

除雪機械の操舵支援技術に関する研究

吉田 正*

荒井 猛**

平下浩史***

A Study on Automatic Steering Support System for Snow Removers

YOSHIDA Tadashi

ARAI Takeshi

HIRASHITA Hirofumi

要旨

日本における積雪寒冷地域での道路除雪作業は、主として機械除雪で行われており、その運転操作は、道路の沿道条件や安全性の確保の観点より、通常オペレータと助手の2名体制で行われている。そこで、機械除雪の従事者の負担を軽減し、将来の省力化、省人化を目指して、除雪機械の自動操舵技術の開発を進めている。

本報文では、近年、ITS (Intelligent Transportation System = 高度道路交通システム) 分野で開発が進められてきたレーンマーカシステムと RTK-GPS 技術、GIS 技術を活用し、除雪機械の中で最も操作が難しい機種とされるロータリ除雪車を対象として開発した自動操舵技術について、その開発技術の内容並びに実機を使用した実証実験の結果を述べるとともに、それぞれの制御方式毎の評価と今後の課題について報告するものである。

キーワード: ロータリ除雪車、自動操舵、ITS、GIS、GPS

Synopsis

In cold and snowy parts of Japan, most snow is removed from roads by mechanical snow removers, and to deal with roadside conditions and guarantee safe operation, these machines are normally operated by two people: an operator and an assistant. Work is in progress to develop automatic steering systems for snow removers in order to lighten the burden on snow remover operating staff and to reduce future labor requirements.

This report describes an automatic steering system that incorporates three technologies: the lane marker system that has been developed in recent years as an ITS technology, RTK-GPS technology, and GIS technology. This steering system has been developed for rotary snow removers: the type of snow remover considered to be the most difficult to operate. The report also evaluates the three control methods based on the results of corroborative testing done using actual snow removers and outlines problems with these control systems that must be overcome to establish a working system.

Keywords: Rotary snow remover, automatic steering, ITS, lane marker, GIS, GPS

* 技術推進本部先端技術チーム 主席研究員
** " 主任研究員
*** " 研 究 員

除雪機械の操舵支援技術に関する研究

目次

1. まえがき	3
2. 研究目的および内容	3
2. 1 ITS及びIT関連分野の既開発技術を活用したロータリ除雪車の自動操舵システムの構築	3
2. 2 開発された自動操舵システムの実用性検証	3
2. 3 研究の実施経緯	4
3. ロータリ除雪車の運転操作支援技術の現状と課題	4
3. 1 自動操舵運転への従来の取り組み経緯	4
3. 2 自動操舵運転に既存技術を活用する際の課題	4
3. 2. 1 横滑り等外乱に関する課題	5
3. 2. 2 離散的配置のマーカによる低速走行に関する課題	5
3. 2. 3 道路上でのGPS利用に関する課題	5
4. ロータリ除雪車操舵支援システムの技術開発	6
4. 1 概要	6
4. 2 ロータリ除雪車の挙動特性	6
4. 3 操舵制御アルゴリズムの検討	7
4. 3. 1 軌道追従制御	7
4. 4 レーンマーカ・センサによる制御ソフトウェア検討開発	8
4. 4. 1 操舵角算出口ジック	9
4. 4. 2 電波式マーカセンサ位置検出方法	9
4. 4. 3 磁気式マーカセンサ位置検出方法	12
4. 5 GPS/GISによる制御ソフトウェア検討開発	13
4. 5. 1 GPS/GISによる操舵角算出口ジック	13
4. 5. 2 道路GIS	15
4. 5. 3 RTK/GPS	15
5. テストコースによる検証実験	16
5. 1 実験目的	16
5. 2 実験方法	16
5. 2. 1 実験における確認項目	16
5. 2. 2 実験結果の評価方法	16
5. 2. 3 実験方法の検討	17
5. 2. 4 実験条件	19
5. 2. 5 実験収集データ	19
5. 3 実験結果	20
5. 3. 1 除雪作業性能	20
5. 3. 2 制御性能評価	21
5. 3. 3 自動操舵システム稼働時の安全性検証	23
5. 3. 4 振動測定結果	24
5. 3. 5 レーンマーカ設置歩掛かり	24
6. 結論	25
6. 1 実験結果に至る前提	25
6. 2 研究開発結果の整理	25
6. 2. 1 ITS及びIT関連分野の既開発技術を活用した自動操舵システムの構築について	25
6. 2. 2 開発された自動操舵システムの実用性について	26
6. 3 結論およびまとめ	26
7. 今後の課題	27
【参考文献】	27

1. まえがき

我が国における積雪寒冷地域は、北海道全域、本州中央山岳地帯および日本海側のほとんど全域に広がっている。その面積は全国土の約60%を占め、全人口の約20%が暮らしている。現在雪害事業として行われている道路除雪は、これらの積雪寒冷地域の産業振興と地域住民の生活安定・向上を目的とした冬期道路交通を確保するために極めて重要なものとなっている。さらに国民のニーズの多様化により、これらの地域においても、そうでない地域と同じような交通ができるような冬期道路管理が求められている。

一方、日本の雪は諸外国に比べて降雪量が多く、湿っており、さらに凍結と融解がくり返されるため、道路交通確保のための雪氷対策には毎年多くの労力と費用が必要なものとなっている。このため、各種の除雪機械が冬期道路管理に投入され、先人のたゆまぬ努力により除雪作業の効率化が図られてきた。しかしながら、現状の道路管理水準を確保するためには将来予想される除雪コストの増大、熟練オペレータの高齢化による不足などが懸念されている。これらの課題に対処するため、一層の除雪作業効率化、低コスト化および操作の簡易化が求められている。

我が国の道路除雪作業にて使用される除雪機械の運転操作は、車両の操縦を担う運転手と除雪装置の操作を担う助手の2名体制で行われるのが一般的である。中でもロータリ除雪車は、道路の拡幅除雪を行うために路肩に極力接近して走行するとともに、雪の投雪方向を決めるシュート操作は、投雪先の安全を確認しつつきめ細かく操作を行う必要があり、操作がもっとも難しい機種といわれている。

このような背景の中、土木研究所ではロータリ除雪車の操舵の自動化、すなわちワンマン化について、近年発展の著しいITS技術等を適用することで実現させる技術開発を平成12年度から平成13年度まで実施した。

本報告は、ロータリ除雪車の自動操舵技術の研究開発において、そのままでは利用できない各種の既存要素技術をロータリ除雪車用に適用させるため、土木研究所が取り組んだ自動操舵システムの開発内容およびこれらを使用して行った実証実験の内容と結果について報告するものである。

2. 研究目的および内容

本研究開発は、次の2点を主な目的としている。

①ITS及びIT関連分野の既開発技術を活用したロータ

リ除雪車の自動操舵システムの構築

②開発された自動操舵システムの実用性検証

2.1 ITS及びIT関連分野の既開発技術を活用したロータリ除雪車の自動操舵システムの構築

自動操舵走行を実現するには、常時、車両自身の位置を正確に把握することが必要である。そこで、ITS分野ですでに開発された車位置特定技術であるレーンマーカ・センサ技術と測量等において普及が進んでいるGPSシステム、道路分野でも構築がすすめられている地理情報システム(GIS)の活用を検討した。既存技術を活用することで、開発コストの縮減も図ることができると考えたためである。しかしながら、開発済みのレーンマーカ・センサ技術は、一般乗用車用のもので、低速走行かつアーティキュレートという中折れ式の操舵方式を持つロータリ除雪車にそのまま適用させることができない。このため、レーンマーカ・センサによる自動操舵技術の制御アルゴリズムをロータリ除雪車の特性に合わせたものとすべく新たに開発した。さらに、GPS/GISを取り入れた新たな自動操舵システムを検討・開発し、これらのシステムを併用することで、実用性が高いと考えられるロータリ除雪車用自動操舵システムの構築に取り組むこととした。

2.2 開発された自動操舵システムの実用性検証

今回開発される自動操舵システムは、将来的にワンマンオペレーションを実現させるひとつのステップとして考えることができる。開発された自動操舵システムは実用化を前提としたものであり、実際の除雪作業を通じての作業効率、安全性、オペレータの受容性などの機能検証が必要である。

ロータリ除雪車が行う除雪作業は一般乗用車の走行と異なり、凍結した路面での横滑りや作業装置からの反力といった車両の走行に対する外乱が予想され、自動操舵を一層困難なものにしていると考えられる。さらに低速走行、中折れ操舵機構といったロータリ除雪車の特性を考慮しなければならない。

このための検証実験を実際の除雪作業と同等の条件で行うこととした。これは新たに開発された自動操舵システムが実際の除雪作業において、どの程度の実用性・有効性を有しているか、実用上の課題・問題点は何かなどを評価、検証することをねらいとしている。そして、この検証実験結果から、本システムの実用化の可能性を検証するものである。

2. 3 研究の実施経緯

土木研究所では、平成10年度よりITS技術を応用し道路の維持管理作業・除雪作業の合理化を図る方策のフィジビリティ調査に着手し、除雪作業への活用が有効であるとの結果を見出した。そこで平成12年度より、実際のシステムにおける実現可能性を検証するため、レーンマーカ・センサ技術やGPS/GIS技術を活用したロータリ除雪車の自動操舵システムの研究を行った。

平成12年度には、制御アルゴリズムに関する基礎的な検討を行い、平成13年度は、この制御アルゴリズムに基づくプロトタイプシステムを開発し、これによる自動操舵走行が可能となるロータリ除雪車による検証実験を行ったものである。

本研究において、土木研究所ではレーンマーカ・センサ技術やGPS/GIS技術を活用する際のロータリ除雪車への搭載方法とそれに基づく制御アルゴリズムの開発、検証実験および評価を行った。なお、センシング技術としては、一般の自動車用にすでに開発されていたレーンマーカ・センサを低速走行用のスペックで調達するとともに、GPSシステムは、高精度の検出が可能な市販のRTK-GPSを採用した。また、土木研究所で提案した制御アルゴリズムに基づく制御システムの構築は、システム設計、プログラム作成並びに実装に関しては専門業者に対する外注により実施した。

これらによるプロトタイプシステムは、2002年1月の第11回国際冬季道路会議札幌大会（PIARC2002）などで公開された。

3. ロータリ除雪車の運転操作支援技術の現状と課題

日本における機械除雪作業では、前述の通り車両本体の運転操作を行うオペレータ、除雪作業装置を操作する助手のあわせて2名が乗務している。このうち、車両本体の運転操作を行うオペレータの操舵作業を支援する技術を確立することでこの除雪機械のワンマン化を図ることができれば人件費が削減でき、将来的な除雪コストの削減が期待できる。また、作業装置操作を簡略化すれば未熟練オペレータでも除雪効果のある除雪作業を行うことができる。

このため、国土交通省では、従前より除雪機械に関する各種の自動化に取り組んでおり一部を実用化している。その中で、ロータリ除雪車のワンマン化を目指した自動化技術の開発に取り組んだ経緯がある。

昭和60年度からの4年間で、レバー操作が煩雑で熟練を要する投雪シュートの操作自動化に取り組み、部分的な

自動化を可能とする成果は上げている。さらに平成元年からの5年間では操舵の自動化に取り組まれているが、実用化には至っていない。最近、最新のITSやIT関連技術を活用したシステムの研究が進められつつあり、本研究もその一環として位置付けられる。

以下、国土交通省におけるロータリ除雪車の自動操舵運転を目指した技術開発について、経緯と課題を述べる。

3. 1 自動操舵運転への従来の取り組み経緯

ロータリ除雪車の作業速度は0.4～6km/hと低速である。そのため車両の運転を担当するオペレータは、作業時の走行位置を、道路側端の縁石に対して、接触を回避しながら極力沿うようにコントロールすることを目標として運転を行っている。

この運転操作を自動化するためには高い精度での位置検出が必要となる。この位置検出では、走行目標ラインの設定と、目標ラインとのズレを補正するための自車位置検出の2つの要素が不可欠である。これらを実現する技術として次の方法が検討されてきた。

平成元年からの取り組みでは、道路に走行目標ラインとなる目印を線的に設置し、ロータリ除雪車はその目印を常に検出しながら走行させる方式が検討された。この目印は、走行目標ラインと自車位置の検出を兼ねることができ、さらに道路に設置することで、作業条件に左右されず常に高精度かつ普遍の位置検出を実現できる。しかし、この方式では、目印の設置が可能であれば、どの区間においても自動運転が可能である反面、延長が長くなるほど、設置コストが膨らむという課題もあった。

このような方式の一つとして、フェライト磁性体の帯による研究開発がなされたが、タイヤの横滑りの問題や道路の表面に貼り付けるための摩耗、コスト等により実用化には至っていない。

3. 2 自動操舵運転に既存技術を活用する際の課題

前項のような問題に対応して自動操舵システムを開発するには、高精度で実用的な完成度の高い位置検出を行うことができる技術が必要である。近年、ITS、GPS、GISなどの最新の技術の活用が期待されており、本研究開発はこれに対応するものである。

自動操舵運転において、既存の技術を活用する際に考えられる課題は次の通りである。

- ① 凍結した路面における横滑りや作業装置からの反力などの外乱が見込まれる除雪機械におけるステアリングの自動制御は実現されていない。
- ② 低速走行でアーティキュレート式の除雪機械を、走

行軌道上に離散的に配置されたマーカを道標として目標軌道に沿って走らせる技術が未開発である。

- ③ GPS の利用においては、道路上において GPS のデータに基づいて実機が自動操舵走行するシステムは例がない。

3. 2. 1 横滑り等外乱に関する課題

凍結路面での横滑り現象は観察されているが定量的な解析は未実施であり、解析がなされても路面状態を検出し制御に反映させるためには高度なセンシング技術が必要と考えられ、これらの解決のためには多くの時間と労力、費用が必要になることが見込まれる。また作業装置からの反力に関しても、ロータリ除雪車が作業を行っているときに受ける反力に関して定量的な計測・分析は行われておらず、作業対象の雪堤の雪質、雪量も作業箇所により大きく変わることが予想されることから、詳細な解析に基づく制御技術の開発は短期間では困難と見込まれる。

したがって、今回 ITS 技術を活用したロータリ除雪車の自動操舵システムの実用化可能性を検証するには、上記のような外乱がある場合でも、実際のロータリ除雪車の作業性能を踏まえつつ、より実地的な対応技術の可能性を見出していくことが必要と考えられた。

3. 2. 2 離散的配置のマーカによる低速走行に関する課題

レーンマーカ方式によるステアリング制御は、AHS における自動操舵走行実験で可能であることが実証されているが、これは一般自動車の 20km/h 程度以上の場合でマーカとマーカの間の時間が 0.7 秒程度と比較的短い（マーカ間隔 4m）。これに対して、ロータリ除雪車では走行速度が例えば 2km/h 程度と低速で、マーカとマーカの設置間隔を 2m と狭くしても、前のマーカを検出してから次のマーカを検出するまでに 3.5 秒ほどかかることになり、その間に前項①に述べた外乱が蓄積され影響を与えるおそれが高くなる。

