助成受付番号 第16005号 研究課題番号 （②）

積雪道路におけるインフラライトな レーン誘導システムに関する研究

秋田県立大学　教授　御室　哲志

概要：

本研究は，特別なインフラ設備を必要とせず，路肩が雪に覆われた状態でも運転者に正確な前方道路端位置を提示する運転支援システムを開発することを目的とする．ここで主要な車載センサとして用いるレーザスキャナは，距離精度と角度分解能が高いという利点があるが，近赤外光を使用しているため，悪天候下の動作は必ずしも保証されていない．その高性能なものは，近年，自動運転システムの中核センサとしてよく用いられている．

最初に，様々な冬期天候下でのレーザスキャナの反射データを示し，冬期悪天候下においてもスノーポールの検出が可能であることを示す．次に，スノーポールを備えた実際の道路において，積雪の有り無しで，レーザスキャナによる路肩と路肩構造物の検出状況を示す．これらの結果を踏まえて，車両進行方向前方の積雪道路端の位置をリアルタイムで推定するシステムの構成と，その開発状況について述べる．

キーワード: 積雪道路，悪天候，レーン誘導システム，レーザスキャナ，スノーポール

１．研究の背景と提案システムの概要

(1) 研究の背景

今まで雪の無かった道路に降雪が始まると，先ず視界が悪化し，風景はモノトーンとなり，道路境界が判別しづらくなる．積雪量が増すと，除雪車が出動して走行路を確保するが，除雪された雪は，多くの場合，路肩に寄せられて，路側帯，縁石，ガードレールなどの路肩構造物を覆う．地吹雪を伴うような悪天候下では，視界を完全に奪うホワイトアウトに至ることもある [1]．このような積雪環境下におけるレーンに沿った運転を支援するために多くの研究がある [2,3,4]．また，道路，自動車の双方で様々な対策がされてきているが，いまだ不十分である．

(2) 提案システムの概要と研究課題

道路インフラを仮定したレーン誘導については種々のアプローチがある [2,5,6,7]．本研究は，特別なインフラ設備を必要とせず，悪天候下で路肩が雪に覆われた状態でもドライバに正確な前方道路端位置を提示する運転支援システムを開発することを最終目的とする．ここで主要な車載センサとして用いるレーザスキャナは，距離精度と角度分解能が高いという利点があるが，近赤外光を使用しているため，悪天候下の動作は必ずしも保証されていない．その高性能なものは，近年，自動運転システムの中核センサとしてよく用いられている [8,9]．今回用いる4レイヤレーザスキャナは，低コスト化が十分見込めるセンサで，現在普及が進んでいる通常の運転支援システムも含め，幅広く適用が可能と考えている．

道路側にはドライバの視覚支援に用いられている通常のスノーポールのみを仮定する．雪が堆積した状態でも，スノーポールの上部は視認可能であり，適切な間隔で路側に設置されているものする．雪が堆積していない状態で走行した時のレーザスキャナ出力から，スノーポールや道路端の位置を抽出し，デジタル地図を生成する．雪によって路肩構造物が覆われ，ドライバとしては道路端の判別が困難になった状況下において，スノーポールを検出することにより，道路端位置を推定して車両をレーン誘導する．道路端位置推定精度が高ければ，除雪作業支援にも適用可能と考えられる．

今回は，次の二つの基本的課題について，大学構内道路のシンプルな環境における実車試験を中心に取組んだ．

(a) レーザスキャナによる悪天候下のスノーポールの検出可能性

(b) スノーポールの位置検出と道路端の位置把握に基づくレーン誘導システムの開発

2．試験システムと試験環境

(1) レーザスキャナ

表 1 に今回使用する 4 レイヤのレーザスキャナ（SICK LD-MRS，IBEO LUX2010 同等品）の諸元を示す[10]．上下の 4 レイヤは，下から第 1，第 2 レイヤと呼び，各レイヤに属する反射点は赤青緑黄の 4 色で示すことにする．

Table 1 Technical data of laser scanner[10]

Size(W×H×D)	164.5mm×88mm×93.2mm
Laser class and wave length	Class 1，905nm
Range	200m/50m(10% remission)
Horizontal field of view	85deg(+35deg~ -50deg)
Vertical field of view	3.2deg，4layers
Scan interval	40ms

