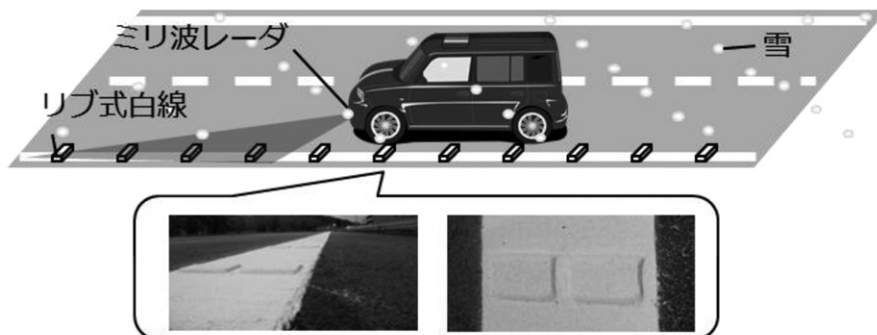


ミリ波レーダによるリブ式白線検知

Raised Profile Line Marking Detection by MMW Radar System

石 本 幸 太 郎 Kotaro ISHIMOTO
長 谷 川 渉 Wataru HASEGAWA
杉 山 裕 一 Yuichi SUGIYAMA
中 村 英 夫 Hideo NAKAMURA
後 呂 孝 亮 Kosuke USHIRO
岸 田 正 幸 Masayuki KISHIDA



要 旨

近年、車の自動運転のための技術開発が進んでおり、渋滞緩和や交通事故の減少が期待されている。自動運転では車両に搭載したセンサを用いて自車の走行位置を推定しているが、雪・雨・霧等の悪天候時ではカメラ等の光学系の車載センサの性能は劣化し、自車位置を推定することができず、自動運転機能を継続することが困難となる。自動運転機能を継続できない場合にはドライバーに運転権限を委譲するか、安全な場所へ退避する必要があるが、それぞれの機能を実行するためにはある程度の時間が必要となる。そのため、自然環境に対するロバスト性が求められる。

そこで我々は環境ロバスト性の高いミリ波レーダと凹凸のあるリブ式白線を用いて自己位置推定をする手法を提案する。実験結果から、ミリ波レーダを用いてリブ式白線上の凸部分を検知することが可能であった。さらにミリ波レーダであれば積雪時の減衰も少なく、雪の降り始め数cmまではリブ式白線を検知することが可能であることが明らかとなった。そのため、本技術を自然環境にロバストな自動運転技術の開発に活用することで、交通事故のないクルマ社会の実現に寄与できると考えられる。

Abstract

With recent development of vehicle autonomous driving technology, traffic congestion and accidents are expected to be reduced. A location of a travelling host vehicle is estimated in an autonomous driving mode, using vehicle-mounted sensors. However, the performance of the optical sensors, such as a camera, is decreased in snow, rain, fog and other bad weather conditions. If the location of the host vehicle cannot be estimated, it is difficult to keep travelling in an autonomous driving mode. In such a case, control of the vehicle has to be given to the driver, or the vehicle needs to evacuate to a safe place. It takes some time to execute those functions. Thus, a system needs to be robust to the natural environment.

Therefore, we propose a method that uses a millimeter-wave radar system robust to the natural environment and raised profile line markings to estimate the location of the host vehicle. We found that the millimeter-wave radar could detect convex portions on the raised profile line markings, from test results. Moreover, the test demonstrated that attenuation of the radar system was not large even in the case of snow on roads, and that the system could detect the raised profile line markings up to some centimeters of snow on roads from beginning of snow. Thus, we believe that we can contribute to realization of the automobile society having no accidents, employing this technology to the development of the autonomous driving technology robust to the natural environment.

1

はじめに

近年、自動運転技術が発展しており、自動運転では外界センシング情報やGPS情報を用いて自車位置を推定している。現在外界センシングでは、車載カメラやLiDAR(Light Detection And Ranging)を用いて路上の白線を検知して自車位置を推定するシステムが検討されており^{1) 2)}、車線維持制御に利用されている³⁾。しかし、車載カメラやLiDARでは降雨や積雪時に白線上に存在する水や雪で信号が反射し、白線の検知性能が低下してしまう。特に、図1に示すように積雪時には白線が雪に覆われるため、車載カメラやLiDARでは白線検知が困難となる。積雪により自動運転システムが維持できない場合には安全な場所へ自動退避するか、ドライバに運転権限を委譲する必要があるが、安全な運転権限の委譲を行うためには5～10秒程度必要となる⁴⁾。そのため、雪の降り始めでも自動運転を継続可能である必要があり、自然環境に対するロバスト性が求められる。

