

特集 レーザレーダによる走行環境認識技術*

Road Environment Recognition Using On-vehicle LIDAR

高木 聖和
Kiyokazu TAKAGI

森川 勝博
Katsuhiko MORIKAWA

小川 高志
Takashi OGAWA

佐分利 誠
Makoto SABURI

In this paper, we demonstrate a road environment recognition algorithm using on-vehicle LIDAR. Although our 2-dimensional scanning LIDAR can detect forward vehicles and lane markers at the same time with high resolution, so far we have only applied the LIDAR to the ACC system. In order to pursue the potential of LIDAR, DENSO has developed a road environment recognition algorithm using LIDAR only as a forward object detection sensor with compensation for ego-vehicle motion. Moreover, we demonstrate the possibility of coordination with maps or GPS for highly accurate navigation.

Key words: Sensor, Radar, Laser radar, LIDAR, Road environment recognition

1. はじめに

昨今、交通安全意識の高まりから、安全運転支援システムが多くの車両に搭載されている。特に、ACC (Adaptive Cruise Control)、PCS (Pre-Crash Safety) を始めとした前方監視システムの搭載が進んでいる。

これらのシステムにおける認識技術は、ACC用では先行車、LKA (Lane Keeping Assist)用ではレーンマーク、PCS用では前方物体というように対象が異なるため、レーザレーダ、画像センサ、ミリ波センサと異なるセンサを使用して個別のシステムに適用しているのが実情である。

デンソーは1997年以来、ACC用途としてレーザレーダを開発し、自動車メーカーへ提供してきた。デンソーのレーザレーダはレーザ光の2次元走査、高分解能が特徴であり、前方物体から路面上のレーンマークまで同時に検出できる。そこでこの特徴を利用して前方空間を統一的に走行環境として認識することを試みた。ここでの走行環境認識とは、自車が走行可能な空間を認識する技術であり、先行車、路側線、走行区分、車線数などを検出し、自車と他車の位置関係を道路空間上で認識する技術である。

今回は、高速道路上での走行環境認識として、レーザレーダの検出結果とエゴモーションを組み合わせることで、車線変更を含んだ自車及び前方車両の動き、自車位置、車線数などが絶対座標上で精度よく認識できることを示す。さらに、自車位置を絶対座標上で正確に判断できることを利用し、レーザレーダとナビゲーションとの連携による高精度な位置情報提供の可能性についても言及する。

2. センサ概要

デンソー製レーザレーダをFig. 1に示す。¹⁾

このレーザレーダは、出射レーザ光を回転する6面ポリゴンミラーで走査し、レーザ光の2次元走査を実現している。量産タイプのレーザレーダは6面のうち3面を使用して必要な上下検知角を実現しているが、今回はレーンマーク、前方物体という自車前方のすべての対象を検出するため、6面すべての面を使用した。これによって上下の検知角が量産比のほぼ倍となり、Fig. 2に示すような検知範囲を実現した。



Fig. 1 DENSO's LIDAR

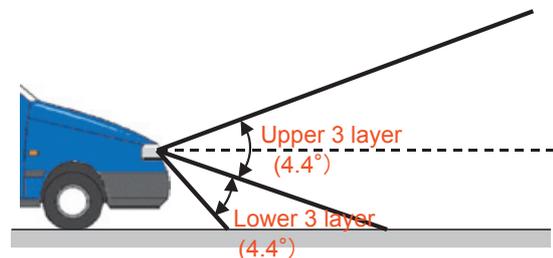


Fig. 2 Detection angle (elevation)

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2006年春季大会学術講演会前刷集」No.42-06, 199より転載

なお、Table 1に示すように、左右の検知角は±18°、分解能は0.08°、検出周期は100msと量産品相当を実現しており、左右方向は画像センサ並みの解像度を有している。

このレーザレーダを使用して、車両前方の物体を検出した状況をFig. 3に示す。画像センサ並みの高分解能という特徴を生かし、前方車両、看板、デリニエータ、レーンマークを同時に検出していることが分かる。

3. アルゴリズム概要

レーザレーダによる走行環境認識技術は大きく三つの部分に分けることができる。(1)前方物体を認識する部分、(2)レーンマークを認識する部分、(3)これらを統合して道路環境を認識する部分である。それぞれについて次に説明する。

