

# 特集 隊列走行におけるレーザレーダ白線検知技術\*

## Lane Mark Detection Using LIDAR for Platooning

松浦 充保                      高須 賀直一                      磯貝 俊樹                      吉田 大輝  
Mitsuyasu MATSUURA      Naohito TAKASUKA      Toshiki ISOGAI      Taiki YOSHIDA

For highly efficient platooning, all platooning vehicles need to maintain a short distance between each vehicle and the same position within the traffic lane. Each vehicle has to detect the lane mark and precisely calculate its lateral position from the lane mark. We developed a lane mark detection method using LIDAR based on lane mark features extraction and lane shape estimation using Hough transformation, and achieved excellent experimental results on an unused expressway. Moreover, we increased the robustness in rainy conditions.

Key words : Laser Radar, LIDAR, Lane Mark, Platooning

### 1. はじめに

運輸部門のエネルギー／環境対策として、省エネルギー効果の高いITS技術による自動制御輸送システムの実現が期待されている。高速道を利用した長距離輸送を想定した場合、空気抵抗は車速の2乗に比例し走行抵抗の主要因となるため、高い省エネルギー効果を得るには、空気抵抗を最小化する必要がある。空気抵抗を最小化するには、複数台の車輛が、短い車間距離、且つ、車線内において先行車と同じ横位置を保ちながら走行する隊列走行技術が重要となる<sup>1)</sup>。隊列走行技術の研究開発は、これまでにも日、米、欧において行われてきたが、その多くは特別な道路インフラを必要とするコンセプトが中心であった。しかしながら、本格的普及のためには、特別な道路インフラを必要としない隊列走行が望まれる。

このような隊列走行の実現には、各車輛において、車線内における自車の横位置を、既存の道路インフラを利用し正確に把握する技術が必須となる。利用できる既存の道路インフラとしては、定常的に存在する区画白線が適している。そこで、自車側方の区画白線検知により、車線内における自車の横位置を把握する。

白線検知手法としては、大きく2種類ある。1つは、画像センサで撮影した画像の中から画像処理により白線を検知するパッシブ方式だが、自然光の影響を受け易く、検知性能に影響を及ぼす可能性がある。もう1つの手法は、レーザを用いるアクティブ方式である。白線とアスファルト路面では反射率が異なるため、反射強度の差を利用して白線を検知できるものと期待できる。この手法は、自らレーザビームを照射するため、自然光の影響を

受けにくいメリットがある。そこで、隊列走行時の車線内における自車の横位置認識を目的とした、レーザレーダを用いた白線検知技術を開発する。

白線を検知するために、レーザレーダを用いて路面方向にレーザビームを照射する場合、反射データには白線だけでなく、路面／路側物からの反射も含まれる。そこで、路面／路側物からの不要反射が含まれる状況においても正確な白線検知が可能な検知アルゴリズムを開発した。更に、降雨時の運用を想定すると、画像センサ、レーザレーダともに検知性能に影響を及ぼす可能性がある。そこで、降雨がレーザレーダによる白線検知性能に与える影響を調査するとともに、対策アルゴリズムを開発した。

### 2. レーザレーダによる白線検知原理

区画白線はJIS規格K5665で規定され、塗料中にガラスビーズが混入されているため、白線及びアスファルト路面に対しレーザビームを走査した場合、白線部分はガラスビーズでの再帰反射によりアスファルト路面と比較し高い反射強度が得られる。

今回使用するデンソー製レーザレーダの外観をFig. 1に、主な仕様をTable 1に示す。6つの走査面、左右方向451方位にレーザビームを2次元走査し、各方位に存在する物体からの反射光の強度を収集する。分解能は $\pm 0.08\text{deg}$ であり、画像センサ並みの高分解能を有している。この左右方向の高分解能を活かし、レーザレーダを車両上部に且つ下向きに搭載し、左右方向即ち、自車側方の白線を横切るように走査することで、高精度な白線検知を可能とする。実験用トラックには、