表1に代表的な車載センサの比較表⁵⁾を示す。表1より、ミリ波レーダは車載カメラやLiDARに比べると霧、降雨、雪による減衰が小さく、自然環境にロバストなセンサである。つまり、ミリ波レーダを用いることで積雪を透過して白線を検知可能となる。しかし、一般的な白線には凹凸がないため、図2(a)のようにミリ波レーダの信号が後方散乱してしまい、レーダに信号が返らないため白線を検知することができない。

一方、図3に示すように、日本の一部の高速道路や幹線道路にはリブ式白線と呼ばれる凹凸を有した白線が存在する。リブ式白線は白線上に等間隔でリブと呼ばれる凸部が敷設されており、降雨時にリブが水没しないため、降雨時の視認性が確保される。リブ式白線であれば凹凸が存在するため、図2(b)のようにミリ波レーダから放射された信号が反射し、白線を検知することが可能であると考えられる。

そこで本稿では、ミリ波レーダを用いてリブ式白線の検知性能を評価し、ミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の実現性を検証する。また、積雪状態における

リブ式白線検知の性能を評価し、悪天候下におけるリブ式白線検知の実現性を検証することで、悪天候下における自動運転制御の継続可否を明らかにする。

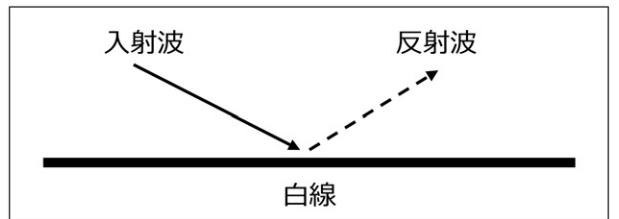
表1 代表的な車載センサの比較

センサ	波長	霧/雨/雪に対するロバスト性	方位分解能	距離分解能
車載カメラ	短い	×	○	△
LiDAR	短い	△	○	○
ミリ波レーダ	長い	○	△	○

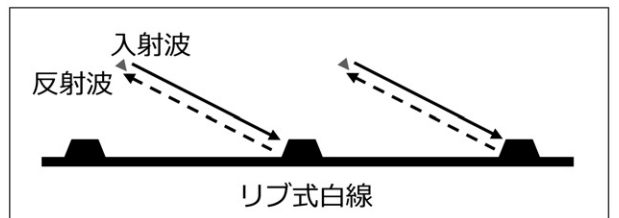


(a) 積雪がない場合 (b) 積雪がある場合

図1 積雪がある場合とない場合の白線検知状況



(a) 一般的な白線(平面)の信号反射



(b) リブ式白線の信号反射

図2 各白線の信号反射

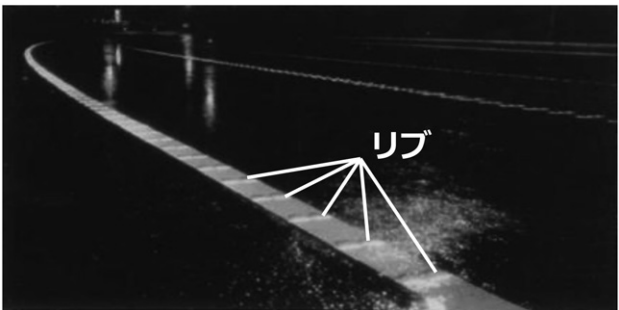


図3 リブ式白線

2 リブ式白線の反射性能評価

2.1 Single Ribの反射特性評価

本項では、リブ式白線上のリブのように微小な物標からミリ波レーダの信号が反射するかを評価する。本評価ではリブ式白線上の凸部分を模擬した奥行き20mm、幅200mm、高さ10mmの評価用のリブ（以下 Single Rib）を用い、アスファルト上に配置して反射特性を評価した。

2.1.1 Single Ribの反射特性評価の評価方法

Single Ribの反射特性評価における実験環境図を図4に示す。図4に示すように、等間隔に並べたリブに対して信号を送信し、リブの反射強度を評価した。そして、リブの反射強度を測定するため、リブが存在する場合とリブが存在しない場合の反射強度を測定し、リブの反射強度とアスファルトの表面からの反射（以下 路面クラッタ）の強度を測定した。また、実験では3m先のリブへ向けて信号を照射した。これは図5に示すように車線幅が3.5m、車幅が1.6mの環境において、車両が車線内に存在する時にリブへの入射角度が0°～40°となる距離である。

