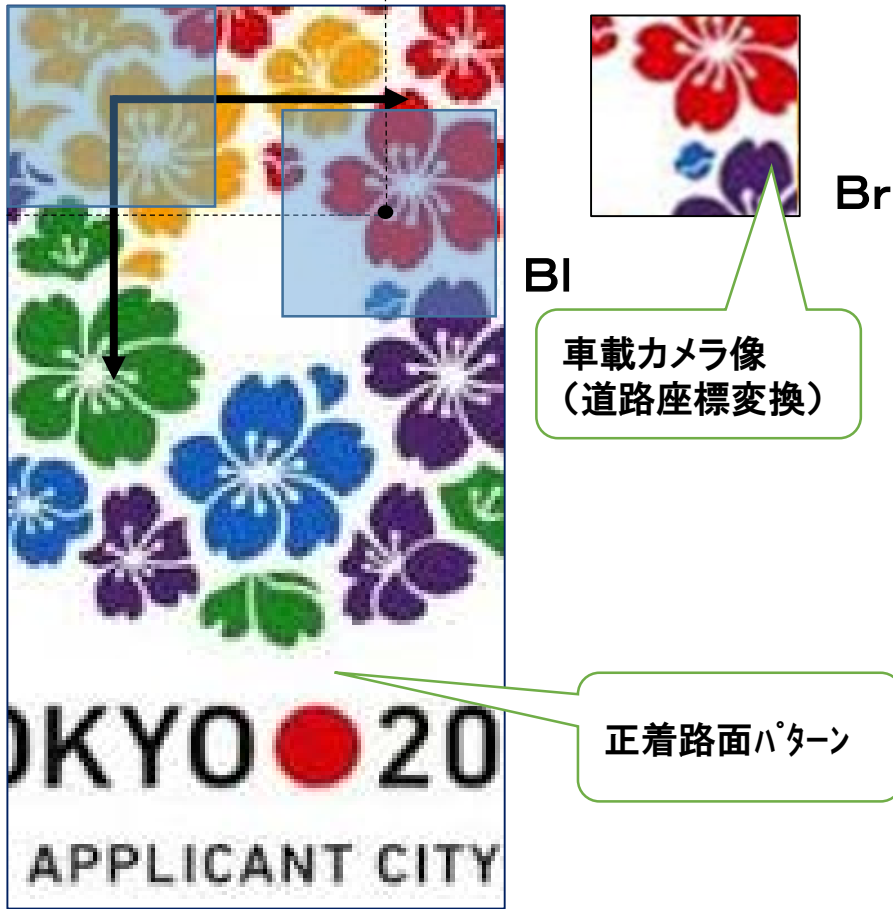


センサユニット横位置検出特性

概要

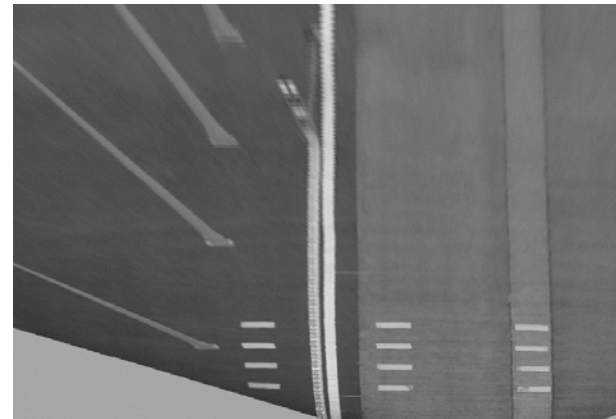
位置検出アルゴリズム

- パターンマッチングによる車載カメラ像の算出
- マッチング式: $\text{一致度} = \sum \text{参照画像} | Br - BI |$



画像による位置検出の課題

- 2次元カメラ画像⇒3次元道路画像への座標変換精度誤差による位置精度の低下
- 路面画像データ生成誤差の発生



実施方法

材質や路面の凹凸によるレーザー光反射強度の違いを利用して、あらかじめ作成した路面反射Mapとのマッチングをとることで自車位置を検出