(2) 試験車両

図 1 に試験車両の構成を示す．レーザスキャナは車両前端に地上からの高さ 415mm で取り付けられており，ノート PC に LAN 接続している．車両には他に，GPS，慣性センサ，前方カメラが取付けられている．

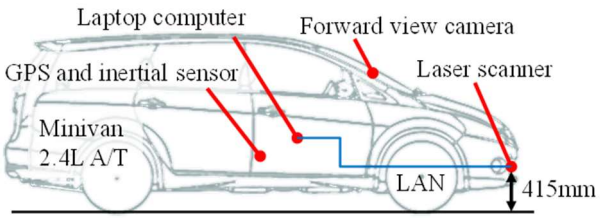

Fig.1 Devices placed on the experimental vehicle

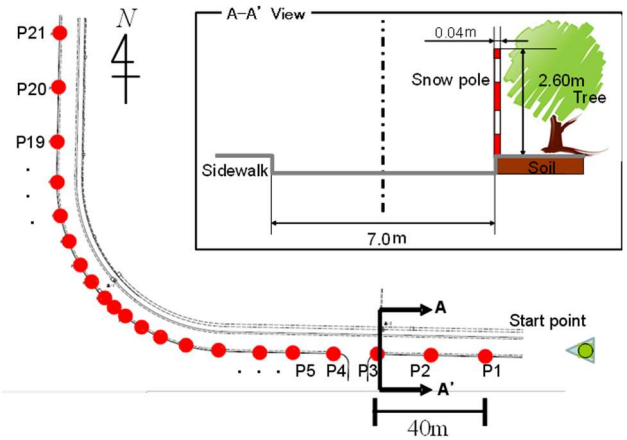

Fig.2 Snow pole arrangement on the campus road

(3) 試験道路環境

秋田県立大学本荘キャンパス構内に試験道路を設けた（図 2）．中央分離帯無しの片側 1 車線で，右下をスタート地点とし，助走区間 50m，直線区間 100m，50R 右カーブ区間 80m，カーブ後直線区間 15m，減速区間 80m である．コースの左側は縁石の先に盛り土と植栽があり，縁石の真上に直径 4cm 高さ 2.6m のスノーポールを不等間隔で 21 本配置した．コース右側には縁石の先に歩道があり，その先には植栽とグラウンドがある．

3．悪天候下のスノーポールの検出可能性[11]

(1) 降雪による反射

路面，路肩の雪や立ち木，対向車等からの反射を含まず，雪やあられからの反射だけを観察するために，車両前端に取り付けたレーザスキャナを原点とする座標（前方+x，右+y）で 0m<x<20m，-1m<y<1m，の領域の反射点を抜き出した．

一方，レーザスキャナが計測する 0～100m 程度の範囲の視界を簡易的に数値化するために，スタート地点の試験車の前方カメラ画像の消失点を取り囲む，横 130pixel，縦 110pixel の矩形領域のピクセル色輝度（0～255）の標準偏差を視界指標とすることを試みた．画像処理には Photoshop Elements 14[12]を使用した．レーザビームは細く，近赤外光なので，レーザ反射特性は人間の視界良否判断とは傾向が若干異なる可能性があるものの，この方法で得られた標準偏差は，主観的な視界良否とよく対応した．

図 3 に吹雪とあられのそれぞれ 3 レベルについて，視界指標に対する領域の全降雪反射点数を示す．吹雪とあられを区別することなく用いた場合，視界指標は降雪反射点数の対数とおおよそ線形の関係にある．

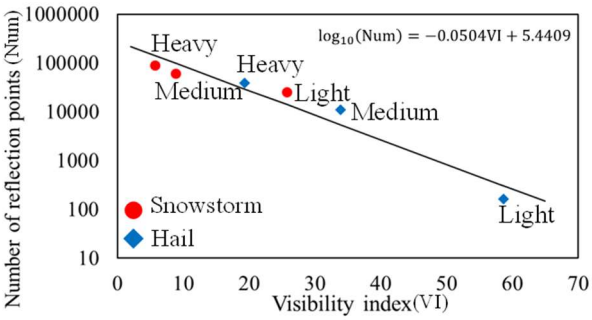

Fig.3 Number of reflection points vs visibility index

(2) スノーポールの反射特性

本レーザスキャナは，降雪に反射しても，その先の反射もとらえるマルチエコー機能を有している．前節の結果より，8m 以遠であれば，悪天候下でもスノーポールを検出できる可能性がある．そこで，種々の天候下の構内道路で計測した反射データから，スノーポールの反射特性を調べる．スノーポールは第 3,4 レイヤから各 1 点ずつ反射してくることが多い．近距離（7m 以内）では 2