実験条件として、300mm間隔に設置されたそれぞれのリブの反射を検出するために、基本周波数は79GHz、帯域幅は2GHzとした。また、リブによる反射の利得を向上させるため、積分処理を実施した。ここで積分処理とは、時系列的に複数回取得したデータを平均化する処理である。本実験では、積分処理を行わない場合と、取得した10回分のデータを平均化した場合の結果について評価を実施した。

また、実験ではコーナーリフレクタの反射とリブの反射を比較することでリブのRCS (Radar Cross-Section: レーダ反射断面積) を算出した。ここでRCSとは単位面積あたりの反射強度を表し、値が高いほど信号を反射させる能力が高いことを表す。

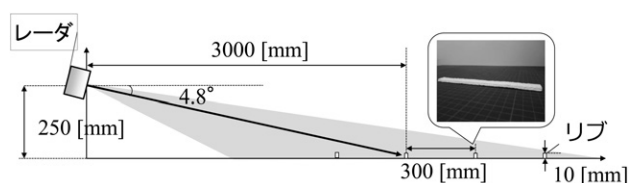


図4 Single Ribの反射特性評価の実験環境

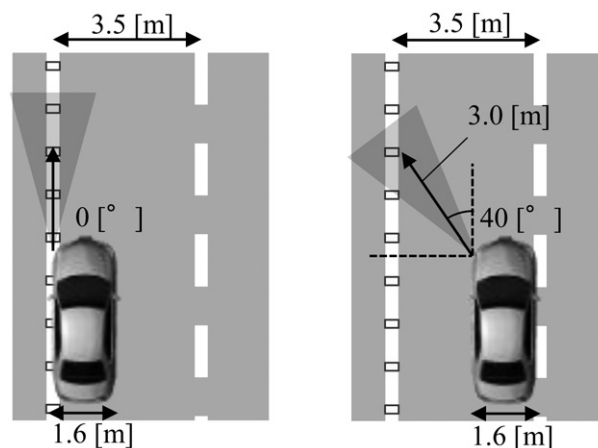


図5 リブ式白線検知のユースケース

2.1.2 Single Ribの反射特性評価結果

Single Ribの反射特性評価結果を図6に示す。ここで図6(a)は積分処理を行わない場合のリブと路面クラッタの反射強度を表す。また、図の横軸はレーダからの距離を表し、縦軸はリブの反射と路面クラッタの利得差を相対的に比較するために路面クラッタの最大値を0dBとした場合の反射強度を表す。

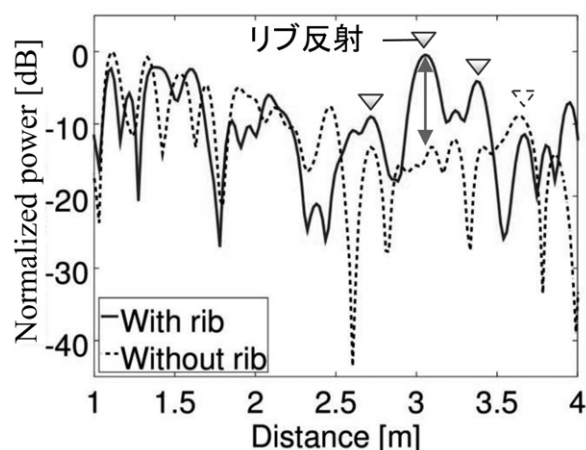
図6(a)より、距離3.0mに存在するリブと路面クラッタとの反射強度の差分が約15dBとなり、ミリ波レーダを用いて高さ10mmの凸部を検知可能であることが確認できる。ただし、ミリ波レーダの信号を直接向けたリブではリブの反射強度が高いが、その他のリブの反射強度と路面クラッタの反射強度の差は約4dB、約11dB、約-2dBとなり、安定的にリブを検知することができなかった。

一方、図6(b)に積分処理を行った場合のリブと路面クラッタの反射強度を表す。ここで、図の縦軸は積分処理を行わなかった場合の路面クラッタの最大値を0dBとした場合の反射強度を表す。図6(b)より、積分処理を用いることで各リブと路面クラッタとの反射強度の差分が平均約8dB向上していることが確認できた。そのため、利得を向上させる処理を用いるこ

