# 雪国の生活を支援する自律運行型除雪ロボットの研究開発

真柄　賢太郎[*]　相田　収平[*]　大野　宏[*]　阿部　淑人[*]　五十嵐　晃[**]　須藤　貴裕[**]

A Study of Autonomous Snowplow for Helping Snowlife

MAGARA Kentarou[*], AIDA Syuhei[*], OHNO Hiroshi[*], ABE Yoshito[*],
IKARASHI Akira[**] and SUTOU Takahiro[**]

**抄　　録**

雪を圧縮して排出する除雪ロボットの自律制御機構を開発した。ロボット本体の位置を計算しながら人や車などの障害物を検出し，決められた範囲を効率よく移動して除雪する。「愛・地球博」で実証実験を行い，その結果をもとに実用化に向けての改良を行った。

## 1．緒　　言

新潟県などの日本海側の地域は冬季の積雪量が多く，ひと冬に何回も屋根の雪下ろしと平地の除雪作業が必要になる。これらの地域では過疎化に伴う高齢化や核家族化が進んでおり，除雪作業による肉体的・精神的な負担が大きい。また，屋根の雪下ろし作業中の転落事故や，平地で除雪機を操作している間に事故に遭うことが多く，深刻な問題になっている。

そのため，本研究では人の代わりに除雪作業を自律的かつ安全に行うロボットを開発した。このロボットは，あらかじめ決められた範囲を自律的に走行しながら雪を取り込んで圧縮し，定型のブロック形状に固めて所定位置に排出する。固められた雪ブロックは高密度に圧縮されており，雪室の冷熱源として利用できる。開発は，新潟工科大学中嶋研究室，山形大学水戸部研究室，（株）技術開発研究所，（財）にいがた産業創造機構および新潟県工業技術総合研究所が共同で行った。当研究所は雪を取り込んで圧縮するという除雪ロボットの基本仕様を決め，また，自己位置の計算と障害物検出を行いロボット本体の動作を決定する自律制御機構の開発を担当した。

**図１　除雪ロボット**

本研究は平成 16～17 年度の独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「次世代ロボット実用化プロジェクト（プロトタイプ開発支援事業）」で行った。これは，2020 年において一般家庭やオフィスで広い応用が可能となるプロトタイプロボットを開発するというものである。「愛・地球博」において実証実験を行い，その結果を踏まえ実用化に向けての改良を行った。

* 研究開発センター
**下越技術支援センター

## 2．除雪ロボットの概要

開発した除雪ロボットの外観を図 1 に示す。また，基本仕様を表 1 に示す。ロボットは前進しながらオーガで雪を掻き集めて内部に送り，スクリューと反力板で圧縮して 15kg の雪ブロックを生成し，これを 6 段に重ねて所定の位置まで運搬する。ロボットの走行機構と圧縮・排出機構の開発は（株）技術開発研究所が担当した。

このロボットは，全方位カメラ，ステレオビジョン，GPS および超音波センサを搭載し，自分の位置を計算しながら周囲の状況を把握し自律的に動作する。

**表 1　除雪ロボットの基本仕様**

| | |
|---|---|
| 重さ | 600kg |
| 走行速度 | 最大 5m/s |
| 作業対象 | 対象雪　新雪（比重 0.1）～湿り雪（比重 0.4）<br>除雪能力　雪捨て時間を含み最高 2m$^3$/h 程度<br>除雪対象　駐車場のような路面が一様な土地 |

## 3．自律制御機構

### 3.1　概要

ロボットが自律的に走行して除雪作業を行うためには，障害物を検出して停止・回避する必要がある。また，一定の範囲内を除雪するためには，自己位置を計算しながらどのような経路で走行するか計画を立てる必要がある。ここでは，①ロボットの自己位置を計算する機構，②障害物を検出する機構，③ロボット内部に地図を作成しロボットの運行計画を決める機構，について述べる。

### 3.2　自己位置計算

ロボットが移動する場所に色のついたマーカを設置し，これを全方位カメラで撮像して画像処理し，その位置関係からロボットの位置を計算する。また，D-GPS（Differential Global Positioning System）により経緯度情報を取得し，2 つの方法を併用して自己位置を計算した。

#### 3.2.1　全方位カメラによる自己位置計算

ロボットの移動する範囲が長方形の場合，四隅に色のついたマーカを設置し，これを全方位カメラで撮像すると図 2 の画像を得る。次にこの画像を処理し，図 3 に示すとおり各マーカの重心を求める。ロボットに取り付けた全方位カメラの位置が変わるとこのマーカの位置も変わるため，マーカの位置から逆算してロボットの位置を計算することができる。これはカッシーニの方法 [1] と言われ，マーカが最低 3 個あるとロボットの位置と向きを求めることができる。ただし，マーカとマーカの間の角度が小さくなると計算で得られる位置の精度が悪くなるため，ここでは 4 個のマーカを使用した。

