



# 光投影法による距離センサを用いた自律型移動ロボットの環境認識と走行制御

崔, 龍雲

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1995-03-31

(Date of Publication)

2008-12-08

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1395

(JaLCDOI)

<https://doi.org/10.11501/3105418>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001395>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

光投影法による距離センサを用いた  
自律型移動ロボットの環境認識と走行制御

1995年1月

神戸大学大学院自然科学研究科

崔 龍 雲

## 内 容 梗 概

自律型移動ロボットは、移動することにより絶えず環境が変化するため、自己の位置や姿勢、また環境の変化を各種センサから得られる情報をもとにまわりの状況を知るといふ環境認識能力が極めて重要である。特に障害物が散在している環境での移動ロボットは、スタート地点から障害物を回避しながら目標地点に到達する経路を自動的に決めなければならない。

本論文は、移動ロボットの環境認識に必要なセンサとして、半導体レーザのスリット光とテレビカメラによる距離センサの開発を行ない、これを研究室で試作した自律型移動ロボットRokkey IIに装着させ、周囲の環境認識による障害物回避を中心とした走行や局所地図作成による走行の実験の結果を示している。また、単一スリット光または2つのスリット光を用いる方法では、対象平面までの距離とその姿勢の高精度計測が同時にできないので、3つのスリット光を用いた三角錐スリット光による平面までの距離およびその姿勢の測定方法とそれによる実験結果をまとめたものである。

第1章では序論として、自律型移動ロボットの構成についての考え方や各種センサの役割り、および、ロボットビジョンによる環境認識の研究動向を述べるとともに、本研究の目的について述べている。

第2章では、研究室で試作し、実験で用いた移動ロボットRokkey IIのシステム構成および実際に誘導する際に必要となる走行部の制御方法を述べ、より正確な誘導の実現のための問題点と改良すべき点を示している。

第3章では、スリット光とテレビカメラによる距離センサを移動ロボットに実装し、屋内環境下で障害物回避を中心とした走行実験を行なった結果を示している。

屋内の廊下で予想しない障害物が置かれている場合を想定し、ロボットは、ス

リット光による距離センサのカメラの視野角内に投影されるスリット光の投影パターンの画像を解析することにより、障害物の配置やロボット自身の姿勢を認識して移動可能領域をみつけだし、走行情報(進行方向と移動距離)を自動的に求めることができた。カメラの視野角内で移動可能領域が見つからない場合、すなわち横幅が広い障害物や壁を向いているときおよび突き当たりのような隅の場合は、画像上で得られる障害物からの反射光による線情報を利用し、変えようとする方向への角度を求めなければならない。この場合、廊下の壁は平衡であることを前提として、ロボットが廊下の方向に正しく向いておれば、観測されるであろうスリット光の反射像を想定(これを基準線と呼ぶ)し、この基準線の方角ベクトルと障害物からの反射光によって得られた線分の方角ベクトルとのなす角度を進行方向の修正角度とすることによって障害物回避走行が可能になった。この走行実験の結果より、カメラのみによる走行、超音波距離センサによる走行に比べ、処理時間や環境認識能力の面においてスリット光による距離センサがより有効であることを示した。

第4章では、移動ロボットが現在の位置において周囲の局所地図を作成し、これを用いて障害物を回避したり方向を転換することによって、安全な走行を行なうための方法と走行実験を行なった結果を示している。

第3章で述べた方法では、テレビカメラの視野角に制限があるので、廊下の曲がり角や障害物の横幅が長い場合など、それらの認識が困難な場合がある。そこで、より広範囲な環境情報を得るため、スリット光による距離センサを水平に回転して複数の画像を取り込み、これを合成することにより、総合的に視野角を広げることを考えた。これは床面に垂直な軸まわりに回転できる回転台上にスリット光による距離センサを取付け、旋回させながら移動ロボットの前方5方向の画像を撮像する。各方向から得られた距離データを合成することにより、移動ロボットの現在の位置を中心とする周囲の局所地図を作成することができる。これは、ロボットの前方はもちろん、左右の障害物の位置情報を得ることができるので、より複雑な地形においても走行が可能である。実験の結果、複雑な構造の通路や障害物回避走行に有効であることが確かめられた。

第5章では、三角錐スリット光を用いて対象平面までの距離およびその姿勢を求める方法を提案し、その方法で行なった実験結果を示している。

この方法では、三角錐スリット光を対象平面に投影する。得られた三角形は対象平面までの距離が大きくなるにつれて1点に収束し、その後、上下、左右逆になって現われる。この三角形の大きさと正三角形からのずれの程度を利用することによって対象平面までの距離のみならず、従来の方法では得られなかった姿勢(方向と傾き)の同時計測が可能であることを示した。また、スリット光投影像の幅が大きくなることによる誤差を減少させるため、最小2乗法による直線のあてはめを行ない、画像面で求めた三角形の内心から各辺までの距離を利用することによって距離測定の精度を向上させている。

第6章では結論として、本研究で得られた結果の要約を行なっている。

# 目 次

第1章 序 論	1
1.1 自律ロボットの知能	1
1.2 自律型移動ロボットの構成	3
1.3 ロボットの視覚	6
1.4 ロボットビジョンによる環境認識の研究動向	7
1.4.1 屋内環境－環境モデルの利用－	8
1.4.2 屋内未知環境	8
1.4.3 屋外整地環境	9
1.4.4 未整地環境	10
1.4.5 能動的視覚	11
1.5 本研究の目的と本論文の構成	12
第2章 自律型移動ロボットRokkey IIのシステム構成	15
2.1 システムの概要	15
2.2 環境センサ部の構成	16
2.3 走行部の構成	18
2.3.1 走行制御モジュール	19
2.3.2 ジャイロセンサモジュール	21
2.4 走行部の制御	21
2.5 Rokkey II システムの問題点と課題	22
2.5.1 モジュール化とRokkey IIの走行制御	22
2.5.2 走行制御モジュールの問題	23
2.5.3 改良すべきシステム構成	24
2.6 まとめ	26

第3章 スリット光投影法による距離センサと、移動ロボットの走行制御	27
3.1 スリット光による距離センサの概要と構成	28
3.1.1 スリット光による距離センサの概要	28
3.1.2 ハードウェアの構成	29
3.1.3 距離の計算法	29
3.1.4 障害物の端点抽出手法	31
3.2 障害物回避のアルゴリズム	32
3.2.1 直進モード	33
3.2.2 一次障害物回避モード	33
3.2.3 二次障害物回避モード	35
3.3 実験結果	40
3.3.1 実環境での測距実験	40
3.3.2 障害物回避と走行の実験	41
3.4 まとめ	43
第4章 スリット光距離センサによる局所地図作成と移動ロボットの走行制御	45
4.1 局所地図作成システム	46
4.1.1 スリット光距離センサ	46
4.1.2 スリット光距離センサによる地図作成方法	47
4.1.3 距離データの導出	47
4.2 走行制御のための移動経路の決定	49
4.2.1 移動可能方向の探索	49
4.2.1.1 直進モード	51
4.2.1.2 障害物回避モード	52
4.2.1.3 多方向モード	53
4.2.2 走行における安全性の確認	55
4.3 走行実験およびその結果	56
4.4 まとめ	58

第5章 三角錐スリット光投影法による対象平面の距離とその姿勢の計測	59
5.1 測定原理	60
5.1.1 対象平面までの距離	62
5.1.2 対象平面の姿勢計測	64
5.2 測定精度の向上法	65
5.2.1 スリット投影像の近似	65
5.2.2 投影像三角形の内心の利用	67
5.3 装置と実験	68
5.3.1 対象平面までの距離測定	69
5.3.2 対象平面の姿勢測定	72
5.3.3 焦点距離の測定	72
5.3.4 距離測定における投光器位置の影響	73
5.3.5 従来の測定方法との比較	73
5.4 まとめ	75
第6章 結 論	77
謝 辞	81
本研究に関連する発表論文	83
文 献	85



# 第 1 章

---

---

## 序 論

ロボティクス (robotics) と人工知能 (AI) の相違は、前者が現実の物理世界とのインタラクション (interaction) を持つのに対して後者はモデル世界の中で話が完結する点にある。すなわち、人工知能ではモデル世界の中で問題の解法を考え、モデル (model) についてそれが有効であることを主眼とする。それに対してロボティクスではモデル世界で問題の解決法を検討の後、最終的には実世界でそれを機能させなければならない。

本章では、自律ロボットの移動に関する知能について概観し、視覚による環境認識の研究動向および本研究の目的について述べる。

### 1.1 自律ロボットの知能

自律ロボットとは、常に外界の変化に即応し、自己機能を維持するために危険を避けつつ、不確定な実世界に働きかけるシステムである。実世界を対象とするロボットの構成は大きく図 1.1 のように表される。ロボット自らの状態もひとつの実環境であるが、それを含めた実世界の状態はセンサによってロボットに取り込まれ、情報処理され、それに基づいてロボットはアクチュエータ (actuator) で

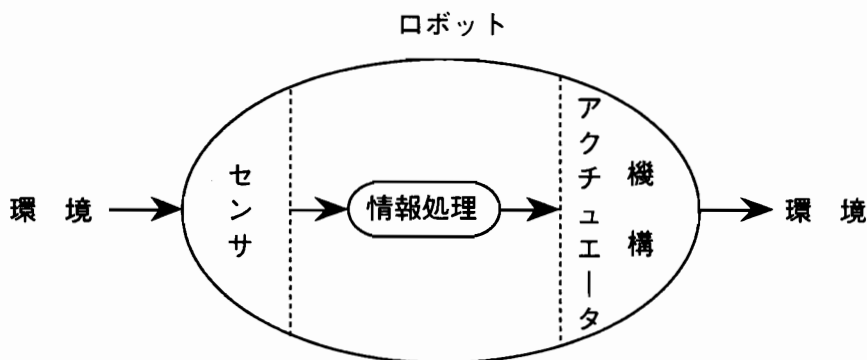


図 1.1 ロボットの構成

駆動される機構を通して実環境に働きかける。マニピュレーション (manipulation) の場合はリンク機構により物を操作し、移動の場合は車輪や脚などの移動機構で環境に対する自らの位置を変える。

