

磁気マーカによる 除雪車の走行支援技術に関する検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地機械技術チーム ○新保 貴広
舟橋 誠

暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業を行うには、除雪車の自車位置を正確に測位し、車線内を走行させるための車線走行支援技術が必要である。自車位置推定には、衛星測位を用いることが基本となるが、衛星不感地帯には別の測位技術を用いる必要がある。

そこで、気象の影響を受けにくい磁気マーカを用いた自車位置推定システムによる車線走行支援ガイダンスを試作し、測位精度及びガイダンス性能を検証したので報告する。

キーワード：除雪、安全対策、自車位置推定、磁気マーカ

1. はじめに

近年、積雪寒冷地では極端な暴風雪に伴い、車両の立ち往生や長時間にわたる通行止め等が増えてきている。このため、暴風雪による視程障害時においても安全に除雪作業を行い、道路交通の早期解放を可能とする除雪車の開発に対する現場ニーズは高い。

視程障害時においても安全に除雪作業を行うには、除雪車の自車位置を正確に測位し、車線内を走行させるための車線走行支援技術が必要である。自車位置推定には、GNSSによる衛星測位を用いることが基本となるが、衛星不感地帯には別の測位技術を用いる必要がある。

そこで、気象の影響を受けにくい磁気マーカを用いた自車位置推定システムを利用して、除雪車のオペレータに走行支援情報を提供する車線走行支援ガイダンスを試作し、試験道路において自車位置推定システムの測位精度及びガイダンス性能の検証実験を行ったので報告する。

2. 磁気マーカシステムを用いた自車位置推定の概要

磁気マーカシステムは、道路に埋設した磁気マーカを車両底部に設置した磁気センサで検知することで、自車位置を測位する技術である。同技術は、国土交通省が実施する「道の駅等を拠点とした自動運転サービス」における実証実験のうち、路車連携型の自動運転バスに利用されている。

寒地土木研究所は、愛知製鋼(株)、(株)NIPPO、アイシン・ソフトウェア(株)との共同研究²⁾により、磁気マーカシステムの位置情報とIMUによる自律航法を組み合わせた自車位置推定システムを開発した。自車位置推定システムには、愛知製鋼(株)製のMIセンサを

用いた磁気マーカシステムを使用しており、磁気マーカの舗装路面への埋設は、(株)NIPPOが実施した。高精度地図DB及び自車位置推定システム及び車線走行支援ガイダンスのソフトウェアは、アイシン・ソフトウェア(株)が作成した。

自車位置推定システムの概要図を図-1に示す。自車位置推定システムは、IMUによる自律航法を主としているが、IMUは観測時間の経過とともに測位誤差が累積される。そこで磁気マーカシステムの位置情報により測位誤差を補正する仕組みとなっている。

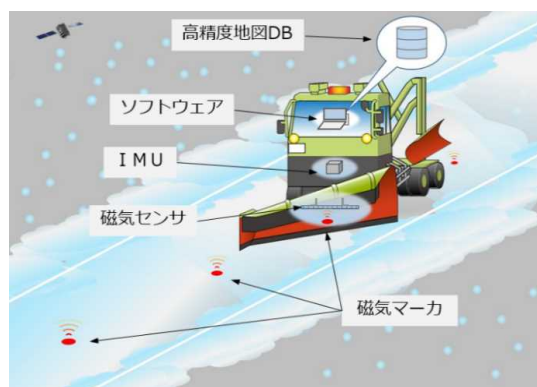


図-1 自車位置推定システム概要図

3. 磁気マーカシステムを用いた車線走行支援ガイダンスの検証実験

磁気マーカシステムとIMUを組み合わせた自車位置推定システムによる位置情報をオペレータに提供するための車線走行支援ガイダンスを試作し、自車位置の測位精度を検証するとともに、ガイダンス情報に従い車線を逸脱せずに走行可能か検証した。

(1) ガイダンス試作機の作製

ガイダンス試作機は、ロボット用オープンソースソフトウェア「ROS」の可視化ツールである「RViz」をベースに新たに開発したものである。RVizは、ROSで通信されるデータであれば種類を問わず表示することができ、外部からのセンサ情報やロボットの形状モデル、地図、計画軌道などを三次元表示することができる。

実験を行った寒地土木研究所苫小牧寒地試験道路の高精度三次元地図を作成し、ベクターマップにより区画線と走行車線の中央にガイダンス用の走行目安線を表示した。また、現在位置や道路周辺状況を把握しやすいように、点群情報を基に道路や道路周辺の起伏・背景をカラー表示した。

