

2012年度 修士論文

三次元距離画像センサを用いたセル生産工場内  
自律移動ロボットのナビゲーションの研究

電気通信大学大学院 情報システム学研究科 博士前期課程  
情報メディアシステム学専攻

学籍番号 1150019      高橋 和宏

主任指導教員: 工藤 俊亮      准教授

指導教員: 末廣 尚士      教授

指導教員: 布施 哲治      客員准教授

提出年月日: 2013年1月24日

# 目次

第1章 緒言	6
1.1 背景	6
1.2 関連研究	7
1.3 本研究の目的	8
1.4 本論文の構成	9
第2章 セル生産工場における自動搬送ロボットについての検討	10
2.1 システム全体像	10
2.1.1 教示段階	10
2.1.2 利用段階	11
2.2 自己位置推定	12
2.3 経路指示のためのインターフェース	12
第3章 システム構成	14
3.1 移動ロボットプラットフォーム	14
3.2 想定するセル生産工場の環境条件	18
3.3 空間観測モデルに基づく自己位置推定法	22
3.3.1 自己位置推定法概要	22
3.3.2 グリッドマップによる環境表現	23
3.3.3 マップマッチングによるパーティクルの尤度評価	24
3.4 環境地図と実際のセンサ観測の齟齬が多数発生する環境への応用	28

3.4.1	環境地図から観測データを復元する方法	29
3.4.2	シミュレーションによる評価	31
3.5	距離画像センサを用いた空間観測モデルの応用	33
3.5.1	距離画像センサの決定	33
3.5.2	距離画像センサを利用したローカル地図の作成方法	34
3.5.3	セル生産工場において物体が密にある高さの考察	36
3.6	環境地図の生成	37
<b>第4章</b>	<b>自己位置推定の精度評価実験</b>	<b>39</b>
4.1	単純な環境・経路での自動走行実験	39
4.1.1	環境・経路教示	39
4.1.2	実験の結果と考察	40
4.2	自己位置推定法の比較実験	48
4.2.1	環境・経路の教示	49
4.2.2	実験結果と考察	49
4.2.3	誤差要因の考察	52
4.3	未知物体のある環境下での実験	54
4.4	まとめ	57
<b>第5章</b>	<b>結言</b>	<b>58</b>
5.1	まとめ	58
5.2	今後の課題	58

# 目 次

3.1	独立二輪式移動ロボットプラットフォーム CARTIS TypeB . . . . .	16
3.2	モーターの取り付け . . . . .	17
3.3	セル生産工場の例 . . . . .	19
3.4	一定高さ平面を観測—情報が疎になる状態 . . . . .	20
3.5	一定高さ平面を観測—情報が密になる状態 . . . . .	21
3.6	ロボットのロケーションと得られるグリッドマップの例 . . . . .	23
3.7	空間情報の不一致の例 . . . . .	25
3.8	ペナルティ関数 . . . . .	27
3.9	位置推定が適切にできないと考えられている状況 . . . . .	28
3.10	環境地図からの観測データ復元のイメージ . . . . .	29
3.11	環境地図の一部 . . . . .	30
3.12	補正後の環境地図 . . . . .	30
3.13	実際に観測したローカル地図 . . . . .	31
3.14	パーティクルの尤度計算の結果 . . . . .	32
3.15	採用した距離画像センサとセンサの取り付け位置 . . . . .	34
3.16	距離画像の格納 . . . . .	35
3.17	ローカル地図 . . . . .	36
4.1	東2号館5階の見取り図 . . . . .	40
4.2	環境地図の生成結果 . . . . .	43

4.3	$P_1$ 地点での位置推定誤差 . . . . .	46
4.4	$P_2$ 地点での位置推定誤差 . . . . .	47
4.5	$P_2$ 地点において, 実際にロボットが停止した位置 . . . . .	48
4.6	実験 2 に用いた環境地図 . . . . .	50
4.7	実際のロボット停止位置 . . . . .	51
4.8	推定された目標点の実環境上における位置 . . . . .	53
4.9	未知物体を配置した実験環境の例 . . . . .	55
4.10	未知物体のある環境下での自動走行結果 . . . . .	56

# 表 目 次

3.1	立位で作業しやすい手の高さの平均値 . . . . .	36
3.2	座位で作業しやすい手の高さの平均値 . . . . .	37
4.1	$P_1$ 地点付近で停止したロボット位置 . . . . .	41
4.2	$P_2$ 地点付近で停止したロボット位置 . . . . .	42
4.3	$P_1$ 地点における推定位置の誤差 . . . . .	44
4.4	$P_2$ 地点における推定位置の誤差 . . . . .	45
4.5	停止位置と目標地点のずれ量 (停止位置誤差) の平均と標準偏差 . . . . .	52
4.6	推定位置誤差の平均 . . . . .	52
4.7	未知物体のある環境下での自動走行性能 . . . . .	55

# 第1章 緒言

## 1.1 背景

過去，大量生産のために工場生産ラインの自動化が進められ，多くの産業用ロボットが導入された．しかし近年，消費者のニーズが多様化し，多品種少量生産や変種変量生産に適したセル生産方式を導入する企業が増えている [1]．セル生産方式は生産量調整，生産する品種の変更に対応するために，工場内のレイアウト変更の頻度が多く，コンベアラインで導入されてきたように大規模な自動化設備の導入が困難である．また一人の作業者が複数工程を担当する多能工となり，熟練に時間を要する上，作業員一人あたりの責任の範囲が大きくなるなど，作業員の負担が増えている面もある．作業員は部品を棚から取得し，各々のセルまで運搬するという行動を，日に何度も求められ体力的に負担となっている．部品のピッキングと運搬を自動化することができれば，作業員の負担を減らすことができる．

従来の無人搬送車（AGV：Automatic Guided Vehicle）は，誘導線，磁気テープ，反射ミラーなどの走行ガイドを経路上に設置し，それらマーカーを検知して誘導する手法が採られてきた [2]．それらの手法では，マーカーの設置や撤去に時間とコストがかかるため，生産ライン変更の多いセル生産方式では，維持費用が増大してしまう．セル生産方式では工場内のレイアウト変更にも柔軟に対応でき，初期導入コストも低く抑えた搬送用ロボットが求められている．

本研究では，セル生産工場内での使用を想定し，セルとセルの間や，セルから部品棚までを自律的に移動するロボットの開発を目的とする．将来的には研究成果である移動口

ボットにマニピュレータを搭載し、自動的にユーザーの指定した部品をピックアップする動作の実現を念頭におき、マニピュレータが部品をピックアップ可能な位置精度での移動を目指す。

## 1.2 関連研究

ロボットが自律移動を行うときに問題となるのが、ロボットの位置姿勢の計測と補正である。車輪を搭載したロボットでは、車輪の回転量を計測することで、ロボットの位置姿勢を計算するオドメトリと呼ばれる手法が多く用いられている。しかしオドメトリは、車輪径の計測誤差や車輪の滑り、歯車のバックラッシュなどの影響で誤差が累積する。この累積誤差を補正するための手法が多く研究されており、二つのタイプに分けることができる。一つはロボットの移動する経路上に、ロボットが容易に検知可能なマーカを敷設するなど環境をロボットに合わせて改変する手法であり、二つ目は対象の環境に存在する物体そのものをランドマークにして位置姿勢を修正する手法である。

ロボットが移動を行う環境を、ロボットに合わせて改変する手法は、ロボットが移動する範囲が限られている場合には、高精度に位置姿勢を求めることができ、産業分野で活躍する AGV に広く用いられている。この種の方法としては、光ビーコン [3, 4]、レーザー反射材 [5]、磁気テープ、磁気タグ [6]、RFID タグ [7] を利用する手法がある。これらの手法は工場内のレイアウトを変更する度に、ランドマークの敷設をやりなおす必要があったり、ランドマークの設置する際にロボットの特性を深く理解している必要があるなど、レイアウト変更で発生するコストや作業員への負担が大きい。また近年では環境中に既に設置されていることが期待できる、複数の Wi-Fi 無線 LAN の電波強度によって位置を推定する手法 [8] も提案されている。磁気や電波を利用した手法は、工場内の環境の影響を受け適用できない場合もある。環境の床にランダムな点群模様を配置し、ロボットにその点群を記録させておくことで床面上のどの位置にいるかを推定する手法 [9] も提案されている。ロボットの位置を一意に精度よく推定することが期待できるが、大規模な特徴点デー



データベースを作成しなければならないことや、既存の工場に適用するには大規模な施工が必要である点が問題となる。

環境にある物体そのものをランドマークにして位置姿勢を修正する手法は、近年盛んに研究されている。カメラをロボットに設置して経路を手動走行させて教示する走行経路画像を使いロボットのナビゲーションを行う手法 [10, 11] が提案されているが、未知の障害物によるランドマークの隠れに弱いこと、未知の障害物を回避しての経路復帰が困難であるという問題がある。レーザー式の測域センサを用いて環境の形状を測定し、位置推定に用いる手法は良好な成果を上げている [12, 13, 14]。これらの手法は特別なランドマークを必要とせず、自己位置を推定可能であり、環境・経路の教示はロボットを一度手動で走行させるティーチング・プレイバックで行うことが可能である。

セル生産工場においては、工場のレイアウト変更の頻度が多くなり、その度に環境・経路を教示しなければならない。よって環境・経路の教示が簡易であり、特殊なランドマークの必要がないことは大きな利点となる。

### 1.3 本研究の目的

本研究の目的はセル生産工場で利用されることを念頭に置き、屋内環境において人の指示した地点まで精度良く移動するロボットの実現を目的とする。そのためまず、セル生産現場への応用を考えた場合、想定されるロボットシステムのはどのようなものであるか検討を行う。その検討内容のもと自律移動に必要な要素としての移動ロボットプラットフォームの開発、工場という環境を想定した既存の自己位置推定法の拡張を行う。最後に開発した移動ロボットプラットフォームを用いて、指示された目標地点へ到達する精度を実験によって評価する。

## 1.4 本論文の構成

本論文では第2章で、セル生産工場において稼働する自動搬送ロボットについて、どのようなロボットであることが望ましいか検討した結果について述べ、第3章では実際に開発を行ったハードウェア、ソフトウェアについて詳細を述べる。第4章で開発したシステムの性能を評価した実験について述べ、最後に第5章で本論文の結論と今後の課題について述べる。

## 第2章 セル生産工場における自動搬送ロボットについての検討

### 2.1 システム全体像

本研究の成果の適用を期待するのは、セル生産工場内における部品・部材の運搬である。そのためユーザーとして想定するのは、セル生産工場で働く作業者である。本研究で想定するロボットの利用の流れについて、ロボットの利用段階を、

1. 教示段階
2. 利用段階

の二段階に分けて述べる。ユーザーが利用段階において、ロボットに物品を取得するタスクを実行させるには、その前に教示段階を経て準備をしなければならない。

#### 2.1.1 教示段階

本研究で想定するロボットは、工場内を自動的に走行するために、環境全体の情報を地図(環境地図)として与えておく必要がある。また走行経路を指定するために、ロボットのスタート位置となるセルの入り口地点や、移動の目標である部品棚前の地点、交差点や曲がり角など経路の分岐のある地点などの情報も必要とする。以降、本論文ではそれらの地点情報のことをウェイポイントと記述する。

教示段階は上で述べた、自動走行に必要な環境地図とウェイポイントを、ロボットに教示するものである。環境地図とウェイポイントを作成する方法として、実際に移動を

行う環境でロボットを手動で走行させながら，センサによって環境情報を計測する，いわゆる教示走行をおこなう方法の他，前もって寸法の精確な工場内のレイアウト図を得られれば，それを基に環境地図を作成する方法も考えられる．しかしセル生産工場での利用を想定した場合には，目標とするロボットの停止位置決め精度に対して，事前に得られるレイアウト図の寸法精度が低いと予想される．

よって，本研究で目標とする工場内自律移動ロボットでは，環境地図とウェイポイントを教示走行にて得ることが適切であると考えられる．以上の理由から，本論文で行った実験では，環境地図とウェイポイントは教示走行にて得ることとした．

### 2.1.2 利用段階

利用段階では，ユーザーの指示によってロボットがタスクを行う．ユーザーの入力からタスクの終了までの流れを以下に示す．

- ① ユーザーが目標地点(部品棚前)となるウェイポイントと取得したい部品を選択する．  
ロボットが移動を開始する地点は既知とし，スタート地点となるウェイポイントの選択も行う．
- ② ユーザーがスタート地点から目標地点までの経路を，通過すべきウェイポイントを通る順番に指示する．
- ③ ロボットは指示された目標地点まで，指定された順にウェイポイントを辿りながら移動を行う．
- ④ 指定の地点まで移動を完了すると，ロボットは搭載されるアーム，もしくは環境に設置された何らかのシステムによって，ユーザーから指示された部品を取得する．
- ⑤ 部品を取得した地点は既知であり，ユーザーのいるセルの場所も既知であるので，ロボットはユーザーのいるセルまで再び移動を行う．

以上がセル生産工場内における AGV のタスクの全体的な流れであり，本研究では上記の内，②，③，⑤の自律的な移動に関する部分を実現するためのシステムの提案と，移動ロボットプラットフォームへの実装を行い，実験により完成したシステムについて評価を行う．

## 2.2 自己位置推定

先に述べたように，ロボットが実環境で目的地まで移動を行うには，ロボットの位置を推定しなければならない．これまで工場稼働する AGV の位置推定では，位置の正確さが重視されているために，磁気テープの他，特殊なランドマークを用いた手法が用いられてきた．しかし近年増加しているセル生産方式を採用した工場では，工場内のレイアウトが変更されることが多く，ロボットが移動する環境や経路もそれに伴って変更される．特殊なランドマークを設置する方式では，レイアウト変更の度にランドマークの取り外しと再設置が必要であり，レイアウトが変更される頻度の多い環境には適していない．

よって本研究では，特別なランドマークを必要とせず，セル生産工場中の環境に設置されている作業台や棚，工作機械などをランドマークとして，自己位置を推定可能なシステムの実現を行う．また目標地点において，搭載したロボットアームによる部品棚からの部品取得タスクの実施を想定するので，ロボットが目標地点の 0.1m 以内で停止可能となることを目指す．

## 2.3 経路指示のためのインターフェース

本研究で想定するセル生産工場内 AGV では，工場内のあるセルから部品棚まで移動することを想定する．工場内ではロボットが通るべき経路が勝手に決められるのは，不都合が生じることがあると予測されるので，ロボットの移動する経路をユーザーが選択可能であることが望ましいと考えた．

そこで本研究では、環境地図とウェイポイントの情報を用いて、スタート地点、通過点、目標地点のウェイポイントを指示することでロボットの移動経路を指示可能な機能の実装を行った。