種々のセンサから機構に至る過程を人間の助けを借りることなく行なう方法の実現がいわゆるロボットの自律化、知能化である。この際、ロボットはモデルをもとにして実世界を理解し、そのモデルを介して実世界に働きかける<sup>1)</sup>。モデルの必要性、重要性は人間の認識の過程を考えてみても明らかである。人間が経験によって現実の世界の何らかのイメージ (image) を作り、そのモデルを通して世界を理解し行動しているように、ロボットにも実世界のモデル (model) が必要となる。したがって、ロボットの知能はまず、モデルを利用した認識、行動計画といったものと考えることができる<sup>2)</sup>。

現実の世界が一旦モデル化されれば、以後は数学的あるいは論理的な処理によって実現できる機能も多い。これらはロボティクスの中でも人工知能と密接に結びついたもので経路探索の手法などがこれにあたる。しかしながら、従来の記号に基づく AI 技術だけでは、

- 1) すべての外部の事象を、適切に記号化することが可能か
- 2) 記号化が可能だとして、記号を用いたシミュレーション (simulation) だけで適当な時間内に解を見つけることが可能か
- 3) 記号的に求められた解によってアクチュエータを動かさせ、望んだ通りの効果を確実に得ることが可能か

という根本的な問題から実世界を忠実にモデル化するのが困難である。そのため、人間の持つ高次の思考活動と低次の機能の関係を再構築することから始めて移動ロボットのアーキテクチャ (architecture) を提唱した研究がある<sup>3)</sup>。またロボットの自律化を実現するため、現存の自律システムである動物の基本的な行動パターン (pattern) を考察することにより神経回路網を用いた昆虫ロボットの制御を試みている<sup>4)</sup>。

しかし、まだロボットが実世界をモデル化する能力は限られており、実世界とモデルの相違をうまく処理し、実世界の中で柔軟に行動する能力がロボット特有の知能と考えられる。

また、未知環境の移動のように環境のモデル自体を作ることが先決問題となる場合は、知識をもとにモデルを作成したり、モデルをメンテナンス (maintenance) することが重要である。これもロボットの知能のひとつと言える。

## 1.2 自律型移動ロボットの構成

自律型移動ロボットの構成に関しては、多くの研究がなされており、目的によってその要素の役割は異なるが、図 1.2 に示すような自律型移動ロボットの構成例をイメージ (image) しながら各要素について説明する。自律型移動ロボットのプランニング (planning) 機能は、本質的にそれだけで独立に存在しえるものではなく、外界に働きかける機能と、外界を認識する機能が共存することによってはじめて存在意義のあるものであり、これらの共通部分として知識データベース (data base) が存在する。すなわち、自律移動ロボットは環境を理解し、行動するために環境モデルと知識データベース (data base) を持つ。

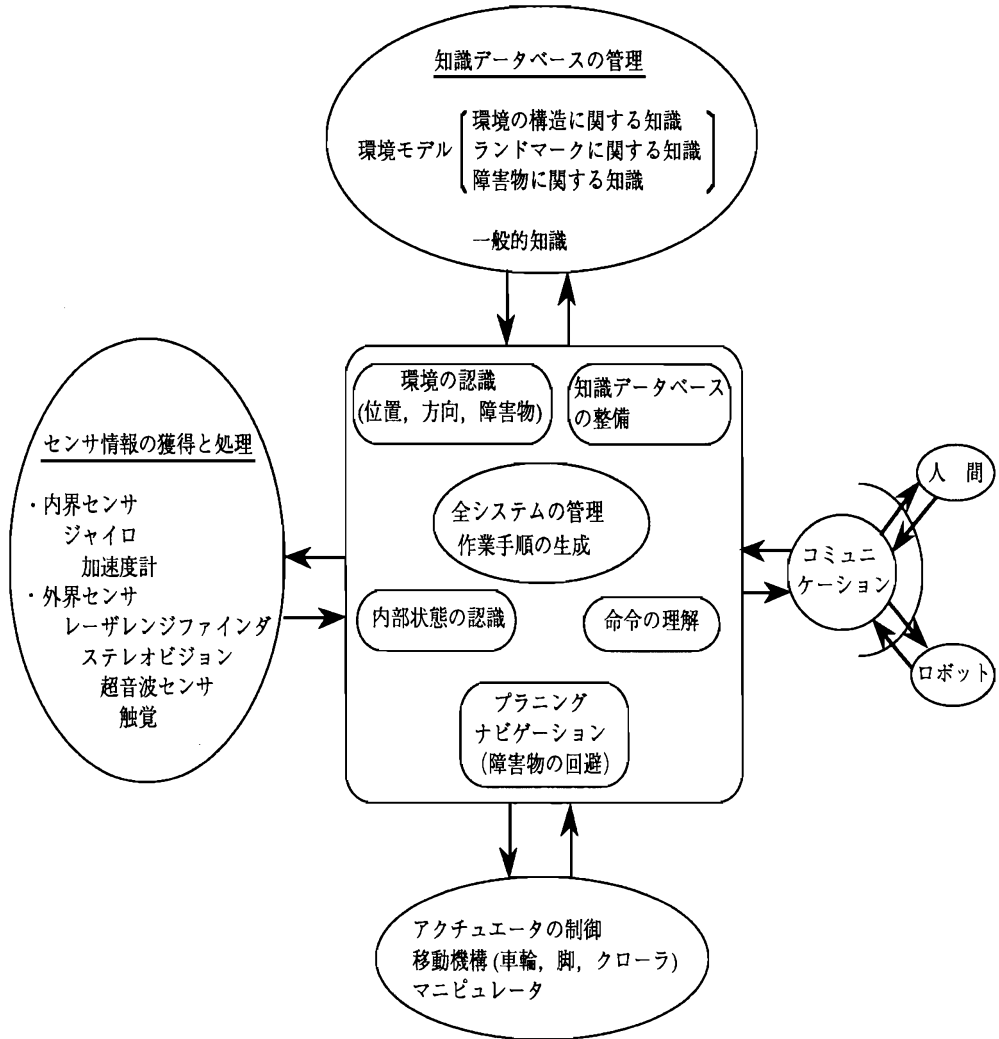


図 1.2 自律型移動ロボットのシステム構成例<sup>5)</sup>

環境モデルは環境の幾何学的な構造，位相的な構造，その他，環境認識の際に手がかりとなるような情報をそれぞれの目的に利用しやすい形にまとめたものである．知識データベースは例えば，「移動環境は平な面である」というような環境に関するより基本的な知識といったものである．通常は意識されないが，処理

の前提としている仮定などもこうした知識と考えられ、環境モデルとともにセンサ情報の解析や環境の認識、行動の計画の際に利用される。人間からの指令や他のロボットからの情報はコミュニケーション (communication) 機能を通して受け取られ、解釈され、必要な処理に回される。タスク (task) やパスのプランニング (planning of path) では目的を達成するための行動計画、および目的地に至る経路探索を行なう。センサ情報処理は移動に必要な位置認識や障害物の検出などである。ナビゲーション (navigation) では移動機構を制御して計画した経路に沿った移動を実現する。ロボット全体の状況の監視も重要である。

経路探索とは、与えられた環境のもとで、初期点から出発して障害物を避けながら目標点に到達する道を見いだすことであり、場合によっては、その道がある種の性質を満足すること (最適性) を要求されることもある。

経路探索の問題は、様々なアルゴリズム (algorithm) が問題の状況に応じて開発されているが、これらを移動ロボットの観点から考えると、グラフ (graph) の探索とポテンシャル (potential) を利用する方法に大別できる。前者は自由空間をセル (cell) に分割し、それらの接続状況をグラフとして表現し、設定した評価関数を最適にする経路をグラフ上の探索から設計する方法である。大域的に最適な経路を計画できる反面、対象となる環境が大きくなると、探索に要する計算量の急激な増大を容易に招く問題点がある。後者は、周囲の障害物や目標地の位置関係をもとに環境の各地点にポテンシャルを導入し、その勾配に沿ってロボットを誘導する方法である。ポテンシャル法では原理的に局所的な情報によって経路が決まるため、大域的には必ずしも適切ではなかったり、またローカルミニマム (local minimum) によって目的地まで経路が設計できない恐れがあるものの、経路の具体的な形状を考える必要がないという特長を持つ。実用的、あるいは実際的な観点からはいずれか一方の方法に頼るのではなく、大域的にはグラフ探索を用い、局所的な経路はポテンシャル法によって作るのが自然であると思われる。

これらは、環境に関する知識が完全な場合の探索法であるが、環境に関する知識がない場合あるいは不完全な場合は、試行錯誤的探索法、発見的探索あるいはハイブリッド (hybrid) 探索法が用いられている<sup>8)</sup>。

ロボットの環境認識，中でも現在位置の認識は，ナビゲーション (navigation) にとって極めて重要である．基本的には内界センサの情報を積分して位置推定を行なう．次に周囲の環境を観察して，手近にある特徴点を視覚情報やレンジ (range) 情報から認識する．このとき内界センサの情報から推定した現在位置と環境モデルを活用する．この環境の特徴点の認識を通して現在位置を更新する．また，必要に応じて環境内の物体との接触や障害物との衝突などの危険もこうしたセンサ情報と環境モデル・知識を利用して認識し，適応的な行動を行なう．こうした障害物の中には人間や他のロボットも考えられ，コミュニケーション可能な相手との意志の疎通もロボットの知能のひとつとして重要である．

移動機構の制御は，設計されたロボットの移動を実行に移す重要な部分である．特に移動環境の凹凸に高い適応性の可能性を持つ歩行機構では環境モデルをもとにしたフィードフォワード (feedforward) 制御とセンサ情報に基づいたフィードバック (feedback) 制御のうまい組み合わせが要求される．

自律型移動ロボットの研究では，対象とする環境が多岐にわたることから各種の環境モデルが提案されてきている．しかしながら，環境モデルを利用できない場合が中心課題となっている自律型移動ロボットの環境認識の場合は，どのようなアプローチ (approach) がとられているかを考察する．