全方位カメラは鏡を使って周囲 360 ° の様子を一度に撮像することができるが，その解像度

**図 2　全方位カメラ画像**

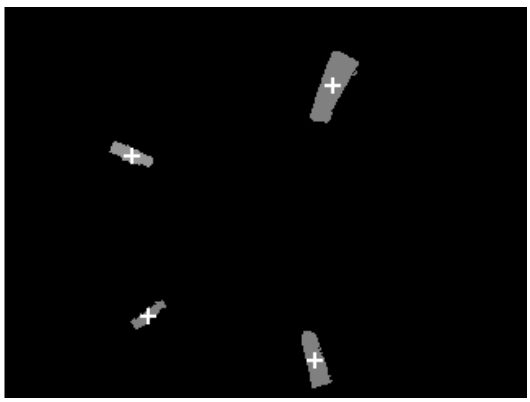

**図 3　マーカの検出**

は低い。そのため全方位カメラとマーカの距離が長くなると色を正しく識別できなくなり，移動範囲が限られてしまう。次章で述べる愛知万博の実証実験では，移動範囲が広くなかったため，マーカを正しく識別できた。

#### 3.2.2 D-GPS

GPS は，衛星を使用して自己位置を計測するシステムで，カーナビとして普及している。以前は，SA（Selectable Abairability）と呼ばれる意図的な誤差があったが，2000 年にこれが解除され，その結果 100m 程度あった位置の誤差は 1/10 に小さくなった。補正信号（RTCM SC-104）を与える D-GPS を利用すると，さらに誤差は小さくなる。現在補正信号を提供するサービスとして，船舶用に海上保安庁が中波で出力しているものと，カーナビ用にラジオの FM 波で出力しているものがある。

### 3.3 障害物検出

ロボットを安全に動作させるためには，人や車などを障害物として検出し，停止したり回避しなければならない。障害物検出は，能動型センサである超音波センサとレーザレンジファインダ，および受動型センサであるステレオビジョンを併用し，それぞれの長所を有効に活用した。

#### 3.3.1 能動型センサ

一般的に能動型センサは，検出する対象に音や光などの信号を発し，その反射信号から対象物の大きさや距離を測定するもので，照明の影響を受けないため夜間でも使用できるという特徴がある。ここでは超音波センサとレーザレンジファインダを利用した。超音波センサは，低コストで高速に動作するが空間分解能が低く対象の細かい形状までは計測できない。レーザレンジファインダは空間分解能は高いが，広範囲を調べるためにはレーザ光をスキャンさせなければならず計測に時間がかかる。

本研究で用いた超音波センサはオーミック電子（株）社製の送受信一体型センサ OM6-2CD である。指向角度は上下 20 ° 左右 40 ° で，動作範囲は 0.5m～3m である。また，レーザレンジファインダは SICK（株）社製の LMS221 を使用した。分解能が 1cm のとき測定範囲は 30m で，スキャン角度を最大の 100 ° にした場合，計測に要する時間は約 1sec であった。

#### 3.3.2 受動型センサ

一般的に受動型センサは，受けた信号から対象を計測する方法で，ステレオビジョンがその代表的なものである。具体的には，複数のカメラ画像における各画素の対応点を求め，その視差から奥行き画像（距離画像）を計算する。能動型センサにくらべて奥行き方向の分解能が低いものの，短時間で広範囲の距離画像を求めることができる。本研究では，平成 16 年度に（株）マイクロビジョンとの共同研究で開発したステレオビジョン [2] を改良して使用した。1GHz の PentiumM プロセッサを使用した場合，320×240 画素の大きさの距離画像計算に約 0.2sec 要した。

### 3.4 ロボットの運行

図 4 に示す運行のための地図をあらかじめ制御用コンピュータの中に用意しておく。この地図に，ロボットが移動する範囲，現在のロボットの位置および障害物の位置と大きさを表示す