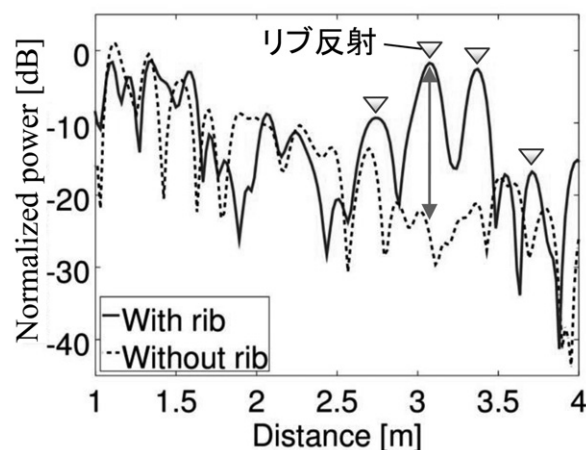
とで、安定的にリブ式白線を検知可能であることが明らかとなった。

また、コーナーリフレクタの反射とSingle Ribの反射を比較することでSingle RibのRCSを算出したところ、-15dBsmとなり、反射率は低いが確実に信号が返ってきていることが明らかとなった。

本評価により、ミリ波レーダを用いてアスファルト上に存在する微小な凸部を検知することが可能であり、リブ式白線を検知可能であることが確認できた。



(a) 積分処理を行わなかった場合の反射強度



(b) 積分処理を行った場合の反射強度

図6 リブと路面クラッタの反射強度

2.2 Twin Ribの反射特性評価

本項では、現在日本の一部の高速道路や幹線道路において採用実績のあるリブ式白線を対象に評価を実施する。評価に用いたリブ式白線を図7に示す。評価に用いたリブ式白線は奥行き50mm、幅80mm、高さ6mmのリブが2個並んでいる。本稿では、このよ

うに二つの凸から成るリブを「Twin Rib」と呼ぶ。本項ではこのTwin Ribを有するリブ式白線の反射特性を評価し、一般的に敷設されているリブ式白線の検知可否を検証する。

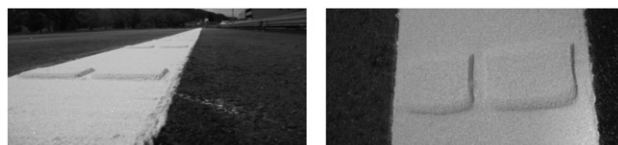


図7 リブ式白線(Twin Rib)

2.2.1 Twin Ribの反射特性評価の評価方法

図8にTwin Ribを有するリブ式白線の反射特性評価における実験環境図を示す。図8に示すように、実験ではリブ式白線の周りを0~180°の範囲で5°ずつ移動させ、レーダから3.0m先に存在するリブの反射強度を測定した。

実験条件は前項と同様に中心周波数は79GHz、帯域幅は2GHzを用いた。実験では、コーナーリフレクタの反射とリブの反射を比較することでリブのRCSを算出した。

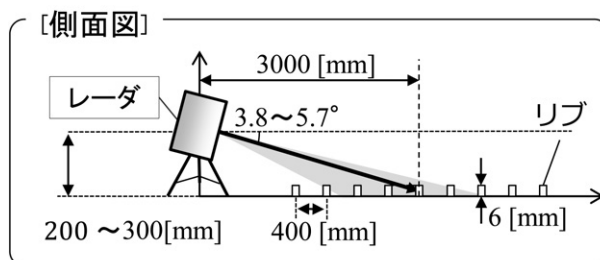
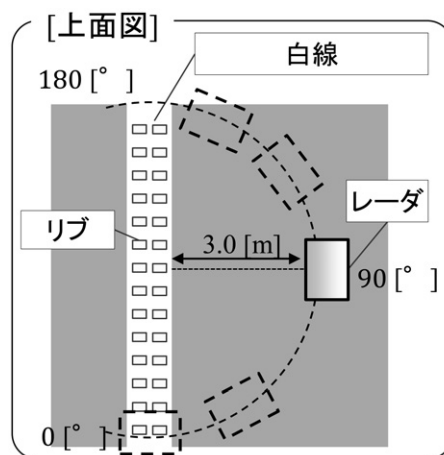