点に増加する場合もある．1 スキャンの反射点の内，第 3 レイヤと第 4 レイヤの反射点の横ずれが 10cm 以内であるペアをスノーポール候補とする．特に遠方では角度分解能によって見落とすことがあり，天候による見落としもある．構内道路ではスノーポールの絶対位置がわかっているので，ここでのデータ処理は，スノーポールが存在する限定した範囲で，候補ペアをトラッキングすることでスノーポールを抽出することができる．今回の 8m 以遠では雪の反射点がなかったのでこのような単純なロジックでトラッキングできた．

反射点情報は位置だけでなく，反射強度に対応する反射パルス幅情報も含んでいる．処理を行った 50m までの範囲ではスノーポールの反射パルス幅のばらつきは大きいものの，距離にほとんど依存せず，くもりの時，平均で 1.7cm である．また，前出の吹雪中と同等の環境下に計測した反射パルス幅は平均 1.6cm でくもりの時と比較して大きく減少することはなかった．

図 4 にそれぞれの天候について，視界指標に対するスノーポールの反射パルス幅と反射パルス幅の標準偏差を示す．吹雪中のみであるが走行中の視界指標の標準偏差も示す．この時，車両は約 30km/h で走行しており，スノーポールを前方 35m~20m 付近でトラッキングした．スキャン回数は天候毎に異なるが，40~80 回である．また，その時のスノーポールからの反射点は 1 レイヤあたりそれぞれ 30 回前後であった．反射パルス幅は吹雪強でも平均で約 1.4cm である．3m 以遠の領域で降雪の反射パルス幅の平均を上回る．以上のことからスノーポールを検出する際，スノーポール候補近傍に降雪からの反射点が検出されても，反射パルス幅が大きい方を候補とすることで，より安定したスノーポール検出ロジックとすることができる．

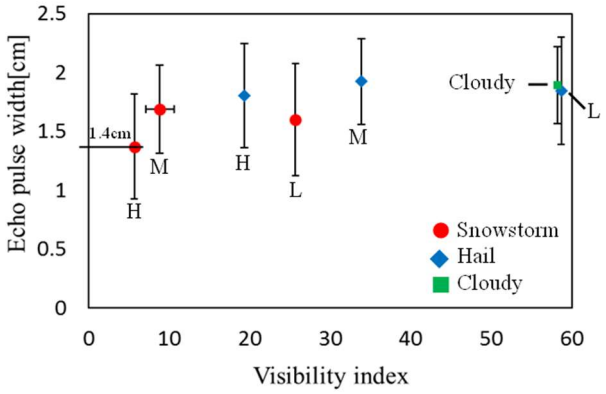

Fig.4 Echo pulse width of snow poles under seven climate conditions

4．スノーポールの位置検出と道路端の位置把握

(1) スノーポール類を含む積雪道路環境検出

シンプルな道路環境の例として，秋田県由利本荘市の片側一車線の郊外道路におけるレーザスキャナ反射点データを図 5, 6 に示す．レーザ反射点位置は，レーザスキャナ位置を原点として，縦軸に車両前方距離，横軸に左右距離をとり，高さは 2 (1) で述べたように下から赤，青，緑，黄 4 色で 4 レイヤを表している．

図 5 は降雪前，図 16 は吹雪で積雪もある時で，ほぼ同じ地点である．この道路の左右の道路端には路肩縁石，路肩縁石上にスノーポール（直径 7.5cm，高さ 180cm）や街路灯，左側の路肩縁石よりもさらに左手に畑地，右側の路肩縁石のさらに右手に防風柵がある．降雪後は，除雪車により路肩縁石付近に雪が寄せられ，高さ 70cm 程になって，路肩縁石を視認できない．