ガイダンス画面はオペレータの運転操作のしやすさを考慮し、運転席からの視点（以下、「コックピットビュー」という）、後方からの鳥瞰的な視点（以下、「バードビュー」という）、カーナビゲーションのような二次元的な視点（以下、「2Dビュー」という）の3種類を設定した。図-2にガイダンス画面例を示す。



図-2 ガイダンス画面例

(2) 実験概要

ガイダンス試作機の測位方法は、磁気マーカシステムとIMUによる自律航法の組み合わせによる自車位置推定システム（以下、「磁気マーカ方式」という）とRTK-

GPSによる位置測位（以下、「RTK方式」という）がある。過年度の実験結果³⁾よりRTK-GPSの測位結果は、TSによる走行軌跡の測位結果と同程度の精度があったことから、RTK方式と磁気マーカ方式の測位結果を比較することで測位精度を検証することとした。

また、視程障害時におけるガイダンスによる運転操作性を検証するため、フロントガラス全面の視界を遮断し、視程障害時を模擬的に再現した状況において、ガイダンス情報を頼りに車線を逸脱せずに走行する実験を行った。

実験場所平面図を図-3に、除雪車外観及び実験時の運転室内の状況を写真-1に示す。

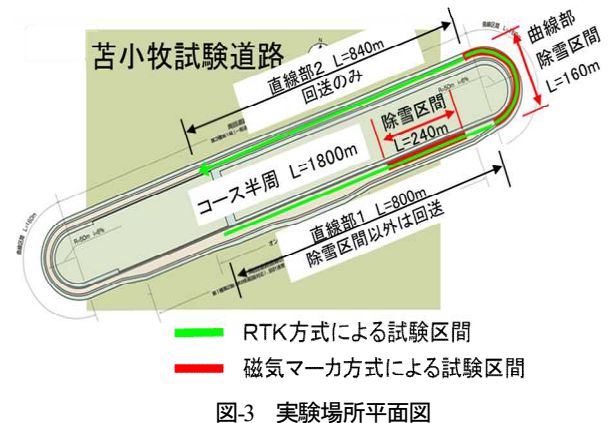


図-3 実験場所平面図



写真-1 除雪車外観及び実験時の運転室内の状況

(3) 磁気マーカ方式による測位精度検証実験

a) 検証実験方法

磁気マーカ方式による測位精度の検証は、磁気マーカを埋設した直線部と曲線部において、設置間隔の違いによる測位精度を検証した。

磁気センサは、除雪トラックの前方底部にブラケットを取り付け、地上高25cmの位置に設置した（図-4）。磁

気マークは、直径30mm、高さ20mmの埋設型マークを、車線中央部に深さ3cmで削孔した穴に埋設し、表層1cmを充填剤にて充填した（図-5）。



図4 磁気センサ設置状況



図5 磁気マーカ埋設状況

実験条件は以下のとおりである。

- ・ マーカ設置間隔：直線部 10m、20m、40m
 ：曲線部 3m、5m
- ・ 視界遮断の有無：有・無（視界遮断は直線のみ）
- ・ 除雪作業の有無：除雪有、除雪無（回送）
- ・ 目標測位精度 ：±50cm

b) 検証実験結果

直線部の実験結果を表-1に、曲線部の実験結果を表-2に示す。直線部の実験では、マーカ設置間隔10mにおける視界遮断無しの場合と除雪時の条件において目標精度を達成できた。視界遮断有りの場合と除雪時では、右方向の最大誤差が目標の50cmを超える箇所があった。しかし最大誤差範囲では1m以内に収まっていること、及び平均誤差に大きな差が見られないことから、視界遮断無と同等の評価と判断した。一方、マーカ設置間隔20m、40mの条件では目標精度を達成することができなかった。

曲線部では、マーカ設置間隔3mの回送時において目標精度を達成できた。マーカ設置間隔3mの除雪時と設置間隔5mの回送時では、右方向の最大誤差が目標の50cmを超える箇所があったが、最大誤差範囲では1m以内に収まっていること、及び平均誤差に大きな差が見られないことから、設置間隔3mの回送時と同等の評価と判断した。