図8 Twin Ribの反射特性評価に関する実験環境

2.2.2 Twin Ribの反射特性評価結果

図9にTwin Ribを有するリブ式白線の反射特性を示す。図9の横軸は角度、縦軸はRCSを示す。また、図中の実線はレーダの高さが200mmのときのTwin RibのRCS、破線はレーダの高さが250mmのときのTwin RibのRCS、一点鎖線はレーダの高さが300mmのときのTwin RibのRCSを表す。

図9より、0°におけるTwin RibのRCSは約-20dBsm程度となり、Twin Ribの反射を検知可能であることが明らかとなった。

また、Twin Ribにおける0～40°のRCSは50～130°のRCSに比べて値が高い事が分かる。これはTwin Ribの奥行きが50mmであり、角度が変化した場合でも照射面積が急激に低下しないため、角度が変化した場合にも反射が返ったためと考えられる。Twin Ribに比べて奥行きが短いSingle Ribの検出範囲は0～5°程度であるため、Twin RibではSingle Ribに比べてRCSは低い、広範囲に渡って信号を反射させることができると考えられる。

本評価では、Twin Ribを有するリブ式白線の反射特性を評価し、一般的に敷設されているリブ式白線の反射を検知可能であることを明らかにした。

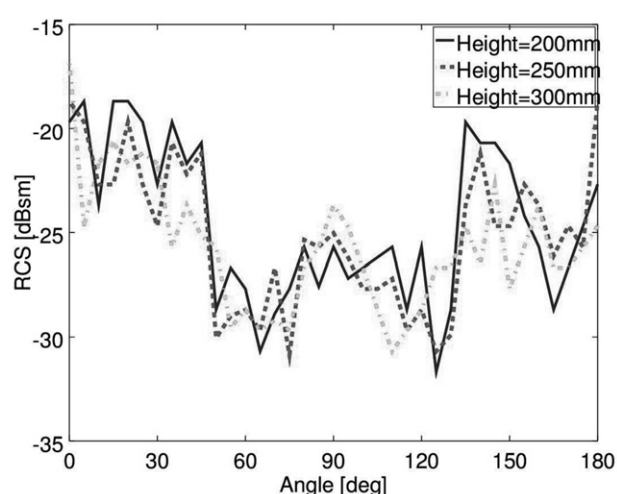


図9 リブ式白線 (Twin Rib) のRCSパターン

3 ミリ波レーダにおける積雪減衰量の評価

本章では、悪天候時を想定し、リブ式白線に雪が積もった場合を考える。そして、積雪量を変化させた場合のリブの反射強度を取得し、ミリ波レーダにおける積雪減衰量を明らかにする。ただし、前章で明らかにした通りリブのRCSは高くないため、積雪による減衰により反射信号を測定できない恐れがある。そのため、評価用として反射率の高い金属製のリブを用いて積雪減衰量を測定する。

3.1 ミリ波レーダの積雪減衰量評価の実験条件

図10に実環境における積雪減衰量評価の実験環境図を示す。図10に示すようにレーダの高さを500mmに設定した。これは測定可能な積雪量の上限を拡げるために、前章の実験条件と比較してレーダの高さを高くしている。また、俯角を9.6°とし、3000mm先の金属リブに向けて信号を照射した。また、使用した評価用の金属リブの写真を図11に示す。使用した金属リブの大きさは奥行き20mm、幅200mm、高さ6mmである。

実験条件は前章と同様に中心周波数は79GHz、帯域幅は2GHzとした。実験では、金属リブ上の積雪量を0～10 cmで変化させて評価を行った。使用した雪の密度は0.08 g/cm³であり、人工的に雪を降りかけて積雪量を変化させた。