3.1 前方物体の認識

レーザレーダの前方に存在する物体を認識する面として上側1~3面を使用する。これは、従来のレーザレーダの検知性能を維持しつつ性能向上を図るためである。

前方物体を認識する方法は、レーザレーダで検出したデータをクラスタリングし、カルマンフィルタを使ってトラッキングする。クラスタリングでは観測データをモデルに基づくグルーピングでその特徴を保持する。前方物体を識別するモデルを Table 2に示す。こ

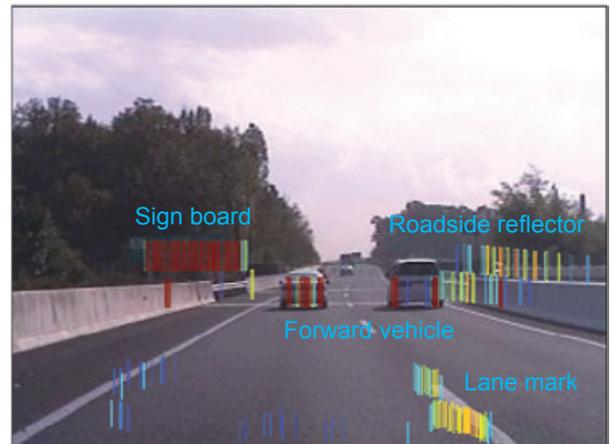


Fig. 3 Situation of object detection

の特徴に基づき、車両、デリニエータといった対象の属性を判断し、遮蔽等によるデータ欠測時に適切にその状態を保持できるようにするとともに、前方物体を識別している。

カルマンフィルタは、車両の加速度運動及び安定性を考慮して、2ステージカルマンフィルタを採用した。²⁾

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}_{k|k} &= \mathbf{x}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{cv}(\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_{cv}\mathbf{x}_{k|k-1}) \\
 \mathbf{x}_{k+1|k} &= \mathbf{A}_{cv}\mathbf{x}_{k|k} \\
 \mathbf{d}_{k|k} &= \mathbf{d}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{ca}(\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_{cv}\mathbf{x}_{k|k-1} - \mathbf{H}_{cv}\mathbf{U}\mathbf{d}_{k|k-1}) \\
 \mathbf{d}_{k+1|k} &= \mathbf{d}_{k|k} \\
 \mathbf{z}_{k|k} &= \mathbf{x}_{k|k} + \mathbf{V}\mathbf{d}_{k|k} \\
 \mathbf{z}_{k+1|k} &= \mathbf{x}_{k+1|k} + \mathbf{U}\mathbf{d}_{k+1|k}
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $\mathbf{x}=(x, \dot{x}, y, \dot{y})^T$ は等速度フィルタ出力、 $\mathbf{d}=(d_x, d_y)^T$ は誤差の等加速度フィルタ出力、 $\mathbf{y}=(D_x, D_y)^T$ は距離測定値である。2ステージカルマンフィルタの出力は、 $\mathbf{z}=(z_x, \dot{z}_x, z_y, \dot{z}_y)^T$ である。 \mathbf{A}_{cv} は等速度フィルタの状態遷移行列、 \mathbf{H}_{cv} は観測行列であり、 \mathbf{K}_{cv} 、 \mathbf{K}_{ca} 、 \mathbf{V} 、 \mathbf{U} はカルマンフィルタ定数である。

Table 1 LIDAR Specification

Term	Specification
Detectable range	120m
Field of view (azimuth)	±18°
Field of view (elevation)	±4°
Sampling time	100ms
Angle resolution (azimuth)	0.08°
Size	W100×H60×D80

Table 2 Examples of object model

	Size/Shape	Reflectivity	Position	Movement	Others
Vehicle	Rectangle Car: 1.7m Truck: 2.5m	Reflector: High Body: Low	On the lane	Longitudinal: Large Lateral: Small	Reflector pair Large reflector board
Sign board	Rectangle, Circle Size: Large	High	Roadside Overhead	Stationary	-
Roadside reflector	Circle Size: Small	High	Roadside	Stationary	Road border