## 第3章 システム構成

本章では，第2章で述べたシステムへの適用を想定し，本研究で構築した移動ロボットプラットフォームのハードウェア，ソフトウェアについて述べる．

### 3.1 移動ロボットプラットフォーム

移動ロボットプラットフォームには，部材を搭載し運ぶことのできる積載・運搬能力，工場内の限られたスペースの中での旋回性能が求められる．しかもそれらの機能を最終的には安価に実現できるハードウェアを構築しなければならない．

ホロノミックに全方向へ移動可能な機構の開発が進んでいる [15, 16]．それらの機構を有すロボットは工場内の限られた空間でも，自由に全方向移動できる．非ホロノミックな拘束のために，ロボットの取りうる軌道が制限されないという点が大きなメリットとなる．しかし一方で，機構の複雑化や動力が冗長に必要ななどの問題がある．

非ホロノミックな移動機構としてステアリング式の四輪車両型や，独立二輪駆動式がある．四輪車両型は高速域や不整地に強く，悪条件でも比較的安定に走行が可能である．しかし旋回性能が良くないため，狭い通路を曲がるには切り返し動作など複雑な操作が必要となる．独立二輪駆動は構造が単純なので安価に構築可能で，超信地旋回が可能であるなど回頭性能も高い．しかし，床面の条件が悪い場合や，高速で動作させた場合，滑りが発生しやすいなどの弱点がある．

本研究で想定するのは，セル生産工場であり屋内であるので，床面の条件は良いと考える．ロボットが通行する経路も，ロボットサイズに対し信地旋回が可能な程度に十分広い

ことを想定し，本研究では実験用の移動ロボットプラットフォームの駆動方式として，独立二輪駆動タイプが適切であると考えた．

セル生産方式は一般に比較的小型の製品製造に用いられることが多く，ゆえにロボットの可搬重量を数 kg ~ 十数 kg と想定した．そこで本研究における実験には GMP インターナショナル製の三輪カート型ベビーカー，AirBuggy COCO をベースに改造した，独立二輪型の移動ロボットプラットフォーム CARTIS TypeB[17] を用いることとした (図 3.1)．CARTIS TypeB は三輪のうち前方一輪を従輪，後方二輪を駆動輪とする独立二輪型の車両であり，全長 1050mm，幅 580mm，高さ 990 mm となっている．駆動輪の動力として Maxon 社製 DC モータ RE35 を図 3.2 のように取り付けている．減速比は 70 倍でモータドライバには東京高専製の MD-180MA2[18] を用いており，モータの電源電圧は 24V である．また可搬重量はフレーム部分の耐荷重により 20kg に制限されている．各モータには回転量を計測するためにロータリーエンコーダ MR Type L(分解能:500 カウント) を取り付けている．本機は SH2-7045 マイコンを介して PC で制御しており，制御ソフトウェアに SH-Spur[19] の発展である YP-Spur を用いている．実験に用いた制御用の PC は東芝 Dynabook(CPU: Intel Core-i5 M 560 2.67 GHz × 4，メモリ 7.6GB) であった．この PC1 台でロボットの制御の他，後述するソフトウェアの実行を行っている．





図 3.1: 独立二輪式移動ロボットプラットフォーム CARTIS TypeB

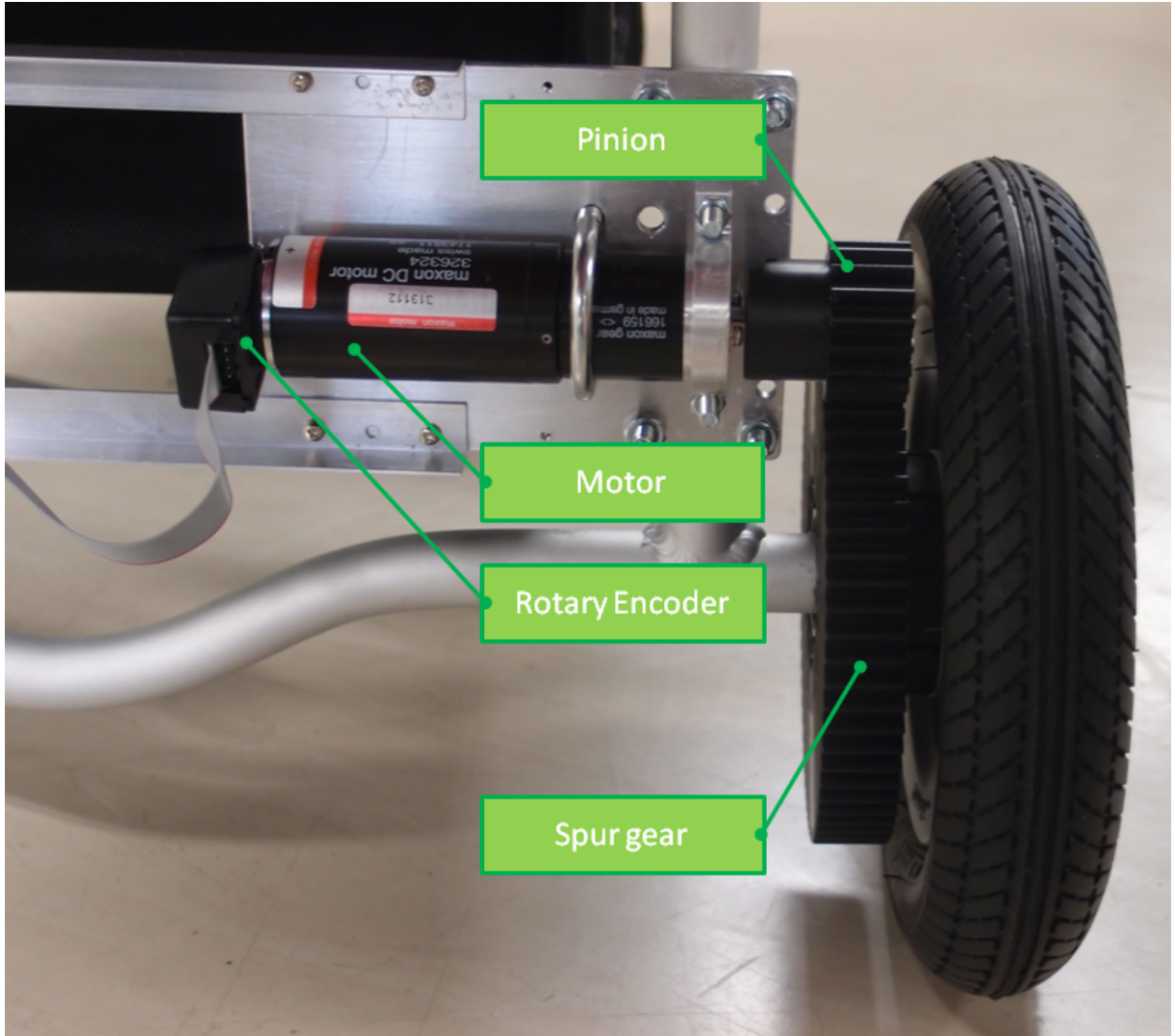


図 3.2: モーターの取り付け

## 3.2 想定するセル生産工場の環境条件

本節では、まず想定するセル生産工場内の環境について分析し、ロボットの自律移動における、自己位置推定に関する問題を検討する。図 3.3 は実際のセル生産工場の写真である。図 3.3 をみると環境中には脚の細い作業台や、部品が置かれた棚などが多く存在することがわかる。それらをランドマークとして観測し、自己位置推定に用いなければならない。ここで自己位置推定に関して、二つの問題がある。

一つ目の問題は工場内で労働する作業者の存在である。作業者はロボットの移動中も常に動いており、事前にロボットに与えられる地図に記載の無い未知の物体となる。よって未知物体の影響を受けにくい、自己位置推定法を用いなければならない。

二つ目の問題は、ランドマークとなる棚や作業台の大きさ・形状が規定されていないことである。例えば、測域センサを用いて一定高さ平面だけを観測した場合、センサの取り付け高さに観測する空間情報が依存してしまい、図 3.4 のように観測高さ平面には、作業台の細い脚しか入らない状態になったり、図 3.5(b) のように、しっかりと観測できる状態になったりする。図 3.3 のように実際の環境では作業台の下が、ラックのようになっており、ラック内の物品も観測情報に影響する。これらの影響により、環境観測の方法によっては位置推定に適する情報が得られない。

以上の二つの問題に対処しなければならない。一つ目の問題には、第 3.3 節で述べる、空間観測モデルに基づく自己位置推定手法を用いることで対処する。さらに、二つ目の問題に関する対処を第 3.5 節で述べる。

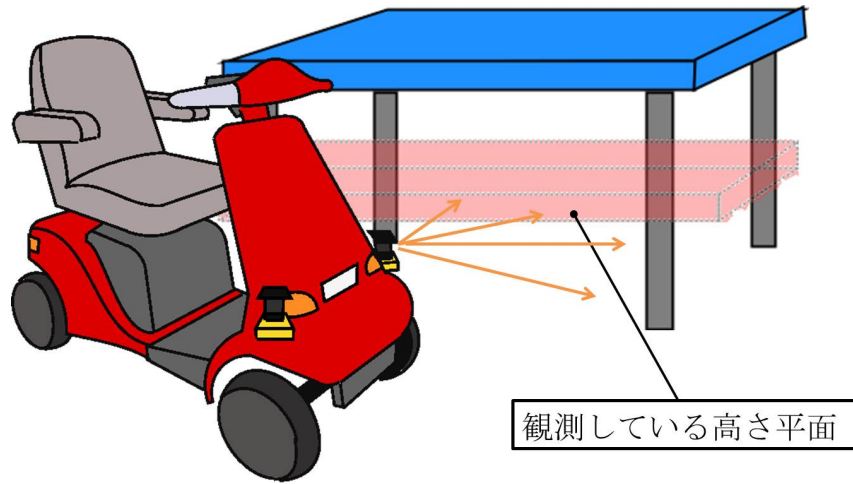


(a) パナソニック エコシステムズ共栄株式会社 [20]

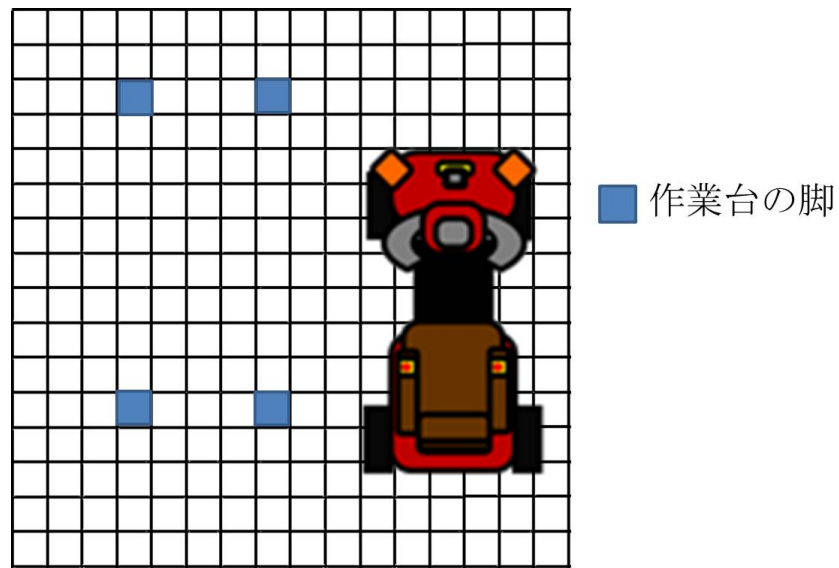


(b) 三友エレクトリック株式会社 [21]

図 3.3: セル生産工場の例

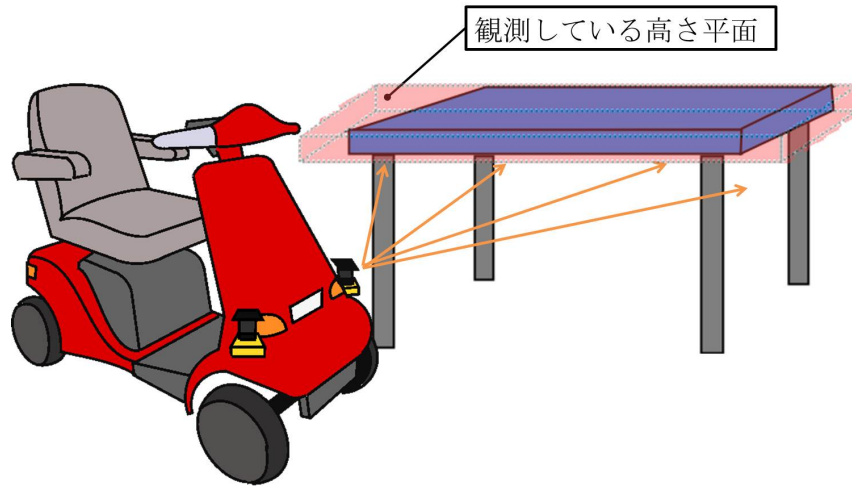


(a) 作業台とロボット，観測平面の位置関係

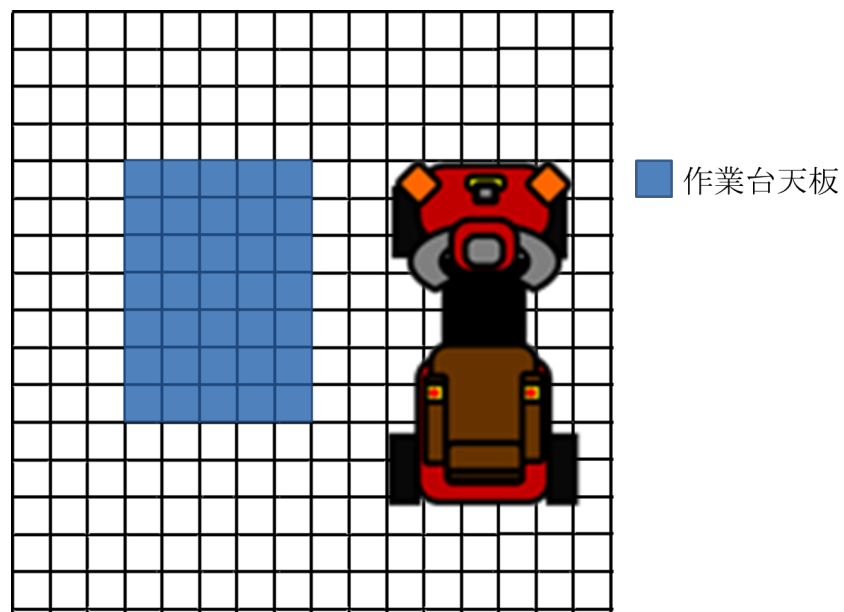


(b) センサで観測される情報

図 3.4: 一定高さ平面を観測—情報が疎になる状態



(a) 作業台とロボット，観測平面の位置関係



(b) センサで観測される情報

図 3.5: 一定高さ平面を観測—情報が密になる状態

### 3.3 空間観測モデルに基づく自己位置推定法

富沢らは自己位置推定手法として，空間観測モデルを提案し [14]，つくばチャレンジ 2010[22] 等において良好な実験結果を示した．空間観測モデルは，

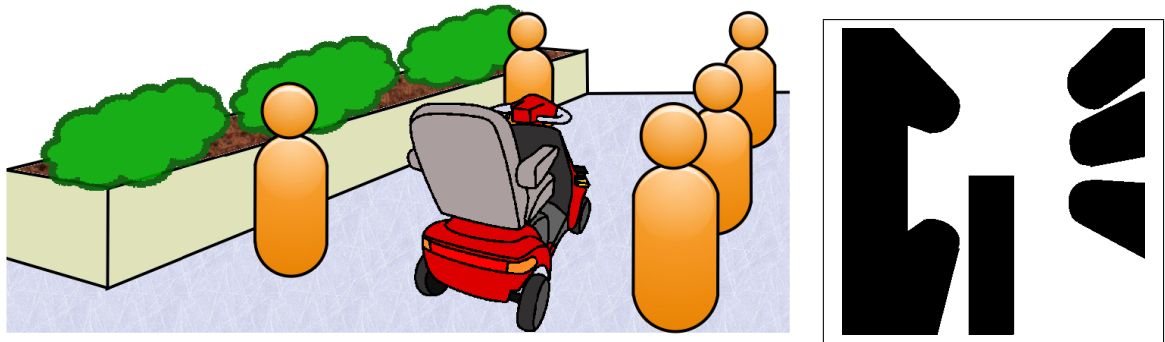
- 事前に与える地図に記載のない未知障害物の存在に頑健である．
- 環境中に特殊なランドマークを必要としない．
- リアルタイムな位置推定が可能である．