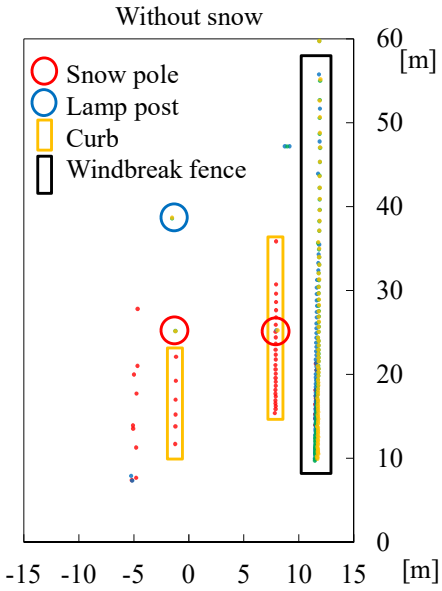

図 5　積雪なしの片側一車線の郊外道路における 4 レイヤレーザスキャナの反射点データ

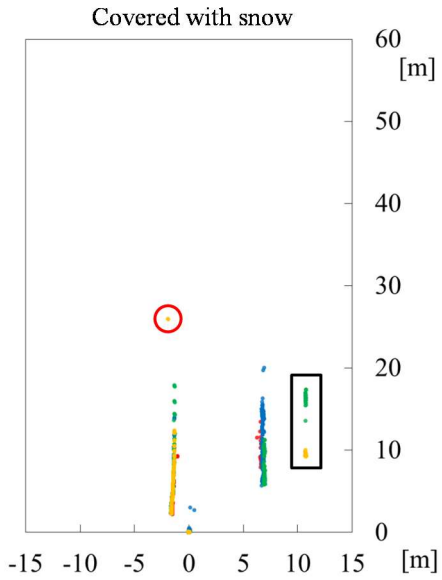

図 6　積雪ありの片側一車線の郊外道路における 4 レイヤレーザスキャナの反射点データ

降雪前のレーザ反射点データにおいて，y= -2，+8m 付近に見られる第 1 レイヤ反射点列は路肩縁石によるものである．y= -5m 付近に見られる第 1 レイヤ反射点列は，歩道奥の畑地との境界に生えている雑草によるものであり，y= +12m 付近に見られる複数レイヤ反射点列は防風柵である．路肩縁石からの反射点上，もしくはその延長線上にある第3 第4 レイヤからの反射点はスノーポール．もしくは街路灯ポール（直径 9~17cm，高さ 3.5m）からの反射である．スノーポールや街路灯ポール以外にも，電柱や標識等，背の高い円柱形状の物体（スノーポール類と呼ぶ）は良好なレーザ反射が得られる．

降雪後のレーザ反射点データでは，縁石があった位置に，雪壁によるより高いレイヤの反射点が見られる．左路肩の前方 26m 付近にスノーポールの反射が見られるが，この 1 回のスキャンデータでは他のポール類を見落としている．

(2) 道路端の位置把握

本研究の 2 番目の課題は，スノーポール位置の検出とともに，スノーポール対する道路端の位置把握である．道路端の位置把握は，様々な考え方があり，路肩構造によって，種々の検出手法を使い分ける必要が出てこよう．以下に四つの手法を列挙する．

① 左路肩沿いのスノーポール列を，イコール道路端とみなす，最もシンプルな手法である．ここでは，スノーポールは縁石の上，あるいはガードレールの上に設置されていると仮定している．実際，スノーポールの大きな目的の一つは，除雪作業者に縁石等の地物の存在を知らせるためであるので，多くの場合，縁石等の直上にある．この仮定に沿わないイレギュラーなスノーポール設置がどの程度あるのか，あるいはスノーポールの縁石等からの設置オフセット量が無視できないことが多いのかは，実際のフィールドを調査する必要がある．

② 縁石がある道路の場合（図 5 に示したように積雪が無い状態では），4 レイヤレーザスキャナの第 1 第 2 レイヤによって連続的なエッジとしてとらえられる．ガードレールの場合も連続したレーザ反射点から道路端を検出できる．

③ 多くのレーン逸脱警報システムやレーンキーピングアシストシステムが用いているカメラによるレーン認識（主として白線認識）を，積雪が無い状態で適用する．

④ 理想的なダイナミックマップが完全整備されたとすると，そこにはスノーポールと道路端の位置関係も記述されている可能性がある．現状のダイナミックマップの検討項目にはガードレール、キャッツアイ，デリニエータ，ラバーポール，照明灯，電柱，信号機，道路標識板等が含まれるが，残念ながらスノーポールは見当たらない[13]．

