

自動隊列走行のための環境認識技術*

Environment Recognition Technology for Trucks platooning

磯貝 俊樹
Toshiki ISOGAI

松浦 充保
Mitsuyasu MATSUURA

川合 健夫
Takeo KAWAI

To support automated driving, we applied a laser scanner that is normally used to detect obstacles to detecting lane markers. We developed a system that can reliably detect lane markers when driving in environments that normally make detecting lane markers very difficult due to extreme illumination changes or low illumination levels, such as encountered when passing shadows of structural objects near the road or in night driving. This method uses the principle that the reflection intensity from various kinds of objects after laser light is projected onto them varies according to the reflective property of each kind of object.

Key words :

Laser scanner, reflection, lane marker

1. まえがき

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。高い省エネルギー効果を得るには、走行時の空気抵抗をできる限り小さくする必要があり、複数の貨物車両が接近して、且つ、車線内の同位置を走行する隊列走行技術が重要となる。

2008 年から 2013 年までの 5 年間で実施した NEDO 自動運転／隊列走行プロジェクトは、実用化を意識した研究開発を実施しており、実用化に向けて重要となる安全性の確保（高度な機能安全の実現）と導入のしやすさ（インフラを含めた安価なシステムコストの実現）を基本構想として掲げて推進された。

特別な道路インフラを必要としない隊列走行の実現には、各貨物車両において、区画線内の自車位置を、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。隊列走行のプロジェクトでは、わが国において定常的に存在している既存の道路インフラとして、幹線道路および高速道路などの自動車専用道路において、一部交差点、合流地点を除くほぼ全区間で同時に敷設されるレーンマーカを取り上げ、自車位置検出の基準として採

用した。

レーンマーカ検出方法は、大きく 2 種類に分けられる。画像センサで撮影した画像の中から画像処理によりレーンマーカを検知するパッシブ方式と、今回紹介するレーザスキャナを用いたアクティブ方式である (Fig. 1)。



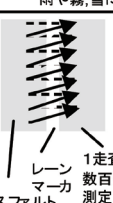
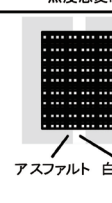
| 検知方式 | アクティブ方式 (レーザーダ) | パッシブ方式 (カメラ) |
|------|---|---|
| |  光を照射し、反射を検知 長所：暗所で作動可 照度変化に強い 短所：解像度が小さい 雨や霧、雪に弱い |  自然光からの反射検知 長所：解像度が大きい 短所：暗所作動不可 照度急変に弱い |
| 特徴 |  レーンマーカ アスファルト 1走査に数百個測定点 |  アスファルト 白線 |

Fig. 1 Comparison of Active and Passive Sensors

パッシブ方式は、レーンマーカを検出するための情報が多いため、例えば、曇天状態での幹線道路走行時など検出を阻害しないレベルの照度で安定している状態での検出結果について高い信頼性が期待できる一方で、道

* (社)映像情報メディア学会の了解を得て、「2014 年 映像情報メディア学会誌 10 月号」より一部加筆して転載

路周辺構造物の影や夜間といった周辺環境の照度変化や低照度環境下など、環境光の影響を受け易く、検知性能が低下する可能性がある。アクティブ方式のレーザスキャナを用いた方式では、対象物に向けてレーザ光を照射し、対象物表面からの反射光の受信強度の違いにより、対象物を識別する。この方式では自らレーザ光を対象物に照射するため、環境光の条件が厳しい場合においても安定した検出が期待できる。一方で、ビーム状のレーザ光を走査することでアスファルトとレーンマーカを識別する原理上、同じ範囲の検知領域の画像方式と比較して測定点が少なく、対象物と光源の間に雨滴や濃い霧などの遮蔽物がある場合に安定した検出ができなくなる可能性がある。隊列走行プロジェクトでは、このような原理的に相互補完の関係にある2方式を併用することで、高い信頼性の実現を狙っており、我々はアクティブ方式であるレーザスキャナを用いたレーンマーカ検出方式の開発を担当した。