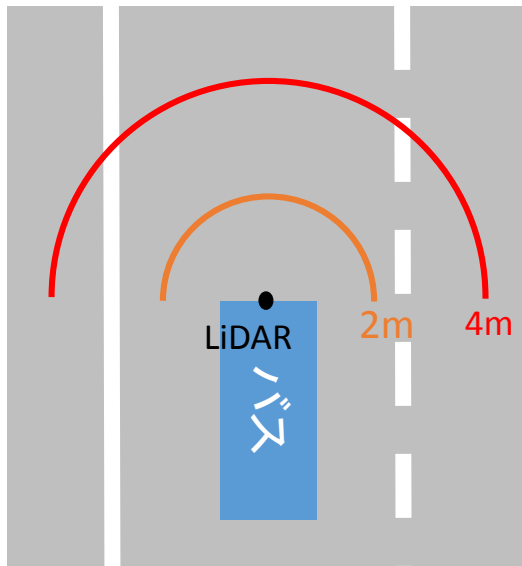
A地点



B地点



C地点



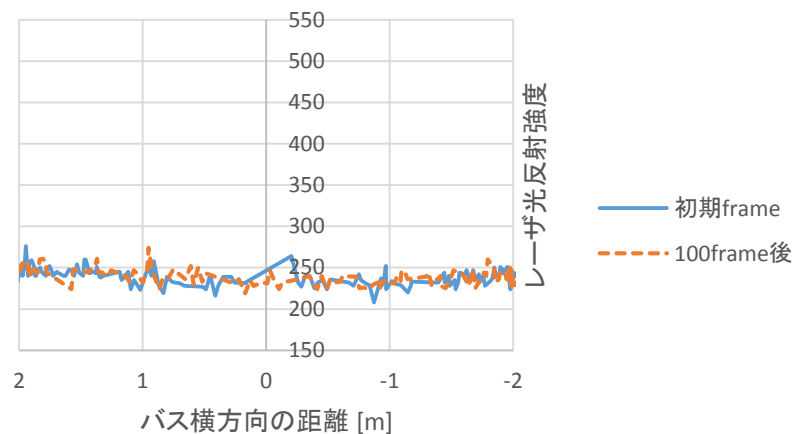
3箇所で測定

- ・ LiDARから2m、4mの距離にあるデータを使用
- ・ 同じ場所で異なる時間に測定した場合と異なる場所で測定した場合とでレーザー光反射の変化を比較

評価結果 《路面反射強度-1》

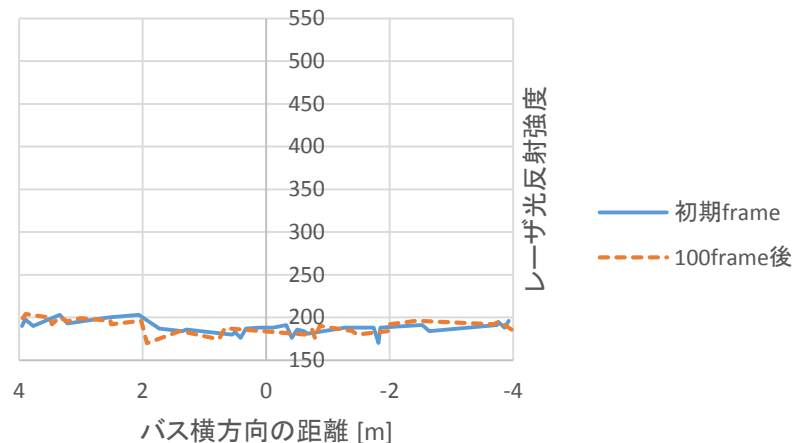


【A地点】 路面状況: アスファルトのみ