3.2 レーンマークの認識³⁾

レーンマーク認識には下側1~3面を使用した。前方物体との識別を容易にするため、レーンマーク検出用として路面上を走査するように設定している。

レーンマークを認識する方法は、レーンマークからの反射信号をハフ変換し、曲率と自車の横位置を算出している。また、車線幅は自己相関による両側レーンマークとヨー角のピーク位置から算出する。これらの結果を使い、レーンマークを抽出する領域を規定してレーンマークのトラッキング精度を向上させている。

3.3 走行環境の認識

次に、前方物体検出とレーンマーク検出の結果を組み合わせ、走行環境を認識する方法について説明する。

3.3.1 座標系の変換

レーザレーダで検出したオブジェクトは、エゴモーションを使用してセンサ座標系から絶対座標系の点に座標変換され、絶対空間上での位置関係を算定する。エゴモーションは、自車両のヨーレート、車速を積分することにより、絶対座標上でのヨー角、横位置、縦位置として算出する。サンプリング毎のヨー角は次式で求められる。

$$\omega T = vT / r \quad (2)$$

ここで、 r はカーブの推定半径である。計測開始からの全ヨー角は次式で求められる。

$$\theta = nT \sum_{n=1}^K \omega_n \quad (3)$$

ここで、 ω_n はサンプリング回数 n 番目のヨーレートである。

検出したオブジェクトは自車両のヨー角と位置によって、絶対座標上にプロットする。

3.3.2 道路境界の認識

次に、道路境界を設定する。多くの道路境界は、ガードレールおよび路側デリニエータ列によって規定される。特に、高速道路ではデリニエータ列によって規定されている。そのデリニエータ列を抽出し、その並びを数式化することで、道路境界を算出する。高速道路における道路環境をFig. 4に示す。デリニエータは静止物体なので、絶対座標系では同一点に固定されて存在する。自車両に近い距離にあるこれらの点を結ぶ線分を最小2乗法によって求め、道路境界を算出する。

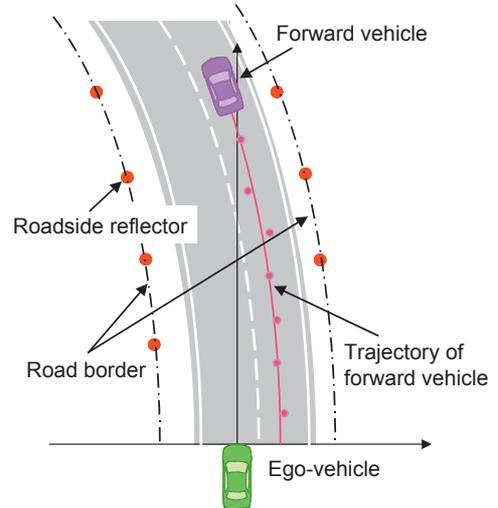


Fig. 4 The road figure of the highway

左右のデリニエータ列は、ヨーレート、操舵角の値から算出したカーブの推定半径とレーンマーク認識の結果から求めた推定半径を用いて、自車位置に対して左右にデリニエータを分離する。先行車が存在している時は、先行車の軌跡によっても左右に分離できる。高速道路では、ヨーレートによってカーブ半径が精度良く算出できるため、主にヨーレートを使用している。レーンマーク認識した結果は、自車が車線変更した際に補正項として使用する。

3.3.3 車線の認識

車線数は、デリニエータ、前方車両の位置、レーンマーク認識による車線幅から算出できる。まずレーンマーク検出の結果から得られた車線幅と自車位置から、道路境界間での自車が走行している車線を特定する。絶対座標上に自車位置と自車が走行している車線をプロットし、残りの空間に対して、車線幅がとれる空間があればそこに別の車線が存在することが分かる。これを繰り返すことで車線数を判定できる。その結果から、自車がどの車線を走行しているか判断することが可能になる。

レーンマークが見えにくくなり認識性能が低下した場合でも車線数の認識を可能にするため、前方を走行する車両の軌跡を絶対座標上にプロットすることで、より正確に車線数を判断できる。前方車両の軌跡はFig. 4に示すようにプロットされるので、レーザレーダが複数の前方車両をトラッキングしている場合、重なっていない軌跡の本数を数えることで車線数が推定できる。