また、マーカが離散的に設置されており、マーカの設置間隔は状況に応じて必ずしも一定に保てないと考えられることから、マーカの設置間隔が変化しても安定して目標軌道に追従できる制御方式が必要である。

さらに、マーカの設置コスト低減の面からも、マーカ設置について、道路の曲線部などの変化があるところでは密に配置するが、変化の少ない道路形状ではできるだけ広く取るなど、設置間隔を変化させることが可能であることが望まれる。

このように、低速走行の機械で、離散的に配置されたレーンマーカによって目標軌道に沿って走らせる技術は提案されていない。

3. 2. 3 道路上での GPS 利用に関する課題

GPS は急速に利用、普及が進んでいるが、そのほとんどは、車両などの位置を検出するための利用であり、その結果は、グラフィックスへの表示などによって人に情報として提供されたり、計測結果としてデータベースに蓄積されたりするものである。その結果に基づいて、リアルタイムで機械の走行などを制御するシステムは比較的に少ない。その中でも、従来は、航空機、船舶など広い自由空間を移動するものへの活用が主であった。地上における作業機械では最近、農業機械で自動走行させ農作業を行う技術が開発されている。

これに対し、今回のロータリ除雪車では、路側に堆積した雪を除去するため、路側の線形に沿って走行する必要がある、走行軌道は実際の道路構造物との相対位置において高い精度で確保される必要がある。RTK-GPS という高い検出精度が期待できる方式を活用するにしろ、道路の路側のように縁石等の実構造物がすぐ近くに存在する空間で自動操舵走行させるには、実証的な取り組みが不可欠である。

また、道路における目標軌道のデータをどのように与えるかという点については将来実際の現場における利用を行う場合の利便性、コストに大きく影響を与える。そこで、現在導入が検討されている「道路GISシステム」におけるデータを利用できるような手法を考えておく必要がある。

4. ロータリ除雪車操舵支援システムの技術開発

4.1 概要

ロータリ除雪車の自動操舵を行うには走行目標に対する自車位置の特定と走行すべき目標軌道の特定が必要である。このため、ITS分野で開発されたレーンマーカ・センサシステム並びにGPS/GIS技術の適用を検討した。

レーンマーカ・センサシステムは、目標軌道に沿って、ある間隔をもって舗装路面下数センチに埋設されたマーカの位置を、車両の下面に設置したセンサで検出し、自車の位置を特定するものである。このシステムには、強力な永久磁石をマーカとした磁気式と電波によりマーカを検知する電波式の2方式がある。

また、レーンマーカからの位置情報は離散的でマーカ間での制御精度の確保に課題があることが予想されることから、もう一つの方式として、ほぼ連続的に位置特定が可能なGPSと道路の形状を表したGIS情報を活用する方式も有効と考えられる。

今回は、前記の磁気式、電波式の両レーンマーカ方式とGPS/GIS方式を採用し、さらにレーンマーカとGPS/GISの併用方式についても検討した。

本研究では、車両の横滑り等の外乱への対応、離散的に配置されたマーカを低速走行で利用する手法の開発、自動操舵へのGPS及びGISの活用可能性の確認等を考慮しつつ、上記の技術を活用した制御アルゴリズムの開発並びにこれに基づく自動操舵システムの実用性を検証するためのプロトタイプシステムの開発を行った。(図-1)以下にその内容を記述する。

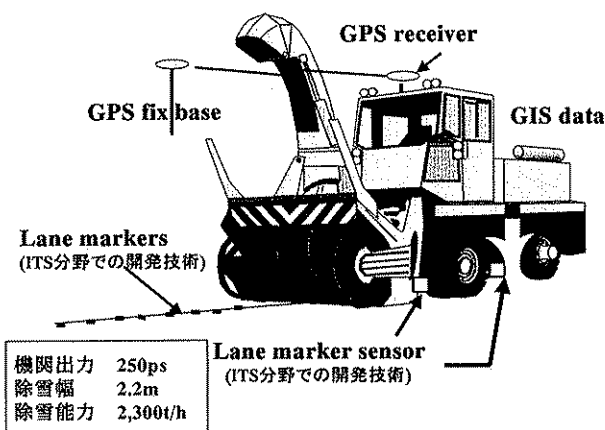


図-1 ロータリ除雪車操舵支援システム概要図

4.2 ロータリ除雪車の挙動特性

ロータリ除雪車は、次に述べる2種類の除雪作業に

供されている。

(1) 拡幅除雪作業

除雪グレーダーや除雪トラック等のプラウ系除雪車により、路肩に堆積させた雪（雪堤）を道路外に投雪し、道路の有効幅員を確保する作業。

(2) 運搬排雪作業

路肩の雪堤を道路外に投雪できない区域において、ダンプトラックを用い、ロータリ除雪車はダンプに雪堤を投雪・積み込みし、道路外に運搬する作業。

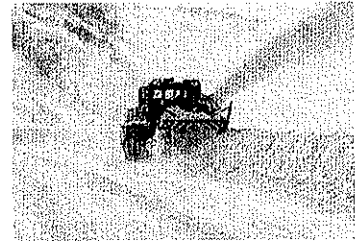


写真-1 拡幅除雪

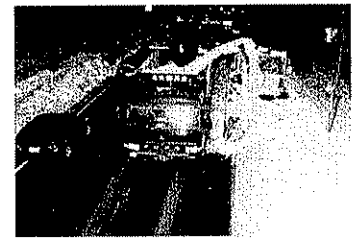


写真-2 運搬排雪

ロータリ除雪車の操舵機構は、建設機械で多く用いられている図-2に示すようなアーティキュレイト方式である。この操舵は、車体の前部と後部を連結するピンを中心に屈折することで行う方式で、一般の車両に用いられてフロンホイールステアリング方式と異なった特性を持つ。

具体的な特徴として、アーティキュレイト方式はステアリング操作地点において目標進行方向に車体が向くことにより、目標軌道上への応答性が良く、小回りが効く利点がある。また、前輪と後輪の走行軌跡が同一線上を描く（内輪差がない）。

反面、ステアリング応答性が良いため小刻みな挙動を示し、直進安定性はフロンホイールステアリング方式に比べ劣っている。

前述の通り、ロータリ除雪車では路肩（左）側の雪堤を排除する作業を担うことより、除雪能力の範囲内でより多く除雪を行うためには、雪堤にオーガ（ロー

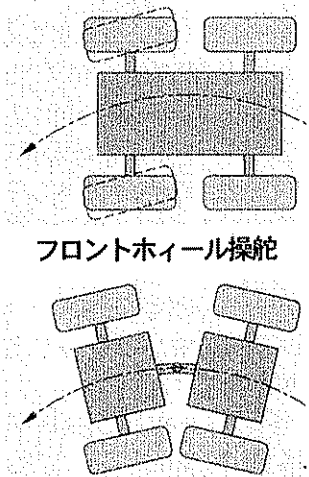


図-2 操舵方式¹⁾

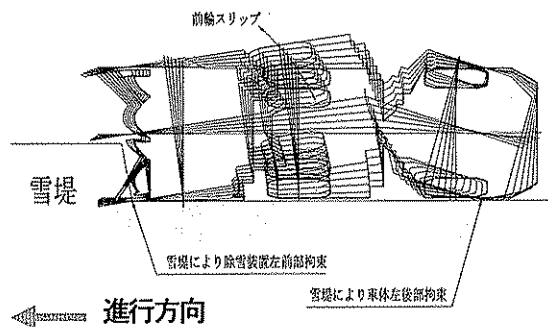


図-3 除雪作業時のロータリ車の挙動

タリ作業装置)を切り込ませる必要がある。(図-3) フロントホイールステアリングのステアリング操作は車輪の舵角は操作できるが、車体の軌道変換はできないため、オーガの側面が雪堤にあたり、切り込ませることができない。一方、アーティキュレート方式はステアリングで、車輪、車体共に軌道変換が可能であるため、雪堤に雪堤に切り込ませることが可能である。ただし、雪堤に車体を押しつけ除雪を行うため、雪堤より常に反力を受けながら走行することとなる。除雪作業時の走行路面は積雪や圧雪、時には凍結していることもあり、有効な除雪作業を実施するために必要な路面摩擦係数が確保されていないことが多い。

したがって、ロータリ除雪車はその雪堤の反力に負け、横滑りが発生しており、オペレータはこの横滑りを軌道修正しながら走行させている。

4. 3 操舵制御アルゴリズムの検討

今回の開発では、ロータリ除雪車の走行(作業)の目標軌道がITSやGISにより自車で認識できることを前提としている。そこで、アーティキュレート方式のロータリ除雪車の操舵を自動で制御するために採用した方式は、目標軌道にステアリングを合わせる「軌道追従制御方式」とした。

ロータリ除雪車などの移動車両の動力学は非ホロノミックな拘束(力学系の拘束が一般化座標 x と時間 t の関数として $f(x, t) = 0$ で表せるか、これに帰着されるホロノミックな拘束以外のもの)を受ける運動方程式で表わされ、多くの軌道制御が提案されている。制御手法を検討するにあたり、今回はこれらのうちから、車両系の制御に適当な非線形制御理論を用い、「厳密な線形化手法」と「時間軸変換」を採用した²⁾。この方法の定式化では、前述の除雪車特有の横滑りは考慮されないが、今回は、車体の横滑りを外乱(制御対象の状態を変化させる外的要

素)として扱うことのできる後述する積分型のサーボ系といわれる制御則を構成した。

以上の考え方を踏まえ、今回の開発では、次項で述べるとおり、PID制御を用いてシステムを構築した。

なお、PID制御は次のような特徴を持つ制御方式である。自動操舵における走行目標と自車位置との差(この場合横ずれ量)を偏差とする。この偏差が大きくなれば操作量もそれに応じて大きくなるのが適当であるので、制御則には偏差に比例する項(比例ゲイン P)を含める。また、自己平衡性をもつ制御対象に比例制御のみを行うと、目標値や外乱のステップ状変化に対して最終的に一定の偏差が残ってしまうが、偏差の積分に比例する項(積分ゲイン I)を制御則に含めることで除去することができる。さらに偏差の増減の動向を操作量の決定に反映させ、制御特性の改善を図るため偏差の微分に比例する項(微分ゲイン D)も制御則に含める。

これらの3項を含む制御則がPID制御であり、比例制御を主体として補助的に積分項や微分項を組み合わせている。この制御方式を構成することで偏差を限りなく小さくすることができ、目標軌道に近づけることが可能となる。

4. 3. 1 軌道追従制御³⁾

本開発システムで使用された軌道追従制御は、レーンマーカ・センサまたはGPS/GISで自車位置を特定し、走行目標との横ずれ量の計算、それを補正するための操舵を自動で行うフィードバック制御を基本としている。

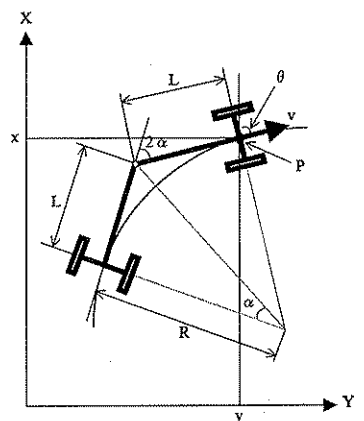


図-4 座標系

図-4において除雪車の連結ピン部から前部車輪及び後部車輪までの距離を L とおく。前部車両に対する連結ピン部折れ角を 2α としたとき、除雪車が通る軌道は半径 $R=L/\tan\alpha$ の円弧となる。前車輪中心点 P での軌道接線方向速度ベクトルを v 、接線方向角を θ としたとき、 P 点の運動方程式は次で記述できる。

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \cos \theta \\ \dot{y} &= v \sin \theta \\ \dot{\theta} &= \frac{v}{R} = v \frac{\tan \alpha}{L}\end{aligned} \quad \cdots \cdots ①$$

「時間軸変換」の考え方に基づき、①の $\dot{y}$ 、 $\dot{\theta}$ を距

離軸 x に対する微分方程式 $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d\theta}{dx}$ に変換する。

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \tan \theta \\ \frac{d\theta}{dx} &= \frac{\dot{\theta}}{\dot{x}} = \frac{1}{L \cos \theta} \tan \alpha\end{aligned} \quad \cdots \cdots ②$$

②式について厳密な線形化を行う。座標変換 $\phi = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ \tan \theta \end{pmatrix}$ とおくと、②式は③式の線形状態方程式に変換される。

$$\frac{d\phi}{dx} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \phi + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u \quad \cdots \cdots ③$$

ただし、

$$u = \frac{1}{L \cos^3 \theta} \tan \alpha \quad \cdots \cdots ④$$

③式に対して状態フィードバック制御 $u = f_1 \phi_1 + f_2 \phi_2$ を施すと、除雪車の操作量である中折れ角 α は、④式より次式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ (f_1 y + f_2 \tan \theta) L \cos^3 \theta \right\} \quad \cdots \cdots ⑤$$

⑤式を実現する場合、図-5に示すフィードバック信号 y (横ずれ量) 及び θ (接線方向角度) の検出が必要となる。

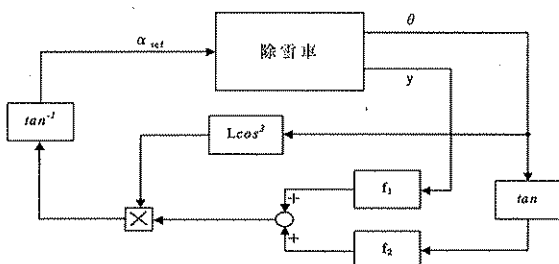


図-5 制御ブロック図

横滑りによる定常偏差を無くすために、積分型のサーボ系(積分項を含む系)の構成を考える。

状態フィードバック制御 $u = f_1 \phi_1 + f_2 \phi_2$ において、1型のサーボ系を設計する。

$$u = f_3 \int (y - y_{ref}) dx + f_1 \phi_1 + f_2 \phi_2 \quad \cdots \cdots ⑥$$

ここで、 $dx = v \cos \theta dt$ であるから

$$u = f_3 \int (y - y_{ref}) v \cos \theta dt + f_1 \phi_1 + f_2 \phi_2 \quad \cdots \cdots ⑦$$

となり、操作量 α は次式となる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left[L \cos^3 \theta \left\{ f_3 \int_0^t (y - y_{ref}) v \cos \theta dt + f_1 y + f_2 \tan \theta \right\} \right] \quad \cdots \cdots ⑧$$

ここで f は制御ゲイン(制御の調整値)であり、⑧式より、 f_1 は比例ゲイン(P)、 f_2 は微分ゲイン(D)、 f_3 は積分ゲイン(I)を示し、PID制御を用いてシステムを構築した。