### 1.3 ロボットの視覚

ロボットはなんらかの指令が与えられてそれを理解し，外界に働きかける作業を行なうシステムである．与えられた指令を正しく実行した結果が最終目標状態となるのであるが，そのためには現在の環境状態，すなわち環境の初期状態がわかっているなければ，最終目標状態に到達するための一連の行動計画が立てられない．環境の状態を認識するために人間は，いわゆる五感を備えているが，その中でも外界に関する情報の 90% 以上を視覚によって得ていると言われているように，環境認識に最も適した感覚は視覚である．

人間を理想的な目標とするロボットにおいても環境の初期状態を認識するのに

最も適した感覚は人工視覚である。通常、これはコンピュータビジョン (computer vision) とかロボットビジョン (robot vision) といった2つの似たような言葉で呼ばれている。コンピュータビジョンとは、両眼立体視とテクスチャ解析という要素技術に重点をおいた研究であるとする、ロボットビジョンとは、自律ロボットの視覚機能のためのシステム開発に重点をおいた研究であるとされている。また、自律ロボットとは、外界からの情報を収集し、なんらかの行動を起こすような閉ループをなすシステムである。自律ロボットは、道路に沿って安全に走るとか、荒積みされた部品を1つずつ摘み上げると言ったようなタスク (task) を持つ。このため、システム全体がそのタスクに適応するよう設計される。自律ロボットの一部を研究するロボットビジョンの研究では、タスク中心の研究が進められることが多い。したがって、組立作業のための目、ビンピッキング(bin picking)のための目、あるいは道路追従のための目といったタスク別の研究分類が可能である。

本研究では、屋内環境下で移動するロボットの環境認識に必要なセンサとして、スリット光とテレビカメラによる距離センサの開発を行ない、これを本研究室で試作した自律型移動ロボットRokkey IIに装着させ、環境認識による自律走行を研究の対象とした。

移動ロボットの環境認識においては、これまでにその応用分野と目的によってさまざまな研究がなされている。ここでは、環境認識に特有の問題にできるかぎり焦点を絞り、環境を屋内と屋外、屋外をさらに整地環境と未整地環境に分けてその概要を簡単に述べる。また、最近ロボットビジョンの研究で着目されている能動的視覚 (Active Vision) について述べる。

#### 1.4 ロボットビジョンによる環境認識の研究動向

従来のロボットビジョン研究の中心課題は物体認識であった。すなわち、視野の中いくつかの対象物体が置かれているときに、それぞれを認識(位置決めも含めて)することであった。しかし、近年、移動ロボットの研究が盛んになると

ともにロボットの周囲の環境を、その視覚(移動視)を用いて認識する研究が重点的になってきた。環境も物体の集まりであると考え、従来の物体認識の手法の延長で環境認識も可能と思えるが、異なった点も多い。

物体認識では、背景となる環境は対象物体を切り出すのに邪魔で、むしろ雑音として扱われることが多かった。このため、背景をできるかぎり単純化する工夫もなされた。しかし、移動視では、個々の物体の認識も重要であるが、むしろ背景環境の認識が重要なテーマ(theme)となる。物体認識の場合、個々の物体のパターン認識(名前付け)が中心テーマであったが、環境認識の場合は、必ずしもパターン認識をする必要はなく、その空間的な構成を認知すれば十分なことも多い。また、物体認識で成功した手法として Model-Based なアプローチ (approach) があげられる。環境認識の場合、幾何モデルを利用できることもあるが、むしろ幾何モデルを利用できない未知環境の認識が中心課題となっている。このように環境認識は、物体認識とは異なった点も多く、また幅広い応用が期待できることから、ロボットビジョンの中心課題の1つとして、近年研究が急速に盛んとなってきた。

#### 1.4.1 屋内環境 —環境モデルの利用—

移動ロボットが作業する環境を考えると、そのモデルが事前に得られることが多い。したがって、それらの環境モデルをロボットに与えておいて、そのモデルを用いて視覚情報を処理すると経路発見や環境認識も容易となる。これにはモデルを利用した物体認識と同様な考え方をを用いることができる。このモデル駆動型 (Model Driven) の方法を用いて、ロボットの環境内での位置決めや、環境認識を行う研究がなされた<sup>9)</sup>。

#### 1.4.2 屋内未知環境

環境認識の場合、その幾何モデルが利用できることもあるが、むしろ幾何モデルを利用できない未知環境の認識が中心課題となっている。このような未知環境



にロボットが置かれたとき、自分の周囲の環境の空間構成を認知したり自分自身の位置決めをしたりするための研究も行われている。

未知環境の場合、まずロボットが移動できる自由空間を求める必要がある。移動ロボット上の左右に取付けた2台のカメラによって撮像された画像を床面上に逆透視変換し、床面上にある高さのある障害物が存在するかどうかを判断するという研究がある<sup>10)11)</sup>。またステレオ視によって得られる観測結果を融合し、ロボットの移動に伴い徐々に環境全体の表現が完成されていく方向を示した研究もある<sup>12)</sup>。

しかし、単眼視の多くの場合、カメラの位置は内部センサにより求めることができる。移動視により新しく得られる画像に対し、カメラの位置がわかると両眼視、3眼視により生じる幾何学的拘束が利用できる。このため、画像処理上の探索範囲を狭い領域に限定することができ、画像処理の高速化が図れるとともに、得られる画像に対して次々と対応づけを行っていくことにより、広い環境の3次元的な再構成ができる<sup>12)</sup>。一方、移動視によって得られる一連の画像を利用し、カメラの位置を推定する研究もなされた<sup>13)14)</sup>。

このようにいくつかの観測結果をなんらかの内部表現において統一的に扱い、環境全体を認識しなければならない。未知環境で移動ロボットは、その周囲の環境全体の粗い構造を計測するとともに、ロボットの移動中に環境の一部を注視する視覚システムの組合せが必要である。

### 1.4.3 屋外整地環境

整地環境下では、環境に関する知識を有効に利用することができるため、ほとんどの研究は道路環境モデルを用いている。道路環境に関する知識を有効に用いている代表例として SCARF (Supervised Classification Applied to Road Following) があげられる<sup>15)</sup>。SCARFでは道路領域と非道路領域を表す色に関する知識を用いて、ベイズの定理により道路境界を検出し、検出された道路領域を Hough 変換することで、道路の向きと道路境界の推定を行なっている。

一方、高速道路のように整備された道路だと、道の両端に白線が描かれている。この白線を検出することにより、走行可能な領域を発見しようとする研究も行われている<sup>14)</sup>。また、高速道路上で時速 100 km/h という高速な自律走行が可能だと発表されている<sup>16)</sup>。

移動ロボットが道路を認識できたとすると、次に問題となるのは経路上の自分自身の位置決めである。このためには、ランドマーク (land mark) と呼ぶ目印をあらかじめ教えておき、それらとの位置関係から位置決めをする。ランドマークとしては、道路の標識や道路の表示、また道路沿いにある構造物がよく用いられている。

#### 1.4.4 未整地環境

NASA の Mars Rover 計画により、火星探査ロボットの研究が開始されるようになった。火星には道路がないので、でこぼこした所や穴などを避けて移動しなければならない。また、自分自身の位置決めのための目印となるランドマークが少ない。これは火星環境に限ったことではなく、地球上でも砂漠などの荒地では、同じような状況である。このような環境を未整地環境 (Unstructured Environment) と呼び、次第に研究が活発化されてきた。

未整地環境では、まず、地形の 3 次元的な形状を知ることが必要で、距離センサが利用されている。例えば、CMU (Carnegie Mellon University) の自律走行車 NAVLAB (NAVigation LABoratory) と火星探査ロボット AMBLER (Autonomous MoBiLe Expoloration Robot) では、レーザレンジファインダ (laser range finder) を用いて距離画像を入力し、それを高さ地図 (Elevation Map) に変換している。この入力された高さ地図と以前に得られた高さ地図や既知の地図と照合することによりロボット自身の位置決めを行なう。この位置データを用いて、複数地図を融合した合成地図を作成している<sup>15)17)</sup>。

### 1.4.5 能動的視覚

最近、ロボットのセンシング (sensing) 方法においても、その観測を能動的に行なおうとする研究が盛んになっている。能動的センシング (Active Sensing) は、すでにロボットにもよく利用されている能動的センサ (Active Sensor) とは異なる。能動的センサは、なんらかの意味を持ったエネルギー (光波、電波、音波など) を測定対象に照射し、その反射を検出するセンサである。一方、能動的センシングは、データ入力の解析結果やタスク (task) の目標に応じてデータ取得のプロセス (process) を制御したり、方策を変更するセンシングとされている<sup>18)</sup>。

視覚の分野でも、1枚の静的画像を扱うコンピュータビジョン (computer vision) から動画像に重点が移り、さらにカメラ運動を制御する能動的視覚が着目されている。すなわち、視覚によって対象を認識するタスクをより効率的に達成するため、能動的なカメラの運動を取り入れようというものである。

Ballard は、人間の視覚はその目的に従って凝視行動の連続で実現されることを根拠とした Animate vision の考えを提案した。これは、最高  $150^\circ$  / 秒の速さで動く高速な凝視制御機能を持つ2台のカメラ (それぞれのカメラの Yaw 及びカメラのプラットフォームの Pitch が制御できる) をロボットハンド (robot hand) の先に搭載したセンサを使用し、視点中心ではなく物体、もしくは空間内の一参照点を座標原点とする座標系で視覚に関する各問題を考え直すことで、容易に解決できる問題があることを示そうとした<sup>19) 21)</sup>。

Animate vision の研究は、1枚の画像を解析してそれから結論を得ようとする従来のコンピュータビジョンに比べて、次のようなロボティクス (robotics) の考え方を示した。まず、タスク (task) によって画像の取得、処理の方策を変える。現在の観測からはある程度の結論が得られれば十分で、以降の観測で仮説を検証しながらタスクの遂行に必要な世界の情報を収集する。また、必要な情報が得られやすいようにカメラを動かし、運動情報と画像情報を一体化して利用する。これらの考え方を総合的に実時間システム (Real Time System) で検証するのが能動的視覚による認識であり、視覚だけでなく他の多くのセンサの処理にも利用できると思われる。