といった特徴がある．工場内では人が作業や移動を行う環境がロボットの移動経路と分けられず，人や一時的に配置されたモノが未知障害物となるため，それらの影響に強いことが求められる．また，生産ラインを変更しても，特殊なランドマークを必要とせずに，環境・経路の教示が可能である．以上の理由により，本研究では自己位置推定手法として空間観測モデルに基づく手法を用いることとした．

本節で空間観測モデルについて説明した後に，セル生産工場を想定した応用について述べる．

#### 3.3.1 自己位置推定法概要

ロボットの自己位置推定に，多数のパーティクルでロボット位置の確率分布を表すパーティクルフィルタを用いた手法がよく用いられており [23, 12, 24]，空間観測モデルもその一つである．空間観測モデルは，ロボット位置の事前分布をオドメトリにより算出し，事前に与えた地図とセンサの観測によりパーティクルの尤度を評価し，ベイズの定理に則って自己位置の事後分布を推定する．以降で，まず地図情報とセンサの観測情報の取り扱いについて述べ，次に各パーティクルの尤度の評価方法について述べる．



(a) ロボットの位置

(b) ローカル地図 白: 自由空間  
黒: 占有空間

図 3.6: ロボットのロケーションと得られるグリッドマップの例

### 3.3.2 グリッドマップによる環境表現

環境全体の情報とロボットの観測情報のそれぞれを、正方格子で分割したグリッドマップで表現する。以降、ロボットに搭載したセンサで得る距離情報をもとに生成する、ロボット周辺の局所的なグリッドマップをローカル地図  $L$  と呼び、環境全体の地形を表す広域なグリッドマップを環境地図  $M$  と呼ぶ。各グリッドに入る情報は、

1. 測域センサのレーザーが通過する空間 (自由空間)
2. 測域センサのレーザーが通過しなかった空間 (占有空間)

の2つである。環境地図においては、レーザーを通過する可能性のある空間は原則として、自由空間として記述することとする。つまり環境地図には、ロボットが実際に走行する際になくなっていく可能性のあるものを記述しない。例えばセンサで一定高さ平面を観測しているとして、図3.6(a)に示す状況にロボットがあった場合、ローカル地図は図3.6(b)のようになる。ローカル地図(図3.6(b))ではロボット周囲にいる人のため、センサの光線が通過しない空間を占有空間となっている。環境地図には、図3.6(b)中の植込みのような固定障害物のみが記述される。



実装ではローカル地図・グローバル地図を，占有空間を黒，自由空間を白とする二値の画像として扱う．

### 3.3.3 マップマッチングによるパーティクルの尤度評価

パーティクルフィルタによる自己位置推定では，時刻  $t$  においてローカル地図  $L_t$  を観測したとき，位置  $\mathbf{r}_t = (x_t, y_t, \theta_t)^T$  をパーティクルの位置姿勢の荷重平均として求める． $i$  番目のパーティクルの重み  $w_t^{(i)}$  は，パーティクルの尤度に比例する．パーティクルの尤度の計算法を以下で述べる．

ローカル地図を，各パーティクルの位置姿勢に合わせ環境地図と重ね合わせて，ピクセルごとに情報の不一致を計数し，パーティクルの尤度を評価する．空間情報の不一致とは，

1. 環境地図の占有空間とローカル地図の自由空間の重複 (貫通)
2. 環境地図の自由空間とローカル地図の占有空間の重複 (侵入)

の二つの状態を指す．第一の状態は環境地図に記述された壁などの占有空間に対し，パーティクルが実際の位置より接近した場合に生じ (図 3.7(a))，以降この状態を貫通と呼ぶ．第二の状態は環境地図中の占有空間に対し，パーティクルが実際の位置よりも遠い場合か，未知障害物が存在する場合に生じ (図 3.7(b))，以降この状態を侵入と呼ぶ．

この二つの基準によりパーティクルにペナルティを与え，パーティクルの尤度は2つのペナルティの掛けあわせで算出する．

まず貫通によるペナルティ  $P_{pr}$  の計算について述べる． $i$  番目のパーティクルの位置姿勢  $\mathbf{r}_t^{(i)} = (x_t^{(i)}, y_t^{(i)}, \theta_t^{(i)})$  に合わせ並進・回転させ，環境地図  $M$  の1部の領域  $m^{(i)}$  として取り出す．ローカル地図  $L_t$  と  $m^{(i)}$  の対応するピクセルの値を比較し， $L_t$  で自由空間， $m^{(i)}$  で占有空間となるピクセル数を数え， $m^{(i)}$  の占有空間のピクセル数で除し，貫通率を計算する．貫通率をパラメータとした中心  $0$ ， $\sigma = 10$  の正規分布をペナルティ関数とし (図 3.8(a))，これによって貫通量に与えるペナルティ  $P_{pr}$  を算出する．



(a) 環境地図の占有空間とローカル地図の自由空間の重複の例



(b) 環境地図の自由空間とローカル地図の占有空間の重複の例

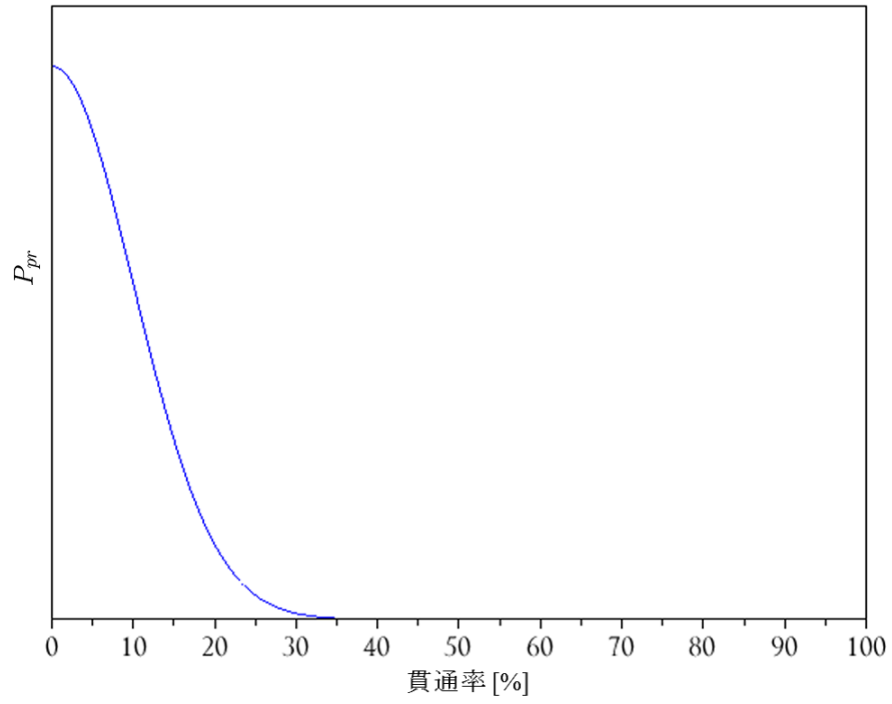
図 3.7: 空間情報の不一致の例 不一致の発生した領域を赤で示している

次に侵入によるペナルティ  $P_{ir}$  の計算について述べる．貫通の場合と同様に，パーティクルの状態に合わせ， $m^{(i)}$  を取り出す．ローカル地図  $L$  と  $m_t^{(i)}$  の対応するピクセルの値を比較し， $L_t$  で占有空間， $m_t^{(i)}$  で自由空間となるピクセル数を数え， $m_t^{(i)}$  の自由空間の数で除して侵入率を計算する．侵入率をパラメータとした中心 0， $\sigma = 130$  の正規分布をペナルティ関数とし (図 3.8(b))，これによって侵入量に与えるペナルティ  $P_{ir}$  を算出する．

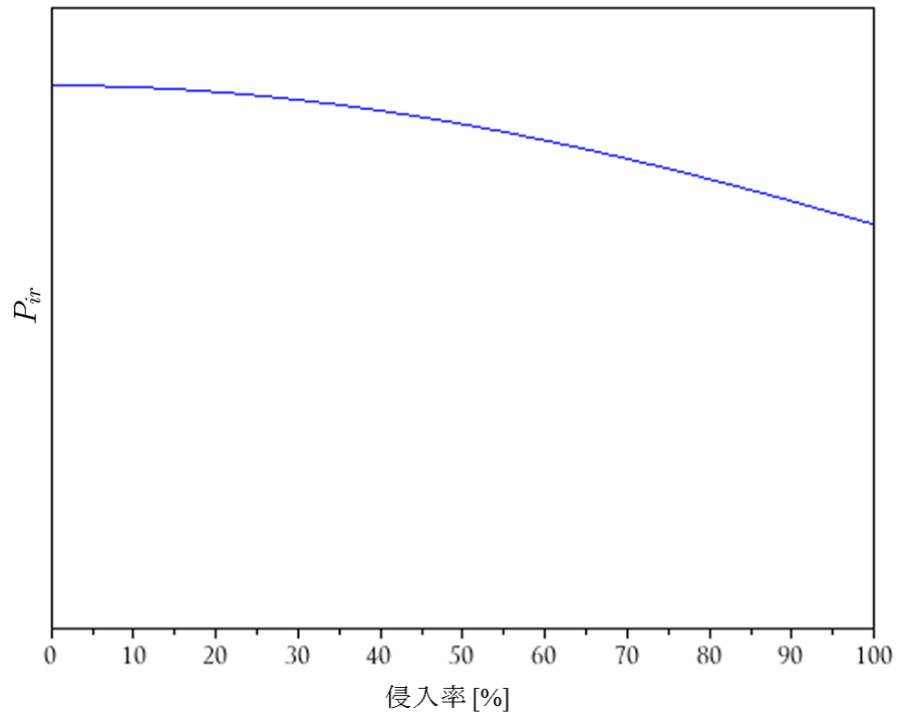
パーティクルの尤度  $p(L_t | \mathbf{r}_t^{(i)}, m_i)$  は，

$$p(L_t | \mathbf{r}_t^{(i)}, m_i) = P_{pr} \times P_{ir}$$

で計算される．重み  $w_t^i$  はパーティクルの尤度の総和で正規化して求める．ここで図 3.8 をみると，二つのペナルティ関数  $P_{pr}$ ， $P_{ir}$  の形状が異なっていることがわかる．貫通が発生した場合は，貫通量の増加に伴ってパーティクルに大きくペナルティを与える．一方，侵入が発生した場合，侵入量の増加に伴いパーティクルに与えるペナルティは貫通の場合と比べて小さくする．その理由は， $P_{pr}$  が測域センサのレーザーは物体をほとんど通過せず，正しい位置にいるパーティクルは貫通の影響を受けないが，侵入は例え正しい位置パーティクルがあっても，未知障害物によって起こりうるためである．以上のように，未知障害物の発生を考慮した二つのペナルティ関数を用いることで，本手法では未知障害物に対して頑健に自己位置を推定することができる．



(a) 貫通により与えるペナルティ  $P_{pr}$



(b) 侵入により与えるペナルティ  $P_{ir}$

図 3.8: ペナルティ関数

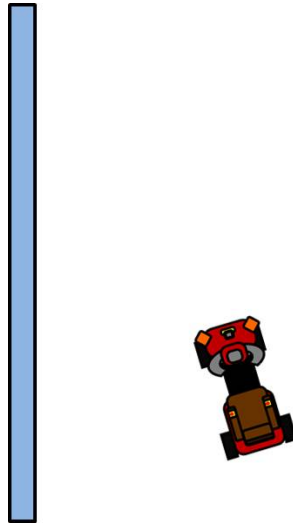
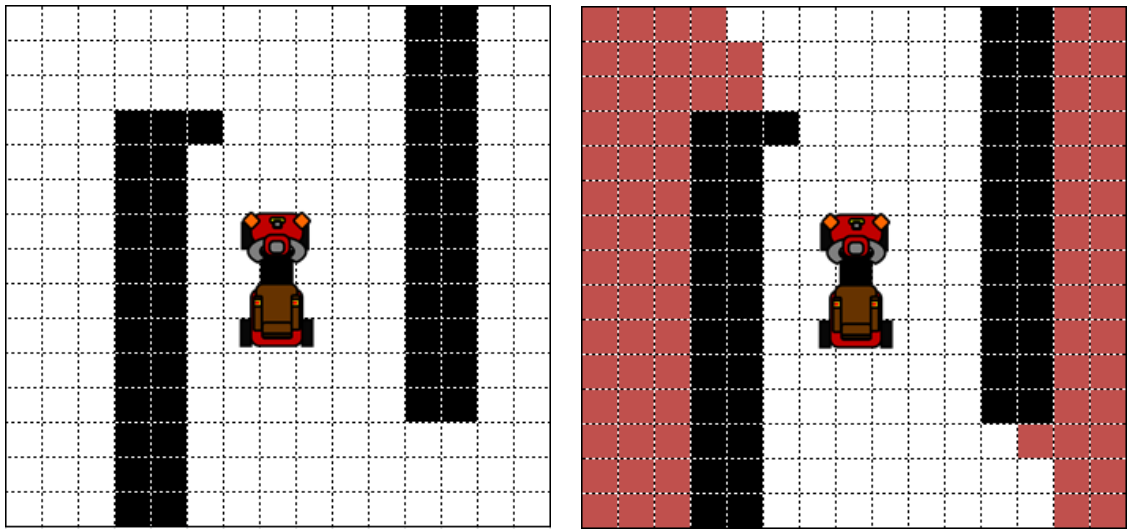


図 3.9: 位置推定が適切にできないと考えられている状況

### 3.4 環境地図と実際のセンサ観測の齟齬が多数発生する環境 への応用

空間観測モデルはこれまでつくばチャレンジや，大学構内の屋外環境において良好な実験成果を示している [14, 25]．しかし，パーティションのような薄い壁がロボットの片側に存在する状況（図3.9）では，正しい位置にあるパーティクルであっても第3.3.3節で述べた侵入によるペナルティを受けるので，位置の推定精度が低下するという問題が予想された．

この原因は，空間観測モデルでは時刻  $t$  において環境地図  $m_i$  が与えられた時，ローカル地図  $L_t$  を観測しえる事後確率を，二つのペナルティ関数の積で表すが，しかし実際には  $m_i$  は環境地図の全体  $M$  の一部を切り抜いた図 3.10(a) のようなものとなり，パーティクルの位置  $r_t^{(i)}$  における観測データ（図 3.10(b)）の再現になっていないからである．本節ではこの問題を解決するための方法として，パーティクルの位置姿勢  $r_t^{(i)}$  における観測データを環境地図  $m_i$  から復元し，パーティクルの尤度評価をより適切に行う手法 [26] を提案する．さらにシミュレーションで提案法と従来法の比較を行い，提案法の有効性を検



(a) 位置  $r_t^{(i)}$  において切り出した環境地図  $m_i$  (b) グローバル地図から復元した観測されるはずのデータ  
 黒:元々の占有空間 赤:復元された占有空間

図 3.10: 環境地図からの観測データ復元のイメージ

討する .