この制御ブロック図を図-6に示す。

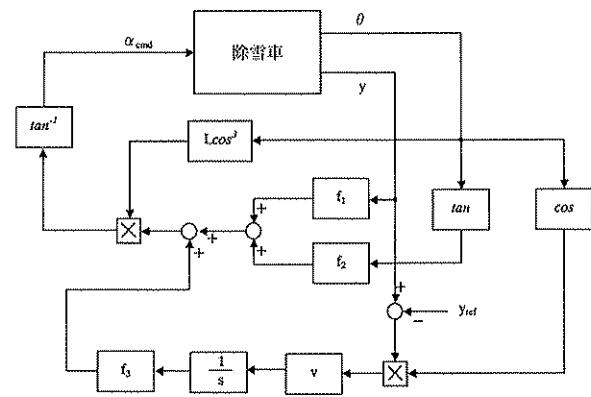


図-6 積分型サーボ系の制御ブロック図

4.4 レーンマーカ・センサによる制御ソフトウェア検討開発

レーンマーカ・センサは ITS(Intelligent Transportation System) 分野で開発された AHS(Advanced Cruise-Assist Highway Systems)の要素技術であり、車線逸脱防止支援に供されようとしている。(図-7)

システムの構成は、レーンマーカ、レーンマーカセンサ、検出器となる。今回採用したレーンマーカ・センサは、国土交通省により開発されたものを調達したが、制御アルゴリズムおよびプロ

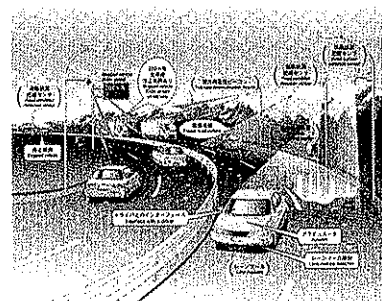


図-7 AHSのイメージ⁴⁾

グラムはロータリ除雪車用として、新たに開発して活用した。

レーンマーカは走行目標軌道上の路面下約数cmの所に埋設され、信号を発信する。レーンマーカセンサは車両の下面に設置され、レーンマーカ通過時にマーカの信号を受信し、位置を特定するシステムである。

なお、このレーンマーカシステムには検出方式の違いで、電波式と磁気式の2種類がある。

4. 4. 1 操舵角算出口ジック

ロータリ除雪車等の移動車両を目標軌道に追従させ走行させるには、目標軌道の情報の他に、現在の自車位置の把握が必要になる。この2つの位置の相対差(ずれ量)を減少するように操舵を行うことで、目標軌道上への走行が可能になる。操舵を行うには、操舵角の算出が必要になる。

目標軌道上を円滑に走行するには、操舵をよりきめ細かく行う必要がある。すなわち、目標軌道と現在の自車位置の相対差を連続的に取得し、その都度操舵を行えば良いということになる。ただし、レーンマーカはある間隔をもって路面に埋設されるため、得られる情報は連続でなく離散している。

レーンマーカは、道路に設置されるインフラである。マーカの埋設間隔は、操舵の制御上は密であるのが望ましいが、コスト面からは、粗であることが望ましい。ただし、急なカーブや交差点等の操舵制御量が大きい区間では、制御システム構築の観点より設置間隔を密にする必要がある。したがってマーカの設置間隔は道路線形によって異なり、マーカを通過するまでは設置間隔が未知であることが考えられる。

そこで、目標軌道上のマーカ設置間隔が未知(次のマーカまでの距離が不明)であっても自動操舵が可能な2列配置のセンサを持つ新しいシステムを以下のとおり構築した。

これまでITS分野で開発されてきたレーンマーカセンサのように1列配置の場合、ステアリング制御(図-8左)で必要となる横偏差及び方位角偏差 y_m 、 ψ_m はセンサ信号 y_{m1} と他にマーカの設置間隔の情報が必要となる。しかし、レーンマーカセンサを2列設置し、車軸前後センサのマーカ受信位置の相対差を比較することで、未知である(一定でない)マーカの設置間隔に次のように対応することができる。

センサが2列の場合(図-8右)では、マーカ通過時に計測されるセンサ信号 y_{m1} 、 y_{m2} の2つをお互いのセンサが次のマーカを通過するまで保持し、横

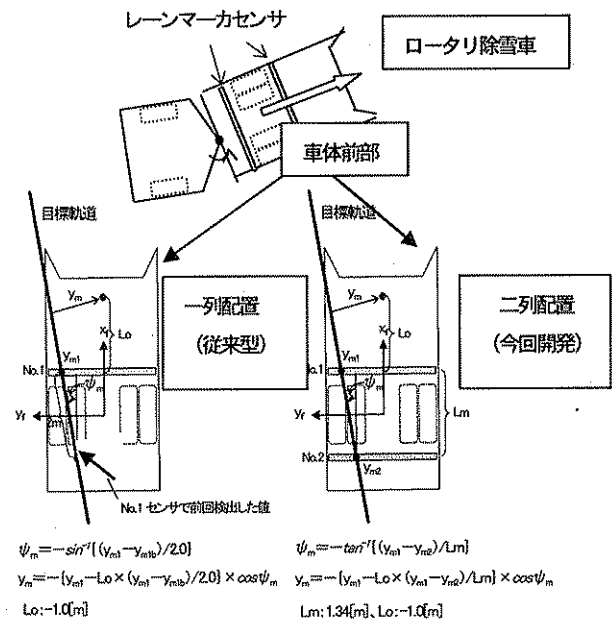


図-8 操舵角算出口ジック

偏差及び方位角偏差 y_m 、 ψ_m を近似的に算出することで、マーカの設置間隔が不明であってもステアリング制御が可能となる。なお、レーンマーカセンサは、ロータリ除雪車の車幅全域を検知できるものを採用した。

4. 4. 2 電波式マーカセンサ位置検出方法

電波式レーンマーカ・センサシステムは、車両に搭載された検出装置から送信アンテナを用い路面に向けて電波を送信し、電波マーカがこの送信電波を受信すると2倍の周波数の電波で返信する。この返信電波を車両側の受信アンテナで受信し、マーカと車両間の通信を行うことで、位置検出を行う(図-9)。

マーカ軌道上の位置(縦方向)は、100msecサイクルの送信電波により、

反射電波のピーク値を検出することで判断する。

道路横断方向の位置(横方向)は、車幅方向に6個設置された受信アンテナが、電波マーカからの反射電波を2つ以上のアンテナ

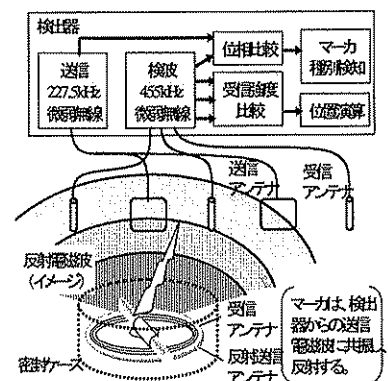


図-9 電波マーカシステム構成

ナで受信し、その時の受信強度値を三角測量法でアン

テナ間の距離を演算し、マーカ位置を検出する⁵⁾。

この装置の仕様は次の通りである。

(1) 装置性能

- ・横位置検出範囲 : 2,000mm(有効値)
- ・横位置検出精度 : $\pm 25\text{mm}$ (設置高 300mm、2m 間隔、アスファルト路面にて)
- ・検出応答性 : センサデータ更新周期 100msec、マーカ通過後 100mm 以内に通過を検出する

- ・検出対応車速(S) : $0 < S \leq 10\text{km/h}$
- ・検出器設置高さ : 200~300mm(調整可)
- ・許容変動高さ : -50~+150mm
- ・環境温度(下限値) : -30℃(検出部)

(2) レーンマーカ(写真-3)

- ・受信周波数 : 227.5kHz
- ・送信周波数 : 455.0kHz
- ・外形寸法 : $\phi 118 \times$

H30mm

- ・外装ケース : PPS 樹脂一体成形
- ・電源 : 電源不要

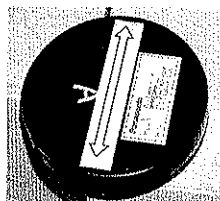


写真-3 電波マーカ

(3) 車載検出器(図-10)

- ・センサ数 : 受信アンテナ 6 個
- ・センサ配列 : 送信アンテナ 1 個の両側に受信アンテナ 2 個配置
- ・必要離間距離 : 必要とせず
- ・送信周波数 : 227.5kHz
- ・送信出力 : 微弱無線規格内
- ・受信周波数 : 455.0kHz
- ・消費電力 : 12V 0.9A 以下

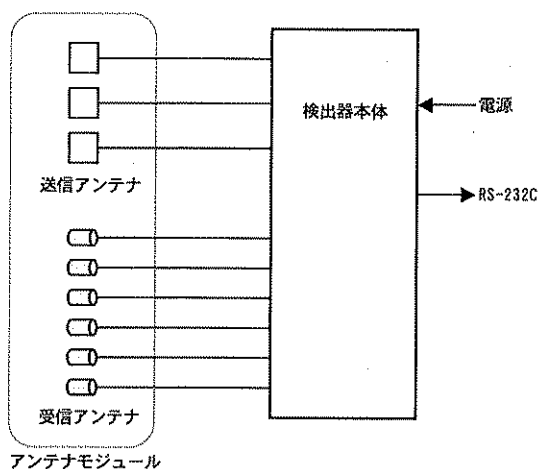


図-10 車載検出器の構成

(4) インターフェイス(図-11)

- ・接続方式 : RS-232C
- ・通信方式 : 単方向通信
- ・データ伝送方式 : 固定長シリアル伝送
- ・伝送速度 : 19.2kbps
- ・データフォーマット

項目	設定内容
スタートビット	1ビット
データ長	8ビット
パリティ	奇数
ストップビット	1ビット

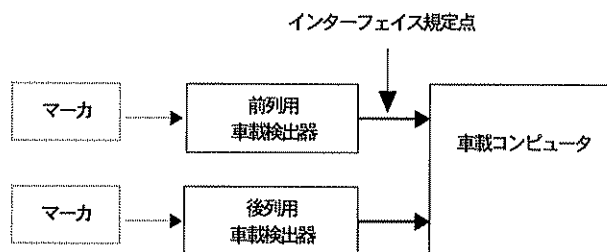


図-11 インターフェイス関連図

・フレーム構成

STX : 1byte 02H 固定

種別コード : 1byte

81h : ピーク時横位置検出結果

83h : 検出器ステータス

84h : 100msec 検出結果通知

(マーカ無し時)

85h : 100msec 検出結果通知

(マーカ検出時)

検出器メッセージ : 6byte

ETX : 1byte 03H 固定

BCC : 1byte 水平 BCC 偶数

(種別コード~ETX までの EOR)

STX	種別コード	検出器 メッセージ	ETX	BCC
1byte	1byte	6byte	1byte	1byte

・データ出カタイミング

マーカ検出器は 100msec サイクルでフレームを出力する。マーカが検知できない状態ではマーカ無しのフレームを、マーカが検知できた状況ではマーカ有りのフレームを送信する。また、ピーク通過後 100mm 以内にピーク通過を検知する。このピーク検知結果に伴い、

100msec 毎のフレーム送信に置き換えて、ピーク時横位置検出結果のフレームとして出力する。(図-12)

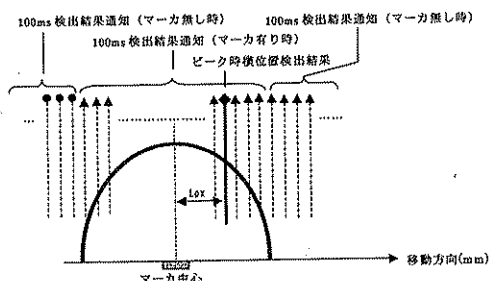


図-12 データ出力タイミング

・通信シーケンス (図-13)

検出器は 100msec 毎に検出器メッセージを出力。

検出器が異常検知時等、位置情報を出力できない状態では、検出器メッセージに代えて検出器ステータスを出力する。

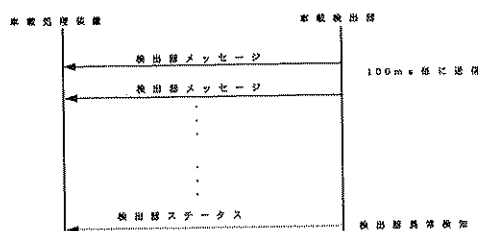


図-13 通信シーケンス

・検出器メッセージ (6byte)

① 位置情報

列		MSB ←————→ LSB							
行		7	6	5	4	3	2	1	0
0	横位置 [上位 8bit]								
1	横位置 [下位 8bit]								
2	極性	予備							
3~5	予備								

② 検出器ステータス

行	列	MSB ← → LSB							
		7	6	5	4	3	2	1	0
0	ステータスコード								
1	ステータスサブコード								
2~5	予備								

・車載検出器メッセージ・データディクショナリ

車載検出器と車載処理装置間の RS-232C 伝送におけるメッセージ・セットは、位置情報検出結果、検出器ステータスの 2 種類である。

① 位置情報

ワード	ビット	形式	意味
0	7~0	BIN	横位置 (全 16 ビットの上位 8 ビット) ビット位置 7 6 5 4 3 2 1 0 意味 横位置検出結果は 16 ビットバイナリデータで mm 単位。 負は補数表現とする。 マーカ未検出時は全て 0
1	7~0	BIN	横位置 (全 16 ビットの低位 8 ビット) ビット位置 7 6 5 4 3 2 1 0 意味 横位置検出結果の低位 8 ビット マーカ未検出時は全て 0
2	7~6	BIN	極性識別 ビット位置 7 6 5 4 3 2 1 0 意味 0 0 極性=1 0 1 極性=2 1 0 極性=3 (予備) 0 1 極性=4 (予備) マーカ未検出時は全て 0
3	5~0	BIN	予備
4	7~0	BIN	予備
5	7~0	BIN	予備

なお、横位置検出結果は、車線内の右側への偏移の場合は正の値、左側への偏移は負の値とする。(図-14)

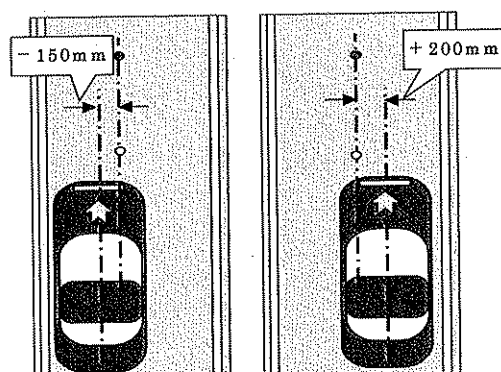


図-14 横位置検出結果の正負表

② 検出器ステータス

ワード	ビット	形式	意味
0	7~0	BIN	ステータスコード ビット位置 7 6 5 4 3 2 1 0 意味 0 0 0 1 0 0 0 0 検出器ステータス 0 0 1 0 0 0 0 0 位置検出ステータス
1	7~0	BIN	ステータスサブコード ビット位置 7 6 5 4 3 2 1 0 意味 内容 0 0 0 0 0 0 0 0 デフォルト値
2	7~0	BIN	予備
3	7~0	BIN	予備
4	7~0	BIN	予備
5	7~0	BIN	予備