レーンマーカの安定した検出を阻害する主な要因として、道路及び周辺構造物の影響と天候の影響が考えられる。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、反射データにはレーンマーカだけでなく、道路上のレーンマーカ以外の構造物や、路側の構造物からの反射も含まれる。構造物の反射特性によっては、レーンマーカと似通った特徴を示す場合が予想される。したがって、ロバストなレーンマーカ検知を実現するには、レーンマーカだけでなく、路面/路側物の反射状況を把握しておくことが重要となる。その他、一般的な天候条件である交通規制されない程度の雨天時でも作動可能であることが求められる。

そこで、各種路面状況においてレーンマーカのみを識別して検出するアルゴリズムと、雨滴の影響を抑制するアルゴリズムについて紹介する。

2. レーンマーカ検出方法

高速道路、幹線道路などで使用されるレーンマーカは、人の視覚により道路表面と識別されるように、JISK5665 (Table 1) で定められる規格に準拠したガラスビーズを含んだ白色、黄色等のペイントが使用されている。ガラスビーズに入射した光は、入射方向に反射する再帰性反

射と呼ばれる特性がある為、高強度の光が反射する。このため、隣り合ったアスファルトとレーンマーカ間で反射光の差を得ることが可能となる。多くの場合、幹線道路のレーンマーカには3種1号が採用されており、国内であればレーンマーカからの反射光には安定した強度が期待できる。

Table 1 JISK5665

| 種類 | 塗料の性状 及び 施工の条件 | |
|----|----------------|---|
| 1種 | A | 水を主な揮発成分とするビヒクルを用い、塗料中にガラスビーズを含まず、常温で施工する液状塗料。 |
| | B | 有機化合物を主な揮発成分とするビヒクルを用い、塗料中にガラスビーズを含まず、常温で施工する液状塗料。 |
| 2種 | A | 水を主な揮発成分とするビヒクルを用い、塗料中にガラスビーズを含まず、加熱して施工する液状塗料。 |
| | B | 有機化合物を主な揮発成分とするビヒクルを用い、塗料中にガラスビーズを含まず、加熱して施工する液状塗料。 |
| 3種 | 1号 | 塗料中にガラスビーズを15~18%(質量分率)含み、溶解して施工する粉体状塗料。 |
| | 2号 | 塗料中にガラスビーズを20~23%(質量分率)含み、溶解して施工する粉体状塗料。 |
| | 3号 | 塗料中にガラスビーズを25%以上(質量分率)含み、溶解して施工する粉体状塗料。 |

今回は自動車向けのレーザスキャナ (Fig. 2) を改造して使用した。Table 2 に使用を示す。レーンマーカ及びアスファルトに対してレーザ光を照射したとき、レーンマーカに当たるビーム径が小さいほど、レーンマーカとアスファルトとの境界を精度よく検知できる。レーンマーカに当たるビーム径を小さくするには、照射角度をレーンマーカに対し垂直に近づければよい。よって、レーザレーダを車両上部に且つ路面に対し下向きに搭載し、自車の車幅方向に水平に走査する。使用したレーザスキャナは、走査範囲を時分割して反射光を検出する方式のため、対象物までの距離が大きくなると分解能は低下し、走査範囲は拡大する。逆に、対象物までの距離が小さくなると分解能は向上し、走査範囲は小さくなる。以上の制約を考慮して、地上約3mの高さにレーザスキャナを設置した (Fig. 3)。

レーザスキャナから取り出した反射光の強度信号は、組込み用PCにて処理し、レーンマーカの位置と車両中心の差分を進行方向に対する垂直方向の偏差として算出した後、車両制御用エンジン制御装置に出力する。