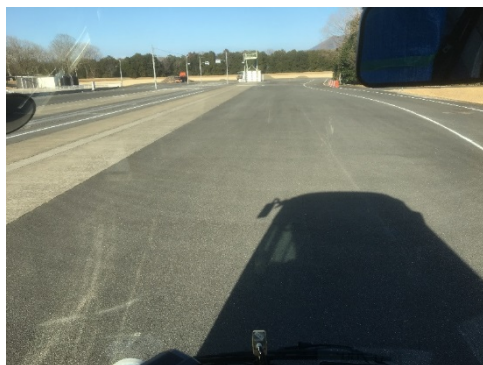
2m前方のレーザー光反射強度

同じ場所での測定であっても
時間が異なるとデータも変化

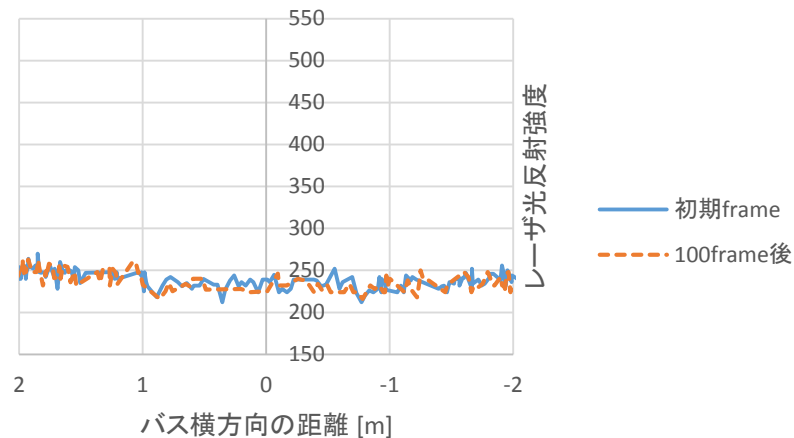


4m前方のレーザー光反射強度

評価結果 《路面反射強度-2》

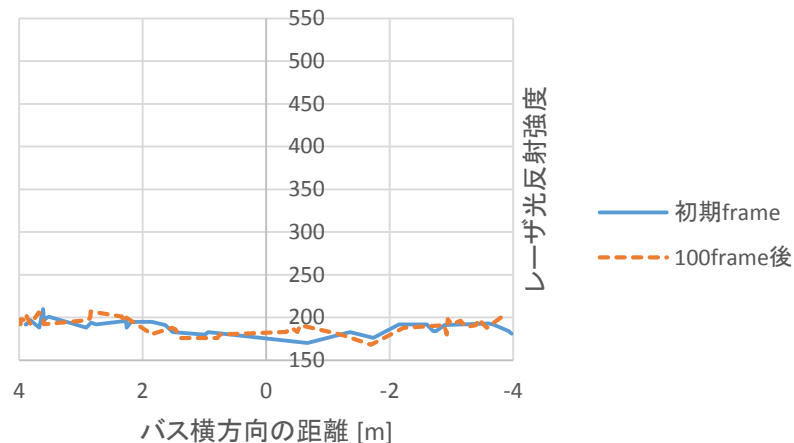


【B地点】 路面状況:アスファルトのみ



2m前方のレーザー光反射強度

アスファルトのみのデータから
レーザー光反射パターンの違いを
区別するのは困難

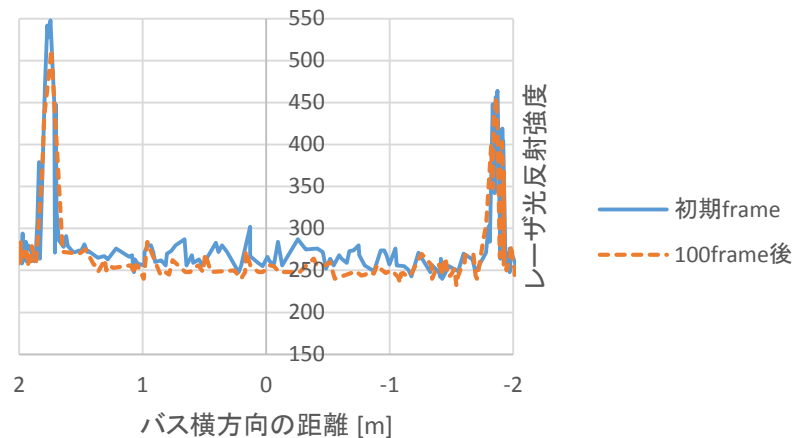