従来のコンピュータビジョン (computer vision) の研究は、2次元の画像(または画像列)から観測対象の3次元世界を復元しようとした。そのため明るさの分布、運動ベクトル、輪郭形状などの情報から3次元形状を推定する Shape from X の手法が研究された。しかし、2次元画像から3次元世界の復元は原理的に ill-posed 問題であり、解を得るために対象が滑らかであるといった付帯条件をつけ、多くは非線形方程式の解として求めていた。その結果、大量の計算が必要で、しかもロバスト (robust) の解が得られずロボットの視覚としてはとても用いられない。一方、カメラ運動を制御しながら連続観測する画像に対して、Shape from X の問題は well-posed になり、線形方程式の解として安定に必要な情報が得られる能動的視覚のパラダイム (paradigm) は、移動ロボットの視覚研究においても重要なことである。

## 1.5 本研究の目的と本論文の構成

以上述べたように自律型移動ロボットは移動することにより絶えず環境が変化するため、自己の位置や姿勢、また環境の変化を種々のセンサから得られる情報をもとにまわりの状況を知るといった環境認識能力が極めて重要である。特に障害物の多い環境での移動ロボットは、スタート (start) 地点から障害物を回避しながら目標地点に到達する進路を自動的に決めなければならない。

本研究では、移動ロボットの環境認識に必要なセンサとして、半導体レーザのスリット光とテレビカメラによる距離センサの開発を行なった。これを研究室で試作した自律型移動ロボット Rokkey II に装着させ、経路上の障害物の位置把握による障害物回避走行をはじめ、ロボット周囲の局所地図作成による走行の実験など、屋内環境下で移動するロボットの自律化を実現するための研究を行なった。また、対象平面までの距離およびその姿勢の計測センサとして、3つのスリット光を用いた三角錐スリット光による平面までの距離およびその姿勢の測定方法を提案し、その装置の試作と実験を行なった。

本論文は実験結果をまとめたもので、その構成は、以下のようになっている。

第2章では、本研究に用いた移動ロボットRokkey IIのシステム構成について述べ、これに対してどのような構造がよいかをまとめる。第3章では、スリット光の投影パターンを利用して障害物の幅が広いときと移動ロボットが壁を向いてしまったとき、また廊下の突き当たりのような隅に遭遇した場合など、障害物回避行動を試みる柔軟性のあるアルゴリズム (algorithm) を提案し、それによって行なった実験結果について述べる。第4章では、移動ロボットが現在の位置において周囲の局所地図を作成し、これを用いて障害物を回避したりロボットの方向を転換することによって、安全な走行を行なうための方法を提案し、この方法で行なった走行制御の実験結果について述べる。第5章では、3つのスリット光を対象平面に向かって三角錐になるよう投影する。得られた三角形像の大きさと正三角形からのずれの程度を利用することによって、画素単位に依存しないでかつ高精度で対象平面までの距離とその姿勢、すなわち方向と傾きが同時に測定可能な計測装置を試作し、その測定原理と実験結果を示す。第6章では結論として、本研究で得られた結果の要約と今後の課題について述べる。

## 第 2 章

---

---

# 自律型移動ロボット Rokkey II のシステム構成

本研究の対象である自律型移動ロボットRokkey IIのシステム (以下Rokkey IIシステムと呼ぶ)の全体の概要について述べる。本体各部の構成として、環境センサ部、走行部をそれぞれ詳細に説明する。また、実際の誘導する際に必要となる走行部の制御方法を述べ、自律型移動ロボットのより正確な誘導の実現のためにどのような構造がよいかを考える。

### 2.1 システムの概要

本研究室で試作された移動ロボットRokkey IIシステムは、本体と基地局で構成されている。Rokkey IIの本体は長さ85cm、幅65cm、高さ117cmの前輪駆動・前輪操舵方式の4輪移動型ロボットである。動力は前輪にとりつけられたDCモータである。また舵角制御用に、これとは別のDCモータがとりつけられている。これらのモータは0～10Vの電圧で制御される。バッテリーを積むことにより電線を引きずることなしに移動が可能である。Rokkey IIシステムの本体を写真2.1に示す。

さらに、Rokkey II本体のシステムは図2.2に示すように環境センサ部、情報処理部、走行部、通信部からなる。走行用内部センサとしては、移動距離センサ、

舵角センサ，ジャイロ方位センサ (Gyroscope sensor) が搭載されている。これらの走行用内部センサからの情報は，メインコンピュータ (main computer) のバス (bus) に接続された8086 CPU ボード (board) で処理され，メインコンピュータと独立に処理が行なわれる。その他，RS-232C 無線モデム (modem) を介して基地局と通信することができ，基地よりリモートコントロール (remote control) することも可能である。Rokkey II 本体のシステム構成図を図 2.2 に示す。

## 2.2 環境センサ部の構成

Rokkey II システムには，テレビカメラ，アレイ型及び回転型超音波距離センサ，スリット光による距離センサの4種類の環境センサが搭載されている。

### (1) テレビカメラ (TV camera)

モノクロ CCDカメラ (monocular Charge-Coupled Device camera) を使用している。視野角は約  $30^\circ$  であるが，画像入力装置に取り込まれるのは  $24^\circ$  である。テレビカメラから取り込まれた画像は，画像入力装置に送られ，そこで  $256 \times 256$  画素，256階調に量子化される。その画像はメインコンピュータで処理することにより，誘導に必要な環境情報を取り出すことができる。

### (2) アレイ型超音波距離センサ

Rokkey II の前面に装備され，発信素子6個，受信素子16個を持ち，前方障害物の探知・認識に利用する。

### (3) 回転型超音波距離センサ

発信・受信各1つずつで1組となり，水平方向に回転できる超音波距離センサである。前方・左右のステッピングモータ (stepping motor) 上に計3組装備され，壁までの距離や交差点の認識，Rokkey II の方向制御などに用いることができる。

### (4) スリット光による距離センサ

テレビカメラと半導体レーザで構成され，Rokkey II の前面中央に取り付けている。床面に対して水平の赤外線スリット光を発生する機構は，半導体レーザ投光器とLD駆動装置より構成されている。投光器の光源には，一般的な屋内環境の

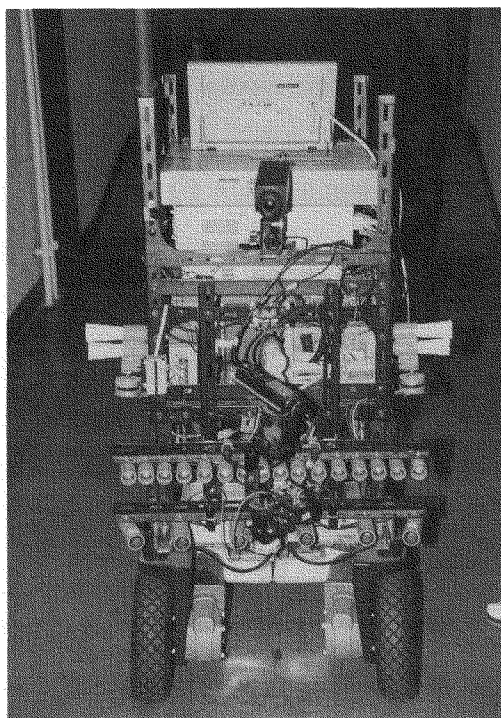


写真 2.1 Rokkey II の本体

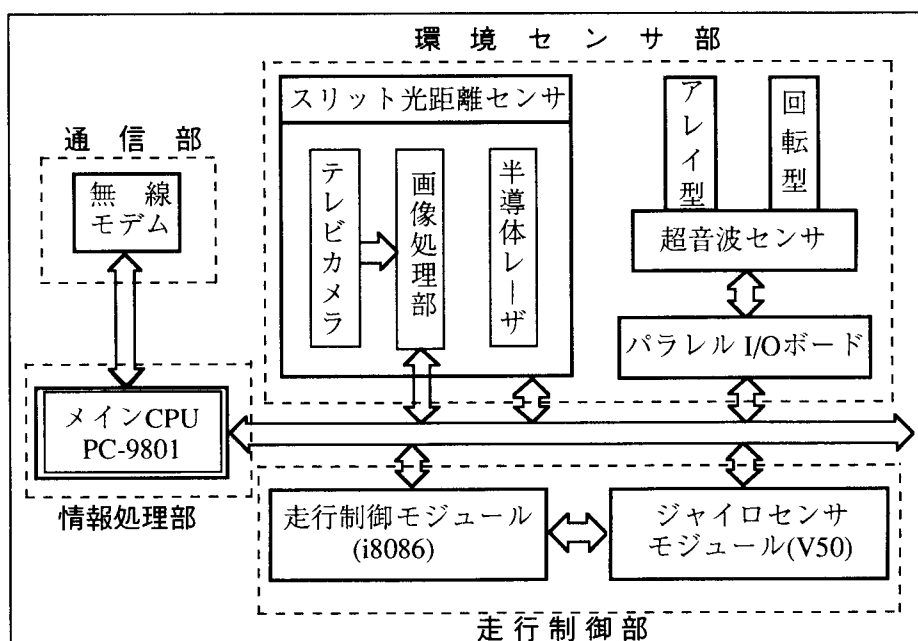


図 2.2 Rokkey II のシステム構成図



照明下でも距離測定が可能な半導体レーザ (830nm, 30mW) , 水平スリット光の生成にはシリンダリカルレンズ (cylindrical lens) を用いたコリメータ (collimator) を使用している。CCD カメラは焦点距離 8.5mm の広角レンズを使用している。このレンズにはレーザの反射光のみを検出するために近赤外線透過用フィルタを取り付けている。カメラから取り込まれた画像は画像入力装置に送られ、そこで  $256 \times 256$  画素、256 階調に量子化される。画像入力装置に取り込まれた画像はメインコンピュータで処理することにより環境認識に必要な情報を取り出すことができる。