Fig. 2 Laser Scanner

Table 2 Laser Scanner 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 |

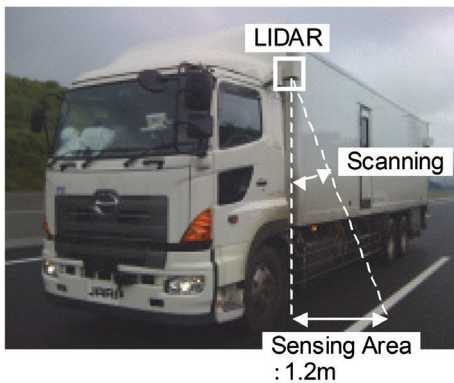


Fig. 3 Laser Scanner Mounted on the Test Vehicle

3. 様々な道路状況における反射データ

ここでは、様々な状況下でのアスファルトの違いや、アスファルト及びレーンマーカ以外の構造物と混在した状態での反射データを紹介する。

3.1 高速道路における反射

一般への利用開始前の高速道路における時速 80km 走行時におけるレーンマーカ及びアスファルトの反射強度データの一例を Fig. 4 に示す。横軸は車幅方向における車両中心からの距離を示している。Fig. 4 から、レーンマーカのみから高い反射強度が得られていることがわかる。アスファルトからの反射が得られていない要因とし

ては、高速道路では一般に排水性のよいアスファルトが用いられており、排水のため隙間が多く、隙間にレーザービームが入り込むためと考える。

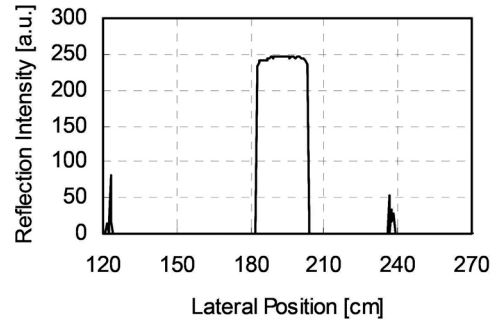


Fig. 4 Reflection from Asphalt and Lane Marker

高速道路上でレーンマーカの検出を阻害する構造物として、幹線道路橋梁区間の継目あげられる (Fig. 5)。継ぎ目は、アスファルトとの境界のコンクリート部、金属の櫛状の格子部、コンクリートと格子部のつなぎ目の表面を樹脂でコーティングした部分からなる。樹脂コーティングした部分は反射率が高く、レーンマーカとの反射強度差が小さくなり、検出信頼性が低下する可能性がある。格子部上のレーンマーカからは、構造物が無い部分からのような反射光は得られないため、レーンマーカからの反射光には、歯抜け状に反射強度が小さい落ち込み部分が現れる (Fig. 6, Fig. 7)。このような特徴に留意してレーンマーカ検出アルゴリズムを構築する必要がある。



Fig. 5 Bridge Seam

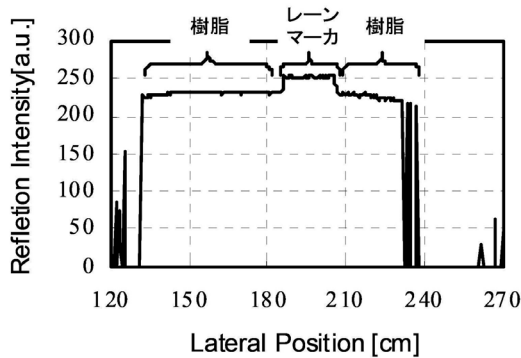


Fig. 6 Reflection from Bridge Seam Resin

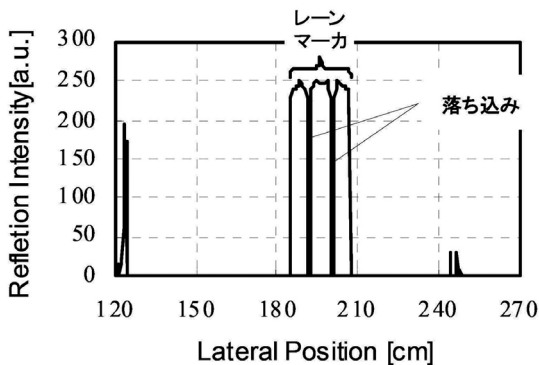


Fig. 7 Reflection from Bridge Seam Grating

3.2 非排水性道路での反射

高速道路では近年、排水性のアスファルトが用いられることが多いが、排水性でない区間も存在する。排水性でないアスファルトが使用されている、(独)産業技術総合研究所 (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology : AIST) が保有する高速周回路にて、時速 80km で走行した場合のレーンマーカ及びアスファルトの反射強度データを Fig. 8 に示す。排水性でないアスファルトは隙間がないため、レーザが吸収されることなく反射してきていることがわかる。