本研究においては，①，②について検討する．

5．積雪道路におけるレーン誘導システム

(1) 想定する道路環境

積雪寒冷地の高速道路，国道，地方道に一般的に見られる中央分離帯がある片側 2 車線道路の左レーン走行，もしくは片側 1 車線＋路肩スペース，もしくは中央分離帯の無い片側 1 車線を走行している状態を想定する．道路線形としては直線と滑らかなカーブからなる単路部とし，カーブの曲率半径は左道路端で 40mR 以上とする．路肩縁石上に十分な高さのスノーポールがランダムな間隔で設置されており，曲線区間のポール間隔は適度に小さいものとする．一般国道等の視線誘導標の設置間隔は 50R 以内であれば 5m，300R 前後であれば 20m と定められており，その程度の間隔での設置を想定する．今回使用する大学構内道路は中央分離帯の無い片側 1 車線道路として，以上の条件に適合している（2(3) 節参照）．

(2) 地図の生成

4 章に示した路肩構造物のレーザ反射の特徴を踏まえて，道路端位置を含むデジタル地図を生成する手法を開発した．そのフローを図 7 に示す．4 レイヤレーザスキャナにより，想定最大積雪高より高い路肩近傍にある構造物（スノーポール類）と道路端の相対位置を自動車座標で検出する．道路端の位置は，ここでは 4(2) 節の①の手法に従って，スノーポール位置と同じとしている．車速と車載の慣性センサから得るヨー角速度から車両移動量が算出される．自動車座標で検出されたスノーポール類の位置を，車両の移動に伴う座標変換を施しつつ地面固定座標で記述し，一定区間のローカルマップを作成する．区間ごとに GPS で得たグローバル座標を加えてグローバルマップを得る．

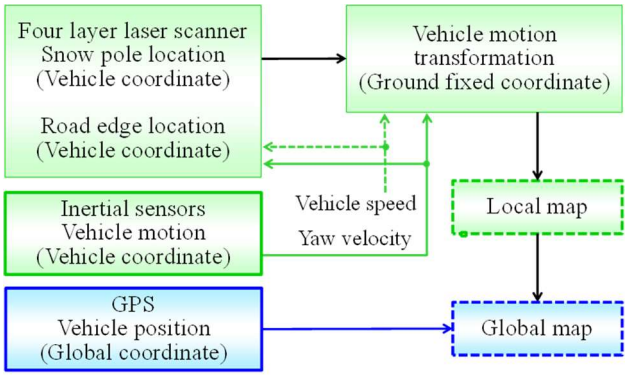

Fig.7 Generating maps consist of snow pole-like roadside objects and road edges

図 7 の左上ブロックのスノーポール位置検出手順を図 8 に示す．一連の手順はレーザスキャナのスキャン周期 40ms の間に行われる．レーザスキャナの反射点の内，第

3 第 4 レイヤ反射点の推定位置が近接するものをポール候補 Pi として，車両の移動とともにトラッキングし，繰り返し検出され，信頼性が高いと判定されたものをポールと呼び，ポールに準ずる信頼性のポール候補とともに Si とする. 前方 10m 以内まで近づいた左道路端の至近距離ポールの位置を，地面固定座標への座標変換ブロックに渡し，地図用データとする.

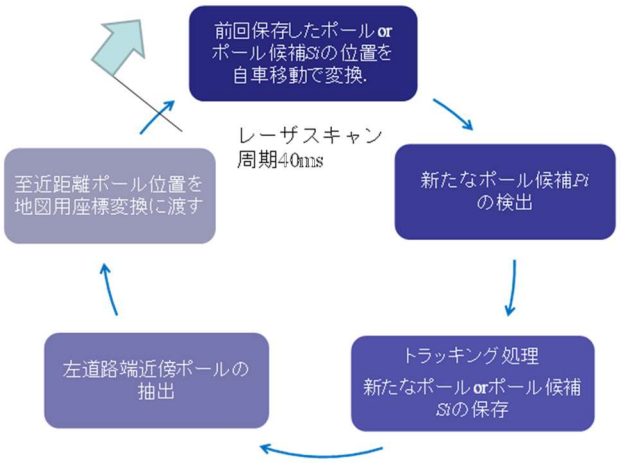

図 8　スノーポール位置検出手順

(3) スノーポールをランドマークとした自己位置推定

通常のスノーポールの設置間隔は，比較的密なところで 10m～30m といったところであり，レーザスキャナにより，ある時刻に検出される左路肩のスノーポール類は多くても 3 個くらいと想定される．この少ないリアルタイム検出のスノーポール類の位置情報だけでは，精度の高い自己位置推定はおぼつかないため，通り過ぎて後方に行ったスノーポール類の位置情報も使うことにする．後方のポール類を検出するのではなく，至近距離ポールとして検出された位置情報を，その後の自車の移動で座標変換しながら，多数のスノーポール類の位置情報を保持する．次図はそのイメージである.