4m前方のレーザー光反射強度

評価結果 《路面反射強度-3》

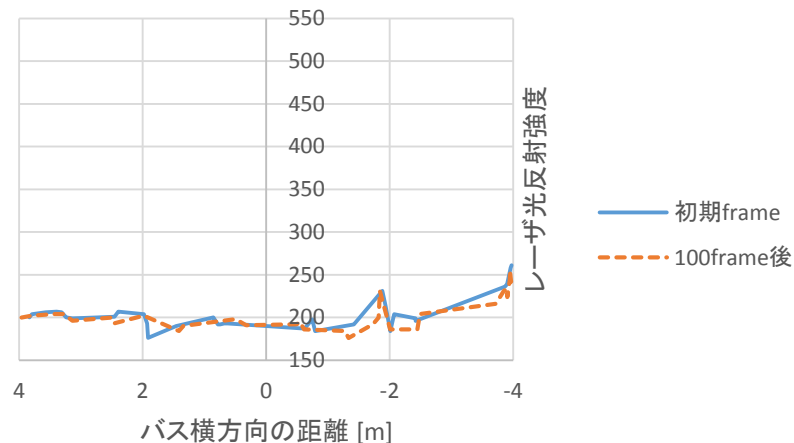


【C地点】 路面状況：白線有り



2m前方のレーザー光反射強度

- ・2m前方における白線の路面反射強度が著しく高い
- ・4m前方では白線とアスファルトの反射強度変化は少ない
- ・レーザー光反射パターンによって区別するには広範囲から様々な材質の反射を受光する必要がある

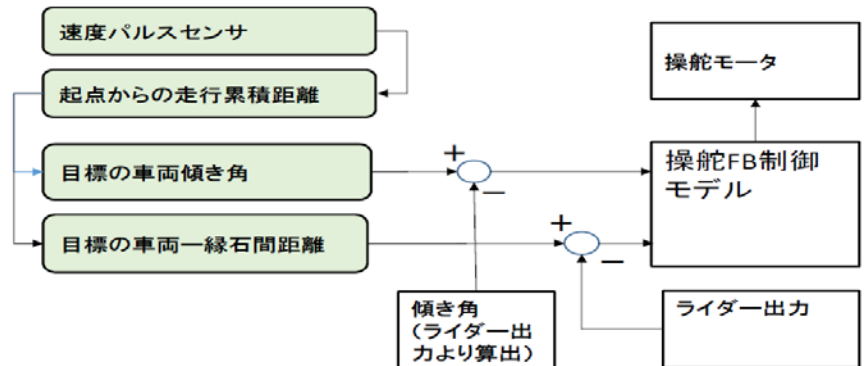
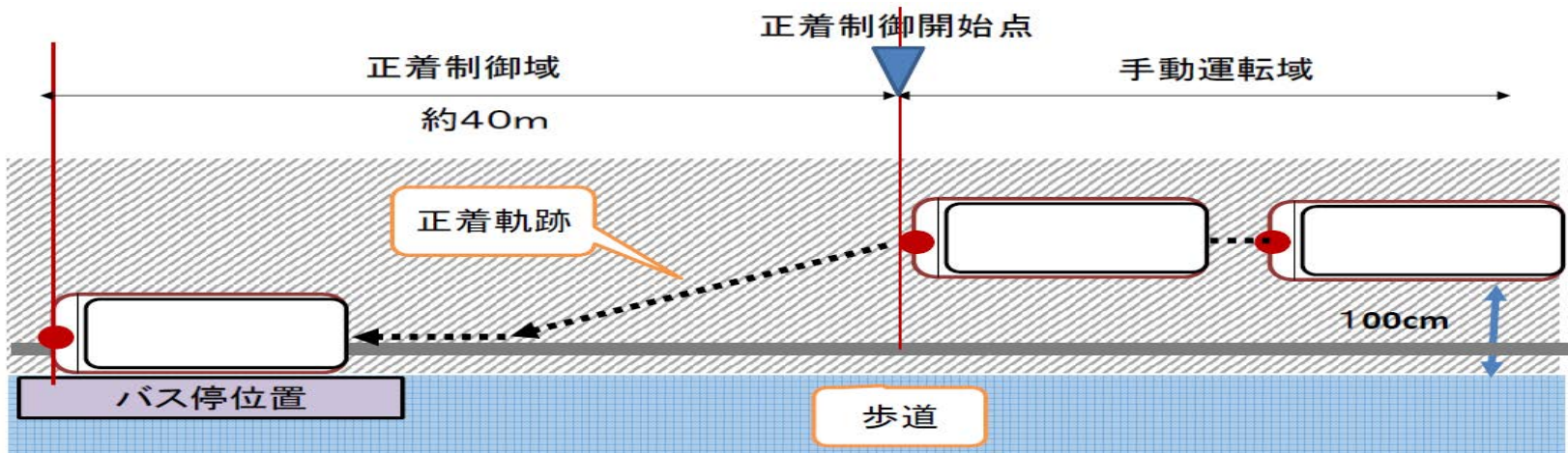