また、高速道路では車線幅は固定値なので、道路境界が検出できれば車線数はほぼ推定可能である。

3.3.4 走行環境の認識

道路境界や車線の認識の結果、自車両の道路空間内の動きを正確に把握できれば走行環境が認識できることになる。それはつまり、自車両の車線変更を認識することである。単純なエゴモーションの追跡では、道路形状の変化と車線変更の差を認識できない。したがって、車線変更の認識が走行環境認識の重要な鍵になる。Fig. 5にその手順を示す。

レーンマーク位置と自車両位置の関係から車線変更を認識する。通常、Fig. 5(a)に示すように、自車両は車線中心付近を走行している。Fig. 5(b)に車線変更を開始した状況を示す。車線変更が進むにつれ、自車両は車線中心から離れていく。車線中心と自車両の中心の距離がスレッシュホールドを超えた場合、車線変更判定が成され、Fig. 5(c)に示すように、隣接車線のレーンマーク探索を開始する。自車両がレーンマークを横切った場合、車線変更が完了したと判断し、Fig. 5(d)に示すように、新しい車線中心が求められ、そこからの自車両位置を算出する。Fig. 5(e)に示すように、自車両が車線変更せずに元の車線に戻った場合、元の車線中心がそのまま使われる。

以上の結果から、自車両の車線変更が判断でき、道路空間上での自車両の動きを正確に判断できることになる。その結果、自車の前方に広がる道路環境を認識することが可能となる。

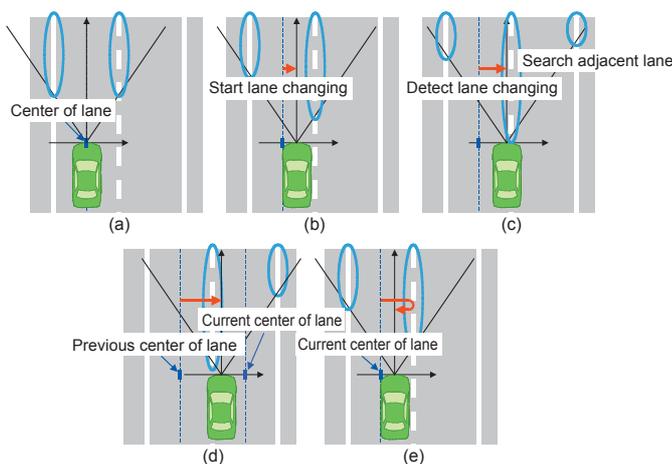


Fig. 5 Recognition of lane changing

4. 評価結果と考察

評価結果をFigs. 6-7に示す。

左図はレーザレーダで認識した道路環境を表す。右上図は認識結果をインポーズした前方風景の映像である。右下図は2秒前の自車位置から見た現在の走行環境である。Fig. 6では高速道路上を走行する状況で、自車の車線変更、走行車線位置、全車線数等を正しく認識していることが分かる。Fig. 7に示すように、画像センサでは明暗差が大きすぎ前方物体が検知できないような状況であっても、アクティブセンサであるレーザレーダでは問題なく先行車および路側の看板を検出できている。

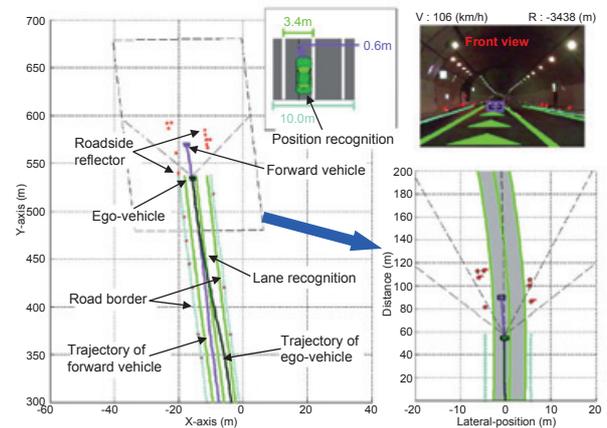


Fig. 6 Result of recognition (1)