また、減衰量の比較として、各積雪量におけるミリ波帯の減衰量を数値計算^{6) 7)}した。

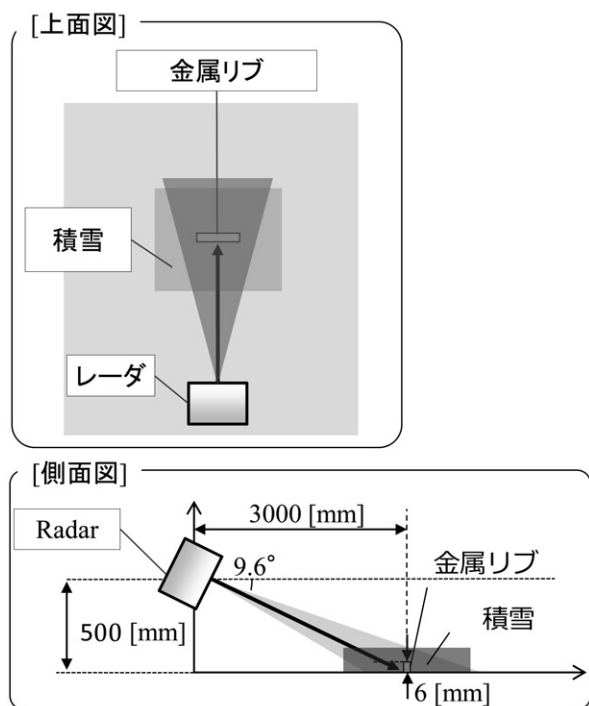


図10 積雪減衰量評価の実験環境



図11 金属リブ

3.2 ミリ波レーダの積雪減衰量評価の実験結果

図12にミリ波レーダの積雪減衰量評価の結果を示す。ここで、図12の実線は実環境における評価結果を表し、破線は雪の密度毎のシミュレーション結果を表す。また、図12の横軸は積雪量、縦軸は減衰量を表す。

図12の評価結果より、積雪量が増加するにつれて減衰量が減少していることが分かる。ただし、実環境における評価結果はシミュレーションの結果とは異なり、線形減少とならなかった。これは、金属リブ上に人工的に積雪させた際、雪が固まり積雪の密度が不均一に分布したためと考えられる。そのため、積雪

3cmまでは雪の密度が 0.76g/cm^3 程度となり、積雪3～10cmでは雪の密度が 0.08g/cm^3 程度となったと考えられる。

湿度等にも影響するが、一般的に新雪の表層の雪の密度は 0.10g/cm^3 程度である。そのため、雪の降り始めの数cmの積雪であれば、ミリ波帯の電波の減衰は小さく、悪天候時にもリブ式白線検知が可能であると考えられる。

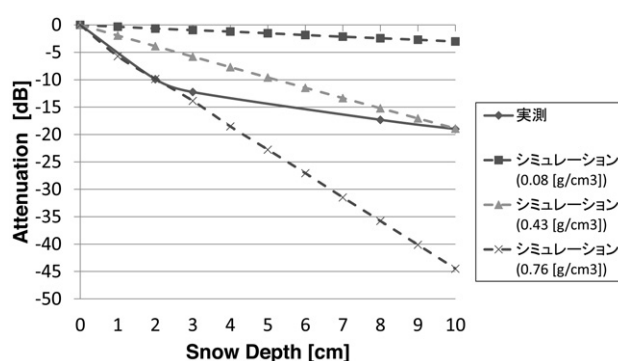


図12 積雪減衰量評価の実測結果とシミュレーション結果

4 積雪時のリブ式白線検知の性能検証

本章では、実環境における積雪時のリブ式白線の反射強度と積雪減衰量を明らかにするため、積雪状態におけるリブ式白線の反射強度を評価する。

4.1 リブ式白線における積雪評価の実験条件

図13にリブ式白線の積雪評価の実験環境図を示す。図13に示すように、リブ式白線上にミリ波レーダを設置し、レーダの高さを300mmとした。これは、車両のバンパ付近にレーダを搭載することを想定したためである。また、俯角を 5.7° とし、3000mm先のリブに向けて信号を照射した。

実験条件として、各リブ反射を検出できるように中心周波数は79GHz、帯域幅は2GHzとした。また、測定時の積雪量は7.5cmであり、表層付近や地表付近の積雪を採取した結果、積雪の密度は $0.10 \sim 0.25\text{g/cm}^3$ であった。そして、実験では積分回数を20回とし、50回測定した結果を平均した。