### 2.3 走行部の構成

図2.2に示すように走行部は、走行制御モジュールとジャイロセンサモジュールで構成されている。走行部で用いられる内部センサとしては、移動距離センサ、舵角センサ、ジャイロ方位センサの3つがある。

舵角制御の場合車輪角度の誤差を抑えるためにはロータリー・エンコーダ (rotary encoder) を使用し、走行制御に必要な移動距離を求めるために距離センサを取り付けている。このロータリー・エンコーダと移動距離センサは走行制御モジュールにつながっている。実際の走行制御をするときの問題点は、舵角の誤差と移動距離の誤差、そして車体の方位角の誤差である。これらの誤差のうち、特に屋内の廊下のような環境下の走行で最も大きな影響を及ぼすのは方位角の誤差である。そこで車体の方位角を知るセンサが必要となる。車体の方位角を知るには、ジャイロスコープ (gyroscope) が適当である。ジャイロスコープにはいくつかの種類があるが、振動型レートジャイロを採用した。ジャイロスコープの出力は角速度であるので、車体の方位角を得るためには、ジャイロセンサの出力を積分する必要がある。リアルタイム (real time) に積分ができなければ車体の振動の影響を受けるので、1つのプロセッサを割り当ててモジュール (module) 化した。走行制御モジュールのモニタープログラム (monitor program) は、直進走行時にジャイロセンサモジュールからの方位角の情報を用いて車輪の滑りなどによる車体の

ずれを抑えるようにする。また車体の旋回の場合もこの角度情報を用いるようにしている。

### 2.3.1 走行制御モジュール

図2.3に走行部を制御する走行制御モジュールの構成図を示す。この走行制御モジュールはメインコンピュータとバス結合しており、メインコンピュータからコマンドを受け取ることで、独立して走行部を制御することができる。移動距離センサと舵角センサからの情報は走行制御モジュール i 8086 CPU ボードで処理される。ジャイロ方位センサからの情報は V50CPU ボードで処理され、処理結果は走行制御モジュールが受け取る。これらの内部センサからのデータをもとに、走行制御モジュールではメインコンピュータから送られた走行コマンドを処

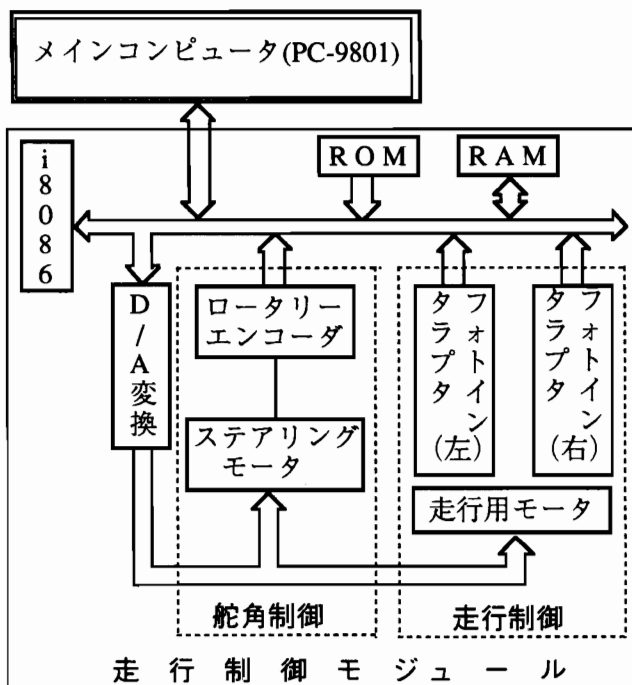


図2.3 走行制御モジュールの構成図

理する。走行制御モジュールからの出力電圧は、モジュール内の D/A 変換器でアナログ (analog) 信号に変換され、Rokkey II の走行用モータを駆動する。また、メインコンピュータのバスに接続されたりレーボード (relay board) によって、走行用モータの正転・逆転の切り替えが行なわれる。

・移動距離センサ

フォトインタラプタ (photo-interrupt) を使用し、Rokkey II の左右後輪についている円板上の放射状パターンを反射をカウントして回転角を求め、これより走行距離を測定している。分解能は 1 カウント当り 24.5 mm である。この移動距離センサからの情報は、走行制御モジュールに直接送られ、走行制御に用いられる。

・舵角センサ

Rokkey II の前輪のステアリングモータ (steering motor) に直結されたロータリー・エンコーダで舵角をセンス (sense) する。この舵角信号用エンコーダ (endoder) の分解能は  $1^{\circ}$  であるが、今回は分解能  $2^{\circ}$  で使用している。この舵角情報は、走行制御モジュールに直接送られる。

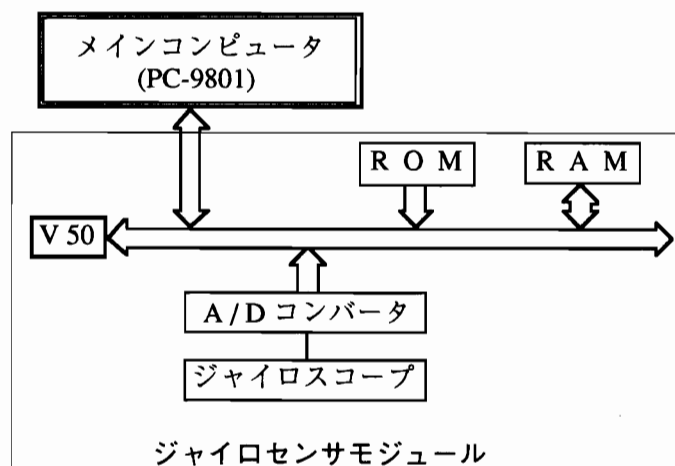


図 2.4 ジャイロセンサモジュールの構成図

### 2.3.2 ジャイロセンサモジュール (gyro sensor module)

走行制御モジュールと同様にメインコンピュータ (main computer) とはバス (bus) 結合し、メモリ (memory) と I/O はモジュール CPU とメインコンピュータが共にアクセス (access) できる。メインコンピュータからモジュールへの通信はモジュール RAM を介し、モジュールからメインコンピュータへの通信はメインコンピュータの I/O を介している。そのシステム構成を図 2.4 に示す。そして、モジュール間の通信は走行モジュールの I/O とジャイロセンサモジュールの I/O と直接つないだ形になっている。それぞれ入出力用に 2 つの I/O を用い、双方向で通信する。ジャイロセンサからは角度情報を走行制御モジュールに送り、走行制御モジュールからは積分の開始・停止の命令を送る。走行中だけ積分することで、停止時の積分誤差をなるべく減らすためである。

#### ・ジャイロ方位センサ

このセンサの出力信号はジャイロセンサモジュールの V50 CPU ボードで処理され、処理結果は走行制御モジュールに送られ、走行制御に用いられる。方位角の分解能は  $1^\circ$  である。

## 2.4 走行部の制御

Rokkey II の誘導は、環境センサから得られた情報により走行部をいかに制御するかを決め、走行制御モジュールに適切なコマンド (command) を送ることによってなされる。また、誘導に必要な走行部の情報を走行制御モジュールから引き出すコマンドも用意されている。走行制御モジュールでは、モニタプログラムがメインコンピュータから送られてくるコマンドの実行を管理している。メインコンピュータからのコマンドは、下記の様に 3 個の走行コマンドと 3 個のモジュール制御コマンドがある。走行コマンドは走行制御モジュールにあるコマンドキュー (command queue) に貯められ逐次実行されることにより、連続走行とメインコンピュータから独立した制御を可能にしている。モジュール制御コマンドは主に現在のモジュールの状態を知るために使用されるもので、走行コマンド実行中でも

用いることができる。

(1) 走行コマンド

- ・ go : 直進する。引数は距離・速度
- ・ rotate : 後輪を軸にしてその場で回転する。引数は角度
- ・ turn : 舵角を一定にして弧を描くように前進する。  
引数は角度・距離・速度

(2) モジュール制御コマンド

- ・ load : 走行コマンドをモジュールに送る。
- ・ state : モジュールの状態をメインコンピュータに送る。
- ・ clear : モジュールのコマンドキューのクリア (clear)

## 2.5 Rokkey II システムの問題点と課題

これまでに述べたモジュールとRokkey II システムとの関係を考察し、モジュール化によるRokkey II 本体の誘導に及ぼす影響について述べる。また、Rokkey II 本体におけるこれからの改良すべきシステム構成について述べる。

### 2.5.1 モジュール化とRokkey II の走行制御

2.3 で述べた走行制御モジュールとジャイロセンサモジュールとは、どちらも本体の内部情報を知るためのセンサである。ジャイロセンサモジュールは独立したモジュールではあるが、情報の流れから言えば走行制御モジュールの内部にあると言える。そこで、以下この2つモジュールを合わせて走行モジュールと言うことにする。

この走行モジュールを使うことで、走行制御をメインコンピュータから切り放すことができた。環境センサによるRokkey II 本体の誘導などが研究されてきたが、これらの研究から実際の走行制御を分離することで、環境情報の処理結果から簡単に誘導を行なうことができるようになった。

特にすべてのプログラムをC言語で作ることができたので可読性があり、また環境センサの処理プログラムもほとんどがC言語で書かれているので、それらとの結合が容易に行なえる。メインコンピュータ上で実行されるプログラムはすべてC言語のライブラリ (library) に納めてあるので、プログラムの中で関数を呼び出すだけで走行制御が行なえる。

走行コマンド形式でRokkey II 本体の誘導が行なえることは、制御を簡単化することにはなるが、走行コマンドからはずれたような誘導は行なえなくなる。本研究でも走行コマンドを組み合わせることで複雑な走行を行なうようになっている。そのため柔軟な制御ができるようになってはいるが、限界はある。