\*自動車技術会の了承を得て、「2010年秋季大会学術講演会前刷集」No. 145-10, 「First International Symposium on Future Active Safety Technology toward zero-traffic-accident 2011」No. TS-1-7-2-2 より一部加筆して転載

Fig. 2に示すように上部左側に搭載し、自車左側方の白線位置を検知する。

Table1 LIDAR Specifications

Term	Spec.
Detectable range	120m
Field of view (azimuth)	±18degree
Field of view (elevation)	±4degree
Sampling time	100msec
Angle resolution (azimuth)	0.08degree
Size	W100×H60×D80



Fig. 1 LIDAR



Fig. 2 LIDAR Mounted on Experimental Vehicle

### 3. 白線検知アルゴリズム

#### 3.1 課題

レーザレーダの検知データは、白線以外に、路面や路側物などからの反射も含んでいる。例えば、アスファルト路面においてはFig. 3に示すように複数のインパルス状の反射が、高速道路に存在する橋梁の継目からは、Fig. 4に示すように全面から反射が得られる。したがって、これら不要反射が含まれるデータの中から、白線からの反射に相当するデータのみを抽出する必要がある。

一方、自動制御輸送システムの運用が想定されている高速道路における白線形状は、本線では直線だが、分流／合流地点ではFig. 5に示すようにゼブラゾーン

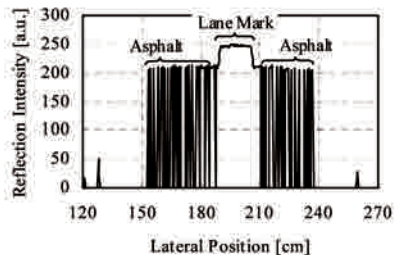


Fig. 3 Reflection from Road Asphalt

を含む複雑な形状に変化するため、この形状変化を考慮した検知アルゴリズムが必要となる。

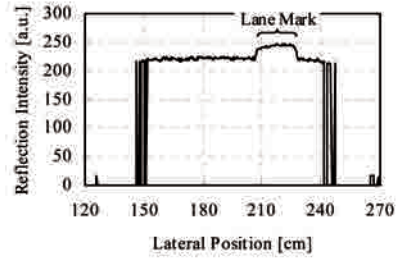


Fig. 4 Reflection from Bridge Joint



Fig. 5 Lane Mark Shapes Marking Expressway Branch off Point

#### 3.2 白線候補の抽出

白線からの反射データは、ガラスビーズでの再帰反射によりアスファルト路面と比較し高い反射強度が得られる。そこで、不要反射の含まれたデータの中から白線のみを確実に捕捉するために、反射強度データに対し、白線の反射強度相当の範囲で閾値を複数設定し、各閾値において、立ち上がり一立下り区間の幅を算出する。

一方、白線形状に着目すると、本線においては道路構造令により定められた規定の線幅である。そこで、算出した幅が、規定値15又は20cm相当であるデータを白線候補として抽出し、車線内側のエッジ位置を算出する。車線内側のエッジ位置を算出する理由については後述する。

Fig. 3に示したアスファルト路面の反射データから抽出した白線候補の車線内側エッジの位置をFig. 6に、Fig. 4に示した橋梁の継目からの反射データから抽出した白線候補の車線内側エッジの位置をFig. 7にそれぞれ示す。アスファルト路面及び橋梁の継目からの反射を除去し、白線を抽出できている。

#### 3.3 白線の判別

白線以外からの反射データが、白線に近い特徴を有する場合、白線候補として抽出されてしまう可能性がある。そこで、曲率や位置などの車線パラメータを算

出し、車速／ヨーレートなどの車両情報と車線パラメータとから現時刻における白線位置を予測してROI (Region Of Interest) を設定し、ROIに存在する白線候補を白線として判別する。