4. 4. 3 磁気式マーカセンサ位置検出方法

磁気式は、路面下の永久フェライト磁石である磁気マーカ（写真-4）と車両に設置された磁界密度を検出する磁気センサにより磁場の強弱で位置を特定する。



写真-4 磁気マーカ

磁気マーカの直上(H=300mm)磁界強度 (Bz0) はマーカ直

下で170 μ T(マイクロテスラ)であり、磁界分布は、車両進行方向 By (縦方向)、車幅方向 Bx (横方向) 共に単峰性を示す。この磁場の垂直成分 (Bz) と車幅方向成分 (Bx) の磁束密度を磁気マーカで検出し、予め規定している Bx/Bz 関係式よりセンサとマーカ間の距離を算出し、マーカ位置を検出する⁶⁾。(図-15) この装置の仕様は次の通りである。

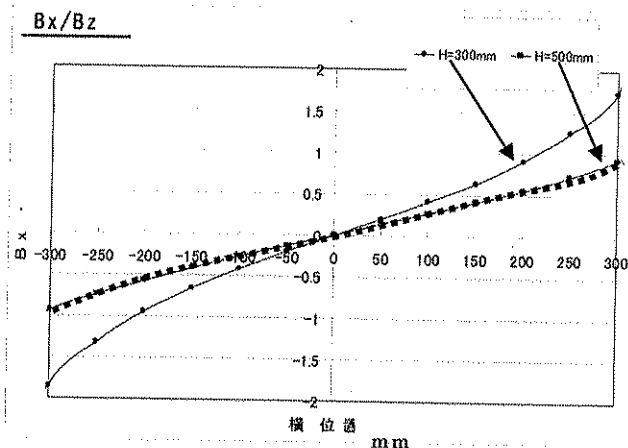


図-15 Bx/Bz 関係式

(1) 装置性能

装置性能は、電波式レーンマーカシステムと同一とした。

(2) レーンマーカ (図-16)

- ・外形寸法 : $\phi 80 \times H40$ mm
- ・フェライト材 : フェライト材 (FB6B)
- ・残留磁束密度 : 0.42T
- ・保磁力 : 303kA/m (キロアンペア毎メートル)
- ・ヨーク (上下保護板) : ステンレス (2mm 板)
- ・磁気特性 :

a. 直上磁界強度 (Z 軸成分)

- ① H=300mm 170 μ T 以上
- ② H=500mm 55 μ T 以上

H : マーカ中心上の路面からの高さ
マーカ温度 20℃
マーカ敷設位置 路面下 65mm

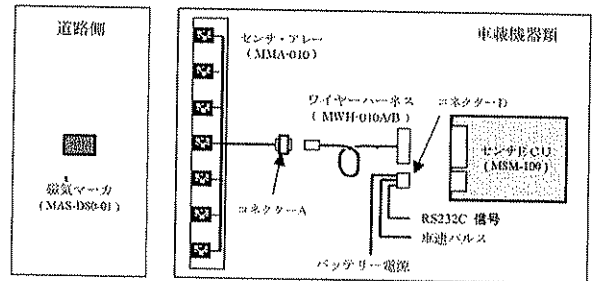


図-16 磁気マーカシステム構成

b. 磁界分布特性

Z 軸成分磁界は、X 軸、Y 軸方向とも図-17、表-1 に示す単峰性の磁界分布を有する。

表-1 磁界分布比率

横位置: X (mm)	H=365mm	H=565mm
-200	-0.93	-0.56
-150	-0.65	-0.41
-100	-0.41	-0.27
-50	-0.20	-0.13
0	0.00	0.00
50	0.20	0.13
100	0.41	0.26
150	0.65	0.40
200	0.93	0.55

単峰性磁界分布 Bz
(マーカ上面から365mm)

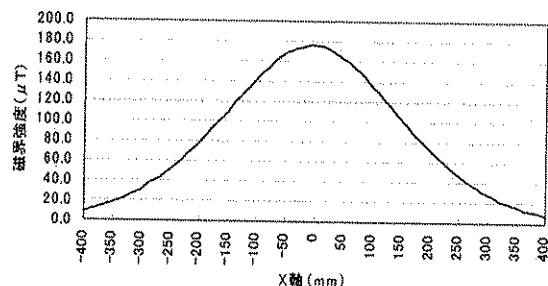


図-17 磁界分布

c. 磁界分布比率

横位置 ± 200 mm 範囲 (X 軸) における X 軸成分磁界と Z 軸成分磁界の比は、右表を中心値として $\pm 10\%$ 以内の磁界分布を有する。

(3) 車載検出器 (図-18)

- ・センサ数 : 7 個
- ・センサ配列 : 150mm $\pm$ 1mm 間隔
- ・必要離間距離 : 金属塊から 100mm 以上
- ・消費電力 : 12V 0.9A 以下

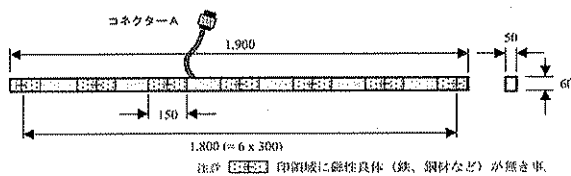


図-18 車載検出器(センサ部)

(4) インターフェイス

インターフェイスは、電波式レーンマーカシステムと同一とした。

4.5 GPS/GIS による制御ソフトウェア検討開発

GPS/GIS 方式は、GPS 衛星から受信されるロータリ除雪車の位置座標と、ロータリ除雪車の目標軌道である道路 GIS の線形データの位置座標を照合し、自車の位置と目標軌道への操舵量を特定し、制御を行う方式である。

今回の開発では、目標軌道情報が断続的にしか得られないレーンマーカ方式欠点を補い、比較検証の対象として連続データの得られる本方式を採用した。

4.5.1 GPS/GIS による操舵角算出ロジック

(1) 基本方針

今回の開発では、レーンマーカ方式と GPS/GIS 方式の2つの自動操舵を確立する必要があり、さらには両方式の性能比較の実験も予定されていた。一方、GPS は、場所、時間、天候の違いで衛星の受信状況が異なり、測定精度が極端に悪化する場合もあり、走行不能に陥る懸念があった。そこで、GPS 衛星からの受信状況が悪化した場合は、レーンマーカ方式へ切り換えることで走行不能を回避することとした。

(2) 仮想レーンマーカ

レーンマーカ方式の目標軌道はマーカ埋設位置の線形でロータリ除雪車の中心に位置し、GPS/GIS 方式では縁石の線形でロータリ除雪車の左側端部であり、目標軌道が概ね 1m 程度ずれている。マーカの設置位置は、ロータリ除雪車の除雪出来形である除雪端部を均一に仕上げるため、縁石の線形と平行に設置している。そこで今回のシステムでは、レーンマーカ方式と GPS/GIS 方式が GPS/GIS 方式で利用する縁石のデータをマーカ設置位置の線形にオフセット(平行移動)させ、仮想のレーンマーカとして利用し、2つのシステムの目標軌道をほぼ同等にし、円滑に切り換えることができるよう配慮した。これにより、レーンマーカ方式による自動操舵中に故障が発生しても GPS/GIS 方式に切り替わ

るため、二重化による安全性が向上する。

縁石のデータは、縁石座標が A, B, C で与えられているとき、 $\theta_1 = \theta_2$ となる直線 G に直角方向で、距離 L の点 D を点 B に対するオフセット位置として定義し、仮想マーカ位置を算出した。(図-19)

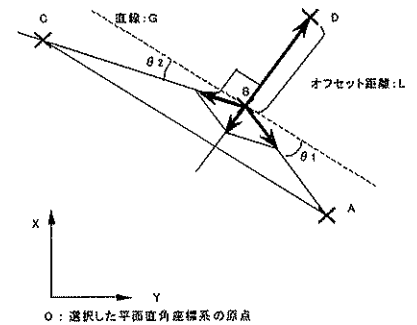


図-19 GISデータのオフセット

(3) 2次元平面座標系 (X_G, Y_G)

GPS と GIS (仮想マーカ) による横ずれ量の計算式で使用するための除雪車平面座標系を定義する。(図-20)

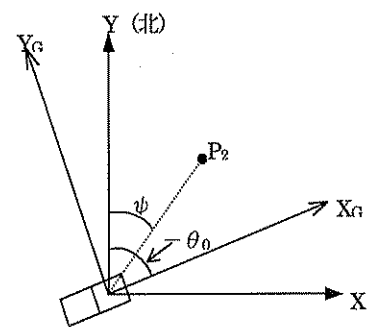


図-20 2次元平面座標系

X_G, Y_G は、除雪車の初期方位 θ_0 を座標系の X 軸とする 2次元平面地球固定座標系である。 θ_0 は北 (XY 座標系の Y 軸) をゼロとし、反時計回りをプラスと定義する。

$$X_G = -X \sin \theta_0 + Y \cos \theta_0 \quad \cdots \cdots ①$$

$$Y_G = -X \cos \theta_0 - Y \sin \theta_0 \quad \cdots \cdots ②$$

次に、GPS アンテナ位置 (X_G, Y_G) から、除雪車ステアリング中心のセンターピンの位置 (X_C, Y_C) を求める。

$$X_C = X_G + X_S \sin \theta_f - Y_S \cos \theta_f \quad \cdots \cdots ③$$

$$Y_C = Y_G + X_S \cos \theta_f + Y_S \sin \theta_f \quad \cdots \cdots ④$$

ここで、 X_S, Y_S は GPS アンテナ取り付け位置を原点とし、除雪車の前車体進行方向を X 軸とする機体固定座標系である。また θ_f は除雪車前車体のジャイロ方位角であり、 X_C 軸方向をゼロとし、反時計回りをプラスと定義する。(図-21)

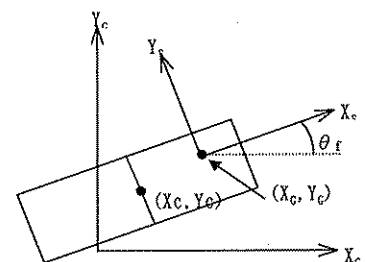


図-21 機体固定座標系

図-21

(4) マーカセンサ座標系 (xy)

マーカは進行方向順に個別番号

(1, 2, ..., k, k+1, ...) が付けられており、k 番目の $X_G Y_G$ 座標における位置を (X_T^k, Y_T^k) とする。

このとき、マーカセンサライン

を X 軸にとるマーカセンサ座標系 (機体固定座標系) から見たマーカ位置は次式で計算することができる。

(図-22)

$$x = (X_T^k - X_M) \cos \theta_M + (Y_T^k - Y_M) \sin \theta_M \quad \cdots \textcircled{5}$$

$$y = (X_T^k - X_M) \sin \theta_M + (Y_T^k - Y_M) \cos \theta_M \quad \cdots \textcircled{6}$$

ここで、

θ_M : マーカセンサの X_G 軸からの角度 [rad]

(前側車体に取り付けられたセンサの場合は $\theta_f + \pi/2$ に等しい) であり、 θ_f と同様反時計回りがプラスである。マーカセンサ中心位置 (X_M, Y_M) は次式で求めることができる。

$$X_M = X_C + L_x \cos \theta_f - L_y \sin \theta_f \quad \cdots \textcircled{7}$$

$$Y_M = Y_C + L_x \sin \theta_f + L_y \cos \theta_f \quad \cdots \textcircled{8}$$

マーカセンサ座標系における x がマーカセンサ検知信号に相当し、 y がマーカセンサとマーカの距離に相当する。今、k 番目のマーカまでの距離を y_k 、k+1 番目までの距離を y_{k+1} としたとき、

$$y_k \cdot y_{k+1} < 0 \quad \cdots \textcircled{9}$$

であればマーカセンサは k, k+1 番目のマーカの間にあることになる。

(5) 仮想マーカ位置設定方法

GIS データ (縁石データ) から仮想マーカの絶対位置 (緯度・経度) を得る場合、 $X_G Y_G$ 座標における位置 (X_T^k, Y_T^k) を計算する必要がある。これは除雪車の初期位置と初期方位角 θ_0 が与えられたときに、 (X_G, Y_G) を求めるのと同様の式①、②で計算することができる。

(6) 仮想マーカによる横ずれ量計算方法

GPS/GIS 制御は仮想マーカ通過時以外にも連続して横ずれ量を検知する制御であり、レーンマーカのような非連続なものとは異なり、精度の良い操舵制御が見込まれる。その際の仮想マーカ間の連続横ずれ量の補間

a) 連続横ずれ量 (x) の計算式

$$x = \delta + x^k \quad \cdots \textcircled{10}$$

δ : 補間データ (補間無制御のときはゼロ)

x^k : レーンマーカ信号/擬似レーンマーカ信号の離散データ

補間データ (δ)

$$\delta = (x_1 - x_c) - x_0^k \quad \cdots \textcircled{11}$$

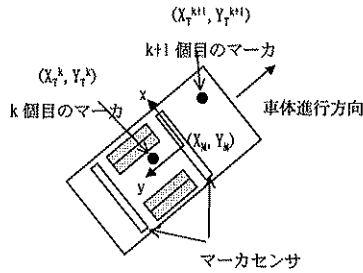


図-22 マーカセンサ座標系

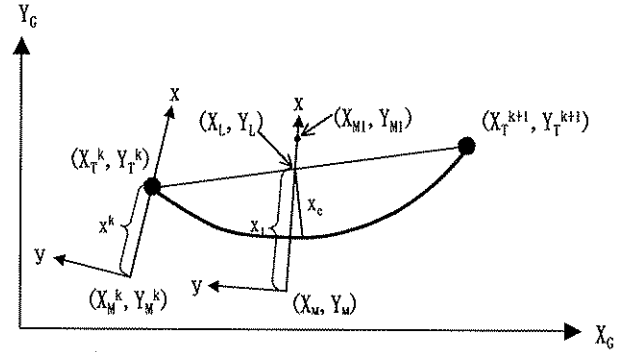


図-23 横ずれ量補間

x_0^k : x^k が更新されたときの $(x_1 - x_c)$ を設定する。($x_1 - x_c$) は GIS 情報の仮想マーカデータより計算する。これは GIS・レーンマーカ併用制御の時も同じものとする。GIS 単独制御のときは x_k が更新されたのと同じタイミングで $x_c = 0$ となるので $x_0^k = x_1$ 、つまり $\delta = 0$ となる。GIS・レーンマーカ併用制御のときは、実際のマーカと仮想マーカの検知タイミングがずれるので、実際のマーカ (x^k) を検知したときに $x = x^k$ とするための補正の役割がある。

b) GIS 情報による横ずれ量 (x_1) 計算式

$X_G Y_G$ 座標系でのレーンマーカセンサ中心位置を (X_M, Y_M) 、レーンマーカ左端位置を (X_{M1}, Y_{M1}) とする (⑦、⑧式参照)。まず、⑨により 2 点 (X_T^k, Y_T^k) 、 (X_T^{k+1}, Y_T^{k+1}) を求めておく。2 点 (X_M, Y_M) 、 (X_{M1}, Y_{M1}) を通る直線 L1 と、2 点 (X_T^k, Y_T^k) 、 (X_T^{k+1}, Y_T^{k+1}) を通る直線 L2 の交点 (X_L, Y_L) を求める。

$$L1 : s_1 X_L + c_1 Y_L + d_1 = 0 \quad \cdots \textcircled{12}$$

$$L2 : s_2 X_L + c_2 Y_L + d_2 = 0 \quad \cdots \textcircled{13}$$

とおいたとき、L1 と L2 が平行でなければ

$$X_L = (d_1 c_2 - d_2 c_1) / q \quad \cdots \textcircled{14}$$

$$Y_L = (-d_1 s_2 + d_2 s_1) / q \quad \cdots \textcircled{15}$$

$$q = c_1 s_2 - c_2 s_1$$

となる。ただし

$$s_1 = Y_{M1} - Y_M, \quad s_2 = Y_T^{k+1} - Y_T^k$$

$$c_1 = -(X_{M1} - X_M), \quad c_2 = -(X_T^{k+1} - X_T^k)$$

$$d_1 = -X_M(Y_{M1} - Y_M) + Y_M(X_{M1} - X_M)$$

$$d_2 = -X_T^k(Y_T^{k+1} - Y_T^k) + Y_T^k(X_T^{k+1} - X_T^k)$$

これより

$$x_1 = (X_L - X_M) \cos \theta_M + (Y_L - Y_M) \sin \theta_M \quad \cdots \textcircled{16}$$