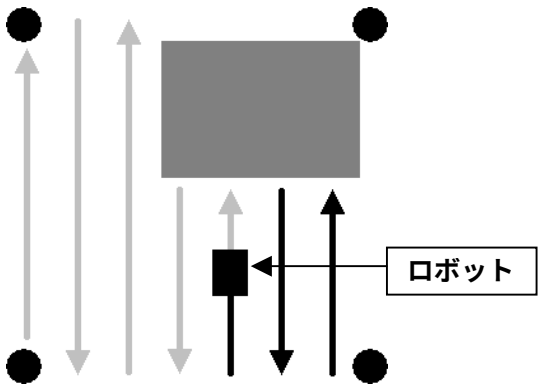


**図 4　運行地図**

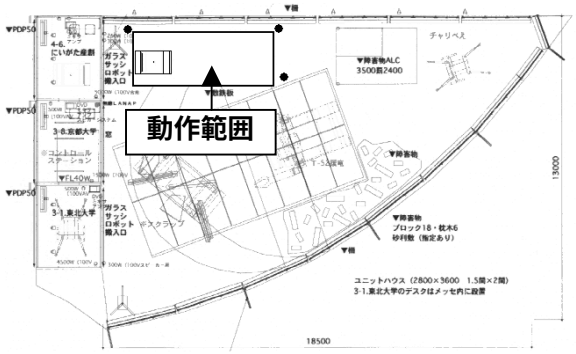


**図 5　展示会場**

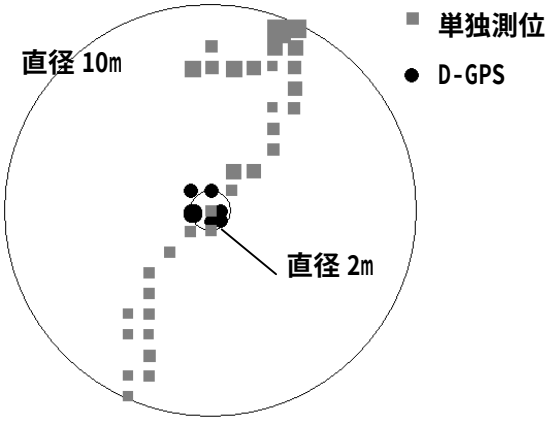


**図 6　D-GPS 測定結果**

る。この地図情報を基に，どの部分が除雪されていないかを把握し，ロボットを制御する。駐車中の車は除雪中に移動する可能性もあるため，障害物検出センサで新たな情報が得られたら，そのつど地図情報を更新しロボットを制御する。

## 4.　「愛・地球博」での実証実験

### 4.1　概要

「愛・地球博」のプロトタイプロボット展は，平成 17 年 6 月 9 日から 19 日までの 11 日間，長久手会場で開催された。京都大学のレスキューロボット，東北大学の不整地走行ロボットと交代で実演を行った。午後 3 時 30 分と 6 時 30 分の 2 回，実際に模擬雪を使って除雪を行い自律制御機構の実証実験を行った。また，その他の時間帯は紹介ビデオやパネルを使用して来場者に説明した。

### 4.2　位置計算

図 5 に除雪ロボットの動作範囲を示すが，その四隅に，黄，赤，緑，青のマーカーを設置し，全方位カメラの画像からロボットの位置を計算する。除雪ロボットの動作範囲が 6m×2.5m と比較的狭いため全方位カメラとマーカーの距離が短く，マーカーの検出が容易であるため，位置計算を確実に行うことができた。直線走行させた場合の位置の測定誤差は最大 10cm で，実演には問題なかった。

もう一つの位置計算手段である D-GPS の実験を行った。補正信号をかけ高精度にした D-GPS と何もしない単独測位の測定結果を図 6 に示す。○は D-GPS で得られた位置を、□は単独測位で得られた位置を示す。単独測位は直径 10m の円の中を，D-GPS は直径 2m の円の中をそれぞれ変動した。位置精度は補正信号をかけることで 10m から 2m ほどに高くなるが，除雪ロボットの精度としては悪い。そのため，全方位カメラ画像からの位置情報を優先させた。

### 4.3　障害物検出

展示会場では安全を確保するため屋外ゾーンでは柵が設置されており，一般来場者はその中に入ることができない。そのため，図 7 に示すとおり，展示スタッフが除雪ロボットの前に立った時に，障害物検出が正しく行われロボットが停止するかどうかの実験を行った。

障害物検出には超音波センサとステレオビジョンを併用した。当初はレーザレンジファインダも使用する予定であったが，屋外防水仕様のものは形状が大きいためロボット全体のデザインを優先させ「愛・地球博」では使用しなかった。あらかじめ超音波センサのしきい値を 3m に設定し，超音波センサと人の間隔がこれ以内になると超音波センサが動作しロボットは停止した。次に，ステレオビジョンの距離画像の形状から人か車かを判別する。図 8 は，ステレオビジョンで人をとらえた時の距離画像で，白いほどカメラとの距離が近いことを示している。