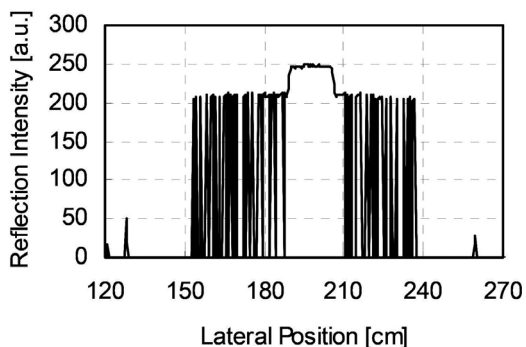


Fig. 8 Reflection from Undrained Pavement

3.3 道路表面に存在する雨水の影響

レーザスキャナを用いたレーンマーカ検出の懸念点として、レーンマーカ及びアスファルト上に溜まった雨による不要反射がある。未共用高速道路における、ワイパーで拭取れる程度の雨天時での反射強度データの一例を Fig. 9 に示す。レーンマーカからの反射上に更に高強度な部分が存在している。これはレーンマーカ上に溜まった雨からの正反射の影響と考えられる為、これへの対処をレーンマーカ検知アルゴリズムに反映する必要がある。

4. レーンマーカ検出アルゴリズム

前章までに述べたように、レーンマーカ以外の構造物からの反射が混在しているため、反射光の受信データからレーンマーカのみを抽出した上で、レーンマーカの位置を検出する必要がある。以下、レーンマーカ候補抽出、レーンマーカ判定のアルゴリズムについて述べる。

4.1 レーンマーカ候補抽出

レーンマーカの反射データは、以下の2点の特徴を持っている。

- ・アスファルトと比較して反射強度が高い。
- ・線幅は規定値である。

この特徴を利用して、レーザスキャナにより取得した反射データの中からレーンマーカ候補を抽出する。

アスファルトや継目、雨の反射の含まれたデータの中からレーンマーカのみを確実に捕捉するために、反射強度データに対し、レーンマーカ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-立ち下り区間の幅を算出する。そして、算出した幅が、道路構造令により規定された線幅即ち 15 又は 20cm 相当であるデータをレーンマーカ候補として抽出する。レーンマーカ以外からの反射光の強度等がレーンマーカの特徴に近い場合、レーンマーカ候補として抽出される可能性がある。そこで、レーンマーカが定期的な存在することを利用して、車線の曲率等の車線パラメータを算出することでレーンマーカ位置を予測する。予測値に基づき ROI (Region Of Interest) を設定し、ROI に存在するレーンマーカ候補をレーンマーカとして判別する。

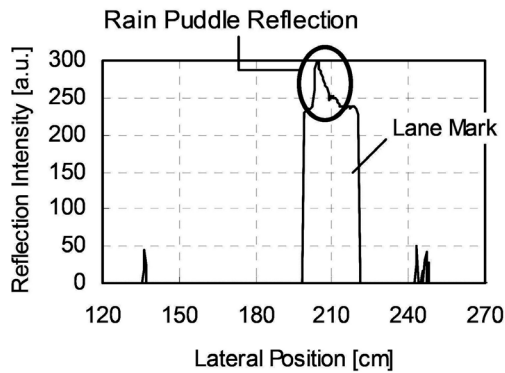


Fig. 9 Reflection from Road Surface Rainwater

4.2 レーンマーカ判定

反射データの強度、幅がレーンマーカに近い場合、上述のようにレーンマーカ候補として抽出される可能性がある。そこで、レーンマーカが連続的に敷設されていることを利用し、以下の手順で判定を行った。

- ① 車線曲率等のパラメータを逐次算出することでレーンマーカ位置を予測
- ② レーンマーカ位置の予測値に基づき ROI を設定
- ③ 複数候補が存在する場合には、ROI に存在する候補をレーンマーカとして判別