4m前方のレーザー光反射強度

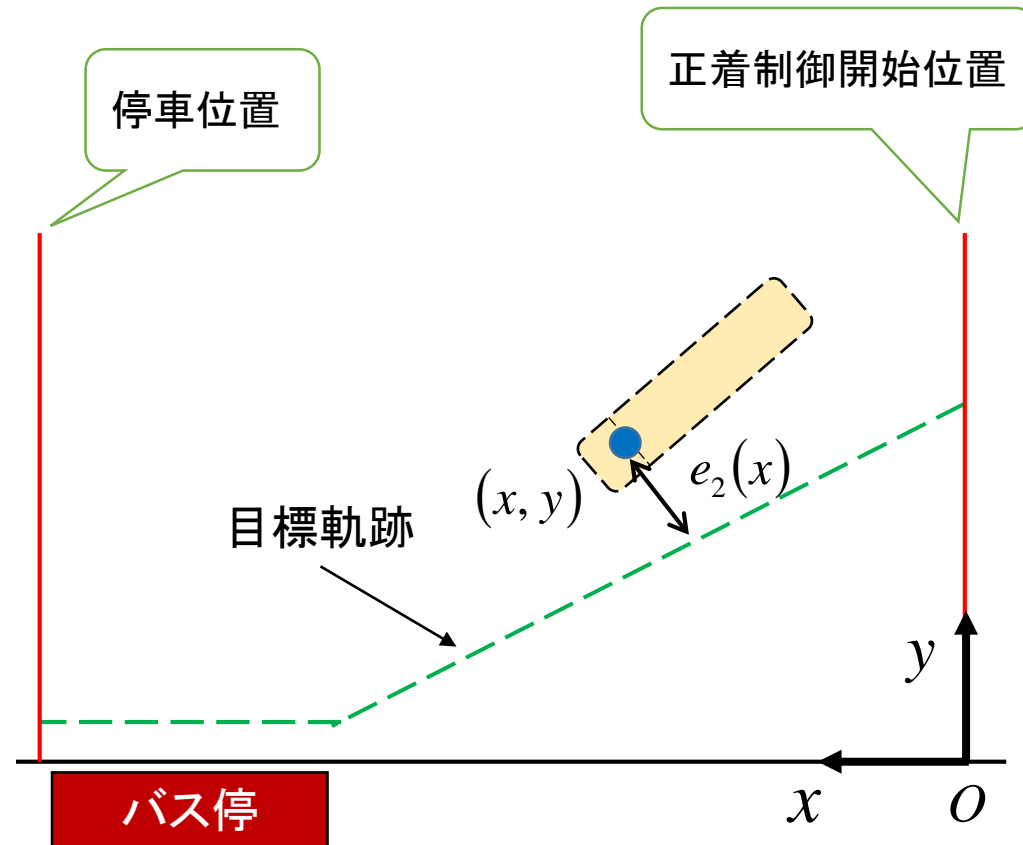
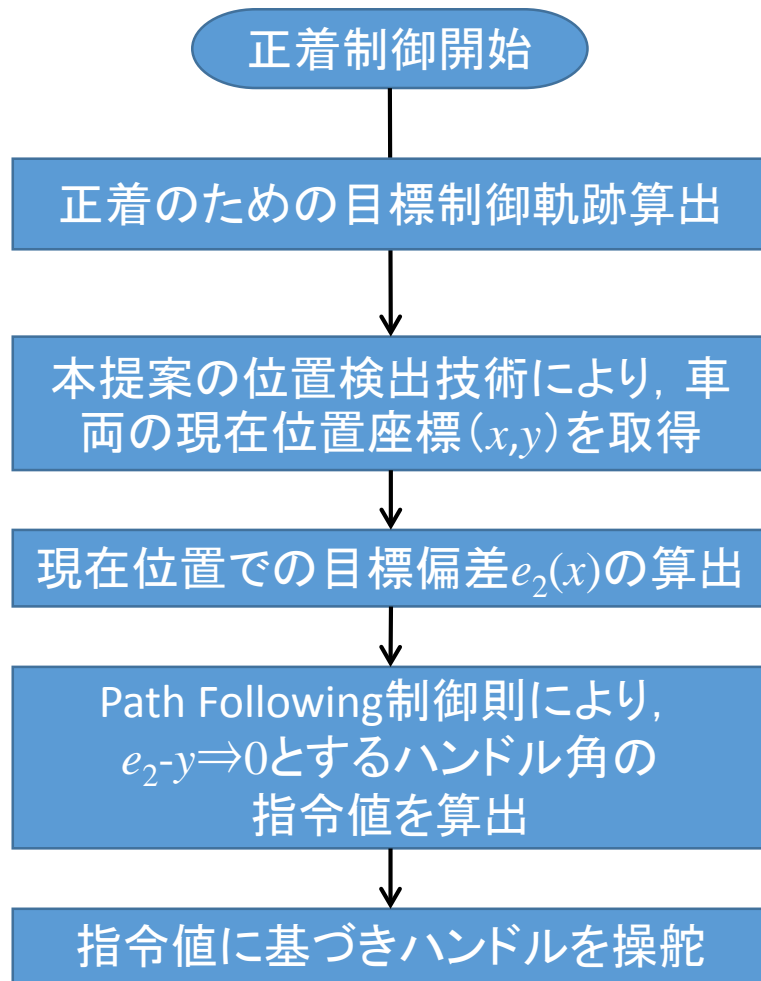
実施方法