## 2.5.2 走行制御モジュールの問題

2.5.1 で最後に述べたのは、走行制御での問題であるが、システムのハードウェア (hardware) 上でもいくつかの問題がある。この走行制御モジュールのハードウェアを制作したときの構想では、モジュールが全くのスレーブ (slave) で動くことを考えていた。メインコンピュータへの通信はメインコンピュータのI/Oポートを用いている。そのため、メインコンピュータからモジュールを監視できるが、モジュールからはメインコンピュータを監視できない構造になっている。

この問題が解決できるシステム構成として複数のモジュールから同時にアクセス (access) できるインターフェース (interface) は、I/Oを用いずに共通メモリに書き込む形にする方が望ましい。それは、1つのバスを介してI/Oにより他のモジュールにアクセスし、目的とするデータ (data) を取ってくるためには、他のモジュールからそのバスへのアクセスを止めなければならないからである。そこで、インターフェースはデュアルポートメモリ (dual port memory) のように2つのバスをもってメインコンピュータとモジュールとが同時にアクセスできるものが必要である。

現在のメインコンピュータのPC-9801では、メインCPUのバスを切り放してモジュールのバスからコンピュータ内部のメモリをアクセスできる。この切り替

えで共通メモリとすることができるが、同時にアクセスはできない。また、MS-DOS が扱えるメモリに限界があるために、画像入力装置にすでに128 KB を使った上に共通メモリを取ると、メインコンピュータ上でプログラムを走らせることができなくなる。そこで、もっと多くのメモリを実装したコンピュータを用い、より広いメモリ空間を扱える CPU や OS が必要である。

複数のモジュールから同時にアクセスできるインターフェースを用いる大きな目的は、他のモジュールに影響を及ぼさないことである。Rokkey II の走行制御モジュール内のセンサは、すべてメインコンピュータからアクセスできるため、あるデータを1回だけ欲しいときには、特にインターフェースを必要としない。しかし、移動距離センサを監視しながら画像の入力を行なうような制御を考えた場合、メインコンピュータではなんの問題も生じないが、走行モジュールでは大きな問題がある。メインコンピュータがモジュール内のデータをアクセスするときはモジュールの CPU は停止している。1回のアクセスはわずか数ナノ秒 (nanosecond) でしかないが、監視したままで繰り返すとモジュールの CPU はほとんど実行が止ったのと同じ状況になる。そのため走行制御が行なえなくなり、ロボットが停止できなくなる。

### 2.5.3 改良すべきシステム構成

様々なセンサを用いなければならない移動ロボットは、いくつもの機能を分散したシステムである必要がある。ここで、Rokkey II を含めた自律型移動ロボットの誘導のため、どのようなシステム構成を採用すべきかを筆者なりに考えてみた。

まず、Rokkey II システムにおけるメインコンピュータは大きなメモリを持ち、処理速度も速いものに変える必要がある。OS の選択はコスト (cost) や開発効率を考慮すべきであるが、リアルタイムなものでなければならない。

また、移動ロボットのアーキテクチャにおいては、1つの大きなメモリ領域 (共通メモリ) をデュアルポートメモリを用いて複数のモジュールからアクセスで

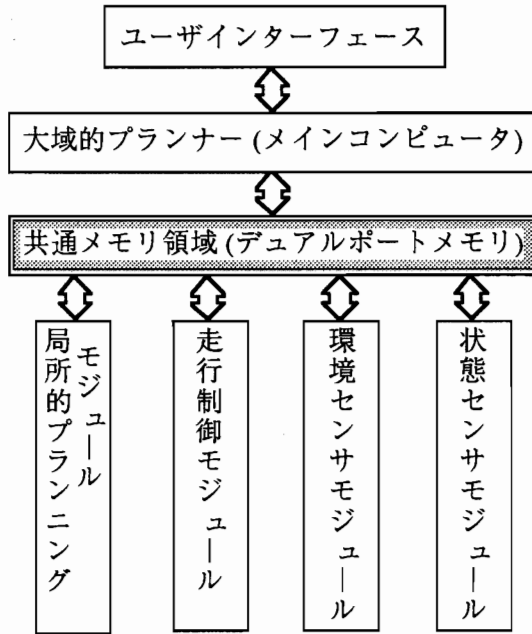


図 2.5 インターフェース中心のシステム構成図

きる構成にする。そこにメインコンピュータをはじめとする各モジュールのバスをスター結合型につなぐ。あらゆる通信をこの共通メモリを介して行なう。そのインタフェース中心のシステム構成を図 2.5 に示す。この構成の特徴は、共通メモリ部分が大きくなってしまふ欠点はあるが、メインコンピュータを含めたあらゆるモジュールが同じ構造で設計できる点である。また、すべてのモジュールから他のモジュールへの通信が行なえることにより汎用性が高くなる。

図 2.5 に示すシステムの特徴をまとめると、

- (1) デュアルポートメモリを利用した共通メモリ空間をインターフェースとする分散システム
- (2) 大域的プランニング (planning) とユーザインターフェース (user interface) を行なうメインコンピュータを含むすべてのモジュールが、共通メモリとスター状に結合



- (3) 共通メモリ上のモジュールデータをメインコンピュータで制御することによるモジュール全体の協調動作
- (4) 大域的処理と局所的処理を分け、移動における情報処理を思考レベルと反射レベルに分解

などがあげられる。このようなシステム構成をとることで、多くのセンサ情報を同時に必要とするセンサフュージョンなど、局所的プランニングのためのセンサ開発がより簡単に行なうことができ、大域的誘導が可能となる。

## 2.6 ま と め

Rokkey II のシステム構成と実験しながら得た構造的な問題点について述べた。さまざまなセンサを用いなければならない移動ロボットは、いくつもの機能を分散したシステムである必要がある。その独立したモジュール間の通信系をどのように実現するかを考えてみた。自律型移動ロボットのより正確な誘導の実現のためには、モジュール間の通信系を用いるのではなく、共通メモリを用いた通信を行なう方がよいという結論になった。

## 第 3 章

---

---

# スリット光投影法による距離センサと、 移動ロボットの走行制御

ロボットの環境認識においてはこれまでにその応用分野と目的によってさまざまな研究がなされている。特に自律型移動ロボットは移動することにより絶えず環境が変化するため、自己の位置や姿勢、また環境の変化を検出するための知的処理機能が不可欠である。移動ロボットが安全な走行を行うためのセンサの役割は、障害物の検出とその回避及び移動可能領域の抽出など、環境を把握することである。一般に移動ロボット用のセンサシステム (sensor system) としてはテレビカメラ (TV camera)、超音波センサ、レーザレンジファインダ (laser range finder) などが使用されている。テレビカメラを用いて道路境界の追跡によるロボットの誘導<sup>1)</sup>、超音波センサによる距離情報を用いたロボットの誘導<sup>2)</sup>、またテレビカメラによる特徴抽出とレーザレンジファインダによる距離画像を用いた障害物検知及び地図作成など、複数センサの協調システムによるロボットの誘導法<sup>3)</sup>も研究されてきた。しかし、一般にテレビカメラを用いた場合は照明や背景に対する分離問題、誘導に必要な情報を取り出すまでの処理時間の問題がある。また超音波センサは発射方向に対して垂直でない壁や障害物の検出能力および方向に対する分解能などに物理的な制約があり、環境認識能力に限界がある。そこで、これらの欠点を補うために半導体レーザを用いたより能動的なセンシング (sensing) 方

法としてスリット光による距離センサの開発を行った。これを研究室で試作した移動ロボット Rokkey II に搭載して廊下のような屋内環境での直進誘導，障害物回避誘導などの実験を行った。

本章では，スリット光の投影パターン (Projection Pattern) を利用して障害物の幅が広いときと移動ロボットが壁を向いてしまったとき，また廊下の突き当たりのような隅に遭遇した場合などでも障害物回避行動を試みる柔軟性のあるアルゴリズム (algorithm) を提案し，それによって行った実験結果について述べる。

### 3.1 スリット光による距離センサの概要と構成

#### 3.1.1 スリット光による距離センサの概要

移動ロボットが屋内のような比較的平坦な平面上を移動するとき，壁や障害物の位置関係を把握し，それを回避するために進行方向・移動距離などを求めることがきわめて大切である。移動ロボットの軽量化，コンパクト (compact) 化などの要請を考慮すると単純な機構を有し，2次元平面内の環境認識に必要な精度や方向分解能の要求を満足させなければならない。

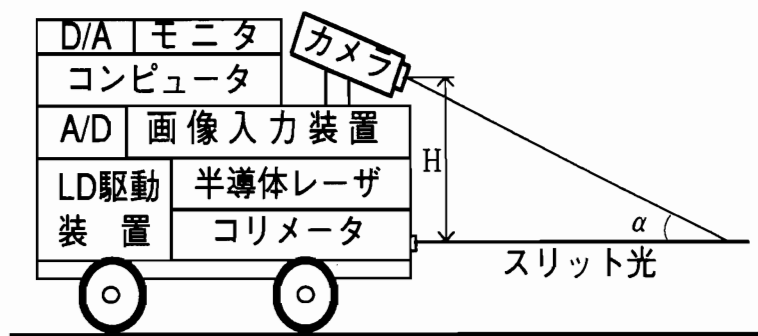


図 3.1 移動ロボットのシステム構成図

このスリット光による距離センサシステムは、半導体レーザとスリット光コリメータ (Slit-Ray Collimator) によって発生された赤外線スリット光を床面に対して水平に投影し、壁や障害物からの反射光を赤外線透過用フィルタを通してカメラで捕らえ、画像中の反射光の位置から三角測量の原理でロボットと障害物の間の距離を求め、環境中の障害物の位置関係の認識を行なうものである。

### 3.1.2 ハードウェアの構成

スリット光による距離センサシステムは Rokkey II に搭載した場合、図 3.1 に示すような構成をとる。2章で述べたように床面に対して水平の赤外線スリット光を発生する機構は半導体レーザ投光器とLD駆動装置より構成されている。投光器の光源には半導体レーザ (830 nm, 30 mW)、水平スリット光の生成にはシリンドリカルレンズを用いたコリメータを使用している。CCD カメラは焦点距離 8.5 mm の広角レンズを使用している。このレンズにはレーザの反射光のみを検出するために近赤外線透過用フィルタを取り付けている。カメラから取り込まれた画像は画像入力装置に送られ、そこで 256×256 画素、256 階調に量子化される。画像入力装置に取り込まれた画像はメインコンピュータ (main computer) で処理することにより環境認識に必要な情報を取り出すことができる。