4. 5. 2 道路GIS

道路 GIS は、道路行政に利用される道路の基盤データとして整備が進められているもので、道路中心線、道路幅員、縦横断等の線形情報、歩道、信号機、防護柵等の構造物情報等の情報が道路の維持管理・交通管理で用いる目的で電子化されて納められる技術である。今回の開発では、ロータリ除雪車の目標軌道情報をこの GIS データのルールに基づき生成し利用した。

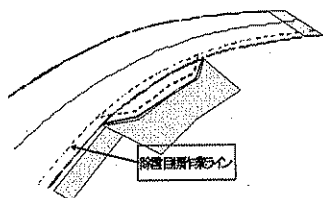


図-24 道路GISデータ

現在の拡幅除雪等においてロータリ除雪車のオペレータは、除雪端部を指標として走行している（図-24）。除雪端部は一般的に道路側端の歩道の縁石であることが多いことより、採用した GIS データは縁石のデータとした。

GIS データにおける線形データは、線形の変曲点を測量し、測点間を線形要素（直線、カーブ等）で結ぶことで表現している。したがって、測量データは断片的ではあるが、線形データとしては連続性を保つこととなる。（図-25）

除雪 ITS 道路関連物パッケージ

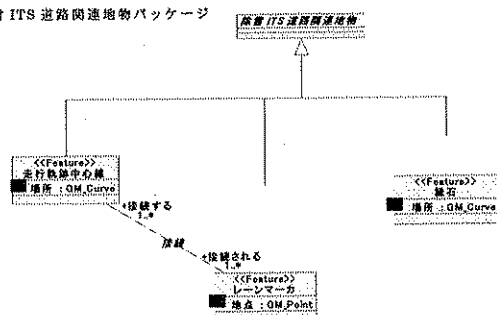


図-25 GISデータの関連図

今回生成した道路 GIS データは、目標軌道の変曲点をレーンマーカの設置点と解釈し、レーンマーカの設置間隔である約 2m 毎の測量を行った。（表-2）

表-2 GIS測量データの一例

	m	N	E
0	43	1	54.6130
2			54.6669
4			54.6660
6			54.6290
8			54.6010
10			54.4742
12			54.4463
14			54.4188
16			54.3910
18			54.3619
20			54.3355
22			54.3072
24			54.2803
26			54.2538
28			54.2289
30			54.2055
32			54.1842
34			54.1605
36			54.1348

4. 5. 3 RTK-GPS

RTK(Real-Time Kinematic)-GPS は、図-26 に示すとおり、電子基準点(GPS 基準局)で観測した GPS 受信データを、無線などを使って、利用者(GPS 移動局)に伝送することによって、利用者の位置をリアルタイムに、高精度(誤差半径 2~3 cm)で求める技術である。

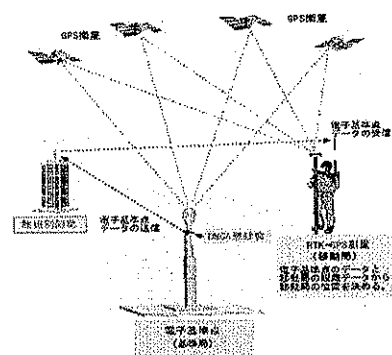


図-26 RTK-GPS 測量

今回の開発では、ロータリ除雪車の目標軌道である道路 GIS データが高精度(1/500 の地図精度：標準偏差 ±25cm 以内)かつ連続データであることより、照合すべき現在の自車位置を高精度かつリアルタイムに計測する必要があった。そこで、簡便にかつ高精度の計測できる手法として、RTK-GPS を採用した。

GPS 固定局(基準局)は、ロータリ除雪車の走行の見通し可能な構内の地上に、移動局はロータリ除雪車の屋根上に設置し、データの電送は無線を利用した。車両の停止状態を今回のシステムでデータを収集(3分間の変化量)した結果は、図-27 に示す通り ±15 mm の精度が得られた。

GPS 受信データの更新は採用した機器の仕様が 20Hz であることより、ほぼリアルタイムに位置計測できる。また、座標は世界測地系を適用し、GIS データと整合を図った。

GPS 受信データの更新は採用した機器の仕様が 20Hz であることより、ほぼリアルタイムに位置計測できる。また、座標は世界測地系を適用し、GIS データと整合を図った。

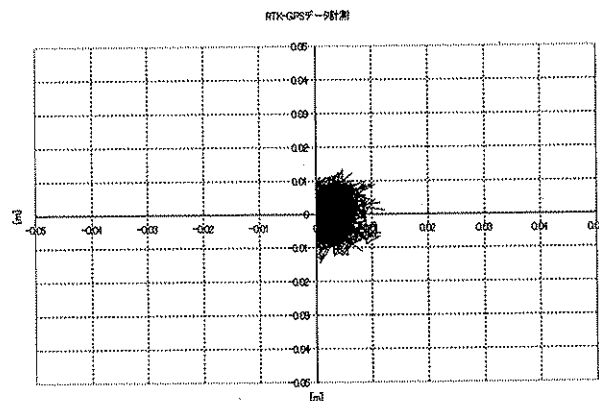


図-27 RTK-GPS 計測データの移動距離(X方向は絶対値で示す。)

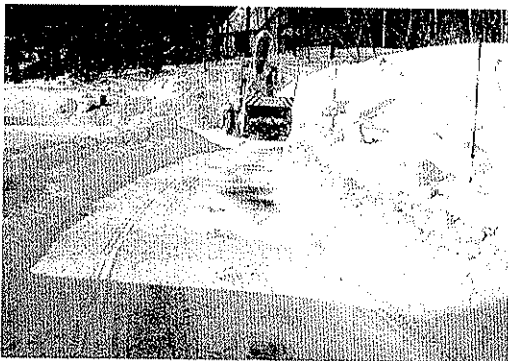
5. テストコースによる検証実験

5. 1 実験目的

本実験は、開発されたロータリ除雪車の自動操舵システムについての実用性を検証すること目的としている。この検証実験を通じて、将来的な同システムの実用化に関する見通しを評価するとともに、レーンマーカ・センサ、GPS/GIS などの位置特定技術についても将来的な実用化を視野に入れた評価を行うものである。さらに、検証実験結果から開発された自動操舵システムの実用レベルでの可能性、課題の整理を行うものとしている。

実験は、実道に見立てた雪上テストコースを設け、各制御方式別（レーンマーカ・センサ方式、GPS/GIS 方式およびそれらの併用方式）の基本動作、制御性能について、実際の除雪作業を通じて確認することとした。テストコース上での実験であるため、実験条件は限られたものとなるが、道路線形、除雪作業負荷、作業速度などは実際の作業を極力反映させたものとした。

なお、実験は平成 14 年 1 月から平成 14 年 2 月にかけて、北海道小樽市内で行われた。（写真－5）



写真－5 テストコースでの実験状況

5. 2 実験方法

5. 2. 1 実験における確認項目

(1) ロータリ除雪車基本動作の確認

自動操舵システム（レーンマーカ・センサ方式、GPS/GIS 方式）を作動させ、レーンマーカ（電波式・磁気式各 1 コース）を埋設したテストコースにおいて、自動操舵中に以下の各作業が可能か確認する。

- a) 作業速度 4km/h（拡幅除雪作業想定）、0.5km/h（運搬排雪作業想定）
- b) 基本的な除雪作業（一般的な雪堤（負荷）による拡幅除雪）

(2) 道路形状への適応

以下に示す道路形状に自動操舵システムが適応可能か確認する。

a) 直線部

b) カーブ部（緩和曲線、R30m）：直轄国道においてもっとも厳しい曲率半径（設計速度 30km/h）

c) 交差点部（R12m）：直轄国道においてもっとも厳しい交差点の曲率半径

(3) 自動操舵技術の性能確認

開発された制御アルゴリズム・制御技術の妥当性を確認する。

a) ロータリ除雪車の特性（低速走行、アーティキュレート操舵方式、作業時の偏荷重）に対応しているか確認する。

b) 制御機器の性能確認（自動操舵システム制御機器が所定の機能を満たしているか、耐久性などハードウェアとしての機能も確認する。）

(4) 各制御方式別位置特定技術の評価

位置特定に使用する電波式・磁気式レーンマーカ、センサおよび GPS/GIS 技術の評価する。なお、評価は今回の実験条件の範囲で実施する。

a) 機能の確実性（信頼性）の確認

b) 機器の取り付け部位、状態の確認

c) マーカ敷設手法、歩掛かり調査、整理

d) 各方式別の得失整理

e) 各方式別の実用化に向けた課題整理

(5) 自動操舵システム全体の評価

(6) 想定される外乱条件の影響確認

レーンマーカ・センサ検出機能において、未検出、予定外のデータが発生した場合の事象を確認する。GPS/GIS データが欠落した場合の事象を確認する。

なお今回の検証実験では除雪負荷の変動、路面状況の差違、気象条件等は実験時の状況によるものとする。

(7) 安定性

a) システム機能の安定性（急停止、急操舵、逸走など異常操向の有無の確認）

b) システム故障時の対応、緊急停止（危険認知時の対応方策、回避手法の検討）

(8) 自動操舵システムの実用化に向けた課題

a) 技術面（ハード、ソフト）インフラ面（ITS 技術、道路、沿道環境）に関する課題整理

5. 2. 2 実験結果の評価方法

検証実験結果の整理と評価は以下の視点で行うものとした。

(1) 制御アルゴリズムが想定された結果となるよう構築されているか。

(2) 実用化に向けて解決すべき課題はなにか、今回

の実験で解決されたものはなにか。

(3) オペレータの受容性は高いか。

(4) 今回のシステムがどの程度実用レベルに近いものであるか。

5. 2. 3 実験方法の検討

実験に用いる除雪機械はロータリ除雪車(250ps 級)であり、レーンマーカ・センサ(磁気式、電波式)とGPS/GIS 方式の3 方式の自動操舵システムが組み込まれたものとしている。実験に際し、システム毎の機能検証或いは比較を行うために以下のことを検討した。

(1) 走行コースレイアウト

走行コースレイアウトを図-28に示す。走行コースは、一般国道の道路線形を反映するように、直線部および曲線部が連続するレイアウトとした。直線部と曲線部間には緩和部(クロソイド曲線)を設ける。また、交差点における除雪を想定した曲線(交差点部)も設けた。ロータリ除雪車が作業を行う道路種別、級別を設計速度の最も小さいもので考えれば、一般国道では都 市部における第4 種、第2 級となる。この道路の設計速度は、やむを得ない場合に適用される30 km/h

が最も小さい。このことより、設計速度を30 km/h として、曲線部等の検討を行った。

a) 曲線部

道路の設計速度に応じた最小の曲線半径は、道路構造令に定められており、設計速度30 km/h の場合は曲線半径30mとなる。また、必要な円曲線の長さは、道路構造令の運用と解説によれば、一般車両が約3 秒以上走行する距離が適当であるとされている。ロータリ除雪車についても同様に考え、作業速度において3 秒間の走行が可能なが長とする。ロータリ除雪車の作業速度は、拡幅除雪時において4~7 km/h であるから、