### 3.4.1 環境地図から観測データを復元する方法

空間観測モデルにおいて地図に記述される情報は、自由空間か占有空間である。自由空間とは測域センサの光線が通過する空間であり、占有空間とは光線が通過しない空間である。測域センサの光線は直進するので、測域センサと環境地図上の自由空間を示すグリッドとの線分上に、占有空間であるグリッドが存在するならば、その自由空間は測域センサからの死角となり、ローカル画像上では占有空間になると考えられる。よって以下に示す4つのステップで環境地図から尤度評価用地図の生成を行う。

1. パーティクルの位置姿勢に合わせて、環境地図からローカル地図と同じサイズの領域を切り出す。



図 3.11: 環境地図の一部



図 3.12: 補正後の環境地図

2. 切り出した環境地図上の自由空間を探索する .
3. 自由空間とセンサの間の線分上に , 占有空間が存在するかを調べる .
4. 線分上に占有空間が存在しない場合 , 自由空間はそのままとする . 線分上に占有空間が存在した場合 , センサから最も近い占有空間より遠い線分上のグリッド全てを占有空間とする .

ロボットに測域センサを搭載して , 手動で走行させることにより , 環境情報を収集して作成した環境地図の一部を図3.11 のように切り出し , 上記の 4 つのステップによって , 環境地図を補正すると図3.12 のような地図を得ることができた . ロボットがこのとき実際に観測しているローカル地図は図3.13 である . 第 3.5.1 節にて詳しく述べるが , 実験に用いたロボットには測域範囲  $59^\circ$  の距離センサ二台を , 対象な方向に向けて搭載した . そのため測域センサの範囲外となる領域が存在し , 図3.13 中の灰色は測域センサの範囲外であることを示している .

図3.11 と図3.13 を比較すると , 環境地図に記述された情報と , その場で実際に観測することのできるローカル地図では , オクルージョンのために異なっていることがわかる . しかし図3.11 より , オクルージョンを考慮して生成した図3.12 は図3.11 と比較して , 図3.13 との矛盾が少ない . この様にして各パーティクルごとに , 尤度評価用画像を生成し尤度の評価に用いる .



図 3.13: 実際に観測したローカル地図 グレーの領域はセンサの測域範囲外

### 3.4.2 シミュレーションによる評価

ロボットの片側に、厚さ 0.1m の薄い壁が存在する状況において、 $x$  軸上でのロボット位置の尤度を計算するシミュレーションを行った。シミュレーションの結果を図3.14に示す。図3.14において、 $x = 0$  がロボットの真の位置である。図3.14を見ると、従来法・提案法ともに真値で尤度が最大となるが、従来法では真値からはずれた位置での尤度と真値での尤度に差が見られない。特に  $x$  軸正方向では尤度が最大となったままである。これらのことから提案法では、誤った位置にあるパーティクルの尤度が低下しないと考える。しかし提案法では尤度が真値で最大となり、かつ真値から外れた位置では尤度を下げることができている。以上より、提案法では環境地図を基に観測データを再現することで、従来法と比較してもっともらしく尤度を評価できることを確認した。



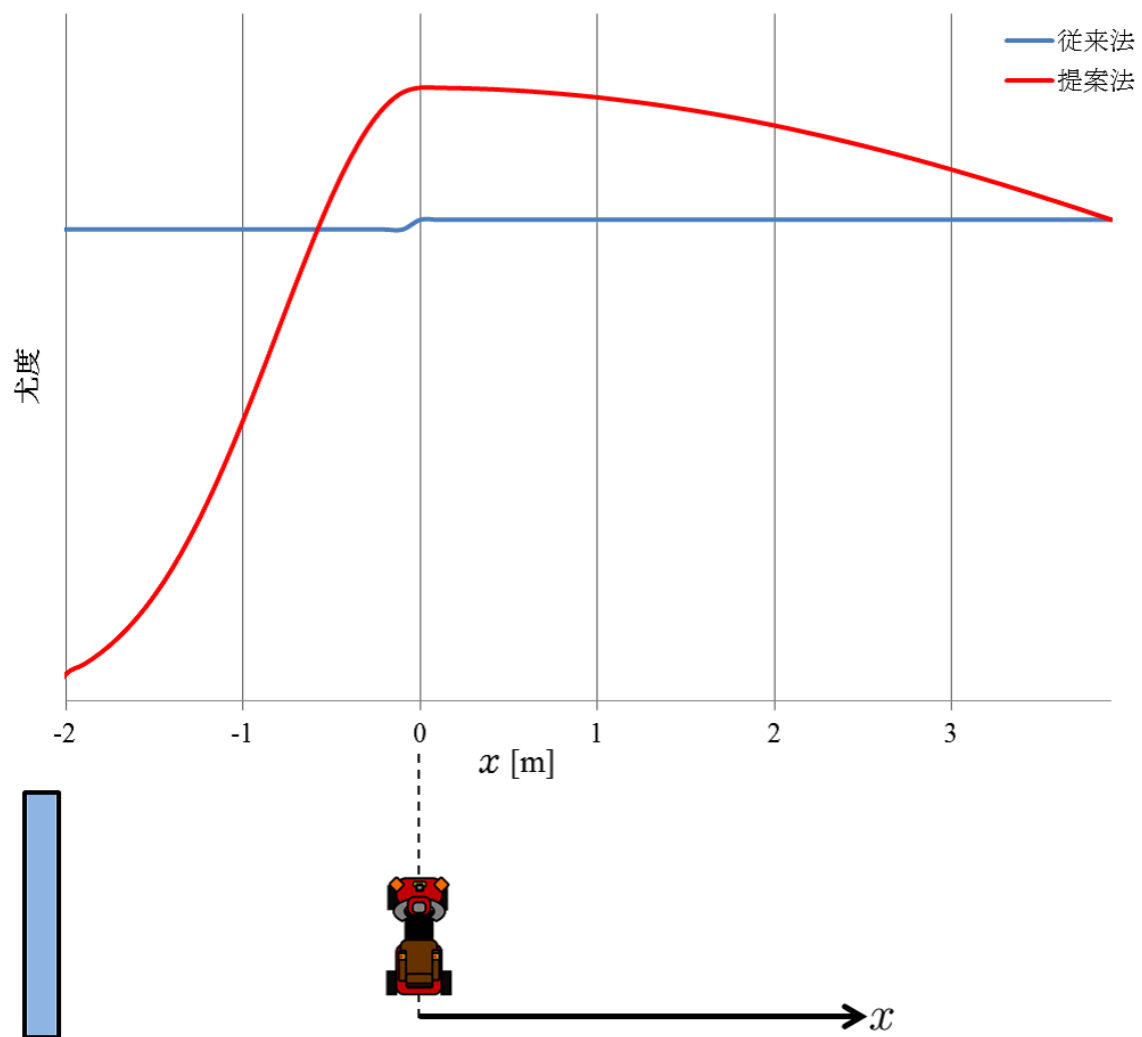


図 3.14: パーティクルの尤度計算の結果

## 3.5 距離画像センサを用いた空間観測モデルの応用

セル生産工場において，第 3.3 節で述べた手法を適用すると，ランドマークとして想定する棚や作業台を観測するとき，図 3.4, 3.5 で示した通り，観測情報がセンサの設置高さに依存して変化し，場合によっては作業台の脚などしか環境情報を取得できない．そこで本節では，三次元の距離情報を取得可能な距離画像センサを用いることで，環境情報をセンサの設置高さに依らず安定して抽出し，第 3.3 節で述べた手法に応用する．空間観測モデルに用いるために，観測情報を最終的には第 3.3 節で述べたローカル地図の形式，つまり二次元の形式にする．三次元距離センサを用いると，ロボット周囲の環境の三次元形状を取得できる．この三次元形状そのものから，特徴点を抽出する手法が提案されているが [27]，本研究では，未知障害物への頑健性や位置推定のリアルタイム性を重視して，三次元情報を二次元のローカル地図へ変換して，位置推定に用いることにした．

### 3.5.1 距離画像センサの決定

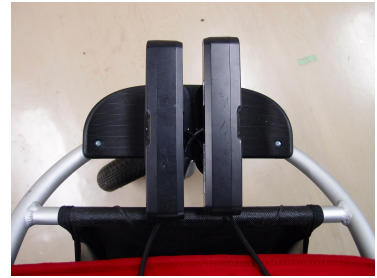
本研究で対象とする環境は，セル生産工場であることから，本研究で目指すロボットの自己位置推定の制限を，

- 屋内における利用のみを前提とする
- ロボット周囲 5m 程度には概ね，ランドマークとなる固定物がある

とした．これらの性能を満たして，工場内の環境を表現するのに十分なセンサとして，本研究では，ASUS 社の Xtion Pro Live (以降 Xtion，図 3.15(a)) を利用することとした．Ligth Coding 技術 [28] により距離画像を得るセンサである．インターフェースは USB2.0 であり，約 30Hz で 640×320 画素の距離データを取得できる．PrimeSense 社の公開するハードウェアドライバと，ソフトウェアライブラリ OpenNI を用いて Xtion Pro Live から距離画像を得られる．OpenNI ライブラリの一部機能を Willow Garage 社のソフトウェアライブラリ OpenCV を介して使用でき，本研究では OpenCV を介して距離画像を得る．



(a) ASUS 社 Xtion Pro Live



(b) センサの設置姿勢

図 3.15: 採用した距離画像センサとセンサの取り付け位置

本研究では二台の Xtion を図 3.15(b) に示すように，ロボットに対して横向きに設置することにした．Xtion の測距可能範囲が  $0.5\text{m} \sim 10\text{m}$  であり，通路を直進するような状況ではランドマークを観測できない場合が多くなると予想されるのに対し，ロボットの側面には壁や棚などが観測範囲内に存在することが期待できるために，少ないセンサ数でランドマークを効率的に観測できるので，このような配置でセンサを取り付けた．

Xtion で得られる深度は Light Coding 技術で得る視差を用いて計算するので，近距離では深度値の分解能が高い．しかし， $4\text{m}$  を越えると分解能は  $5\text{cm}$  より悪化する．グリッドマップを用いて自己位置を推定する場合，グリッドの大きさによって位置の推定精度が決定されるが，以上のことを考慮し，以降本論文で実験に用いるグリッドマップの格子サイズは  $0.1\text{m} \times 0.1\text{m}$ ，ローカル地図の大きさは  $8.0\text{m} \times 8.0\text{m}$  とした．

### 3.5.2 距離画像センサを利用したローカル地図の作成方法

本節では距離画像センサを用いて，ロボット周囲の環境情報を観測し，第 3.3 節で述べた自己位置推定のためのローカル地図  $L$  を得る方法について述べる．図 3.16 に示すように，センサ座標系を定義されいているとすると， $j$  行  $\times$   $k$  列の距離画像  $A$  の各要素には  $(g, h, d)$  の値が格納される．二次元のローカル地図  $L$  に格納するために，距離画像  $A$  の三

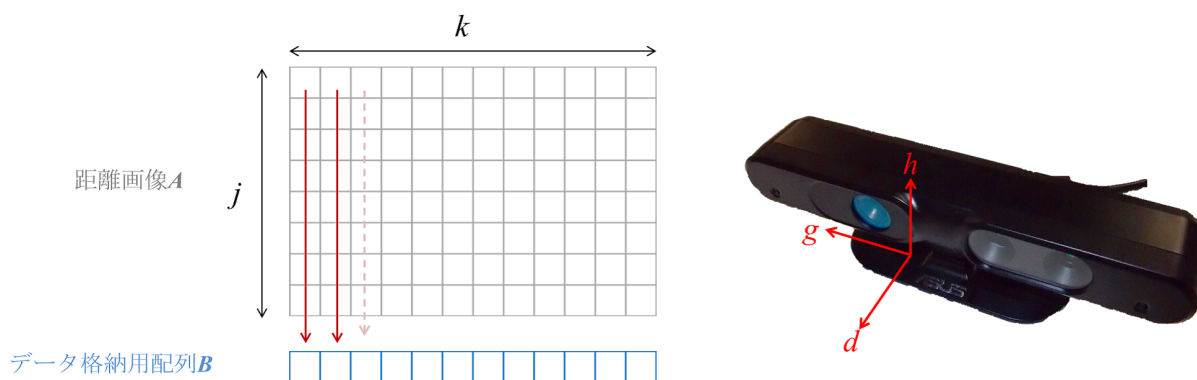


図 3.16: 距離画像の格納

次元の距離情報の二次元への圧縮を以下のように行う．

1. データ格納のために，1行  $k$  列の配列  $B$  を確保．
2.  $A$  において列ごとに  $d$  値の走査を行い，最も  $d$ (センサからの距離) の小さい画素の， $g, d$  の値を  $B$  の対応する列に格納する．  
(このとき高さ  $h$  によって格納するデータを制限する)

配列  $B$  に格納された  $(g, d)$  の値を，距離画像センサをロボットに設置した位置姿勢に応じて座標変換し，ローカル地図  $L$  を作成する．

高さ  $h$  によって格納データを制限するのは，床や天井を見ないようにするためである．以降に述べる実験では， $h$  が  $0.0 \sim 0.6\text{m}$  の範囲内でのみ，配列  $B$  への格納を行った．本研究では Xtion を床面から  $0.4\text{m}$  の高さに水平に設置したので，床面から高さ  $0.4\text{m} \sim 1.0\text{m}$  の範囲にある物体を観測している．