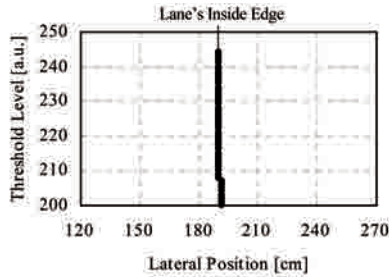


Fig. 6 Lane Mark Extraction from Road Asphalt

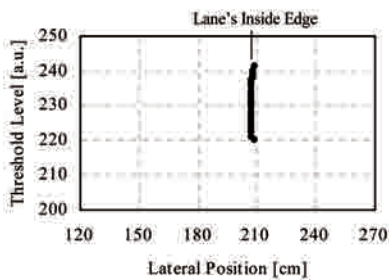


Fig. 7 Lane Mark Extraction at Bridge Joint

ここで、白線形状は必ずしも一定の線幅の直線とは限らず、分流／合流地点において変化するが、Fig. 5を見てもわかるように、車線内側のエッジは直線性・連続性を維持している。そこで、車線内側のエッジを用いて車線パラメータを算出しROIを設定する。過去にROIに白線があったにも関わらず白線が検知されなかった場合は、分流／合流地点の白線である可能性が高いため、車線内側のエッジ位置がROIに含まれるデータがあれば白線として判別する。

車線パラメータの算出方法を述べる。算出する車線パラメータは、車線の曲率／ヨー角／位置である。まず、車速／ヨーレートなどの車両情報から、エゴモーションを計算する。次に、過去数スキャン分のレーザーデータの検知データを、エゴモーションを用いて、現時刻におけるレーザー座標系に変換する。そして、下記に示す2次曲線モデルを用い、ハフ変換により曲率／ヨー角／位置を算出する。求めた直前スキャン時の車線パラメータと、現時刻の車速／ヨーレートとから、現時刻の白線位置を求める。

$$x = a_0 + a_1 y + a_2 y^2$$

$a_0$  : Lateral Position [m]

$a_1$  : Yaw Angle [rad]    $a_2$  : Curvature [1/m]

Fig. 6の反射データに対しROIを設定した結果をFig. 8に示す。白線の位置を正確に予測しROIを設定できおり、白線として判別できる。

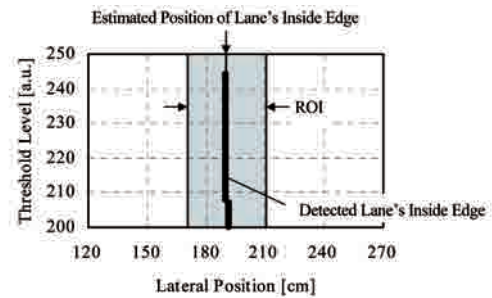


Fig. 8 Example of Lane Estimation

### 3.4 トラッキング

上記により求めた白線位置及び車線パラメータを、車両振動等による計測誤差低減及び、追い越し車線走行時に破線状の白線を検知するため、拡張カルマンフィルタを用いてトラッキングする。状態変数は次のように設定する<sup>2) 3) 4)</sup>。

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} y_{lat} \\ \Psi_{rel} \\ c_0 \\ c_1 \end{pmatrix}$$

$y_{lat}$  : Lateral Position [m]

$\Psi_{rel}$  : Yaw Angle [rad]

$c_0$  : Curvature [1/m]

$c_1$  : Curvature Changing Rate [1/m<sup>2</sup>]

白線位置とヨー角の状態遷移モデルは、Fig. 9に示すように、自車運動と車線形状変化の相対的關係に基づいて構築する。ヨー角の絶対値が十分小さいとき、連続時間におけるシステムモデルは、以下に示す線形の微分方程式で近似できる。

$$\begin{aligned} \dot{y}_{lat} &= v \Psi_{rel} + c_0 v^2 \\ \dot{\Psi}_{rel} &= \dot{\Psi}_{abs} + v c_0 \\ \dot{c}_0 &= v c_1 \\ \dot{c}_1 &= 0 \end{aligned}$$