表-1 自車位置推定実験結果（直線部）

設置間隔	除雪有無	視界遮断	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
				左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
10m	回送	無し	0.08	0.77		○
		有り	0.14	-0.33	0.44	△
	除雪	無し	0.07	0.71		○
		有り	0.07	-0.18	0.53	△
20m	回送	無し	0.71	2.40		×
		有り	0.52	0.04	2.45	×
	除雪	無し	0.39	2.26		×
		有り	0.47	-0.56	1.69	×
40m	回送	無し	0.58	0.86		×
		有り	0.75	0.00	0.86	×
	除雪	無し	0.53	1.41		×
		有り	0.53	-0.21	1.20	×

表-2 自車位置推定実験結果（曲線部）

設置間隔	除雪有無	平均測位誤差(m)	最大誤差範囲(m)		評価
			左方向最大誤差(m)	右方向最大誤差(m)	
3m	回送	0.04	0.65		○
	除雪	0.08	-0.23	0.42	△
5m	回送	0.28	0.83		△
	除雪	0.04	-0.04	0.66	×

本実験では、圧雪路面上に磁気マーカの位置を示すマーキング等は行っておらず、ガイダンスの画面に表示される磁気マーカの位置を目安に実験を行った。そのため直接目視で路面を確認しながら運転するよりも、細かなハンドル操作を伴う運転となり、自律航法の測位精度に影響を与えたものと思われる。また、視界を遮断した場合は運転挙動がより不安定になるため、その傾向がより強くなったものと考えられる。

曲線部の実験では、道路線形に合わせてハンドル操作を行いながら、マーカの位置合わせを行うため、確実にマーカ上をセンサが通過するためには、ガイダンスによる運転操作の習熟が必要である。

(4) RTK方式によるガイダンス性能検証実験

a) 検証実験方法

ガイダンスシステムはリアルタイムに自車位置を高精度地図に表示するとともに、走行軌跡が記録可能である。高精度地図には、走行位置をガイダンスするための走行目安線が表示されているため、オペレータは走行目安線に除雪車モデルの中心を合わせて運転することで、車線

を逸脱せずに走行することができる。そこで走行目安線の設定座標を基準とし、目視による通常走行の軌跡と視界を遮断した各ガイダンス情報のみによる走行軌跡の測位座標との差を比較することで、ガイダンス性能を評価することとした。また、オペレータにガイダンス使用時における運転操作性に関するヒアリングを行った。

試験コースは半周1800mで、L=800mの直線部1のうちL=240mを圧雪路面、曲線部はL=160mの全てを圧雪路面とした。圧雪路面では除雪作業を行いながら走行し、圧雪路面以外の区間は乾燥路面のため回送姿勢にて走行するものとした。

実験条件は以下のとおりである。

- ・ガイダンス種類：コックピット、バード、2D、通常走行（ガイダンス無し）
- ・走行条件：除雪有、除雪無（回送）

b) 検証実験結果

実験結果を表-3に示す。

表-3 自転車位置推定実験結果

ガイダンス種類	走行条件	道路条件	平均離隔距離(m)	最大離隔距離範囲(m)		評価
				左方向最大離隔距離(m)	右方向最大離隔距離(m)	
無し (通常走行) 視界遮断無	回送	直線	0.00	0.49		○
				-0.26	0.24	
	除雪	直線	0.16	0.39		○
	曲線	-0.23	-0.03	0.37		
コックピット ビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.36	1.28		×
				-0.84	0.44	
	除雪	直線	-0.08	0.71		△
	曲線	0.14	-0.61	0.10		
バードビュー 視界遮断有	回送	直線	0.02	0.40		○
				-0.32	0.08	
	除雪	直線	0.05	0.90		△
	曲線	0.10	-0.23	0.57		
2Dビュー 視界遮断有	回送	直線	-0.14	0.60		○
				-0.30	0.30	
	除雪	直線	-0.19	1.13		×
	曲線	-0.18	-0.56	0.56		
			0.79		△	
			-0.55	0.25		
			0.48		○	
			-0.46	0.02		
			0.69		△	
			-0.53	0.16		

実験はガイダンス種類毎に2回行い、実験結果は道路条件及び走行条件毎に分割し平均処理を行った。目標精度は磁気マーカ方式と同様に±50cmとした。

コックピットビューでは、直線部の除雪時においては目標精度を達成できたが、直線部の回送時と曲線部の除雪時では、左右方向の最大離隔距離が50cmを超える箇所があった。しかし最大離隔距離範囲では1m以内に収まっていることから概ね目標精度を満たしていると評価した。