図 3.17(a) の環境にロボットを置いたとき，実際にロボットが距離画像センサによって得た三次元の距離情報から作ったローカル地図を図 3.17(b) に示す．図 3.17(c) は距離画像  $A$  から，特定の高さ ( $h = 0$ ) のデータのみを配列  $B$  に格納して，ローカル地図にしたものである．図 3.17(b) と図 3.17(c) を比較すると，図 3.17(a) 中のテーブルを図 3.17(b) の赤い丸で囲んだ範囲内にある占有空間として観測できているが，図 3.17(c) では自由空

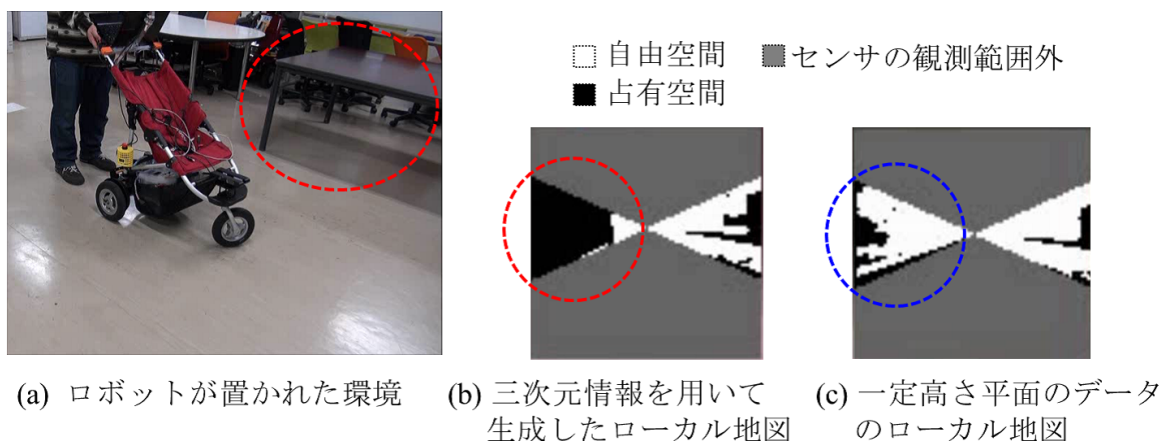


図 3.17: ローカル地図

間になっている．よって一定高さ平面の計測のみでは観測することが難しいテーブルなどのランドマークを，距離画像センサを用いて環境の三次元情報を計測することで，占有空間として観測することができた．

### 3.5.3 セル生産工場において物体が密にある高さの考察

セル生産工場において，作業者が製品の組み立て作業などを行う場合，作業台の天板などの高さは作業のしやすさを考慮されて設定されることが期待される．人間生活工学研究センターの行った実験によると，立位での作業をしやすい作業台の高さは表 3.1，座位での作業をしやすい作業台の高さは表 3.2 ということであった [29]．表 3.1，表 3.2 と図 3.3

表 3.1: 立位で作業しやすい手の高さの平均値 [cm]

	男性	女性
前期高齢者	100	96
壮年者	104	101

表 3.2: 座位で作業しやすい手の高さの平均値 [cm]

	男性	女性
前期高齢者	79	77
壮年者	82	80

から，70 cm ~ 100 cm 程度の高さに，作業台の縁面などがあることが期待できる．よって，この範囲の高さを含む高さ平面のデータを二次元に圧縮して，自己位置推定のための地図に用いることで，地図に記載されるランドマークの密度を上げることができうる．

### 3.6 環境地図の生成

環境地図に期待する要件は，

- 実世界の座標と対応づけられている地図であること
- 実環境にある固定障害物が占有空間として描かれていること
- 移動する可能性のあるものは自由空間とすること
- ウェイポイントと地図上の座標に対応付けがされていること

である．この要件を満たす地図生成のシステムとして，本研究ではマニュアル走行時のオドメトリとセンサの観測データを用いて環境地図を構築した．地図構築の流れは，

- 最初は初期値の書き込まれた，環境地図画像  $M$  がある．
- オドメトリの計算に合わせて並進回転させたローカル地図  $L$  を重ね合わせる
- もし， $L$  と重なった  $M$  のピクセルに初期値が書き込まれていたならば， $L$  のピクセル値を書き込む．

- $L$  と重なった  $M$  のピクセル値が、 $L$  のピクセル値と一致していれば、 $M$  の値には何もしない
- $L$  と重なった  $M$  のピクセル値が、 $L$  のピクセル値が異なっていた場合、
  - $L$  のピクセルが自由空間であり、 $M$  のピクセル値が占有空間であるならば、 $M$  のピクセル値を自由空間とする。
  - $L$  のピクセルが占有空間であり、 $M$  のピクセル値が自由空間であるならば、 $M$  のピクセル値には何もしない

となる。このような流れで地図構築を行う。それと同時にウェイポイントの教示を行う。ウェイポイントの持つ座標はオドメトリの計算値である。このようにして、環境地図とウェイポイントの教示を行い、第 4 章で用いた。

しかし、このような実装では旋回と停止を繰り返して、複雑な経路を教示しようとすると、地図の精度が低下する。これは、オドメトリの精度によって地図の精度が決まるからである。精度よく地図を構築するには、地図作成と同時に位置推定を行う SLAM 問題 [30] を解くか、高精度の慣性センサによってオドメトリの精度を高める必要がある。

## 第4章 自己位置推定の精度評価実験

本章では開発し本章では、開発した移動ロボットに、環境・経路を教示して、目標地点まで自律移動させ目標地点での停止位置精度・位置推定精度を確認する実験について述べる。

### 4.1 単純な環境・経路での自動走行実験

#### 4.1.1 環境・経路教示

実験を行ったのは、本学東2号館5階の廊下である。環境地図はロボットを人の操作で走行させ、ロボットに搭載したセンサの観測情報から生成したローカル地図を、オドメトリにより計算したロボット位置姿勢に重ねていくことで作成した。また、環境地図生成のための教示走行時に、ウェイポイントの指定を同時に行った。教示走行を開始する地点でまず、ウェイポイント  $P_0$  を設置する。ウェイポイントに含まれる情報は、ウェイポイントのIDとオドメトリで計算される位置である。ウェイポイントは、他に図4.1中のEV前にウェイポイント  $P_1$  を、509 共通ゼミ室前に  $P_2$  を設置した。ウェイポイントは床面に印を付け、後の実験では床面のマークを基準にして、実際のロボット位置の計測に用いた。

501 室より廊下の509 共通ゼミ室前まで、上記の方法で作成した環境地図を図4.2に示す。図4.2中、黒の領域は占有空間であり、緑線はロボットを手押ししたオドメトリによる軌跡、青点はウェイポイントを示す。またグリッドマップの格子サイズは  $0.1 \times 0.1\text{m}^2$  とした。

この経路を  $P_0$  をスタート地点として、 $P_1$  を経由し  $P_2$  までロボットを自律移動させる実験を行った。ロボットは搭載したセンサと自己位置推定アルゴリズムで自己位置を修正



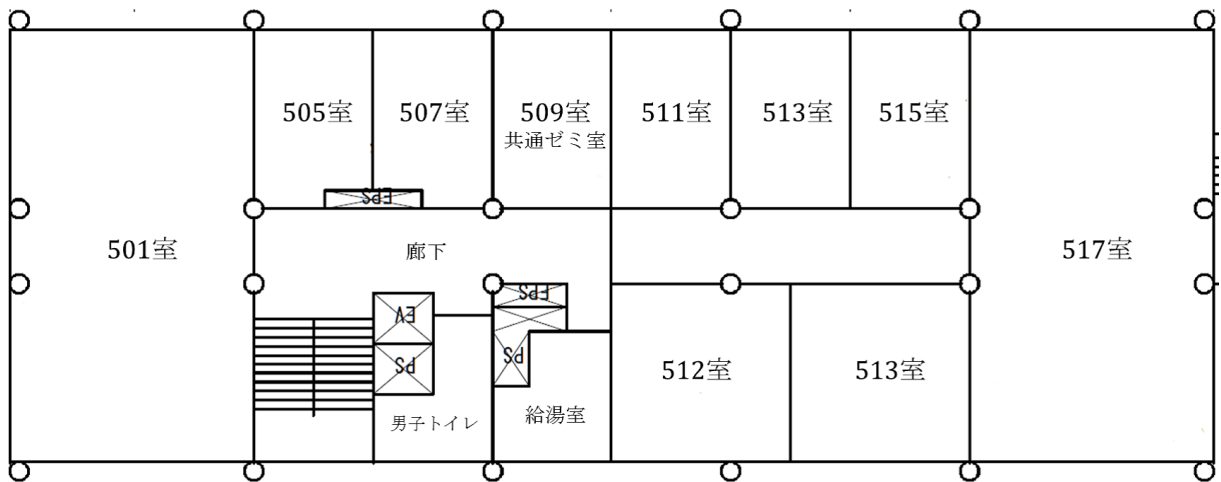


図 4.1: 東 2 号館 5 階の見取り図

しながら移動し，ウェイポイントの半径 0.1m 以内に入った時点で停止コマンドを発行し，停止する．停止した地点においてオドメトリによる推定位置  $r_{Od}$  と，空間観測モデルに基づき修正した推定位置  $r_{Lo}$  を記録した．また，実空間上でロボットが停止した位置  $r_{Re}$  を床面のマークを基準に計測した．

#### 4.1.2 実験の結果と考察

一連の計測を 11 回行った．結果を表 4.1, 4.2 に示す．それぞれの結果は， $P_0$  を原点とした GL 座標系の数値で示す．GL 座標系はロボットの進行方向 ( $P_0 \rightarrow P_1$ ) を  $x$  軸方向とする右手系とする．

また， $P_1$  地点， $P_2$  地点のそれぞれにおいて，実環境での計測値  $r_{Re}$  をロボットの真の位置として，オドメトリの計算位置  $r_{Od}$  との差分  $r_{Od} - r_{Re}$ ，自己位置推定との差分  $r_{Lo} - r_{Re}$  を表 4.3, 4.4 に示す．表中の  $\delta x$ ,  $\delta y$  は差分の  $x$  成分， $y$  成分である．そして，表 4.3 をグラフにプロットしたものを図 4.3，表 4.4 をグラフにプロットしたものを図 4.4 に示す．

図 4.3(a) は，誤差の  $x$  成分，図 4.3(b) は誤差の  $y$  成分である．図 4.3(a) を見ると，オドメトリで計算される位置と，自己位置推定の結果に差がほとんど無い．しかし， $y$  成分で

表 4.1:  $P_1$  地点付近で停止したロボット位置 [m]

試行回数	$r_{Re}$		$r_{Lo}$		$r_{Od}$	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	7.41	-0.10	7.40	-0.09	7.43	-0.27
2	7.40	-0.10	7.41	-0.10	7.42	-0.07
3	7.42	-0.08	7.42	-0.09	7.44	0.04
4	7.43	-0.08	7.42	-0.09	7.44	-0.31
5	7.40	-0.08	7.42	-0.09	7.42	-0.16
6	7.40	-0.08	7.41	-0.09	7.42	-0.26
7	7.40	-0.08	7.42	-0.09	7.42	-0.29
8	7.37	-0.09	7.38	-0.09	7.39	-0.05
9	7.40	-0.08	7.41	-0.09	7.42	-0.14
10	7.41	-0.08	7.42	-0.09	7.43	-0.14
11	7.40	-0.09	7.40	-0.10	7.44	-0.09

表 4.2:  $P_2$  地点付近で停止したロボット位置 [m]

試行回数	$r_{Re}$		$r_{Lo}$		$r_{Od}$	
	$x$	$y$	$x$	$y$	$x$	$y$
1	12.99	-0.16	12.95	-0.18	12.99	-0.49
2	12.96	-0.18	12.94	-0.18	12.97	-0.12
3	12.95	-0.19	12.93	-0.18	12.96	0.03
4	12.97	-0.17	12.94	-0.18	12.97	-0.57
5	12.96	-0.20	12.94	-0.18	12.98	-0.36
6	12.97	-0.21	12.95	-0.18	12.98	-0.69
7	12.94	-0.20	12.92	-0.18	12.94	-0.69
8	12.98	-0.18	12.95	-0.18	12.99	-0.22
9	12.99	-0.18	12.96	-0.18	13.01	-0.44
10	13.00	-0.21	12.95	-0.18	13.01	-0.42
11	12.97	-0.21	12.93	-0.18	13.01	-0.28

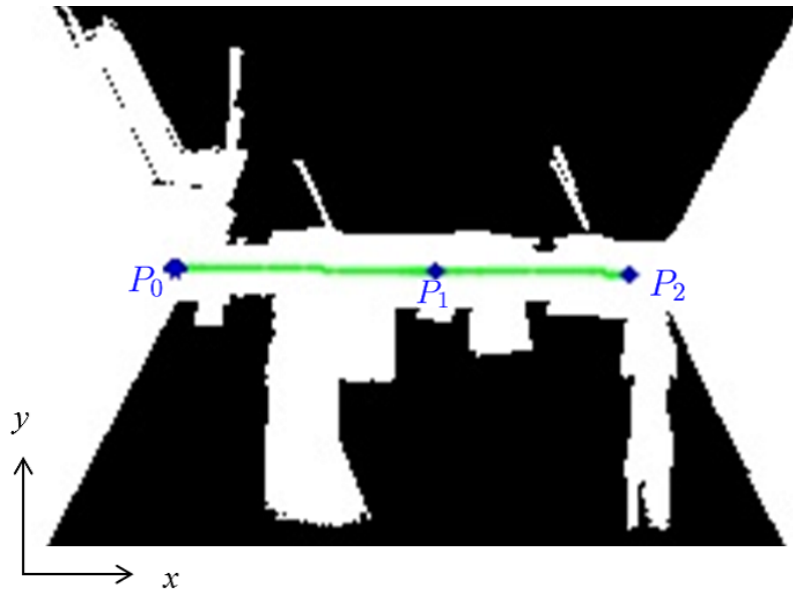


図 4.2: 環境地図の生成結果

ある図 4.3(b) では推定位置は実測値とほぼ一致するが，オドメトリによる位置計算では実測との差が大きくなっていることがわかる．この傾向は  $P_2$  地点でより顕著になっていることが図 4.4 から分かる．

この原因は，オドメトリによる位置計算では誤差の累積が生じるからである．誤差の発生要因として， $P_0$  地点でのロボットの初期位置姿勢のずれや，エンコーダによる車輪回転量の計測から速度を計算する際の離散化の誤差，床面のたわみなどが考えられる．そのなかでも特に設置姿勢のずれの影響は，移動距離の増加に従い大きくなるので， $P_1$  地点においてよりも  $P_2$  地点において，オドメトリの計算位置と実測位置のズレが大きくなったと考えられる．図 4.4 に示す通り， $P_2$  地点においてオドメトリによる計算位置は実測の位置に対して大きく誤差が乗ったのに対し，自己位置推定によって得られた位置と実測の位置の誤差が小さくなっている．