円曲線の長さ=走行速度×所要時間

$$=7/3.6 \times 3 = 5.8\text{m}$$

したがって、曲線部の曲線半径は30m、長さは5.8m以上とした。

b) 緩和部

緩和部のクロソイド曲線のパラメータAは、道路構造令の運用と解説によれば、曲線部の曲線半径Rに対して以下の範囲内とするのが一般的である。

$$R \geq A \geq R/3$$

但し、 $A > R/2$ が望ましいとされているため、パラメ

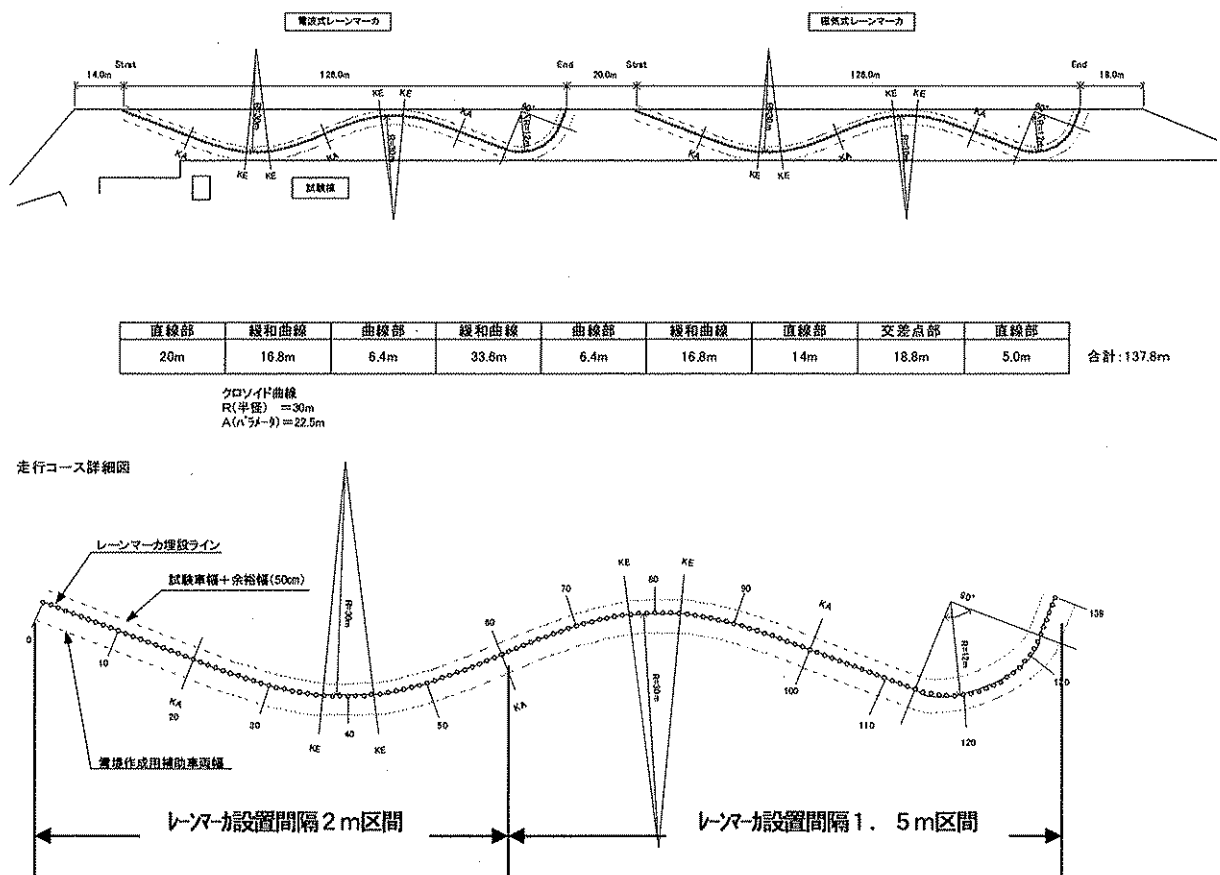


図-28 コースレイアウト

ータAは、RとR/2の間である0.75R (A=22.5m) とする。従って、曲線長は計算より16.8mとした。

c) 交差点部

交差点取り付け部における車道中心線の曲線半径は、曲線部のものがそのまま遵守され、最小曲線半径は30mとなる。但しここでは、最も厳しい条件での実験確認を行うこととして、曲線半径として示される最も小さい値15mとした。ロータリ除雪車の作業時は路肩部を走行することになるため、先の曲線半径より小さいところを通過する。積雪地域の道路幅員は、「道路構造令の運用と解説」によれば、図-29に示すものとなっており、これよりロータリ除雪車の中心位置における曲線半径R1を求めれば次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} R1 &= \text{道路の曲線半径} - \text{幅員}/2 - \text{路肩} - \\ &\quad \text{一次堆雪幅} + \text{除雪車幅}/2 \\ &= 15 - 3/2 - 0.5 - 2 - 2.2/2 = 12\text{m} \end{aligned}$$

これより、交差点部の曲線半径は12mとした。

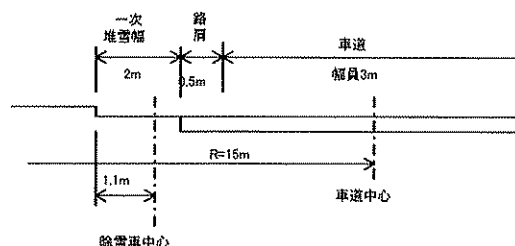


図-29 道路幅員構成

d) その他の線形

平面線形ではバス停や変速車線等のように、付加車線を設け本線からの移行(シフト)を行う区間がある。設計速度30km/hで道路幅員3mをシフトするときの最小長は図-30のとおりであり、曲線半径12mより操舵するのは困難ではないと考えられる。

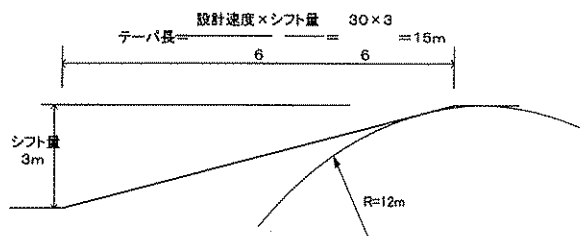


図-30 シフト区間の影響

したがって、交差点部の確認を行えば、シフト区間の挙動を推察することは十分可能であり、この線形を含める必要はないと考えられる。

走行コースは、直線部から始まり緩和部・曲線部の連続したS字カーブを経て、直線部から交差点部に至るものとしたものである。直線部の長さは、車輪式建設機械の性能試験における走行速度試験では、通過するのに必要な時間4~5秒程度となるよう測定区間長が定められており、このことより、ロータリ除雪車の作業速度では10m以上あれば良いと判断した。また、スタート地点においては、機械のセット並びに加速に必要な距離が必要であるから20mとした。また、テストコースにおいては、レーンマーカ2種類(電波式・磁気式)の実験を行うため、レーンマーカの比較が可能のように同一レイアウトのコースを2本用意した。

(2) 実験コースの成型(実験雪堤の作成)

雪堤の形状は、ロータリ除雪車による拡幅作業を想定して、プラウ系の一次作業によって道路左側に集められる一般的形状とする。一次除雪により形成される堆雪は、数回の作業によって三角形から徐々に台形状となり、その限界値は概ね高さ1.1m、勾配40度となるといわれている。しかし、交通確保の意味からこの堆雪は限界値まで発達する前に、二次除雪により二次堆雪帯に移動させられる。このときのロータリ除雪車の出動基準は地域により多少異なるが、高さ70~80cmに達したときが多い。このため、実験雪堤はロータリ除雪車の作業装置内で、図-31のような高さ80cm、勾配40度となる三角形断面形状を目標に作成した。

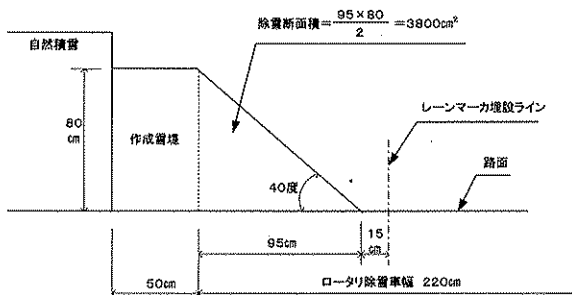


図-31 実験雪堤の断面形状(基本)

なお、試験コースの内、スタート地点の最初の10mは機械のセットや助走に必要な区間として、この間には実験雪堤は作成しないこととした。

(3) レーンマーカ設置間隔

レーンマーカの設置間隔は、狭いほど頻繁に位置情報を取得できるため精度の良い位置検出が可能と考えられる。しかしながら、レーンマーカの設置コストが高騰するといった問題がある。このため、本実験では2.0mの設置間隔の区間(テストコース前半0~60m)と1.5mの設置間隔の区間(テストコース前半60~138m)

を設定し、両者の差による走行特性（目標軌道からの横ずれ量、車体挙動等）を比較検討した。

（写真－6）



写真－6 テストコースの状況

5. 2. 4 実験条件

（1）検証を行う自動操舵システムの条件

自動操舵を行う方法（制御）は、以下の5条件である。

- ①磁気式レーンマーカ、センサによる単独作動
- ②電波式レーンマーカ、センサによる単独作動
- ③GPS/GIS 情報による単独作動
- ④上記①と③の併用による作動
- ⑤上記②と③の併用による作動

なお、④、⑤については常時2方式が作動可能であるものの実際の稼働はいずれか1方式（切換自由）となる。

（2）作業速度

ロータリ除雪車で除雪作業を行うときの作業速度は、「道路除雪ハンドブック第4版：（社）日本建設機械化協会編（平成5年8月）」によれば、拡幅除雪時において4～7 km/h、運搬排雪時において0.2～0.5 km/hである。このことより、実験時は実作業に近い速度とすることが望ましいと考え、作業速度は4 km/hを基本とする。また、運搬排雪も考慮して、0.5 km/hについても実験を行った⁷⁾。

（3）実験回数

実験は自動操舵システム条件と走行速度条件の組み合わせに対して、実験雪堤を作成して行う除雪負荷ありを2回、実験雪堤なしで行う負荷なし1回を行うものとした。

（4）投雪方法

実際の拡幅除雪における投雪は、二次堆雪帯が除雪車左側に設けられているため、この場所へ排出する雪が拡散しないようシュート投雪するのが一般的である。

実験における投雪もシュート投雪とするが、作業および計測上の利便性から右側投雪とし、車体から余り離れない距離に積み上げるものとする。このため、シュートの位置・角度の調整は走行中に行わないことを基本とした。写真－7に投雪状況を示す。



写真－7 雪堤と投雪方向

5. 2. 5 実験収集データ

実験において収集するデータは、ロータリ除雪車の各センサから得られる情報と、除雪作業量およびロータリ除雪車搭乗者（オペレータ）の乗り心地とした。

また、運転席振動を参考に測定している。

（1）ロータリ除雪車からの情報

実験では、除雪車に組み込まれた各種センサより、以下の項目が計測され蓄積される。この蓄積されたデータを、解析コンピュータに取り込むものとした。（図－3 2参照）なお、データ収集PCのサンプリング周期は、200msecである。

《センサ計測》

- ①マーカ信号（検出信号）
- ②RTK-GPS データ（緯度、経度）
- ③前部車体方位角（北を0とした方位角）
- ④除雪車走行速度
- ⑤車体屈折角
- ⑥操舵シリンダ油圧値（左、右）

《計算値》

- ⑦横ずれ量マーカ計算値
- ⑧車体位置 進行方向(X)座標：Xc (RTK-GPS 座標変換)
- ⑨車体位置 進行直角方向(Y)座標：Yc (RTK-GPS 座標変換)
- ⑩目標軌道（位置Xcにおける目標軌道のY座標）：Yr
- ⑪横ずれ量(Yr-Yc)＝目標軌道と車体中心との距離
- ⑫操舵角指令値（操舵用サーボ弁指令値）
- ⑬操舵角指令値（車体屈折角指令値）
- ⑭横すべり量計算値＝車体の左右のふらつき

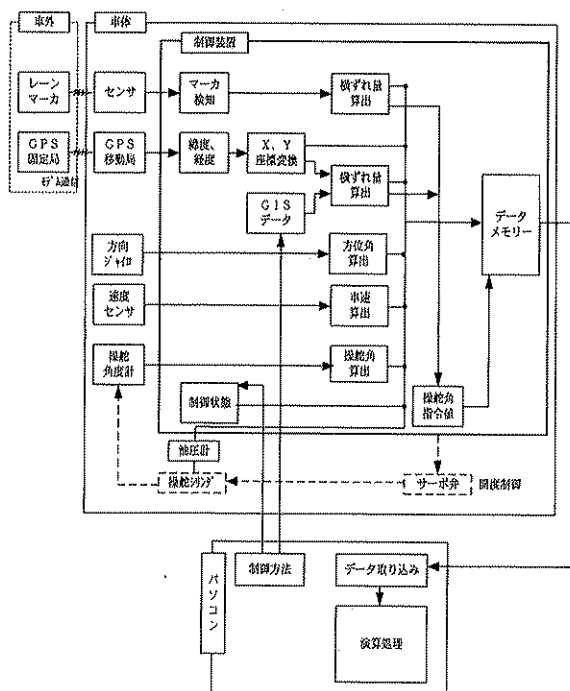


図-3 2 実験データ計測フロー

(2) 除雪作業量および雪質

a) 除雪作業量

除雪作業量は、1 回の実験前・試験後において測定する除雪幅と高さから、平均除雪断面を求め、走行距離および雪の密度を乗じて求める。また、平均走行速度より時間あたりの除雪能力 (t/h) を算出する。除雪断面の測定は、実験雪堤作成開始地点を含め 10m 置きとした。写真-8 に除雪作業量の測定状況を示す。



写真-8 除雪作業量の計測

b) 雪質

雪質として、雪の密度および硬度を測定した。密度は、内径 10 cm の塩ビパイプ (サンブラー) を路面に対して垂直に差し込み雪を採取し、採取した部分の高さおよび雪の質量を測定し求めた。硬度は、木下式硬度計を用いて測定した。これらの測定は、コース内の 3 カ所において行うものとした。写真-9 に雪質の計測

状況を示す。



写真-9 雪質計測

(3) 運転席振動

オペレータの受容性を確認するため、走行中の運転席での振動を測定した。測定は自動操舵中と一般の手動操作中で行い、両者を比較し、どの程度の変化が生じるか検証した。

(4) 測定オペレータに対するヒアリング

自動操舵走行時点の横揺れ等の乗り心地および操作性、信頼性等に関してヒアリングを行うこととした。

5. 3 実験結果

検証実験は、レーンマーカ (電波式・磁気式)、GPS/GIS の単独 3 方式およびレーンマーカと GPS/GIS 制御の併用方式によりテストコース上を自動操舵させ、各走行性能、除雪能力等を確認した。

5. 3. 1 除雪作業性能

除雪作業の出来形は、写真-10 に示すような状態であり、各制御方式とも路肩の雪堤に対し、多少の凹凸はあるものの、未除雪箇所もなく、ほぼ均一な仕上がりを見せた。自動操舵中オペレータはステアリングに手を触れることなく、除雪状況の確認を行った。この結果、テストコース全区間にわたり概ね実用に足りる除雪作業を自動操舵で行うことができた。これにより、本自動操舵システムは一般的な国道の道路線形に



写真-10 除雪作業の出来形

も対応しうるものと推察される。

各制御方式別の除雪作業量を表-3に示す。これによると設定速度が0.5km/hの場合119t/h~215t/h、4.0km/hの場合1,107t/h~1,425t/hであった。制御方式による作業能力の差は見られなかった。

同じ形状の疑似雪堤にもかかわらず除雪作業量がばらついているのは雪の密度が不均一であること、横ずれによって雪堤を残す場合があることなどが要因と思われる。実験機の最大能力が2,300t/hであることから、4.0km/hでの作業でも能力の50%程度(0.5km/hでは5%~9%とさらに軽負荷)であり、負荷としては軽いものであったといえる。

表-3 除雪作業能力

制御方式	設定速度 (km/h)	Q: 除雪能力 (t/h)	Q/2300(t/h) (%)
電波単独	0.5	146~215	6~9
	4	1107~1231	48~54
GPS/GIS単独	0.5	156~193	7~8
	4	1156~1189	50~52
電波GPS併用	0.5	145~174	6~8
	4	1206~1207	52
磁気単独	0.5	119~135	5~6
	4	1155~1187	50~52
磁気GPS併用	0.5	160~167	7
	4	1425~1250	54~62

5. 3. 2 制御性能評価

自動操舵システムにより実際の除雪作業を行う場合には、定められた走行目標を逸脱することなく、且つスムーズな走行を行うことが求められる。このため目標軌道からのずれ量が最も小さいシステムが実用化のための条件が良いと考えられることから、制御性能を評価する指標は、除雪車前センサ中心と目標軌道との横ずれ量とした。また実験では、この横ずれ量を最小化するように制御調整値(ゲイン)を油圧機器の反応速度、路面状態等の諸条件に合わせて調整している。

今回の実証実験から制御性能に関し、全般的に以下のことが確認できた。

- ①除雪負荷有り無しで行った自動操舵による実験結果の横ずれ量はほぼ同じである。除雪量が機械の能力に対して小さかったためと考えられる。
- ②各制御方式とも作業速度0.5km/hと4.0km/hでの実験結果の横ずれ量に大きな差は見られなかった。
- ③レーンマーカ設置間隔の長短(2.0mと1.5m)による