人は自動車などと違って細長い形状をしておりこの形から判断し，除雪ロボットは停止した。その後，人がいなくなると超音波センサは OFF 状態となり，ステレオビジョンでも人がいなくなったと判定し，除雪ロボットは前進した。

当初予定していた車などの大きな障害物を検出しこれを避ける動作は，可動範囲が狭いため，「愛・地球博」での実証実験では行わなかった。

### 4.4　ロボットの運行

展示会場での実演ではかき氷を雪にみたてて実験を行ったが，1 回に利用できる量や実演時間も限られていたため，ロボット本体の位置を計算しながら一方向のみ直線的に走行するようにした。また，雪ブロックを数個作製したら来場者の方向に旋回しこれらを排出するようにした。

旋回角度の計算は位置計算と同じように 4 個のマーカーの位置関係から計算する。1 回の位置と角度の計算時間は 1GHz の Celeron プロセッサで約 0.3sec，旋回速度は約 0.2sec/deg で，90°旋回の場合，旋回角度の誤差は最大で 5°であった。実演では特に問題はなかったが，折り返し走行させる場合，旋回角度に大きな誤差があると同じ場所を除雪したり未処理の場所が残ったりするため，旋回角度の誤差をできるだけ小さくする必要がある。

## 5.　実用化に向けての改良と実験

### 5.1　概要

「愛・地球博」での実演の後，ステレオビジョンの改良と，降雪時におけるレーザレンジファインダを使った測定実験を行った。ステレオビジョンは短時間に多くの情報を得ることができるため，自動車の安全センサとして一部利用されている。しかし，雪が降ったりした場合や夜間はカメラでは十分な画質が得られないため，能動型のセンサを併用することが一般的である。ここでは，実際の降雪時にレーザレンジファインダで障害物が検出できるか実験を行った。

### 5.2　ステレオビジョンの改良

平成 16 年度は，県内企業との共同研究で開発したステレオビジョンを除雪ロボットに搭載したが，より処理速度を速くするため計算アルゴリズムを改良した。本ステレオビジョンの計算方法は，カメラの Y 軸方向の 1 ラインごとに輝度値の変化の激しい点をエッジとし，エッジとエッジの間隔ごとに左右カメラ画像の対応を求め，その視差から距離画像を算出している。このエッジを求める方法を簡略化し，全体の計算時間を短くした。得られた距離画像結果はほぼ同じとなり，1 フレーム当たりの計算時間はほぼ半分の 0.1sec に短縮された。

### 5.3　レーザレンジファインダによる実験

レーザレンジファインダはピンポイントに照

**図 7　人の検出実験**

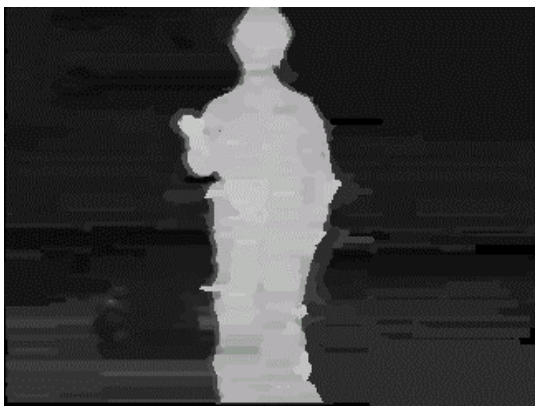

**図 8　人の距離画像**

射するレーザを鏡で走査し，障害物までの距離をパルスレーザの反射時間から測定するものである。雪の降りが弱い時のレーザレンジファインダでの測定結果を図 9 に示す。センサの近くに小さな物体がみられ，これは雪を検出したものである。レーザは雪で反射するため，同図に示すとおりところどころで雪の反射が発生する。この場合，信号処理により小さな反射を取り除くことで，車や家の壁だけを障害物として検出することができる。しかし，雪の降りが激しい場合は，実際に実験はできなかったが，いたるところで反射が起きるため雪か車などの障害物なのか判別は非常に困難になる。そのため，レーザレンジファインダの使用は雪の降りが弱い時に限られる。

なお，自動車間の距離計測センサとして使われているミリ波レーダの利用も検討したが，車間距離検出用に設定されているものを除雪ロボットにはそのまま使用できず（自動車用は測定範囲が数十メートルから百メートルであるが除雪ロボットは約 1/10），設計からやりなおすと膨大なコストがかかるため，今回は利用しなかった。