実験では、積雪がある場合とない場合の反射強度

を測定した。図14(a)に積雪がある場合の実験環境図を、図14(b)に積雪がない場合の実験環境図を示す。

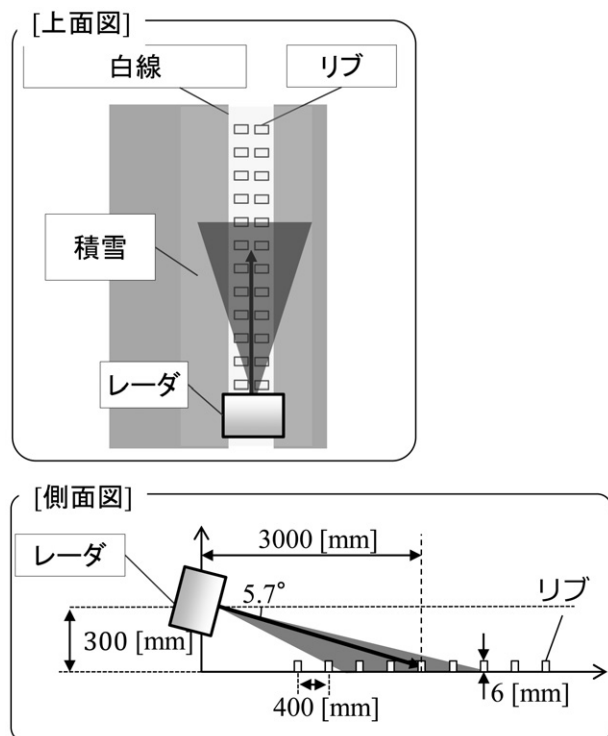
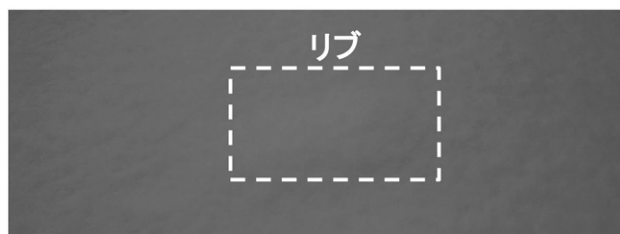
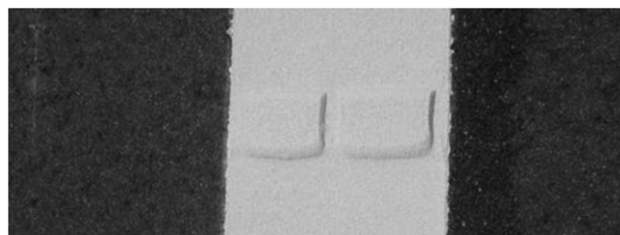


図13 リブ式白線の積雪評価の実験環境



(a) 積雪がある場合のリブ式白線



(b) 積雪がない場合のリブ式白線

図14 積雪がある場合とない場合の実験環境図

4.2 リブ式白線における積雪評価の実験結果

図15に3m付近に存在するリブの反射強度を示す。ここで、図15の縦軸は平均電力を表し、横軸は積雪がない場合とある場合の結果を示す。図15に示すよ

うに、3m付近のリブでは積雪により10dB程度の減衰が生じている。ここで、2章ではSingle RibのRCSは約-15dBsmであり、リブ反射と路面クラッタとの利得差は約15dBであった。そして、Twin RibのRCSは約-20dBsmであるため、Twin Ribと路面クラッタの利得差は約10dBとなる。そのため、積雪により利得が10dB減衰すると、リブの反射が路面クラッタに埋もれて検知することができないと考えられる。そのため、積雪量に応じて減衰量を補うだけの利得を向上させる必要があると考えられる。

また、図16にシミュレーションにおける積雪減衰量と実測における積雪減衰量を示す。シミュレーションでは、雪の密度が $0.10\text{g}/\text{cm}^3$ のときと $0.25\text{g}/\text{cm}^3$ のときの減衰量を算出している。また、実測における積雪減衰量は図15の結果を示している。

図16より、雪の密度が $0.10\sim 0.25\text{g}/\text{cm}^3$ と混ざった状態での実測結果は密度 $0.10\text{g}/\text{cm}^3$ と $0.25\text{g}/\text{cm}^3$ のそれぞれのシミュレーションによる積雪減衰結果の範囲に収まるため、実環境における積雪減衰とシミュレーションにおける積雪減衰量が同等であることが分かる。そのため、新雪の密度である $0.10\text{g}/\text{cm}^3$ であれば、数cmの積雪でも数dBの減衰であるため、雪の降り始め数cmの積雪であればリブ式白線を検知することが可能であると考えられる。