本アルゴリズムでは、上述した処理により、状態変数のうち白線位置／ヨー角／曲率が直接観測可能である。よって、観測モデルは、以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} a_0 &= y_{lat} \\ a_1 &= \Psi_{rel} \\ a_2 &= c_0 \end{aligned}$$

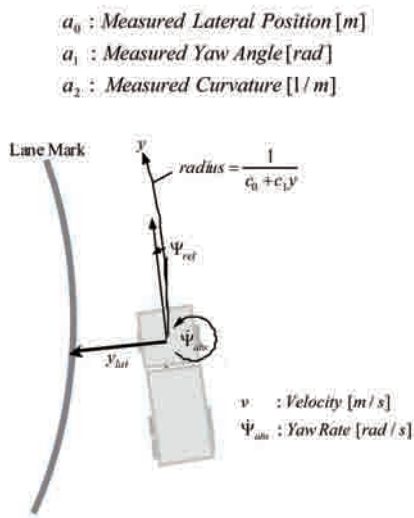


Fig. 9 Relationship between the Ego-vehicle and the Lane

### 3.5 白線検知結果

上述の白線検知アルゴリズムの有効性を確認するため、(独)産業技術総合研究所(AIST)が保有する高速周回路を使用して走行実験を実施した。この試験路においては、Fig. 10に示すように、一部区間に道路と側道との境界に白線の線幅相当のコンクリート面が存在する。この区間での反射強度データはFig. 11に示すように、白線以外に、白線に近い特徴を有するコンクリート面からの反射が得られるため、白線候補として抽出されてしまう。しかし、Fig. 12に示すように、車線予測により設定したROI内には白線のみが存在するため、白線のみを正確に抽出できる。

晴天時に時速80kmで走行した場合における白線位置算出結果をFig. 13に示す。Fig. 13においては、縦軸は計測時間を、横軸は自車の車両中心線を基準とした白線検知位置を示しており、参考値として、画像センサを用いた白線位置算出結果を併せて示している。Fig. 13より、コンクリート面での誤検知や未検知なく、画像センサ同等の高精度な白線検知ができていることがわかる。