バードビューでは、直線部の回送時と除雪時においては目標精度を達成できた。曲線部の除雪時では最大離隔距離範囲が1mを超えているため目標を達成できていない。2Dビューはコックピットビューと同様の結果とな

った。一方、比較のため実施した目視による通常走行では、直線部の回送時と除雪時は目標精度内で走行できたが、曲線部では最大離隔距離範囲が1mを大幅に超える結果となった。

通常走行とガイダンス種類毎の平均離隔距離を比較すると、直線部の回送時及び除雪時では、通常走行とバードビューの平均値は小さく道路中央寄りに走行する傾向が見られた。また、コックピットビューと2Dビューは、左方向に偏る傾向が見られた。

曲線部では目視による通常走行でも左方向に偏る傾向があり、2Dビューは同様の傾向を示したが、コックピットビューとバードビューでは、緩和される傾向が見られた。通常走行では、路面状況が圧雪のため中央線や外側線が視認できなかったことから、道路中央より左寄りに走行したものと考えられる。一方コックピットビューやバードビューでは、ガイダンス画面上に区画線や走行目安が表示されているため、バラツキはあるものの道路中央に沿って走行することができた。

アンケート評価結果を図-6に示す。

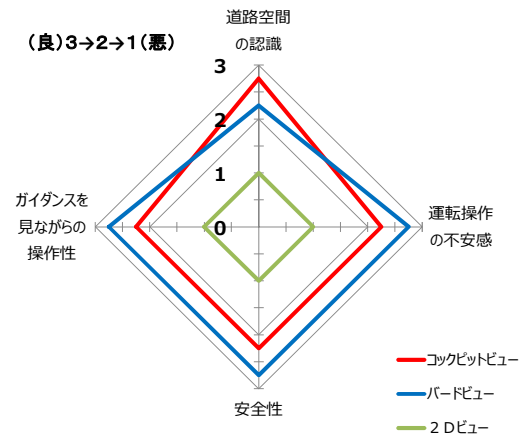


図-6 アンケート評価結果

アンケートはオペレータ2名に対し、道路空間の認識、ガイダンスを見ながらの操作性、運転操作の不安感、安全性について、ガイダンス種類毎に評価の高い順に採点をしてもらった。道路空間の認識については、目視による視界に近いコックピットビューの評価が高かったが、それ以外の項目はバードビューの評価が高かった。2Dビューについては全ての項目で評価が低い結果となった。

オペレータへのヒアリングでは、除雪車モデルと3D地図との位置合わせに慣れが必要だが、慣れると走行に支障はないことがわかった。

また、3D地図に背景があるため位置関係を把握しやすく、特にバードビューは俯瞰のため道路の先を見通せ、距離感を掴みやすかった。但し、バードビュー、コックピットビューともに曲線部の出入りではハンドル操作の遅れが生じる場合があるため、ある程度の習熟は必要と思われる。また、画面を見ながらの運転でも画面酔いをするのではないことが確認できた。

ガイダンス性能の検証実験の結果、コックピットビュー及びバードビューでは、視界を遮断した状況においてもガイダンス情報に従って車線逸脱することなく除雪作業が可能なのが確認できた。また、オペレータへのヒアリングの結果、バードビューが最も高い評価を得た。

4. まとめ

本稿では、暴風雪による視程障害時でも安全に除雪作業が行える運行支援技術として、磁気マーカシステムと IMU を用いた自車位置推定システムの車線走行支援ガイダンスを試作し、除雪車の前方視界を遮断した状態でガイダンス情報に従って車線内を走行する実験を行った。

車線走行支援ガイダンスは、目標測位誤差（±50cm

以内）で自車位置を表示し、車線逸脱することなく除雪作業が可能であることを確認した。

今後は、主たる測位方法である衛星測位（みちびき等）に関する一般道での検証試験を行う予定である。

参考文献

- 1) 中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転ビジネスモデル検討会：道の駅を拠点とした自動運転サービス「中間とりまとめ」（案），2018年
- 2) 佐藤昌哉，宗広一徳，片野浩司，新保貴広，他：自動運転技術の活用による運転支援及び道路構造・管理に関する共同研究報告書，共同研究報告書第523号，2021年
- 3) 新保貴広，山口洋士，久慈直之，視程障害時における除雪車運行支援技術に関する検討，寒地土木研究所月報、No.798、pp.25-31、2019.