### 3.1.3 距離の計算法

基本方程式の誘導を単純化するために CCD カメラをピンホール・カメラ (pin-hole camera) によってモデル化して考える。図 3.2 は距離センサが Rokkey II に取り付けられたときの距離測定の説明図を示す。まず、ロボットからみた障害物の位置情報を得るために画像をサーチ (search) して画像上での反射光の位置を求める。いま、図 3.2 において諸量をつぎの様にとる。

$\beta_0$  : カメラの傾斜角

f : 焦点距離

H : スリット光面からカメラ中心までの高さ

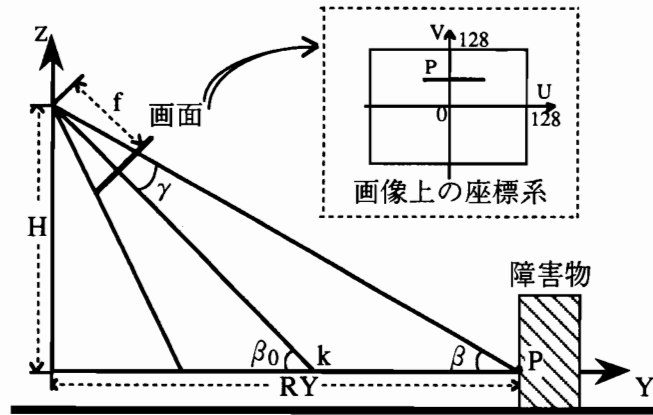


図 3.2 距離測定の説明図

$u_i, v_j$  : 画像上の座標

$s, t$  : 画像上の  $U$ , および  $V$  方向の画素間の距離をそれぞれ実空間に換算した値

画像中の反射光点の座標値  $P(u_i, v_j)$  から図 3.2 における  $\beta$  は次式で表される。

$$\beta = \beta_0 - \gamma \quad (3.1)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{t \cdot (128 - v_j)}{f}\right) \quad (3.2)$$

また、画像上の点  $P$  の座標値  $u_i$  は次式で表される。

$$u_i = \left(\frac{f \cdot \sin \beta}{s \cdot H \cdot \cos \gamma}\right) \cdot RX + 128 \quad (3.3)$$

また、 $RX, RY$  を実空間の座標とすると

$$RX = \left(\frac{H \cdot \cos \gamma}{f \cdot \sin \beta}\right) \cdot s \cdot (128 - u_i) \quad (3.4)$$

$$RY = H \cdot \cot \beta \quad (3.5)$$

と求められる。これらの式を用いると実空間の座標が得られ、距離と方向の関係式が得られる。

距離の精度はカメラ (camera) とスリット光面との距離  $H$ 、焦点距離  $f$  のように定められた値以外にも画像上の反射光の画素の  $V$  軸方向の座標によって大きく影響を受ける。それに距離の遠くなることにつれて光の広がりが生ずるので、反射光点の位置は画像上の  $V$  軸方向でいくつかの画素にまたがっている。従って、測定距離の精度を向上させるため、 $V$  軸方向反射光の位置は重心計算により抽出する。すなわち、図 3.3 で示すように画像面を  $V$  軸方向へ調べ、最大強度の画素  $(i(v_j), v_j)$  を探し出す。この画素を中心として上下の画素の強度を用いて重心の位置を求め、これをスリット光の反射の中心と考える。

#### 3.1.4 障害物の端点抽出手法

移動ロボットが進もうとする方向の移動可能領域と障害物の位置関係を得るためには画像上での障害物の輪郭に着目した端点抽出を行なう必要がある。ここで

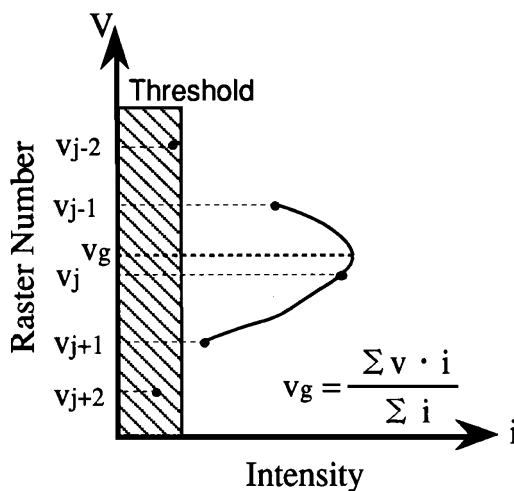


図 3.3 重心画素の抽出法

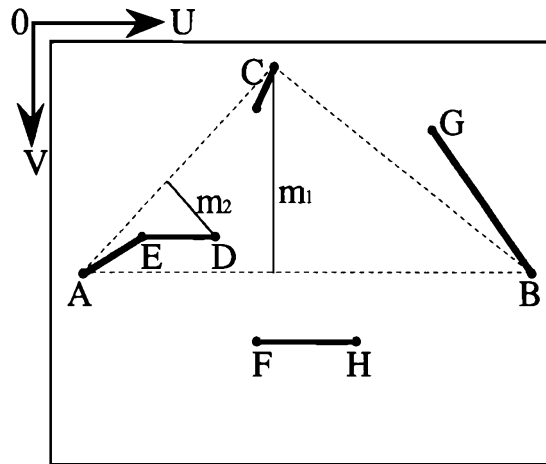


図 3.4 繰り返し端点あてはめ法

は繰り返し端点あてはめ法 (Iterative Endpoint Fitting) を用いて障害物の位置関係を得ることとする。この手法は、図 3.4 に示すようにまず 2 つの点  $AB$  を選び、これらの点を結ぶ直線と各点との距離を求め、直線から最も遠い点  $C$  を選ぶ。この点  $C$  までの距離  $m_1$  がある値  $d$  より大きければ、最初の直線  $AB$  による記述を  $AC, BC$  による記述に置き換える。次にこの 2 直線のそれぞれについて、最も遠い点を求めて直線までの距離を計算する。この距離が  $d$  より小さければ、その直線についてはそれ以上の分割は行なわない。この処理をすべての直線について最も遠い点が  $d$  以下になるまで繰り返すことで端点を得ることができる。

### 3.2 障害物回避のアルゴリズム

廊下のような屋内環境を認識して移動可能領域を見つけ出し、ロボットを移動させることを考える。屋内環境でも障害物が置かれている配置によって、また移動ロボットの位置や向いている方向によってさまざまな状況が予想されるが、カ

メラの視野角内で障害物が検知できる約  $50^\circ$  のスリット光面を考慮すると次のようなことが考えられる。

- (1) 検知範囲内に障害物がないか、それとも廊下の両側の壁だけが障害物となるとき
- (2) 障害物を検知するが、その視野角内で移動可能領域が見つかるとき
- (3) 障害物の検知範囲内（視野角内）で移動可能領域が見つからないとき

すなわち、検知範囲内に障害物がなかったり、廊下の真ん中でロボットが壁と平行の方向を向いている場合が上述の(1)のことで、この場合には直進モードに入る。廊下などに障害物が置かれていても検知範囲内で移動可能領域が見つければ、それは上述の(2)の場合で、この場合一次障害物回避モードに入る。また障害物の幅が広かったり、ロボットの姿勢が壁を向いてしまったり、突き当たりに遭遇したりする場合が上述の(3)に相当し、この場合二次障害物回避モードに入る。ソフトウェア (software) の一連の流れ図を図 3.5 に示す。以下には各モードの処理手順について説明する。

### 3.2.1 直進モード

画像上で障害物が見つからないときは、そのままの状態で行制御の go コマンドを用いて進むことになる。また、図 3.7(上)のように検出範囲内に障害物があっても、それが遠方である場合は、画像上の障害物(図上の白線)に対応する各画素に対して床面上の実距離を計算する。そして、ロボットの幅を考慮して、実空間横方向(X軸)の座標値で $\pm 50\text{cm}$ 内に障害物がなければ、ロボットは現在の方向や姿勢のまま直進コマンドによって進むことになる。

### 3.2.2 一次障害物回避モード

このモードでは図 3.6 に示すように移動ロボットが障害物を検出し、その端点を抽出して障害物の配置関係を認識する。すなわち、処理方法としてはカメラの視野角約  $50^\circ$  を画像の解像度の数(256)だけの方向に分割し、画像上の u 座標に