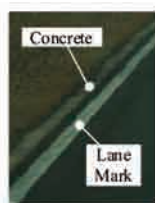


Fig. 10 Concrete beside the Lane Mark at the AIST Test Course

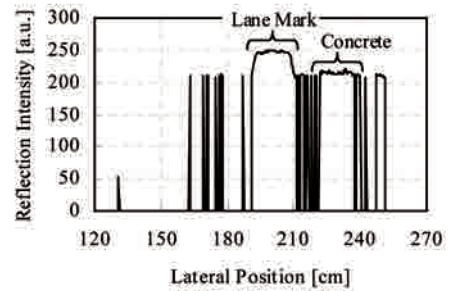


Fig. 11 Reflection from Lane Mark and Concrete at the AIST Test Course

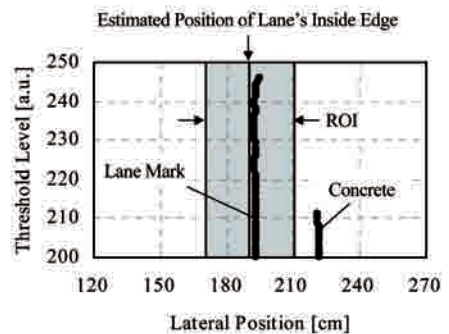


Fig. 12 Result of Lane Mark Extraction

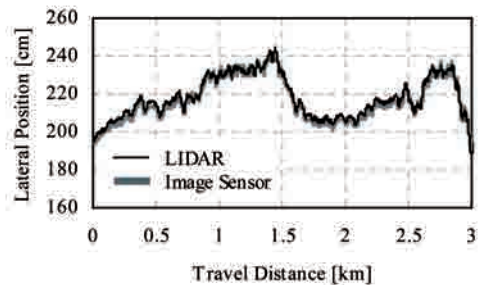


Fig. 13 Lane Mark Detection Results on AIST Test Course

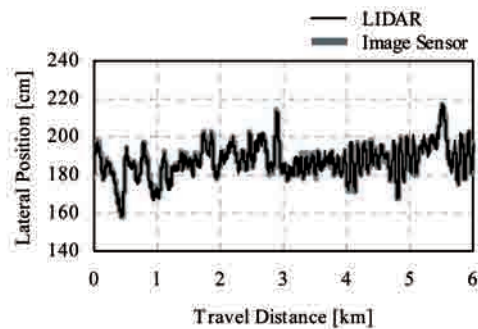


Fig. 14 Lane Mark Detection Results on Unused Expressway

未共用の高速道路にて、同様の走行実験を実施した。本線における白線位置算出結果をFig. 14に示す。Fig. 14より、誤検知・未検知なく白線検知できている。次に、分流地点における白線位置算出結果をFig. 15に示す。Fig. 15 (a)に示すような複雑な白線形状ではあるが、車線内側のエッジの直線性・連続性に着目に追跡することで、正確に白線検知できている。

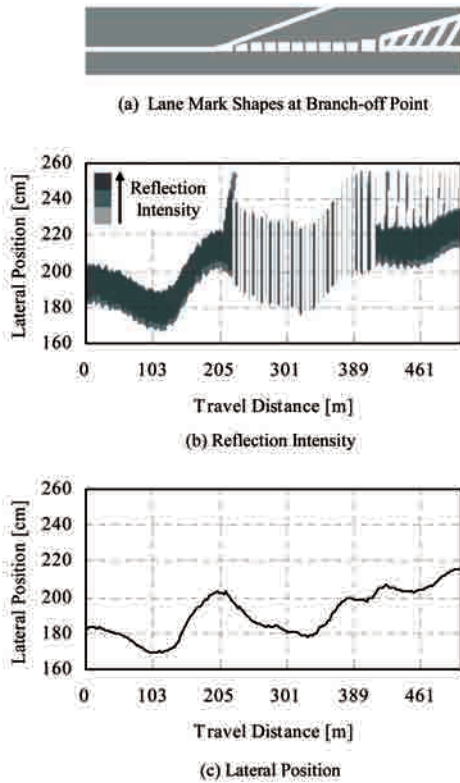


Fig. 15 Lane Mark Detection Results at Branch-off Point

#### 4. 降雨が白線検知性能に与える影響

降雨時においては、走査中にレーザービームが空中の雨滴に当たると、得られる反射データの中には雨滴データも含まれる。降雨を再現可能な大型降雨実験施設を用いて、晴天時及び時間雨量50mmの降雨時における反射強度の時系列データを計測した結果をFig. 16, Fig. 17にそれぞれ示す。ここで時間雨量50mmとは、通行規制基準を超える大雨である。降雨時は晴天時と異なり、雨滴での反射により、特にアスファルト路面の反射強度が上昇し、場所的・時間的にランダムに変動しているため、白線とアスファルト路面との判定マージンが低下する。