横ずれ量の差異では、単独制御方式では顕著な差はみられなかった。しかし、軌道情報を活用する場合(後述)は、設置間隔1.5mの方が少なくなる傾向にあった。

- ④屈折角の指令値は測定値とほぼ同じであり、制御装置から送られた指令値に対して、ほぼタイムラグなく動作している。

各制御方式別の比較検討および評価を以下に示す。比較する横ずれ量は、除雪負荷有りの作業速度4.0km/hでの前センサの値で、2回の結果を合わせたものである。

(1) 各制御方式別の横ずれ量

表-4は各制御方式別、道路線形別の横ずれ量の一例を示したものである。これによると、全般的には直線部は横ずれ量、標準偏差ともに小さいが、カーブ部、交差点部は共に大きいものとなった。これは曲率半径が小さい区間ではステアリング操作が大きいのに加え、除雪負荷等の外乱による横滑りも生じやすいことが理由と考えられる。

制御方式別に比較すると、レーンマーカ制御方式では、目標軌道に対し交差点部を除く最大横ずれ量が+0.39m、-0.49m(電波式)、+0.42m、-0.53m(磁気式)で、ステアリングもレーンマーカ直上毎の操舵となるため、左右の操作量が大きく、不安定な挙動を示した。また、交差点部(r=12m)での軌跡は、レーンマーカ検出範囲を超えるケースも見られた。一方、GPS/GIS単独方式は最大横ずれ量が+0.25m、-0.21m(交差点部を除く)程度とレーンマーカ単独制御よりも良好な制御結果が得られた。自動操舵システムによるステアリングも毎秒20回の操作となるため、滑らかな軌跡となった。

表-4 位置特定方式別横ずれ量

単独動作作業速度4km/h、前センサ位置ずれ量		単位:m				
道路線形	直線	左カーブ	右カーブ	直線	交差点部	
電波式	最大値	0.25	0.41	0.28	0.39	0.76
	最小値	-0.23	-0.49	-0.38	0.02	0.26
	平均値	-0.05	0.06	-0.13	0.16	0.51
	標準偏差	0.12	0.23	0.19	0.12	0.16
磁気式	最大値	0.06	0.35	0.37	0.42	0.91
	最小値	-0.18	-0.37	-0.53	0.11	0.29
	平均値	-0.04	0.08	-0.25	0.27	0.61
	標準偏差	0.06	0.21	0.24	0.10	0.22
GPS	最大値	0.04	0.04	0.25	0.24	0.17
	最小値	-0.03	-0.32	-0.26	0.00	-0.24
	平均値	0.00	-0.08	-0.04	0.07	-0.02
	標準偏差	0.02	0.11	0.10	0.08	0.09

図-33はこれら制御方式別横ずれ量の一例を図で示したものである。横軸が走行延長で、縦軸に横ずれ量を示している。この図より、電波式、磁気式のレーンマーカ方式では、若干電波式の横ずれが少なかったもののいずれも同様な横ずれが生じているのに対し、GPS/GIS方式はレーンマーカ方式より明らかに横ずれが少ないことがわかる。この特性は作業速度 0.5km/h および 4.0km/h いずれも同様であった。

次にレーンマーカ設置間隔の長短 (2.0m と 1.5m) による横ずれ量の差違であるが、電波式・磁気式単独制御方式のいずれも顕著な差違はみられなかった。しかしながら、軌道情報 (次のレーンマーカの位置座標) を持たせた制御の場合、直線やカーブ部での横ずれ量は、1.5m の設置間隔の方が少なくなる傾向にあった。

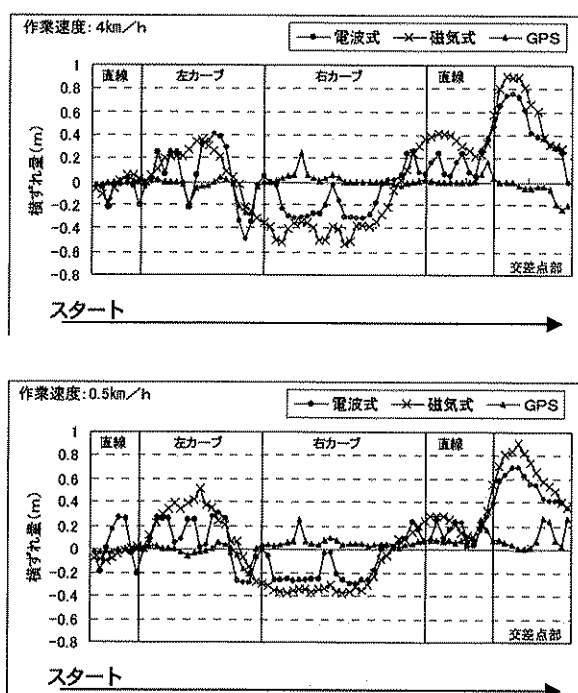


図-33 制御方式別横ずれ量

図-34は同じく自動操舵 (作業速度 4.0km/h、除雪負荷有り、2 回走行平均、交差点部含む) 中における横ずれ量のばらつきを示したものである。これは目標軌道からの横ずれ量を 10cm 毎のレンジに分け、そのレンジ内を除雪車が走行している比率を制御方式別に示したものであり、目標軌道 (すなわち横ずれ量 0.0m) に近いほどロータリ除雪車の精度の良い自動操舵が行われているものと考えられる。制御方式別では電波式、磁気式では両者に大きな性能差は見られず、目標軌道

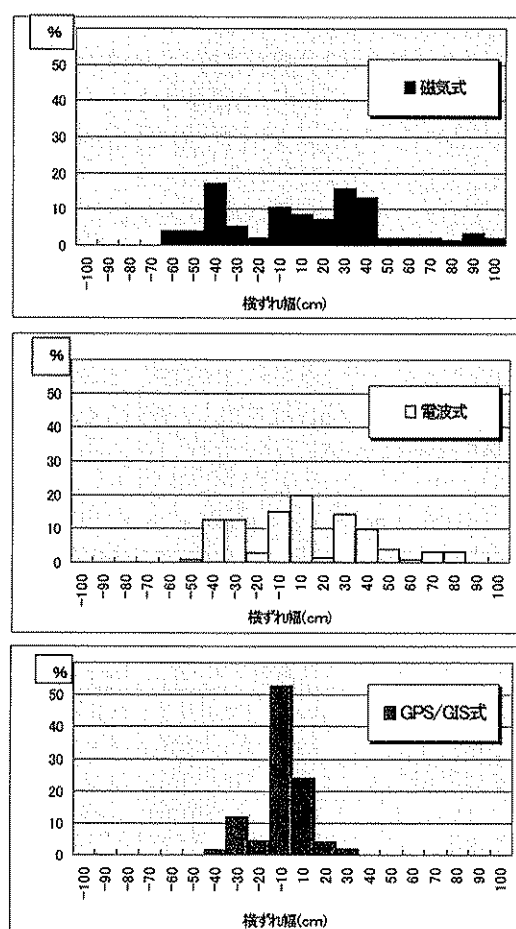


図-34 制御方式別横ずれ量の分布

を中心に交差点部を入れても -0.60m、+1.00m にばらついて、同様な横ずれを起こしている。これに対し、GPS/GIS 制御では、-0.40m、+0.30m にまとまっている。目標軌道を中心に $\pm 0.10\text{m}$ の幅でみると電波式では 35%、磁気式では 19%、GPS/GIS 制御では 77% がその中に収まっており、GPS/GIS 制御が横ずれの少ない高精度な操舵を行っている結果となった。

(2) 制御性能向上の取り組み

電波および磁気式レーンマーカ単独方式は、位置情報がレーンマーカからのみ与えられるため、連続的な GPS/GIS 方式と比較し、その横ずれ量のばらつきは大きなものとなる。この横ずれのばらつきを減少させるため、マーカ通過時の操舵制御において、マーカからの横ずれ量のみに基づくのではなく、さらに軌道情報を組み合わせて制御性能を向上させる方法を考案し、実験を行った。

これは、GIS データを用いて次のマーカの位置情報を操舵制御に取り入れるものである。具体的には連続する 3 つのマーカを通る軌道を考えると、その曲率を

中間のマーカ位置で算出することが出来る。この値をマーカの番号とともにあらかじめデータとして取得しておけば、走行時にマーカの番号をカウントしていくことでその位置での軌道の方向を制御に取り入れることが可能になる。

この制御方式による電波式マーカを使用した実験結果を図-35に示す。

目標軌道を中心に $\pm 0.10\text{m}$ の幅でみると軌道情報無しでは35%であるが、軌道情報有りでは65%に改善され、GPS/GIS 制御に近い制御結果となり改善が図られた。

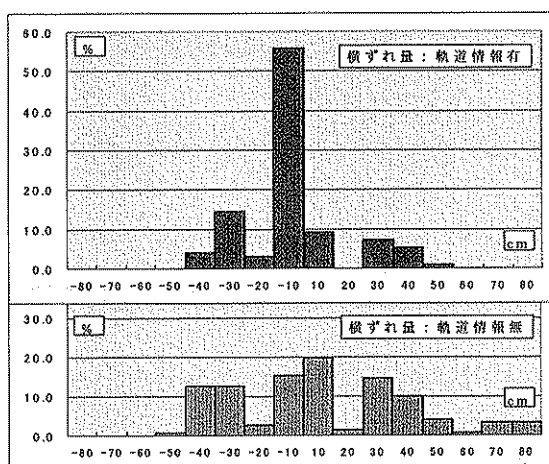


図-35 軌道情報の有無による横ずれ量の差(電波式)
また、軌道情報を活用した場合、レーンマーカの設置間隔は1.5mの方が2.0mに比べ横ずれ量が小さくなる傾向が見られた。

(3) 併用方式による横ずれ量

表-5は、電波式および磁気式レーンマーカ方式とGPS/GIS 制御方式の併用作動による横ずれ量を示したものである。これは自動操舵の途中に制御方式を切り換えた場合の制御性能を検証したものである。電波式からGPS/GIS 制御方式へ切り換えた場合と磁気式から

表-5 併用方式による横ずれ量比較

併用作動		単位:m				
道路線形		直線	左カーブ	右カーブ	直線	交差点
電波式	最大値	0.01	0.26	0.30	0.40	0.28
	最小値	-0.05	-0.34	-0.44	0.04	-0.06
	平均値	-0.01	-0.05	-0.08	0.23	0.05
	標準偏差	0.02	0.12	0.19	0.12	0.11
磁気式	最大値	0.02	0.07	0.19	0.30	0.28
	最小値	-0.08	-0.25	-0.36	0.13	-0.31
	平均値	-0.03	-0.08	-0.12	0.20	-0.11
	標準偏差	0.03	0.08	0.15	0.03	0.17
作動方法		GPS		レーンマーカセンサ		
				GPS		

GPS/GIS 制御方式へ切り換えた場合での大きな制御性能差は見られず、各々の特徴を再現したに留まった。さらに2方式のいずれかが故障または通信障害等により機能停止をした場合のレーンマーカ制御方式とGPS/GIS 制御方式間の移行は電波式、磁気式ともに円滑に行われ、不測の事態に備えた併用方式においても実用性が高いことが確認された。

5. 3. 3 自動操舵システム稼働時の安全性検証

(1) システム稼働時の割り込み操作

レーンマーカセンサ(電波式)による自動操舵システム稼働時の安全性を検証するため、オペレータが自動操舵中に次の割り込み操作を故意に行い、除雪車の挙動を確認した。

- 前後進レバー操作にて急停止を行ったが、操舵制御に異常な動作は発生しなかった。
- 走行ブレーキにて減速したが、操舵制御に異常な動作は発生しなかった。
- 非常オーガ停止スイッチを操作しても操舵制御に異常な動作は発生しなかった。
- 除雪装置の操作を行っても操舵制御に異常な動作は発生しなかった。

以上のことから、自動操舵中であっても、ハンドル操作以外の危険回避操作は可能であると思われる。

(2) 外的要因がシステムの機能に与える影響

自動操舵システムが、稼働中に実道上において影響を受けると考えられる外的要因について制御方式別に検討した。

- GPS/GIS 方式では、山陰などでGPS 信号が遮断されることが考えられる。この場合、位置特定が不可能となるので、自動操舵は不可能となる。今回の実証実験では、GPS 信号が遮断、または故障した場合のバックアップとしてレーンマーカを併用させることで、この問題を解決することとした。併用方式の作動状況を検証し、所定の機能を確認したのは前記のとおりである。
- 電波式レーンマーカ方式では、実験途中に偶然強力な電波(TV 中継用)による異常な挙動を示した。実道上では不法無線などへの対策が必要と考えられる。
- 磁気式レーンマーカ方式では、路上の金属片や可能性は低いものの磁性体の影響が考えられる。そこで、本実験では、テストコース上に事務用品で使用する磁石を埋設された磁気式レーンマーカ近傍に置いて、自動操舵させた。(写真-11)走行速度は安全を考慮して0.5km/hで2回行ったが、磁力が低いいためか異常な

挙動は示さなかった。レーンマーカを覆うような金属片が除雪後の路上に落下していることは考えにくいので、検証していない。

いずれにせよ、何らかの外的要因の影響を受けた場合には、自動操舵を継続させるばかりではなく、非常停止や警報装置の設置も考慮する必要がある。

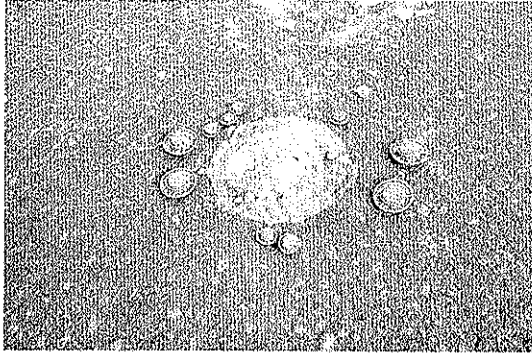


写真-11 磁気式レーンマーカと外乱用磁石

(3) 車載センサ等の信頼性

レーンマーカ・センサ、RTK-GPS など本自動操舵システムの構成機器の取り付け状況は良好で、実験中に機器類が損傷したり、故障による機能停止といったトラブルが発生することはなかった。しかしながら、実道上での使用を考慮する場合、路上での落下物、タイヤチェーンの装着などの対策を検討する必要がある。

5. 3. 4 振動測定結果

オペレータの受容性を検証するため、オペレータがどの程度の振動に暴露されているか振動測定を行った。自動操舵中の振動が手動操作に比べて大きなものとなると、オペレータ作業環境が悪化し、自動操舵システムの実用性も低下するおそれがある。振動測定は運転席の取り付けベース部分において、圧電型加速度計にて行った。測定を行ったのは次の条件である。

- a) 磁気式レーンマーカ・センサ単独作動、作業速度 4.0 km/h、除雪負荷あり
- b) オペレータによる手動操作、除雪負荷あり
- c) 磁気式レーンマーカ・センサ単独作動、作業速度 4.0 km/h、除雪負荷なし