このことから，本実験によって，実装した自己位置推定アルゴリズムによって，オドメトリのみの場合に生じる誤差の累積を抑制することが可能であることが確認された．また，実際にロボットが停止した位置を図 4.5 に示す．すべての試行で目標とする  $P_2$  地点

表 4.3:  $P_1$  地点における推定位置の誤差 [m]

試行回数	$r_{Od} - r_{Re}$		$r_{Lo} - r_{Re}$	
	$\delta x$	$\delta y$	$\delta x$	$\delta y$
1	0.01	-0.17	-0.01	0.01
2	0.02	0.03	0.01	0.00
3	0.02	0.12	0.00	-0.01
4	0.01	-0.22	0.00	-0.01
5	0.02	-0.08	0.02	-0.01
6	0.02	-0.19	0.01	-0.01
7	0.01	-0.21	0.01	-0.01
8	0.02	0.04	0.01	0.00
9	0.02	-0.06	0.01	-0.01
10	0.02	-0.06	0.00	-0.01
11	0.05	0.00	0.00	-0.01
平均	0.02	-0.07	0.01	-0.01
分散	0.00	0.01	0.00	0.00

表 4.4:  $P_2$  地点における推定位置の誤差 [m]

試行回数	$r_{Od} - r_{Re}$		$r_{Lo} - r_{Re}$	
	$\delta x$	$\delta y$	$\delta x$	$\delta y$
1	0.00	-0.32	-0.03	-0.02
2	0.02	0.06	-0.02	0.00
3	0.01	0.22	-0.02	0.01
4	0.00	-0.39	-0.02	-0.01
5	0.02	-0.16	-0.02	0.01
6	0.01	-0.47	-0.02	0.03
7	0.00	-0.49	-0.02	0.01
8	0.02	-0.04	-0.03	0.00
9	0.02	-0.26	-0.03	0.00
10	0.02	-0.21	-0.05	0.03
11	0.04	-0.07	-0.04	0.03
平均	0.01	-0.20	-0.03	0.01
分散	0.00	0.05	0.00	0.00

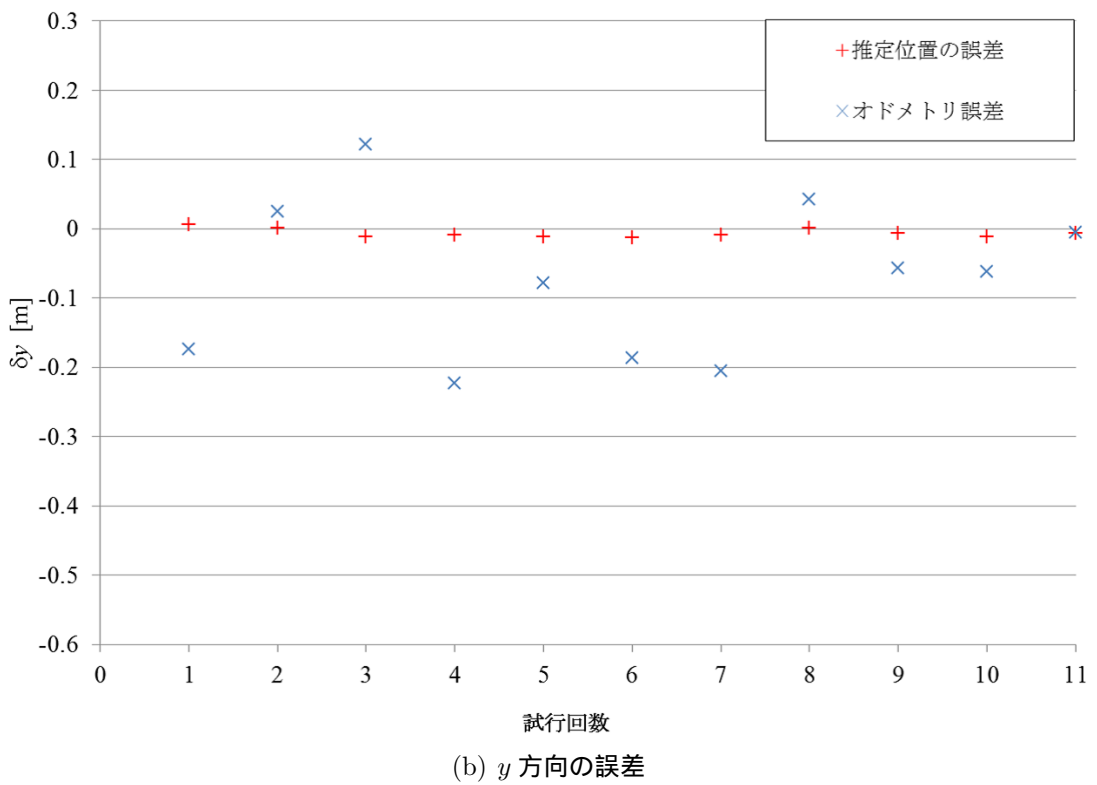
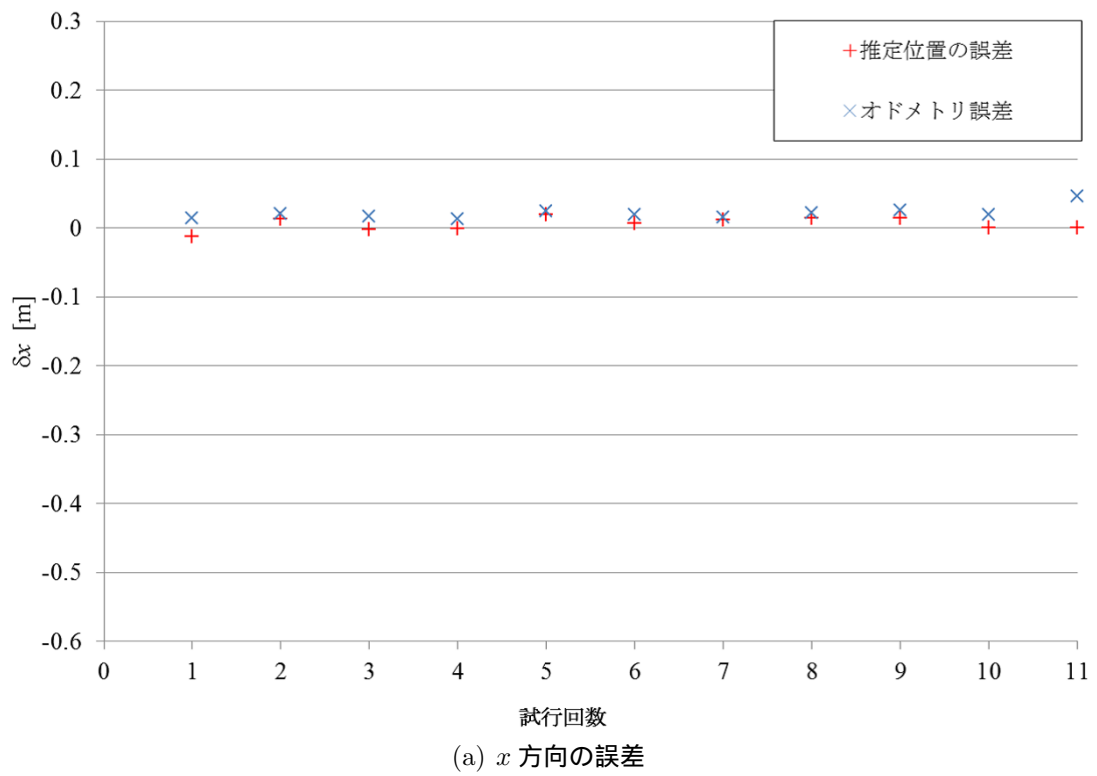
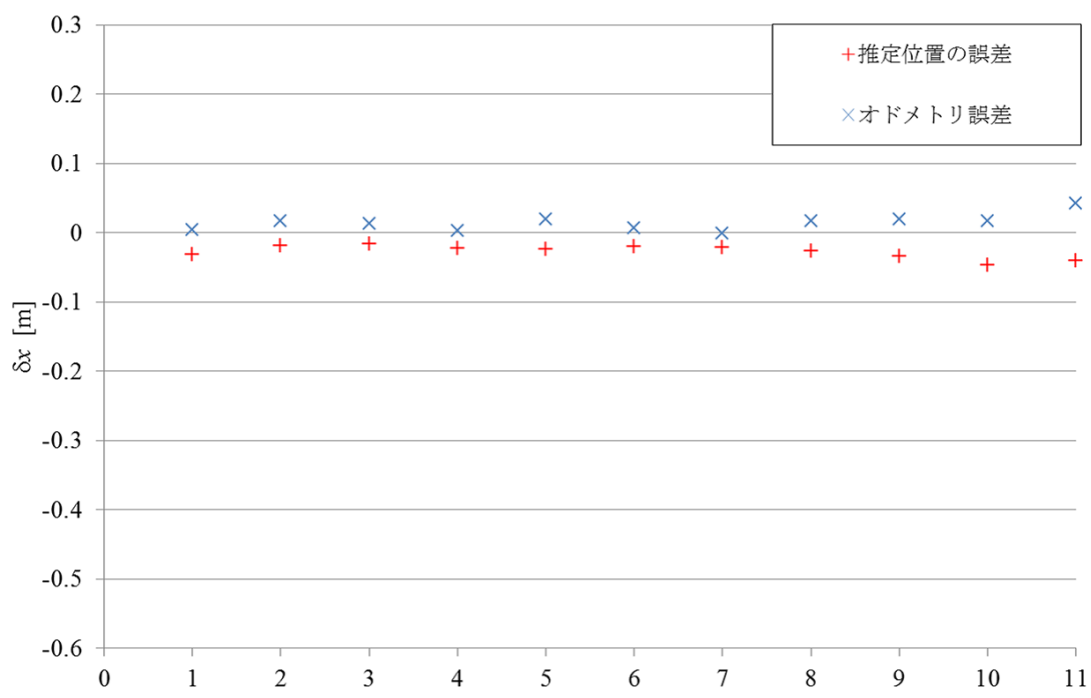
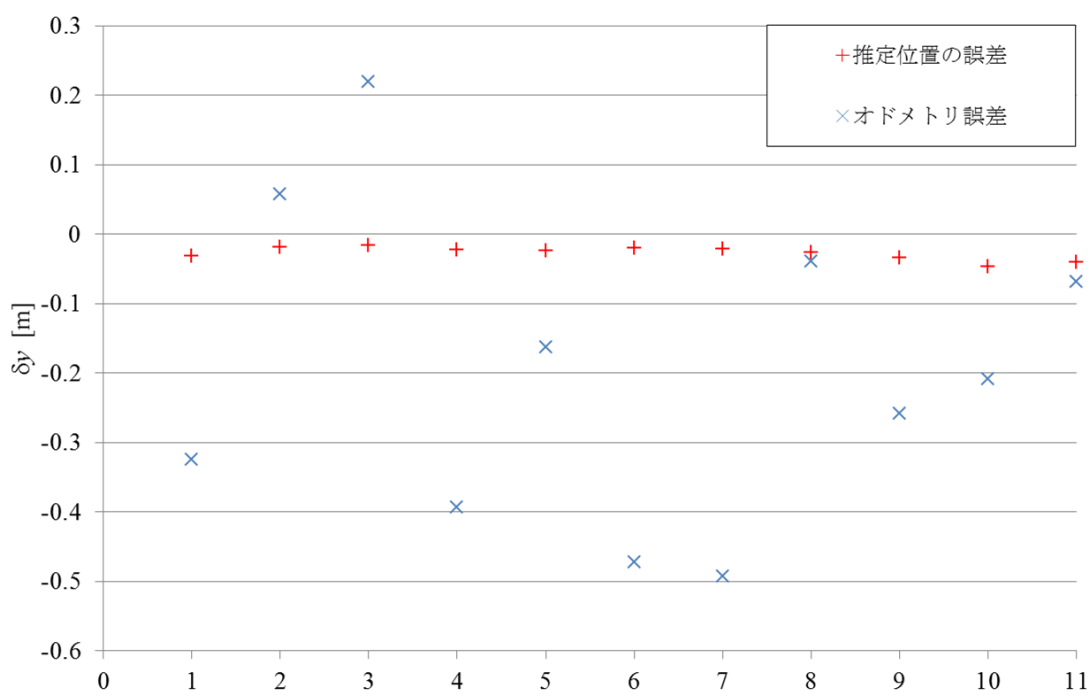


図 4.3:  $P_1$  地点での位置推定誤差



(a)  $x$  方向の誤差



(b)  $y$  方向の誤差

図 4.4:  $P_2$  地点での位置推定誤差



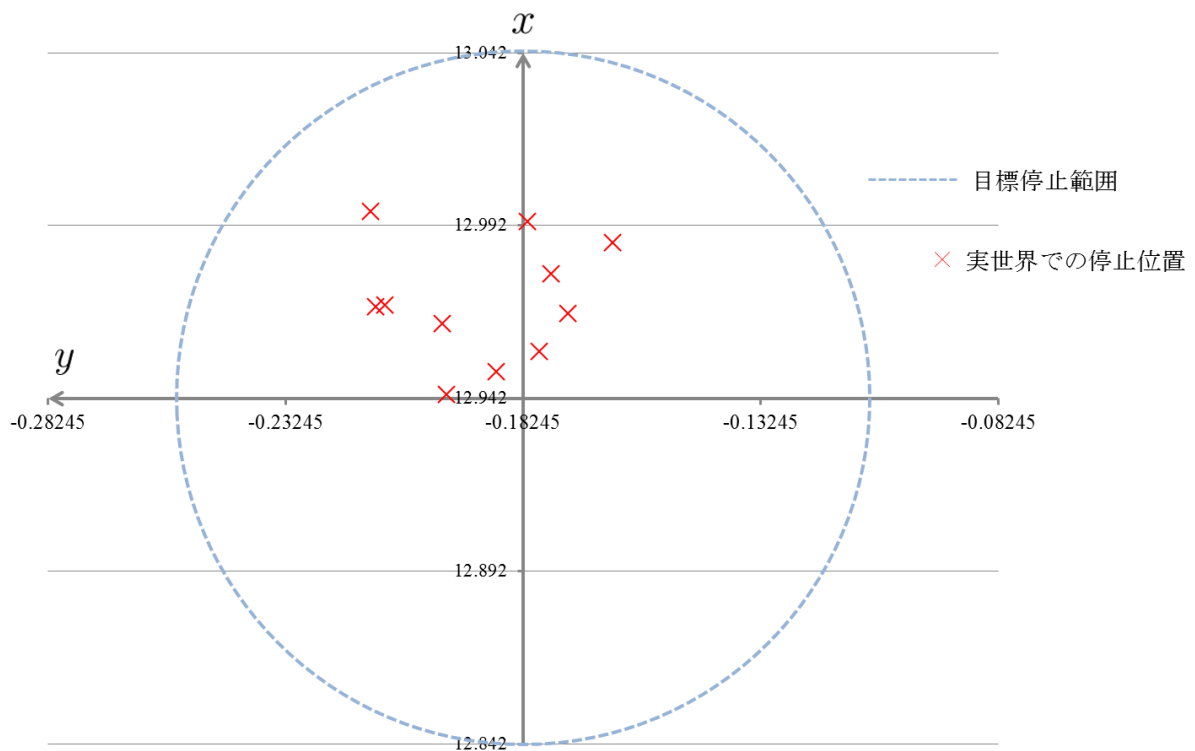


図 4.5:  $P_2$  地点において，実際にロボットが停止した位置

から半径 10cm の領域内にロボットを停止させることができた．以上より，開発した移動ロボットシステムは，単純な直線経路ではあるものの，目標地点まで自己位置を修正しながら移動し，要求された精確さで停止可能であることが示された．