### 5.4　遠隔操縦

能動型のセンサを使用しても天候が非常に悪い場合は，ロボットの自律制御が難しくなる。そのため，人が遠隔で操縦できるようにした。模型用リモコンでロボットを操縦できる制御回路を開発し，映像転送機能を加え，屋内にいながらロボットのカメラからの映像を見て操縦することができる。暖かい屋内で除雪作業を行えることから，この機能だけでも除雪作業が非常に楽になる。

## 6．結　　言

(1) 自律的に走行しながら雪を取り込み圧縮して排出する除雪ロボットを開発した。当初の予定より大きなロボットになったが，時間当たりの除雪能力は目標とした 2m$^3$/h を達成することができた。

(2) ロボット本体の位置を計算しながら人や車を検出してこれらを避けて移動する自律制御機構を開発した。

(3) 「愛・地球博」のプロトタイプロボット展に出展し，来場者に好評を博した。NEDO の次世代ロボット実用化プロジェクトの主

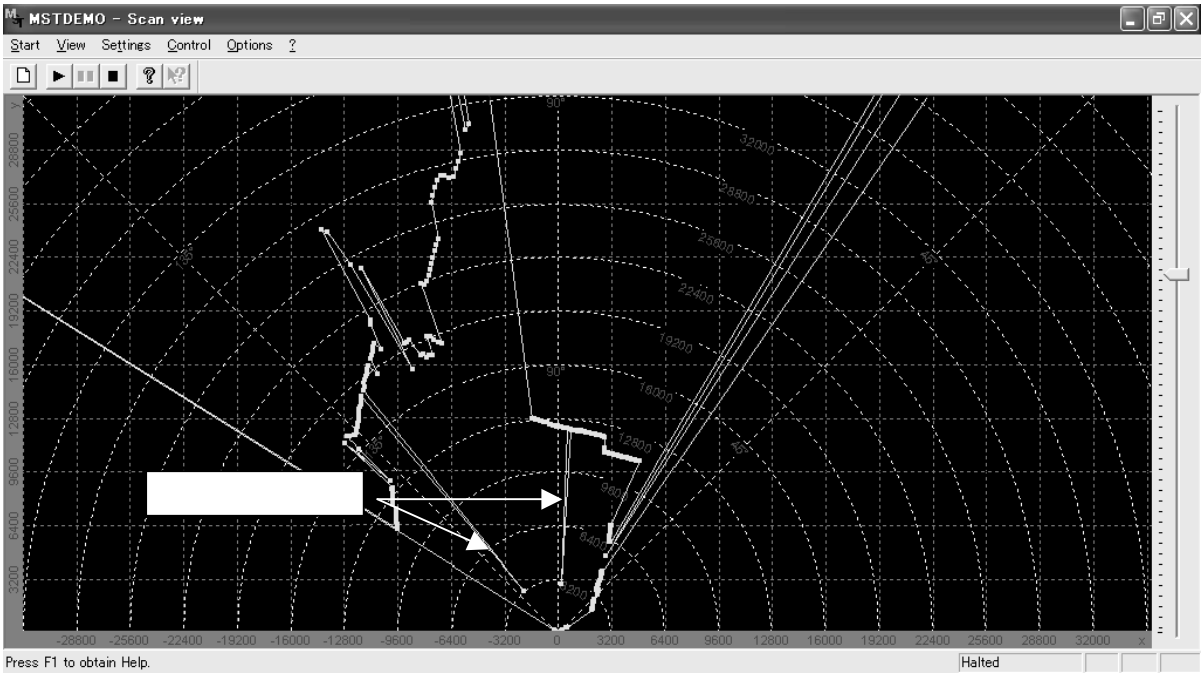


**図 9　降雪時におけるレーザレンジファインダの測定結果**

旨である「2020 年において一般家庭やオフィスで広い応用が可能となるようなプロトタイプロボット」を提示することができた。

(4) 自律制御機構に関しては既存の各種センサを利用し信号処理を工夫したが，降雪時等の悪天候下でも正確に動作するセンサがないため，新しいセンサの開発が必要である。このようなセンサは，屋外の移動ロボットだけでなく，自動車の運転者の安全運転を支援する車間距離計測センサとしても使えるため，大きな市場が見込める。

**参考文献**


1) 倉爪亮，長谷川勉，“ 全方位カメラとデッドレコニング機能を有するサッカーロボットのロバストな自己位置同定手法 L-MedS 法を用いたランドマークの対応付け ”，第 20 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集，3A22，2002

2) 大野宏他，“ ステレオビジョン画像処理の実用化研究 ”，工業技術総合研究所工業技術研究報告書，34，2005，p45-51．