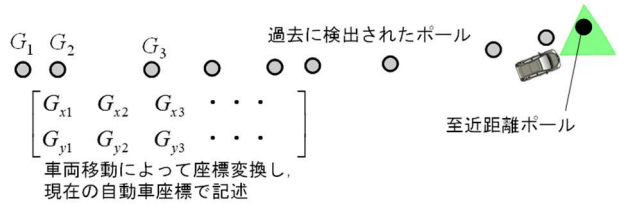

図 9　後方スノーポール類の位置データの保持

レーン誘導サービスを受けようとする車両は，進行方向別の道路区間毎に，左道路端近傍スノーポール類と道路端の位置座標からなる地図データを持つものとする．ある道路区間に近づくと，区間の最初に記録されたグローバル座標と現在の GPS 位置情報が十分近くなったことをトリガに，システムは当該地図データを読み込む．システムが保持あるいはリアルタイム検出中のスノーポール類の位置情報（地面固定座標）と，地図が持つスノーポール類の位置情報（グローバル座標）との間でマッチングを行って，最も適合するポール列を探索し，自己位置推定を行う（図 10）．保持するポール類の数が増えれば，検出漏れや誤検出に対しても許容範囲が増えることが期待される.

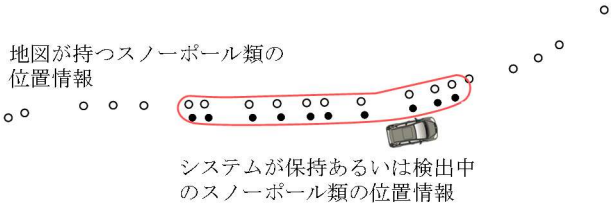

図 10　地図とのマッチング

(4) レーン誘導の方法

自己位置推定により，スノーポール類と自車の相対的位置関係が分かると，道路端との位置関係もわかる．レーンキープしながら走行中のドライバにとって必要な情報は，前方の道路線形であるので，車内表示器に自車に対する相対的な道路端位置を表示することが，レーン誘導のための情報提供サービスである．地図はレーザスキャナ検出レンジよりもさらに先の道路端情報まで保持しているので，ドライバは視界やレーザスキャナの検出レンジの制約なしに，十分前方の道路線形を把握することが可能になる.

また，通常のレーン逸脱警報（積雪なしの天候が良好な場合に白線カメラによって提供される）に相当する支援機能も提供可能である．ドライバのレーン逸脱回避操舵に必要なのは, 2 秒程度前方の横位置である. 図 11 は, 現在の車速とヨー角速度から τ 秒先の自車位置を 2 次予測し，道路端からの距離 ε を推定する方法を，地面固定座標で表現したものである．ε がある閾値を下回ると表示と音でドライバに警報する.

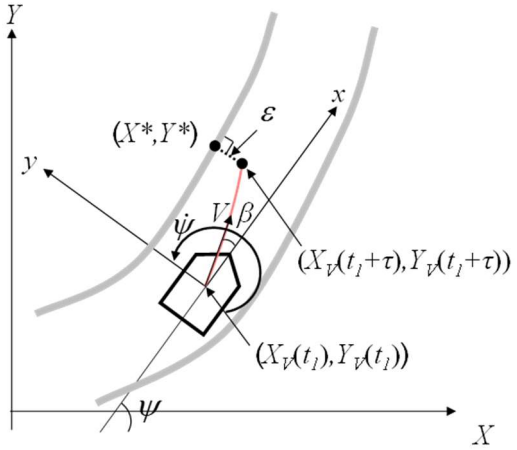

図 11　レーン逸脱判定のための τ 秒先の道路端との距離予測

６．まとめ

本研究では，積雪悪天候下で道路横位置が確認しづらい時の自己位置推定手法ならびにレーン誘導手法を具体化し, その実験システムを構築した. 主要センサとして，普及が容易な4 レイヤレーザスキャナを用い，想定積雪高より背の高いスノーポール類の位置を検出してランドマークとする．積雪の無い時に道路端位置を合わせて取得しておけば，積雪時に雪の上に突き出ているスノーポールを検出して，ランドマーク地図とのマッチングにより，雪に埋もれた道路端位置を推定することができる．この提案の実現性を検証するために,

(a) レーザスキャナによる悪天候下のスノーポールの検出可能性

(b) スノーポールの位置検出と道路端の位置把握に基づくレーン誘導システムの開発

の二項目について検討した.