## 4.2 自己位置推定法の比較実験

第 3.3 節で述べた自己位置推定法に対して，第 3.4 節 (提案法 1)，第 3.5 節 (提案法 2) で述べた応用をそれぞれロボットに実装して自動走行させ，目標点での停止精度，自己位置推定精度を比較する実験を行った．また比較のために，一定高さ平面の観測データを用いて自己位置推定を行う従来法をもちいた場合の実験も行った．

### 4.2.1 環境・経路の教示

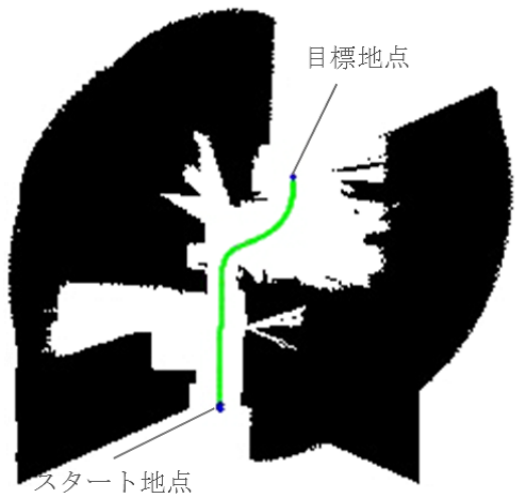
環境地図の作成は、実験 1 で述べたのと同様にロボットを、スタート地点から目標地点まで手押しで走行させ、センサの計測データを収集して行った。本実験で用いる環境地図を図 4.6(a)(b) に示す。図 4.6(a) は、距離画像センサの一定高さ (床面から 0.4m) のデータを用いて生成した環境地図である。図 4.6(b) は、距離画像センサで床面から 0.4m ~ 1.0m の範囲の高さを観測し、生成した環境地図である。図 4.6(a)(b) 中に緑線で示すのは、オドメトリにより計算した教示走行の経路であり、世界座標系はスタート地点を原点として、図 4.6(c) 中に示す姿勢で定義されている。

この 2 つを比較のために重ね合わせたものを、図 4.6(c) に示す。図 4.6(c) の赤い領域が、距離画像センサを用いて環境を三次元的に計測することで、新たに占有空間とすることのできた領域である。この赤い領域は図 4.6(d) に示すような、テーブルの縁の部分 distances 画像センサで観測できていることを示しており、図 4.6(a)(b) を比較することで、距離画像センサで環境の三次元情報を計測することで、テーブルや作業台などをランドマークとして地図に記述できることが示された。

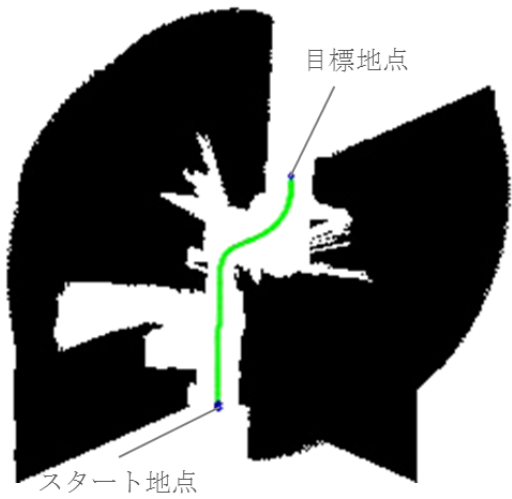
### 4.2.2 実験結果と考察

従来法、提案法 1、提案法 2 のそれぞれで 5 回ずつ、スタート地点から目標地点へロボットが自動走行し、目標地点付近にて停止した位置をプロットしたものを図 4.7 に示す。図 4.7 に示す座標系の原点は目標地点であり、座標系の姿勢は世界座標系と一致するものとする。各手法での停止位置を凡例の通りにプロットしており、青点線で囲んだ範囲内が目標とするロボットの停止範囲である。

停止位置が目標範囲に収まった回数で比較すると、従来法はすべての試行で目標範囲内に停止できていないのに対し、提案法 1 では 5 回中 4 回の試行で目標範囲内で停止できており、さらに提案法 2 ではすべての試行で目標範囲内に停止することができた。よって提



(a) 環境地図 (二次元)



(b) 環境地図 (距離画像センサによる三次元計測)



(c) 比較



(d) 比較

図 4.6: 実験 2 に用いた環境地図

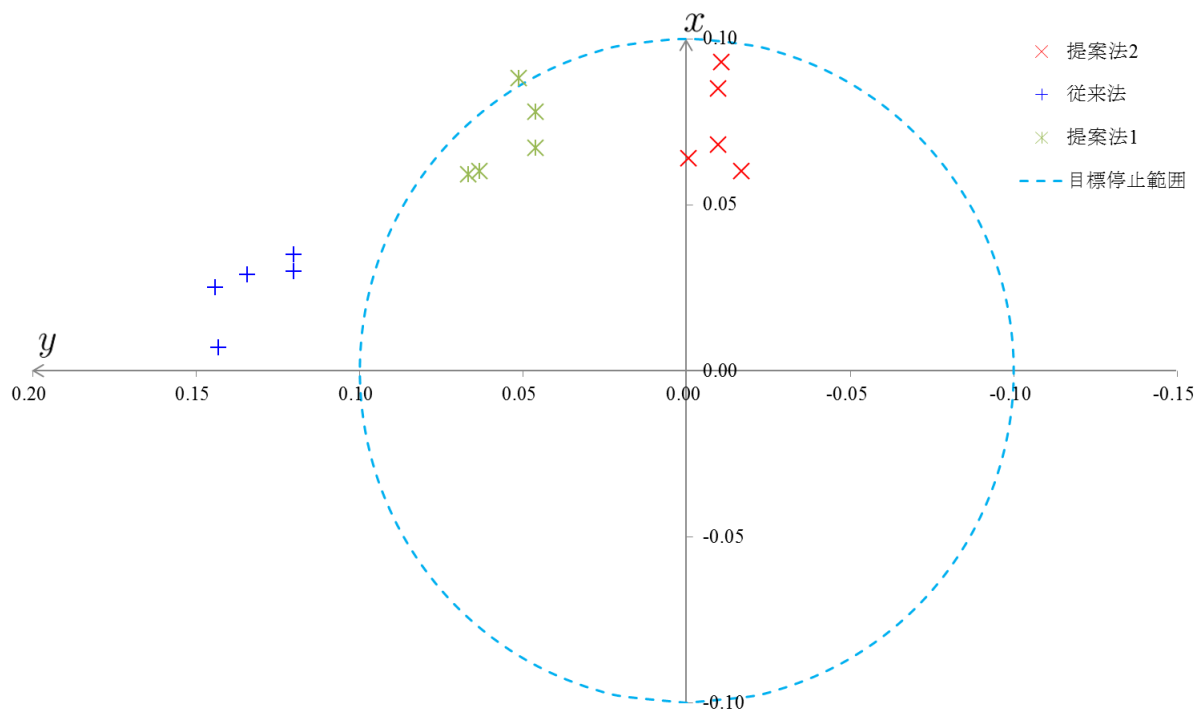


図 4.7: 実際のロボット停止位置 (原点は目標地点)

案法 1, 2 では従来法と比較して、目標地点により精確に移動することができた。この実験では自動走行後のロボットの姿勢は、教示走行時の停止姿勢を目標としており、従来法、提案法 1, 2 とともにほぼ角度がずれることなく、目標地点で停止することができていた

表 4.5 は手法ごとの、実際の停止位置と目標地点の誤差の平均と停止位置の標準偏差である。停止位置誤差の目標は 0.1m 以内であるが、従来法では平均して 0.13m 離れた地点で停止しており、目標を満たしていない。提案法 1 では停止位置誤差の平均が 0.09m となり、平均的には目標を満たしているが、5 例中 1 例で目標範囲内での停止に失敗している。提案法 2 は平均が 0.07m であり、目標を満たしている他、実験ではすべての試行で成功している。よって、停止位置の精確さでは提案法 2 がもっとも優れている結果となった。また、停止位置のばらつきはすべての手法で 0.01m となった。

ロボットが停止した地点で位置推定アルゴリズムにより、計算されたロボットの推定位

表 4.5: 停止位置と目標地点のずれ量 (停止位置誤差) の平均と標準偏差

	停止位置誤差の平均 [m]	停止位置の標準偏差 [m]
従来法	0.13	0.01
提案法 1	0.09	0.01
提案法 2	0.07	0.01

置と実際のロボット位置 (真の位置) の差分を、推定位置の誤差としてその平均を手法ごとに計算した結果を表 4.6 に示す。従来法で 0.13m と最も誤差が大きく、ついで提案法 1 の誤差が大きかった。最も誤差が小さく精度よく位置を推定できているのは提案法 2 であった。よって、提案法 2 では位置推定の性能が最も良く、そのことが最終的な停止位置の精確さに寄与したと考えられる。

以上より、提案法 2 は従来法、提案法 1 と比較して、位置推定精度、停止位置精度ともに優れている結果となった。これらの結果から、空間観測モデルに基づく自己位置推定法に、距離画像センサを用いて環境計測を行う拡張を行うことで、屋内環境において目標地点まで移動し、0.1m 以内の精確さで停止可能な移動ロボットを実現できたといえる。

表 4.6: 推定位置誤差の平均

	推定位置誤差の平均 [m]
従来法	0.13
提案法 1	0.08
提案法 2	0.05

### 4.2.3 誤差要因の考察

図 4.7 で示したのは、実際のロボットの停止位置であり、この誤差要因には位置推定の誤差の他、ロボットの制動距離の問題がある。本研究の停止アルゴリズムでは、位置推定

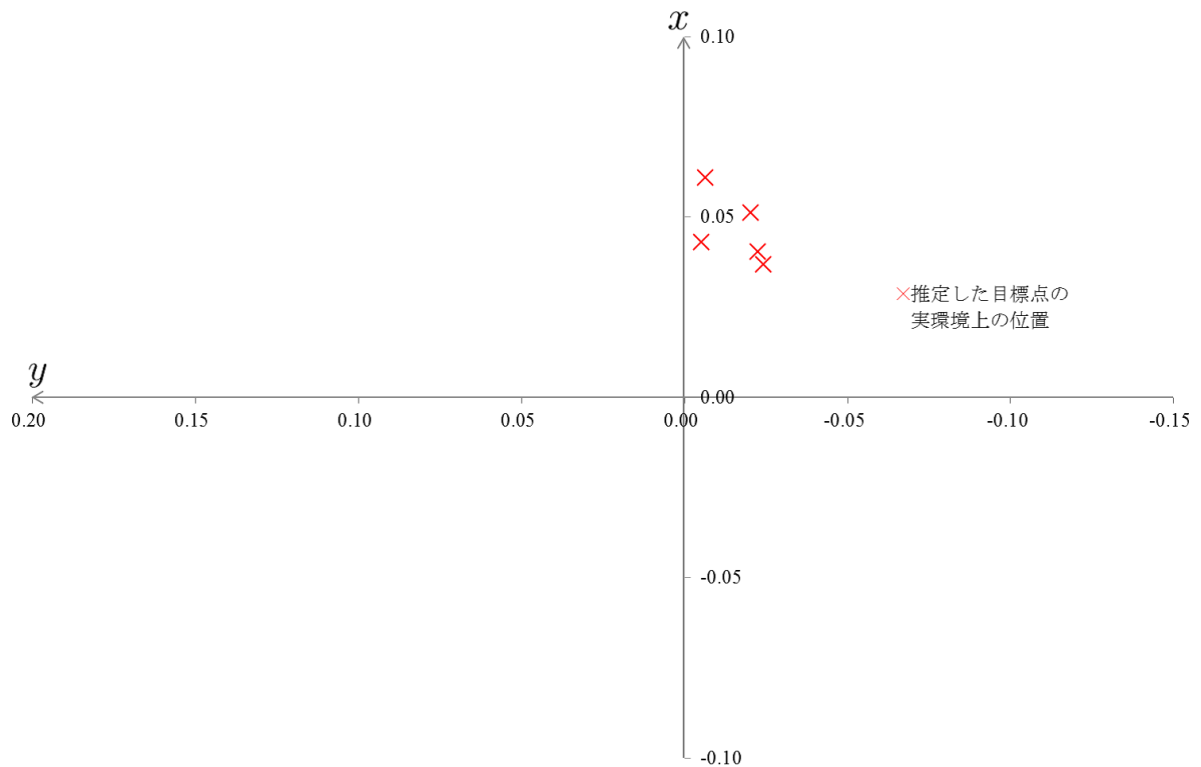


図 4.8: 推定された目標点の実環境上における位置

に誤差がなくとも，目標位置には停止できない．制動距離の影響を除いて位置推定の結果について議論をするために，提案法 2 においてロボットが実際に停止したとき，ロボットの推定した目標点の位置を実環境上に投影したものを図 4.8 に示す．図 4.8 において原点は目標点であり，位置推定に誤差が無ければプロットした結果は原点と重なるが，図 4.8 ではそのようになっていない．つまり制動距離以外の要因で誤差が生じているといえる．

誤差要因の一つとして，位置推定の誤差が考えられる．図 4.8 をみると，ロボットの停止位置は  $x$  軸上の正方向（ロボットの進行方向）に偏って分布している．特に停止位置誤差の  $y$  成分は小さく，停止位置誤差のほとんどが  $x$  成分となっている．誤差成分が  $x$  成分に偏るの原因についてはまず第一に，距離画像センサをロボットの横向きに設置しており，ロボットの前後方向をほとんど観測していないために， $x$  方向に拡散するパーティクルを収束させられなかったからであると考えられる．

第二には環境地図の精確さの問題がある．本実験では環境地図を教示走行のオドメトリに基いて生成している．教示走行でロボットが移動したのは  $x$  方向に 10.29m ,  $y$  方向に -3.29m であり , その移動量の多くは  $x$  方向であるので , 環境地図の精確さは  $y$  方向には距離画像センサの精度で描かれているが ,  $x$  方向にはオドメトリの誤差が反映される .  $x$  方向に環境地図が不正確なために , 上記の要因とも相関して  $x$  方向に誤差が発生しやすくなると考えれる .