前章で述べた高速道路橋梁の継ぎ目格子部の場合、ROI の範囲内で前回検出時のレーンマーカ位置との連続性が維持されている場合に限り、レーンマーカとして認識させる処理を加えた。

次に、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、自車の運動を推定する。次に、過去数スキャン分のレーザスキャナの検知データを、推定した自車の運動から、現時刻におけるレーザスキャナ座標系に変換する。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²⁾。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、現時刻の位置を求める。

$$x = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 \quad (1)$$

a_0 : Lateral Position [m]

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

5. レーンマーカ検出結果

レーザスキャナの反射強度データ及び車線パラメータ算出に必要な車速／ヨーレートを PC により取得・記録するとともに、前述のレーンマーカ検出アルゴリズムを実行し、レーンマーカを検知し、その位置を算出する。併せて、参考値として画像センサによるレーンマーカ検知結果を取得する (Fig. 10)。

テストコースにて時速 80km で走行した場合のレーンマーカ検出結果 (Fig. 11) において、横軸は計測時間を、縦軸は自車の車両センターを基準としたレーンマーカ検出位置を示している。レーザスキャナにより検出したレーンマーカ位置 (実線) は画像センサによる参考値 (破線) とよく一致しており、誤検出や未検出なく検知できている。

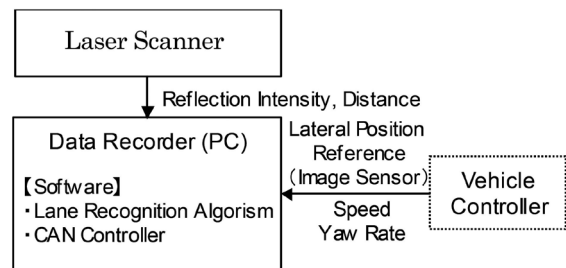


Fig. 10 Experimental System

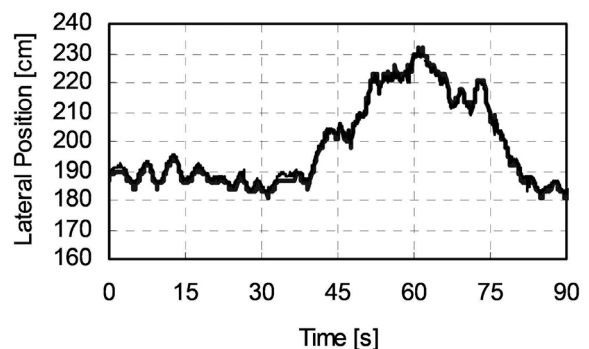


Fig. 11 Lane Marker Detection Result

6. まとめ

高速道路の橋梁継目などのレーンマーカ以外の構造物からの反射信号を、レーンマーカの特徴量を活用した候補抽出と、車線パラメータ推定に基づくレーンマーカ判定により、レーンマーカのみを抽出し、画像センサと同等の高精度なレーンマーカ検知が可能となる手法を紹介

した。今回の自動運転／隊列走行プロジェクトで提案した高い環境性や、より一層の安心・安全を実現するためには、各機能が少なくとも現在人が運行可能な走行環境の範囲内での常時作動が必須となる。レーザスキャナによるレーンマーカ検知については、検知結果の信頼性低下要因となる降雨や霧など物理的障害が発生する天候における安定した検知の実現に取り組む必要がある。

参考文献

- 1) 日本自動車研究所他：NEDO エネルギー ITS 平成 21 年度版 事業中間年報
- 2) 松浦充保，磯貝俊樹，川合健夫：“レーザレーダを用いた白線検知技術の開発”，自動車研究 10 月号 (2010)

著者



磯貝 俊樹

いそが い としき

DP-Mobility IoT 事業企画課
車両周辺監視センサ及び半導体センサの要素技術開発，ロボット関連要素開発に従事



松浦 充保

まつうら みつやす

日本自動車部品総合研究所 研究 2 部
21 研究室
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



川合 健夫

かわい たけお

研究開発 1 部 企画課
車載アンテナ，携帯電話，車載通信機器の研究開発、技術渉外業務等を経験、現在はインフラ協調システム等の研究開発に従事