ライダーによる縁石検出方式の実車評価

- バス停形状:直線型 (テラス型)
- 評価実験車:日野小型バス「リエッセ」
- 正着目標: $4\text{cm} \pm 2\text{cm}$



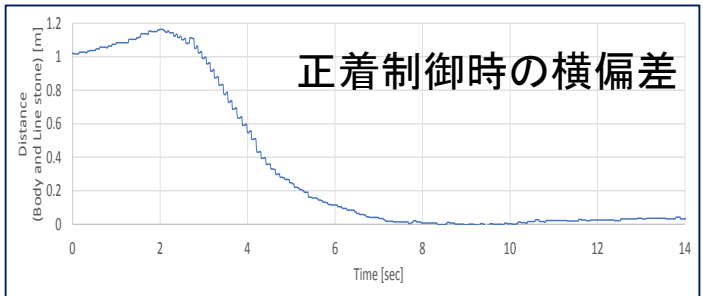
実施方法 《アルゴリズム》



評価結果

実験条件

- 正着目標: 4cm ± 2cm
- 正着開始速度: 20km/h、8km/h
- 速度制御: ドライバーによる手動操作
- 初期縁石一車両間離隔距離: 1.0m
- 評価回数: 10回



実評価結果

- 正着平均誤差 : 0.7cm (4.7cm)
- 正着最大+誤差 : +2.0cm
- 正着最大-誤差 : -0.6cm