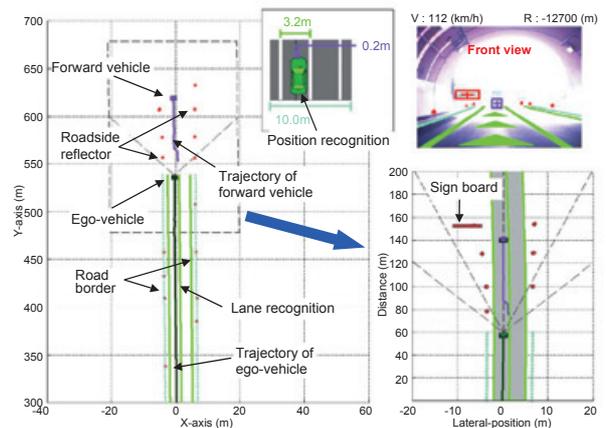


Fig. 7 Result of recognition (2)

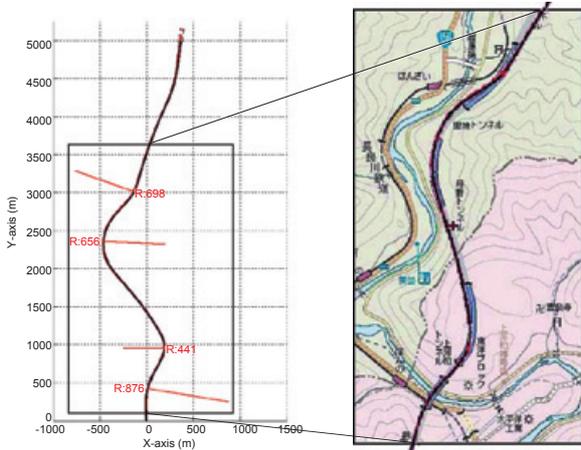


Fig. 8 The road figure comparison between recognition result and map

また、絶対座標上で求めた道路形状と実際の地図とを比較した結果をFig. 8に示す。左図は走行環境を認識した結果から求めた道路形状であり、右図は認識結果の道路形状を地図上に重ね合わせた結果である。その結果は、認識結果がほぼ地図と重なるので、運転支援システムのみならず、ナビゲーションとの連携の可能性を示している。道路線形に沿った自車の動きだけでなく、車線変更などを含めた動きを積算して求めた道路形状が地図とほぼ重なることから、走行環境認識が高精度で実現できており、その結果をナビゲーションに使用し位置精度を高めることが可能であると考えられる。

5. おわりに

今回は、高速道路上という比較的良好な環境下での道路環境認識であったので、今後はバイパス道路、幹線道路、市街地道路などへの適用を検討していく。そのためには、エゴモーションの算出が極めて重要であり、車両モデルを低速時のモデル誤差を考慮した形に変更する必要がある。ナビゲーションとの連携を考慮すると、GPSによる補正も考えられる。

また、市街地道路のように規則正しいデリニエータ列が存在しない道路における境界線の認識に対して、画像処理的な処理を使い、デリニエータ列だけでなく、縁石、ガードレール等から判断できるようにすることも必要である。

さらに、レーザレーダにとってより重要なことは、耐環境性能の向上である。高分解能を維持した耐環境性能が高いレーザレーダの開発を進め、悪環境下での認識性能評価も進めていく。

<参考文献>

- 1) Y. Teguri: Laser Sensor for Low-Speed Cruise Control, Proc. of SAE Convergence 2004, CD-ROM (2004).
- 2) K.Zhou et. al: A New Maneuvering Target Tracking Algorithm with Input Estimation, Proc. of 2002 American Control Conference/ACC02-ASME1080 (2002).
- 3) 小川高志 他: レーザレーダによる車線認識技術 2006年自動車技術会 春季学術講演会前刷集 (2006).
- 4) S. Blackman, R. Popoli: Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Boston, Artech House (1999), p. 1230.



<著者>



高木 聖和
(たかぎ きよかず)
システム開発部
レーザーダを使用した車両周辺
認識アルゴリズム開発に従事



森川 勝博
(もりかわ かつひろ)
システム開発部
車載用周辺監視センサの開発に
従事



小川 高志
(おがわ たかし)
システム開発部
レーザーダの認識アルゴリズム
開発に従事



佐分利 誠
(さぶり まこと)
デンソーテクノ(株) 電子1部
レーザーダの信号処理プログラムの
開発に従事