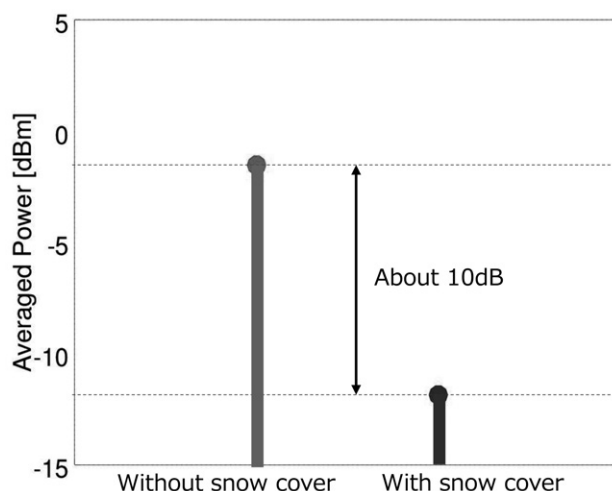


図15 3m付近に存在するリブの反射強度

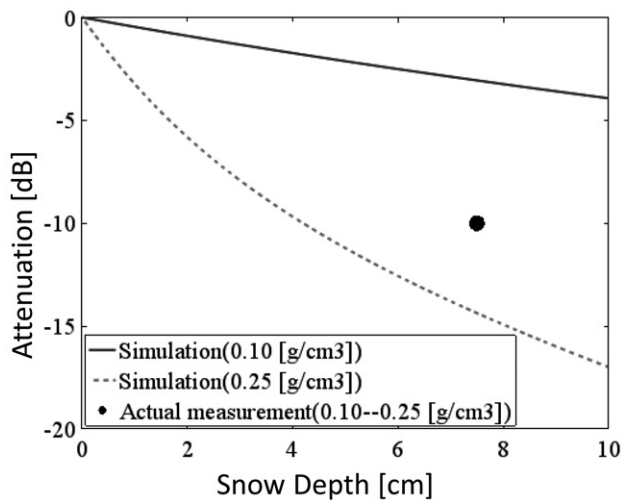


図16 シミュレーションによる積雪減衰量と実測における積雪減衰量

5

おわりに

本稿では、ミリ波レーダを用いてリブ式白線検知の性能を検証した。実験結果より、79GHz帯のミリ波レーダを用いて既存のリブ式白線上に存在するリブを検知可能であることが明らかとなった。

また、悪天候時におけるミリ波レーダを用いたリブ式白線検知の性能を検証するため、積雪時におけるリブ式白線の反射特性を評価した。実験結果より、雪の密度が高い場合や積雪量が多い場合には積雪減衰量を補うだけの利得向上が必要であるが、雪の降り始めでは自動運転から手動運転への切り替えや自動退避を行うための時間を稼ぐことが可能であることが明らかとなった。

今後は本技術を自然環境にロバストな自動運転技術の開発に活用し、交通事故のないクルマ社会の実現に貢献していきたい。

本稿にて紹介した内容は内閣府の戦略的イノベーション創造プログラムにおける経済産業省からの委託業務「全天候型白線識別技術の開発及び実証」で得られた成果の一部である。

参考文献

- 1) 足立 淳, 佐藤 淳, “未校正カメラによる自転車位置推定”, 電子情報通信学会論文誌D, vol. J89, No. 1, pp. 74–83, 2006
- 2) J. Sparbert, K. Dietmayer, and D. Streller, “Lane detection and street type classification using laser range images,” Proc. IEEE 4th International Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.454–459, 2001
- 3) 須田 義大, 青木 啓二, “自動運転技術の開発動向と技術課題”, 情報管理, Vol.57, No. 11, pp.809–817, 2015
- 4) R. Homma, T. Wakasugi, and K. Kodaka, “Human-Factors issues of transition from an automated driving system to manual driving,” 23rd ITS World Congress, Melbourne, Australia, 2016
- 5) 渋谷 奈保, 高橋 友和, 井出 一郎, 村瀬 洋, 小島 祥子, 高橋 新, “車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自転車位置推定”, 電子情報通信学会論文誌D, vol.J92, No. 2, pp.215–225, 2009
- 6) 瀧本 幸男, 上瀧 實, “積雪に対するミリ波帯電波の特性”, 電子情報通信学会論文誌B, Vol. J81, No. 1, pp. 71–81, 1998
- 7) 小野 光弘, 鈴木 道也, “マイクロ波に対する雪の透過減衰量”, 日本雪氷学会, Vol.29, No. 5, pp.150–155, 1967

筆者紹介



石本 幸太郎
(いしもと こうたろう)

VICT技術本部
技術開発室



長谷川 渉
(はせがわ わたる)

VICT技術本部
技術開発室



杉山 裕一
(すぎやま ゆういち)

VICT技術本部
技術開発室



中村 英夫
(なかむら ひでお)

一般財団法人
日本自動車研究所



後呂 孝亮
(うしろ こうすけ)

一般財団法人
日本自動車研究所



岸田 正幸
(きしだ まさゆき)

VICT技術本部
技術開発室