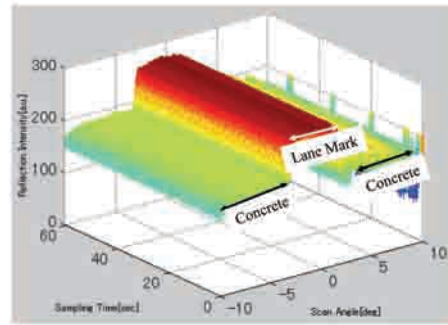


Fig. 16 Reflection in Fine Conditions

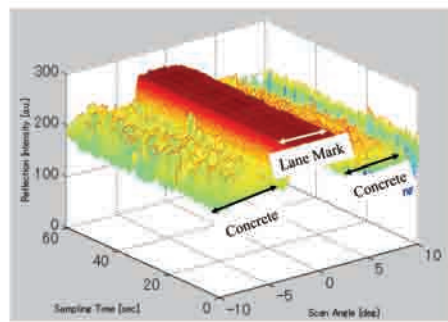


Fig. 17 Reflection in Rainy Conditions

この反射データの特徴を鑑み、各走査角度において、過去の走査データの反射強度を比較し最小値を選択する波形整形を新たに追加し、整形後のデータを入力として前述の白線検知アルゴリズムを適用することで、雨滴からの反射による影響を低減する。過去200データに対する本波形整形後の反射データの一例をFig. 18に示す。Fig. 18より、雨滴からの反射によるアスファルト路面部分の反射強度の上昇を抑制でき、白線との判定マージンが改善できている。

ここで、波形整形を行う際に使用するデータ数が多いほど遅延が生じるため、データ数を小さく設定したい。データ数に対する、白線とアスファルト路面との反射強度比をFig. 19に示す。

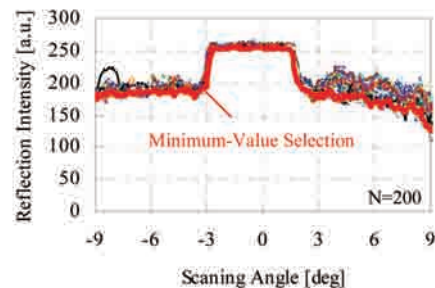


Fig. 18 Improvement of Robustness against Rain

Fig. 19より、過去6データ (0.1sec分) 即ち、1回の2次元走査で波形整形の効果が十分得られ、晴天時と同等の反射強度比3dBを確保可能であり、大きな遅延の影響を受けることなく白線判定マージンを確保できる。

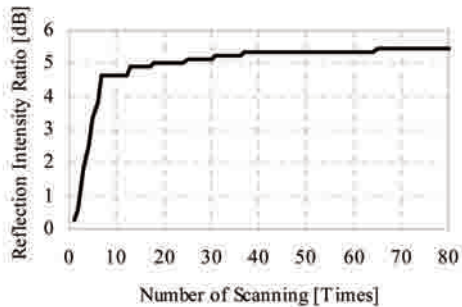


Fig. 19 Number of Scans for Improvement of the Reflection Intensity Ratio

## 5. おわりに

路面／路側物からの不要反射が存在する道路環境や、分流・合流地点においても安定した白線検知を可能とするアルゴリズムを開発した。更に、代表的な悪天候である降雨時について、検知性能に与える影響を調査するとともに、レーザ走査領域を通過する雨滴による反射の影響を低減、降雨時のロバスト性を向上した。今後は、空気中を長い時間漂う霧や雪についても、検知性能に与える影響を明らかにしていく予定である。

尚、本技術開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のエネルギーITS推進事業である「協調走行 (自動運転) に向けた研究開発」の成果の一部である。

## <参考文献>

- 1) 山崎穂高, 岡本邦明: 隊列走行トラックの高速道路における走行抵抗・燃費低減効果の検討, 自動車研究, Vol.32, No.3 (2010)
- 2) 小川高志, 高木聖和: レーザレーダによる車線認識技術, 自動車技術会春季大会学術講演会前刷集, No.42-06, 200 (2006)
- 3) 菅沼直樹, 魚住剛弘: レーザレンジファインダを用いた白線検出および白線線形推定, 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No.145-10 (2010)
- 4) 西山清: 最適フィルタリング, 培風館 (2010)

<著 者>



松浦 充保  
(まつうら みつやす)  
技術企画部  
車両周辺監視センサ及び  
それを使った認識アルゴ  
リズム開発に従事



高須賀 直一  
(たかすか なおひと)  
技術企画部  
レーザレーダの認識アルゴ  
リズム開発に従事



磯貝 俊樹  
(いそが い としき)  
技術企画部  
車両周辺監視センサ及び  
半導体センサの要素技術  
開発に従事



吉田 大輝  
(よしだ たいき)  
(株)日本自動車部品総合  
研究所  
車両周辺監視センサ関連の  
ソフトウェア開発に従事