冬期の様々な気象条件下での試験により，以下の結論を得た．降雪時のレーザスキャナの近傍では降雪からの反射点数が多いが, 8m 以遠になると反射点数は激減し，反射強度も低下する．一方，スノーポール等の路肩構造物の反射強度は距離に対してあまり変わらないことから, 8m 以遠のポール候補を車両の移動に合わせてトラッキングすることによって，比較的安定したスノーポール類の位置検出が可能である.

積雪が無い時にスノーポール類と道路端の配置を含む地図を得て，積雪がある時には，スノーポール類の配置を得て，両者のマッチングを行うことで，道路端の推定を行うシステムの構成を示し，実際に車載してリアルタイムで動くシステムを開発した．今回は路肩縁石上にスノーポールが配置されたシンプルな構内道路で動作することを当面のターゲットとして開発を行った．まだ動作検証が不十分であり，今後，システムの完成度を上げるとともに，更に多様な道路環境の下で，システムの実用性評価を進めていきたい.

謝辞：終わりに，計測やデータ処理にあたってアドバイスやご協力を頂いた木村健二氏，小山早苗氏に感謝の意を表する．また研究助成をいただいた国土技術センターの関係各位に御礼申し上げる.

参考文献

1) 北の道ナビ，吹雪による視界の程度，http://northern-road.jp/navi/info/guide1_2.html，（2018 年 3 月閲覧）.

2) 石黒克弥，御室哲志，礒田陽次 : 悪天候時レーンキーピングシステムのロジック検証と HMI の検討，日本機械学会第 24 回交通・物流部門大会(TRANSLOG2015)，交通・物流部門大会講演論文集, No.1401, 2015.

3) 添田勝真，他，除雪車支援 ICT システムにおけるデータ転送方式の検討，電子情報通信学会技術研究報告. IA，109(421), 17-22, 2010-02-12.

4) 東日本高速道路, 準天頂衛星を活用した除雪車運転支援システムの開発，定例記者会見資料，2017 年 10 月.

5) 山田純，佐藤史隆，川村武，他 : UHF 帯 RF-ID と方位情報を用いた曲線路における車両誘導，ITS Japan 第 14 回 ITS シンポジウム，2016 .

6) トヨタ系素材メーカーが後押しする、磁気マーカーを活用した自動運転，日刊工業新聞，2018 年 03 月 25 日.

7) 自動運転の社会実証実験への 7 人乗り小型車両の提供について 20 年以上にわたり培ったゴルフカーの電磁誘導式自動運転技術を転用，ヤマハ発動機プレスリリース， 2017 年 09 月 15 日.

8) 渋久奈保，他，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車位置推定，電子情報通信学会誌, Vol.J92-D No.2, pp.215-225, 2009.

9) 加藤正浩，他，ランドマーク情報を活用した LiDAR データ処理による自己位置推定技術の開発，自動車技術会論文集 Vol.49 No.1, 2018.

10) LD-MRS Laser Scanner Operating Instructions, SICK AG(2009)

11) 谷口直也，御室哲志，4 レイヤレーザスキャナを用いた積雪道路のスノーポールの検出，自動車技術会論文集 Vol.49, No.2, pp. 341-346 (2018), DOI :10.11351/jsaeronbun.49.341.

12) Adobe Support，ヒストグラムとピクセル値の表示，https://helpx.adobe.com/jp/photoshop/using/viewing-histograms-pixel-values.html (2017 年 4 月 3 日参照).

13) ダイナミックマップ構築検討コンソーシアム, 自動走行システムの実現に向けた諸課題とその. 解決の方向性に関する調査・検討におけるダイナミックマップ構築に向けた試作・評価に係る調査検討. 委託業務成果報告書（本編），2017 年 3 月.