### 4.3 未知物体のある環境下での実験

工場内では作業者が存在しているので , 環境地図にない未知物体があることになる . 未知物体が環境中に存在するとき , 開発した移動ロボットシステムで , 停止位置精度 0.1m を満たして自動走行が可能かを確認するための実験を行った . 本実験において位置推定法は提案法 2 を用い , 実験環境は第 4.2 節の実験と同様とした . 位置推定のために用いた環境地図は図 4.6(b) である .

環境中には未知物体としてダンボールを三個配置して , 自動走行させ停止位置を記録する試行を 5 回行った . 未知物体の設置した環境の例を図 4.9 に示す . 試行ごとに未知物体の位置を変化させたので , 図 4.9 は実験環境の一例である . 図 4.9 中には , 未知物体が二個しかないが画像の範囲外にさらに一つ設置している .

スタート地点から目標地点へロボットが自動走行し , 目標地点付近にて停止した位置をプロットしたものを図 4.10 に示す . 図 4.10 に示す座標系の原点は目標地点であり , 青点線で囲んだ範囲内が目標とするロボットの停止範囲 , 座標系の姿勢は世界座標系と一致するものとする . 図 4.10 をみると , 全試行において実際に停止した位置は , 目標の停止範囲内に収まっていることがわかる . 環境中に未知物体が存在しても , 目標の停止位置精度が実現されていることがわかった . 表 4.7 は停止位置誤差の平均と停止位置の標準偏差 , 推定位置誤差の平均値である . 停止位置誤差の平均値は第 4.2 節の表 4.5 の提案法 2 の値と変わらない結果となった . 標準偏差に関して表 4.5,4.7 を比較すると , 未知物体のある環



図 4.9: 未知物体を配置した実験環境の例

境である表 4.7 において、大きくなっており停止位置のばらつきが大きくなる結果となった。これは未知物体の位置を試行ごとに变化させた影響によるものであると考えられる。推定位置誤差の平均は表 4.7 で 0.06m となり、表 4.5 の 0.05m に対して僅かに性能が低下したが、未知物体のない状況下の従来法 (0.13m)、提案法 1(0.08m) と比較すると、良い精度で位置を推定できているといえる。

本実験により未知物体の存在する環境下においても、提案法 2 を用いることで開発した移動ロボットシステムは、スタート地点から目標地点まで十分な精度で移動可能であることが示された。

表 4.7: 未知物体のある環境下での自動走行性能 [m]

停止位置誤差の平均	停止位置の標準偏差	推定位置誤差の平均
0.07	0.02	0.06



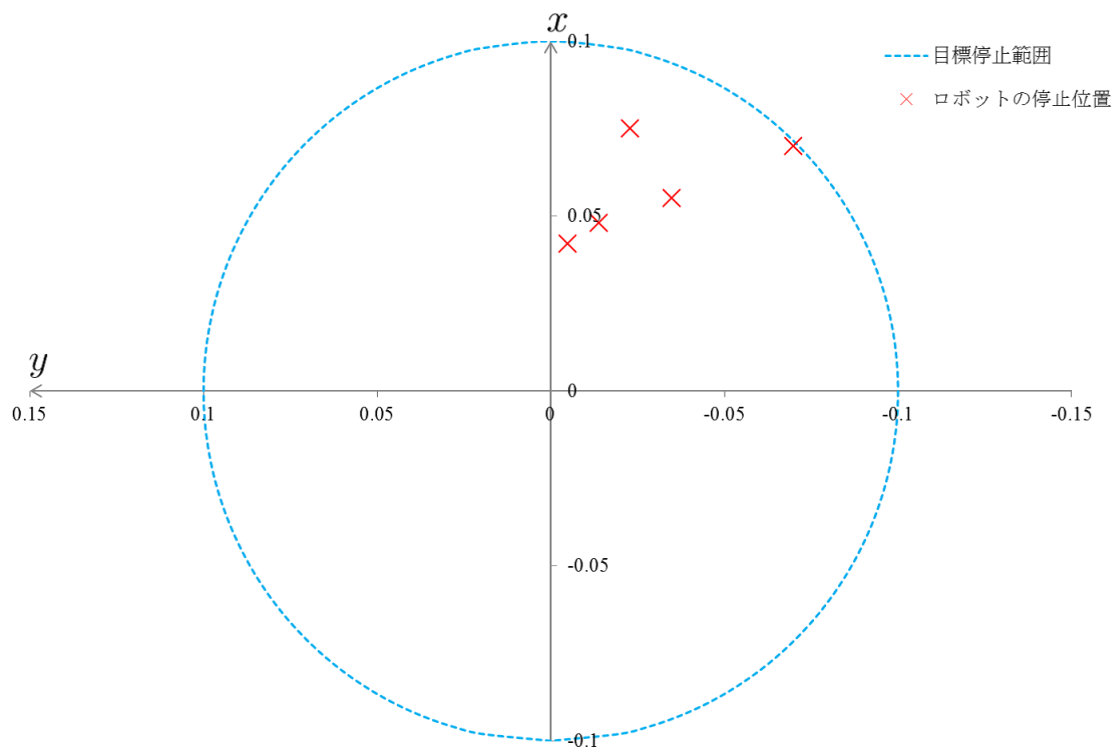


図 4.10: 未知物体のある環境下での自動走行結果

## 4.4 まとめ

本章では開発した移動ロボットに、環境・経路を教示して、目標地点まで自律移動させ目標地点での停止位置精度・位置推定精度を確認する実験について述べた。まず第 4.1 節では廊下を直進するのみの単純な環境・経路における実験で、開発した移動ロボットの基礎的な性能を評価し、開発した移動ロボットシステムが、要求された精確さで目標地点にて停止可能であることを示した。

第 4.2 節では、従来法と提案法 1, 2 を比較する実験を行い、その結果として提案法 2 が従来法、提案法 1 と比較して、位置推定精度、停止位置精度ともに良好な性能であることを示した。

第 4.3 節では、自己位置推定に提案法 2 を用いた際に、環境地図に記載のない未知物体が存在する状況での位置推定精度、停止位置精度を確認した。その結果、未知物体が存在する状況下であっても、要求の停止位置精度を満たして自動走行できることを示した。

以上により、開発した自律移動ロボットは、距離画像センサで観測できる環境の三次元情報を用いて、自己位置を推定することにより、目標の停止位置精度 0.1m を満たして自動走行可能となったといえる。

## 第5章 結言

### 5.1 まとめ

本研究ではセル生産工場で利用されることを念頭に置き，屋内環境において人の指示した地点まで精度良く移動するロボットの実現を目指した．

まず，セル生産現場への応用を考えた場合，適したロボットシステムはどのようなものかについて検討した．次にその内容のもと自律移動に必要な要素としての移動ロボットプラットフォームを開発した．また，セル生産工場という環境では，環境情報を表現するのに三次元の環境情報を用いることが適していることを述べ，三次元情報を用いた自己位置推定法の拡張を行うことを提案した．これらの結果を統合し，自動運搬ロボットとしての全体のシステムをデザインし，実装を行った．最後にロボットの自己位置推定性能，目標点での停止性能を実験によって確かめた．本研究で開発した移動ロボットは，精度よく自己位置を推定し，目的地点の半径 0.1m 以内で停止することができた．

本研究によりセル生産工場内での利用を考えたときに，十分な精度で自律移動可能な移動ロボットプラットフォームが実現されたといえる．

### 5.2 今後の課題

開発した移動ロボットプラットフォームの性能の評価についてより複雑な経路や，セル生産工場に近い環境での実験を行い，より詳しく性能を評価する必要がある．また，現実にセル生産工場にこうしたロボットを導入するには，障害物回避や自己位置推定誤り時の復帰機能が必要であるなど，本研究の中で開発を行ったもの以外の機能を開発する必要がある．

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，様々な視点から多くのご助言やご指導を頂いた工藤 俊亮准教授，末廣 尚士教授，富沢 哲雄助教，産業技術総合研究所の尹 祐根様に感謝の意を表します．また苦境にたたされたとき，いつも励ましと指導を頂いた，村松 聡さん，平井 雅尊さんに厚く御礼を申し上げます．実験，趣味問わずロボットのハードウェア製作について，力を尽くし協力頂いた松田 啓明くん，研究室で苦楽を共にした大谷 洋介くん，佐藤 雄也くん，林 直宏くんをはじめとする知能システム学講座の皆様のお陰で，ここまで挫けず投げずに研究生活を続けることができました．

皆様のおかげで，楽しい研究生活を送ることが出来ました．本当にありがとうございました．

## 参考文献

- [1] 秋野晶二. 日本企業の国際化と生産システムの変容(下): 電気・電子産業の海外進出とセル生産方式. 立教経済学研究, Vol. 51, No. 1, pp. 29–55, Jul. 1997.
- [2] 中村明德. 車輪移動機構の ABC (第5回) 物流システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 6, pp. 788–791, Sep. 1995.
- [3] Clare D. McGillem and Theodore S. Rappaport. Infra-red location system for navigation of autonomous vehicles. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1236–1238, Apr. 1988.
- [4] Jean-François Le Corre and Gaëtan Garcia. Real time determination of the location and speed of mobile robots running on non-planar surfaces. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2594–2599, May 1992.
- [5] Toshihiro Nishizawa, Akihisa Ohya, and Shinichi Yuta. An implementation of on-board position estimation for mobile robot. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 395–400, May 1995.
- [6] 関淳也, 青山元, 他. 視覚によるライン・トレースと磁気タグの併用による走行制御を用いた搬送ロボットの開発. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 8, pp. 833–841, Oct. 2009.

- [7] Sunhong Park and Shuji Hashimoto. Autonomous mobile robot navigation using passive RFID in indoor environment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 7, pp. 2366–2373, Jul. 2009.
- [8] Joydeep Biswas and Manuela Veloso. WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4379–4384, May 2010.
- [9] 深瀬勇太郎, 木村真一. 床を利用した位置検出システムの開発—自律移動ロボットのための建設空間技術. *建設機械*, Vol. 47, No. 9, pp. 63–67, Sep. 2011.
- [10] Yoshio Matsumoto, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Visual navigation using view-sequenced route representation. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 83–88, Apr. 1996.
- [11] Yoichiro Yamagi, Junichi Ido, Kentaro Takemura, Yoshio Matsumoto, Jun Takamatsu, and Tsukasa Ogasawara. View-sequenced based indoor/outdoor navigation robust to illumination changes. In *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1229–1234, Oct. 2009.
- [12] Tomoaki Yoshida, Kiyoshi Irie, Eiji Koyanagi, and Masahiro Tomono. A sensor platform for outdoor navigation using gyro-assisted odometry and roundly-swinging 3D laser scanner. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1414–1420, Oct. 2010.
- [13] Eijiro Takeuchi, Kazunori Ohno, and Satoshi Tadokoro. Robust localization method based on free-space observation model using 3D-map. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 973–979, Dec. 2010.

- [14] 富沢哲雄, 村松聡, 平井雅尊, 佐藤晶則, 工藤俊亮, 末廣尚士. グリッドマップのマッチングに基づく未知障害物にロバストな自己位置推定. 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 280–286, Apr. 2012.
- [15] Yuki Ueno, Takashi Ohno, Kazuhiko Terashima, Hideo Kitagawa, Kazuhiro Funato, and Kiyooki Kakihara. Novel differential drive steering system with energy saving and normal tire using spur gear for an omni-directional mobile robot. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3763–3768, May 2010.
- [16] 多田隈建二郎. 全方向移動・駆動機構. 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 6, pp. 516–519, Jul. 2011.
- [17] 松田啓明, 村松聡, 林直宏, 高橋和宏, 小川雅也, 佐藤雄也, 富沢哲雄, 工藤俊亮, 末廣尚士. 自由空間領域モデルおよび画像情報に基づいた自己位置推定. 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 1781–1784, Dec. 2011.
- [18] 佐藤晶則, 松林勝志. 大容量かつ信頼性・汎用性の高いモータドライバの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp. 2A2–E07(1)–2A2–E07(4), May 2011.
- [19] 竹内栄二郎, 坪内孝司. 異種複数センサに対応した移動ロボット用ナビゲーションソフトウェアの公開. ロボティクス・メカトロニクス講演会, pp. 1P1–E22(1)–1P1–E22(4). 一般社団法人日本機械学会, Jun. 2008.
- [20] パナソニックエコシステムズ共栄株式会社. 事業内容 | 部材製造部門, Jan. 18 2013. <http://panasonic.co.jp/es/pesesky/jigyoubuzai.html>.
- [21] 三友エレクトリック. 三友エレクトリック–制御機器, Jan. 18 2013. <http://www.sanyu-sec.co.jp/enterprise2.htm>.

- [22] 油田信一, 水川真, 橋本秀紀, 田代泰典, 大久保剛史. 移動ロボットに遊歩道を自律走行させるつくばチャレンジ: 公開走行実験の考え方と2010年度の結果. システム制御情報学会誌, Vol. 55, No. 7, pp. 278–283, Jul. 2011.
- [23] Sebastian Thrun, Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Frank Dellaert. Robust monte carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence*, Vol. 128, No. 1–2, pp. 99–141, 2001.
- [24] Teddy Yap, Jr., Mingyang Li, Anastasios I. Mourikis, and Christian R. Shelton. A particle filter for monocular vision-aided odometry. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 5663–5669, May 2011.
- [25] Satoshi Muramatsu, Tetsuo Tomizawa, Hiroaki Matsuda, Shunsuke Kudoh, and Takashi Suehiro. Mobile robot localization technique using web-based aerial photos. In *Proc. of IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp. 438–443, Aug. 2012.
- [26] 高橋和宏, 村松聡, 富沢哲雄, 尹祐根, 工藤俊亮, 末廣尚士. オクルージョンを考慮した尤度評価用地図を用いた空間観測モデルによる自己位置推定. 第30回日本ロボット学会学術講演会, Sept. 2012.
- [27] 鄭龍振, 大石修士, 倉爪亮, 長谷川勉. RGB-D センサと3次元地図を用いたXORボックスセルマッチングによる位置同定. 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, pp. 2A2–I10, May 2012.
- [28] Barak Freedman, Alexander Shpunt, Meir Machline, and Yoel Arieli. Depth mapping using projected patterns. Patent Application WO 2008/120217 A2, Oct. 2008.



- [29] 吉岡松太郎, 森岡正和, 恒屋修一, 榊原浩子, 吉田高雄, 北島洋樹. 高齢者向け生産現場設計ガイドライン. 一般社団法人人間生活工学研究センター, 2001. <http://www.hql.jp/project/funcdb2000/index.html>. Jan. 18 2013.
- [30] Gamini Dissanayake, Paul M. Newman, Steve Clark, Hugh F. Durrant-Whyte, and Michael Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 3, pp. 229–241, Jun. 2001.