図-36に振動波形を示す。同図において、左右、前後、上下とは、車両の進行方向に対しての方向である。振動測定は、各条件あたり1回の限られたものであったが、測定結果より次のことが確認できた。

- a) 走行前は、エンジンおよび作業機の回転等により左

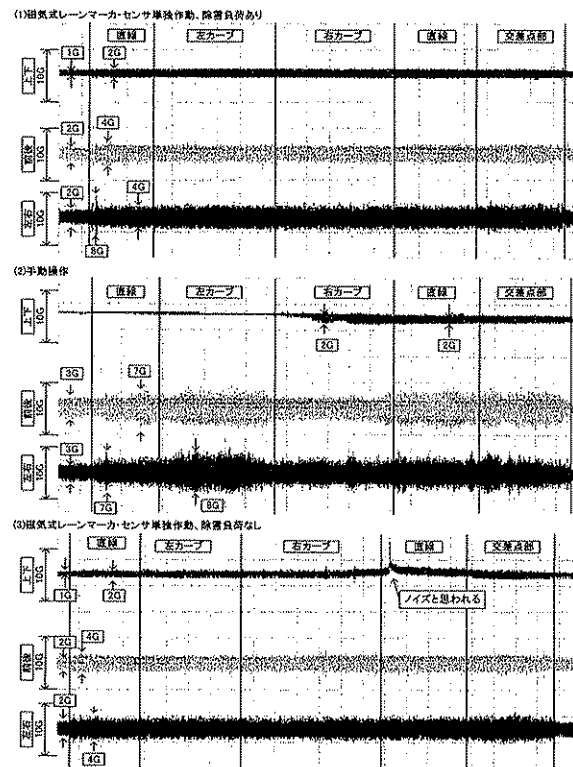


図-36 運転席における振動加速度測定結果

右、前後方向で 2G、上下方向で 1G 程度の加速度が加わっている。

- b) 磁気式レーンマーカ・センサでは除雪負荷の有無に関わらず、走行中の加速度は、走行前に比べて約 2 倍の値となり、その変動は少ない。
- c) 磁気式レーンマーカ・センサと手動操作を比べれば、手動操作の方が左右および前後方向の振動加速度は大で、その変動は大きい。

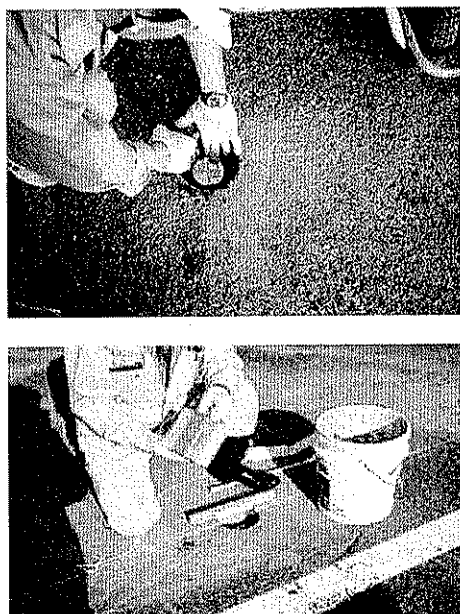
以上のことより、磁気式レーンマーカ・センサによる単独作動時に掛かる振動加速度は、オペレータによる手動操作時よりも小さく、その変動も小さいことから、自動操舵に起因するオペレータの不快感は少ないと考えられる。実証実験時のオペレータのヒアリングでも、「自動操舵による車体屈折時の横揺れは、通常のマニュアル操作での横揺れと変わらず、違和感を覚えない」との回答であった。

5. 3. 5 レーンマーカ設置歩掛り

レーンマーカの埋設時に要する作業時間・人員はレーンマーカ設置コストすなわちインフラ側のコストに直接影響する。このため、短いテストコースではあるもののどれだけの人工がかかるのか実態調査した。レーンマーカの埋設に最も時間を要するのは、電波式、磁気式のいずれも設置床面（砂床）作りであった。設

置基準に従ってひとつひとつ正確に深さを測りながら調整したテストコースの電波式レーンマーカでは 10 個設置当たり 2 名の作業で 40 分要している。このため、特製治具（木製 T 型ゲージ）を用いて効率化を図ったところ 10 個設置当たり 2 名の作業で 25～30 分の作業時間となった。実道でのレーンマーカ埋設では、数量も多くなり、作業に対する慣れも生じてくると考えられるので、より効率化されるものと思われる。

（写真－12）



写真－12 レーンマーカ設置状況（磁気式）

6. 結論

6.1 実験結果に至る前提

今回の開発にあたっては、与えられた以下の諸条件下での結果であり、設計値、計測データ等がすべての状況で再現できるものではない。特に自動操舵システムの走行精度を示した横ずれ量は、システムの精度に関し、全体の傾向の把握はできるものの偶発的な要因が影響した結果である点に留意する必要がある。

【前提条件】

- ①限られた開発期間の制約下での作業であり、必ずしも最適設計まで至っていない点を含んでいる。
- ②自動操舵システムの走行安全性を確保する機能が今回の開発には盛り込まれていない。
- ③開発システムの実用化に向けた将来的な可能性を確認することに主眼をおいた。

④今回の実験はすべての設定条件での実験ではなく、更なる設定値の調整で車体の挙動は更に良くなる可能性がある。（現状のシステム上の課題に関し、解決の見込みがあるものは将来的には実用化可能とする。）

⑤今回の制御方式は、一般的な PID 制御による自動制御であり、制御技術自体についての研究は行っていない。

6.2 研究開発結果の整理

6.2.1 ITS 及び IT 関連分野の既開発技術を活用した自動操舵システムの構築について

本研究開発では、ITS 分野の既開発技術として、レーンマーカ・センサ（電波式、磁気式）を、IT 関連分野の既開発技術として、RTK-GPS システムと道路 GIS 技術の組み合わせを活用し、次の 3 通りの自動操舵システムを開発した。

- ① 電波式レーンマーカ方式
- ② 磁気式レーンマーカ方式
- ③ GPS/GIS 方式

このうち、自動操舵における操舵制御アルゴリズムでは目標軌道からのずれ量に基づき除雪車の中折れ角を制御する一般的な PID 制御を採用した。なお、この中で横滑り等の外乱は積分型のサーボ系を構成することで制御するものとした。

また、電波式と磁気式のレーンマーカ方式については、除雪車本体の前輪の前後に同様に 2 列のセンサを設け同じ操舵角算出ロジックによるものとし、センサからのデータ出力のインターフェースの整合を図ることで開発することが出来た。この 2 列のセンサを用いることでレーンマーカの設置間隔が不明であっても制御可能な方式とした。

GPS/GIS 方式では仮想のレーンマーカの位置を算出し、それに基づきレーンマーカ方式と同じ自動操舵制御を行う方式とした。

このように、いずれもレーンマーカによる操舵制御アルゴリズムを基本としたシステムを構築することが出来た。結果的には、レーンマーカ方式と GPS/GIS 方式の間の相互補完もスムーズに可能であることが確認できた。

また、一般車両用に開発されたレーンマーカ・センサ技術をロータリ除雪車に適用する点については、0.5 km/h という低速走行においても可能であったことから十分に適用できるシステムを構築できることが確認できた。

6. 2. 2 開発された自動操舵システムの実用性について

開発されたシステムの実用性については、除雪の出来形に繋がる走行精度を含む操舵性能、操舵の信頼性・安全性、ハードウェアの使用環境への適応性などの面から検討する。

(1) 操舵性能

自動操舵を行った場合の除雪の出来形は、自動操舵走行の目標軌道に対する走行精度（横ずれ量）に左右される。横ずれ量は、交差点部を除き概ねGPS/GIS方式で最大±25cm程度であった。レーンマーカ方式（電波式、磁気式）では最大±50cm程度であったが、あらかじめ与えた軌道情報を活用することでGPS/GIS方式に近い走行精度を得ることが出来ることも確認できた。また、いずれの方式も除雪負荷の有無や作業速度の違い（0.5km/hと4km/h）については操舵性能に大きな差がないことがわかった。さらに、道路の線形から見ると通常の直線部、カーブ部では概ね目標軌道に沿って走向でき、交差点部についてもGPS/GIS方式、軌道情報を活用したレーンマーカ方式では安定して走向することができた。

熟練オペレータが行う通常の除雪作業では、走行精度は±10cm以下で制御していると考えられ、これに対しては±25cmは低い精度である。しかし、今回のシステム開発、実験は限られた期間で行われたもので、採用した制御方式（PID制御）や自動制御のゲインの調整などに改善の余地を残しており、これを考慮すると、今回開発した上記3方式の自動操舵システムはロータリ除雪車の一般的な除雪作業において概ね実用レベルの制御が可能であることを確認することが出来たと考えられる。

(2) 操舵の信頼性・安全性

自動操舵システムでは外部からの信号を受信あるいは計測して自車の位置などの情報を獲得しており、その情報の獲得の過程で不具合があった場合には異常な制御が行われる可能性がある。

今回のシステムでは、GPS/GIS方式と電波式レーンマーカ方式において上記のような事象が観察された。GPS/GIS方式では、GPS衛星からの電波を遮る遮蔽物がない場所においても一時的に位置検出精度が落ちて走向がふらつく場合があった。すぐに回復したが、これはGPS衛星の配置が一時的に狭い範囲に偏ってしまったためと推察される。また、電波式レーンマーカ方式では、除雪車に実験で取り付けた高出力の送信機の影響と思われる走向のふらつきが観察された。これも一

時的なものですぐに改善できたが、いずれの場合も実作業時の安全性確保の上から異常な動作信号に対する対策の必要はあるものと考えられる。

また、GPS/GIS方式とレーンマーカ方式を併用し、相互に補完し合う方式についても切り替えの実験を行い、円滑に行うことが出来ることを確認できた。

(3) 使用環境への適応性

道路の除雪作業は厳しい作業環境であると同時に、道路としての利用を念頭に置いておく必要がある。

今回のレーンマーカセンサは、電波式、磁気式の両方式とも、ロータリ除雪車の前車輪の直前、直後にセンサを設置するものであった。今回の実験においては損傷は見られなかったが、実作業においては車輪からの雪跳ね等の影響も考えられ、損傷等を受けないかどうかの確認は実作業を通して必要と考えられる。

また、磁気式レーンマーカは強力な永久磁石であり路面下に埋設した状態でも小さな金属片を引きつける磁力があることが観察された。道路への活用では留意する必要があると思われる。

6. 3 結論およびまとめ

本研究の結果、レーンマーカ・センサあるいはGPS/GISを活用しての自動操舵制御システムは、ロータリ除雪車の一般的な除雪作業において概ね実用レベルの制御が可能となることを確認した。

凍結した路面における横滑りなどの外乱については、検証実験の結果より、今回の積分型のサーボ系を構成する制御方法によって、実用的な範囲内で制御が可能であると考えられる。

低速走行を行うアーティキュレート式の機械を、目標軌道上に離散的に配置されたレーンマーカにより走行させる点については、アーティキュレート前方車体の下面に設置した2列のセンサを活用した操舵角算出ロジックを適用することで実現が可能であると考えられる。また、検出したレーンマーカの次のレーンマーカの位置情報（軌道情報）をあらかじめ与えておくことで制御精度はさらに向上させることが可能である。

GPSの計測データに基づき機械を自動操舵走行させることについては、道路GISのデータ形式を利用して、構内における検証実験ながら、概ね実用レベルで活用できる可能性が高いことを確認した。なお、GPS特有の一時的に位置検出精度が落ちる現象も確認されており、実用化のためには、このような場合の安全措置を講じておくことが必要である。

7. 今後の課題

今後の実用化へ向けては、以下の課題への対応が必要である。

①GPS/GIS方式では、開放的な空間であっても一時的に検出精度が落ちる場面が観察された。原因は、GPS衛星の位置が狭い範囲に集中することによるのではないかと推測される。また、電波マーカ方式においても、実験で車体に取り付けた高出力の送信機の影響と思われる予測できない挙動を示した場面があった。このような状況への対応策として、異常な動作信号が出力された場合には、オペレータに依存しないで自動的に停止する機能を付加することが必要である。

②レーンマーカ方式は、GPS/GIS方式同様、レーンマーカの位置情報を予め除雪車に与えて制御精度の向上を図ることが必要と考えられる。それには、マーカ通過毎に当該マーカの通過記録が必要で、このマーカを読み飛ばした場合の対策が必要になる。

③さらなる制御性能の向上（横ずれ量の低減）を図るには、除雪車の横滑りや除雪負荷等の外乱の定量化に努め、ロータリ除雪車の除雪作業のモデル化を行い、制御技術においてはシミュレーションによる最適方式の選定、パラメータの設定を行う技術を目指す必要がある。

④除雪作業における実用化を図るには、コストと便益の評価、安全性、信頼性など、今後、実際の道路における試験施工などを通じて確認し、改善を図っていくことが望まれる。

【謝辞】

本研究開発を実施するにあたり、国土交通省北陸地方整備局並びに同北海道開発局の皆様に多大なるご協力、ご支援をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 建設機械図鑑；社団法人日本建設機械化協会，pp28，1999.4
- 2) 三平満司、伊藤毅：非線形制御理論を用いた車両の経路追従制御と移動計画一切り返しを用いた車庫入れ制御；システム制御情報学会論文誌，Vol.6，No.1，pp.37～47，1993
- 3) たとえば、荒木光彦：古典制御理論（基礎編）；培風館など
- 4) ITS HAND BOOK 2000-2001 （財）道路新産業開発
- 5) 半田悟、中塚章、丹治義彦：レーンマーカシステム；Matsushita Technical Journal，pp45～49，2001.10
- 6) Hiroyoshi Suzuki：Development of Lane Marker System in AHSRA；6Th World Congress on Intelligent Transport Systems，1999.11
- 7) <http://163.42.5.4/rtk-gps/rtk-gps.html>
- 8) 道路除雪ハンドブック第4版；社団法人日本建設機械化協会編，pp131
- 9) Arai, Hirashita, Yoshida：ITS Application in the field of snow removal in Japan；8th World Congress on Intelligent Transport Systems，2001.10
- 10) 平下浩史、荒井猛、吉田正：ロータリ除雪車の自動操舵技術の開発；第9回建設ロボットシンポジウム，pp151～156，2002.7
- 11) 平下浩史、荒井猛、吉田正：ロータリ除雪車の自動操舵技術の開発；第9回建設ロボットシンポジウム，pp151～156，2002.7
- 12) 吉田正、荒井猛：除雪機械の操舵支援技術に関する研究開発；土木学会第54回年次学術講演会，2002.9
- 13) Arai, Hirashita, Yoshida：Automatic steering system for rotary snow removers；19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction，pp443～448，2001.10
- 14) Hirashita, Arai, Yoshida：Automatic steering system for rotary snow removers that utilizes ITS technologies；9th World Congress on Intelligent Transport Systems，2002.10