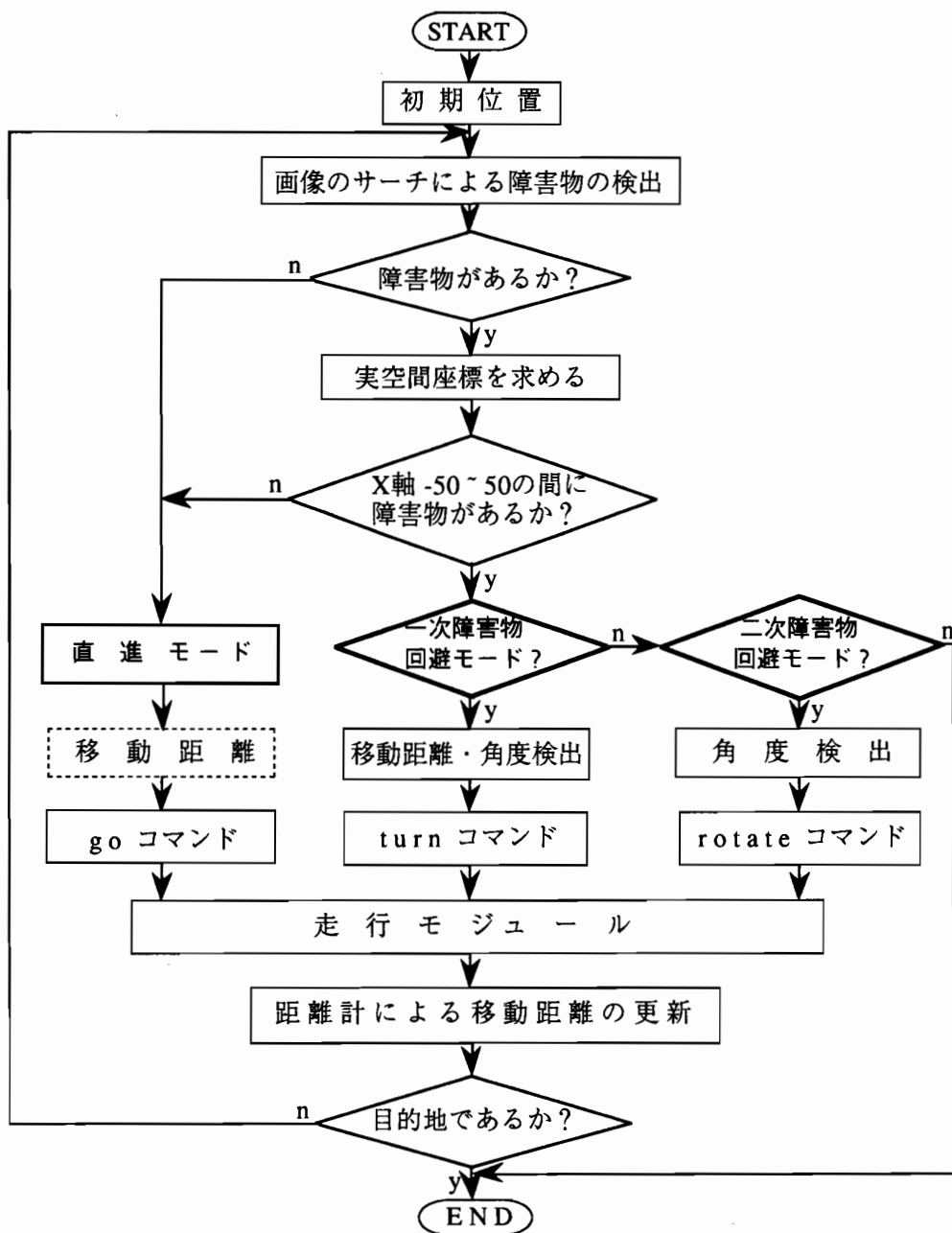


図 3.5 ソフトウェアの流れ図

対する障害物からの反射光の  $v$  座標を 1 次元配列に入れる。この配列から障害物の間の端点を求め、その端点と端点の間の配列内の  $v$  座標の値を調べることでより床面上の障害物の位置関係を知ることができる。障害物の中でロボットとの距離が最も近いものを選び出し、それを中心として両隣の障害物の配置とロボットの幅を考慮した移動可能領域を抽出する。抽出された移動可能領域内にロボットが安全に通れる 1 つの点を画像上の画素で決め、その画素の実空間上の対応点までの距離と角度を求める。この手法で得られた距離と角度を走行コマンド `turn` の引数として与えて走行モジュールに送って実行する。

### 3.2.3 二次障害物回避モード

一次障害物回避モードで移動可能領域が見つからなかった場合、二次障害物回避モードに移る。すなわち、

- ① 移動ロボットが壁の方を向いてしまった場合 (図 3.7 の下)
- ② 障害物の幅が長すぎる場合
- ③ 廊下の突き当たりのような隅に遭遇した場合 (図 3.10 の上)

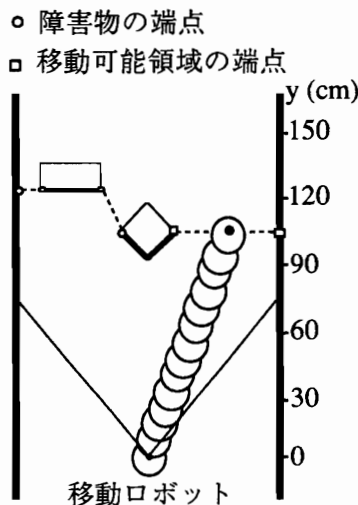


図 3.6 一次障害物回避モードの説明図

には画像上で移動可能領域が見つからない。これらの場合のうち、①と②の場合、移動ロボットの進行方向を変えるためには画像上で得られる障害物からの反射光による線情報を利用し、変えようとする方向への角度を求めなければならない。そこで、廊下の壁は平行であることを前提として、ロボットが廊下の方向に

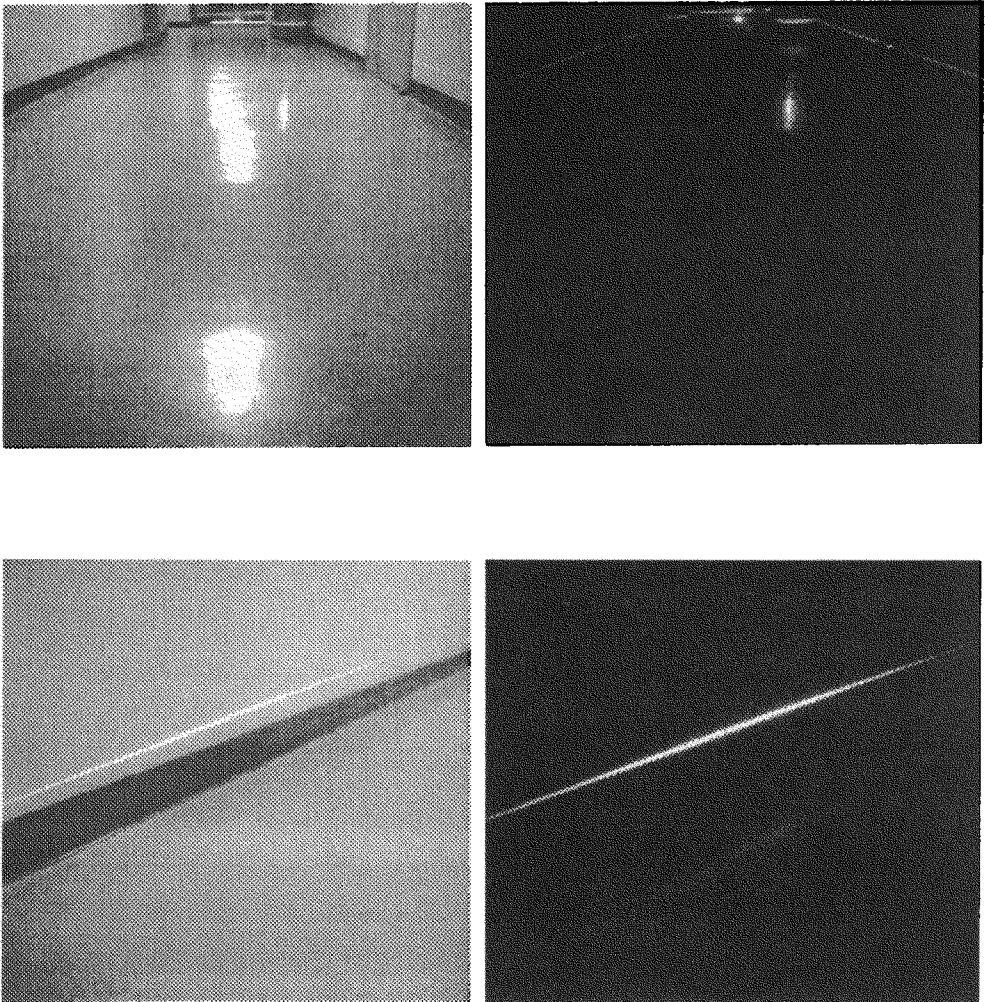


図 3.7 基準線 (上) と壁を向いたときの投影像 (下)

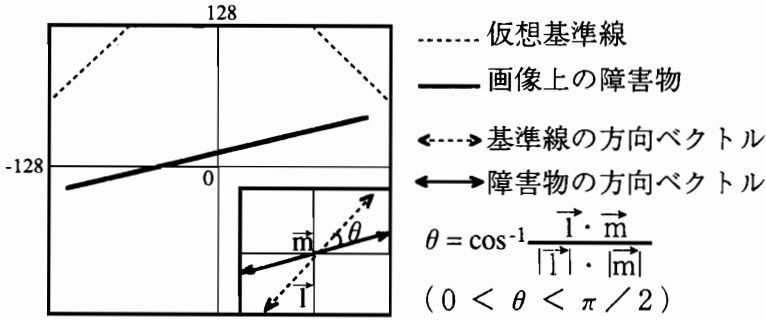


図 3.8 二次障害物回避モードの説明図

正しく向いておれば、観測されるであろうスリット光の反射像(図3.8の点線)を想定し(これを基準線と呼ぶ)、この基準線の方方向ベクトルと障害物からの反射光によって得られた線分の方方向ベクトルとのなす角度を進行方向の修正角度とする。この場合、障害物から得られた画像上の線分の方方向ベクトルと2つの基準線の方方向ベクトルとのなす角度の小さい方を採用して回転することになる。図3.8はその様子を示す。

また③の場合(例えば、図3.10の上)は、画像面上の線情報を利用し、予め突き当たりの隅であることを認識しなければならない。人工的に作られた環境の多くは3辺が互いに直交している直交頂点をもつので、画像上の頂点像に注目し、次のように変換を施すと隅の認識に必要な情報を得ることができる。

図3.9に示すように画像上の頂点座標を(a, b)とし、そこから出発する辺のそれぞれの方向をV軸方向から時計まわりに測ったものを $\phi_i$ ,  $i=1,2$ とし、それぞれを辺iの方向角とよぶ。3次元解釈上の性質を利用し、カメラの光軸上に画像原点を頂点とする位置に新しい頂点を設ける。これを標準位置と呼ぶ。標準の位置での辺iの方向角 $\theta_i$ を辺iの標準方向角とよぶ。この標準方向角は次のようにa, b,  $\phi_i$ から直接に計算できる。

$$\theta_i = -\tan^{-1} \frac{(fE + am_1)\tan\phi_i - (fF + bm_1)}{(fF + am_2)\tan\phi_i - (fG + bm_2)} \quad (3.6)$$

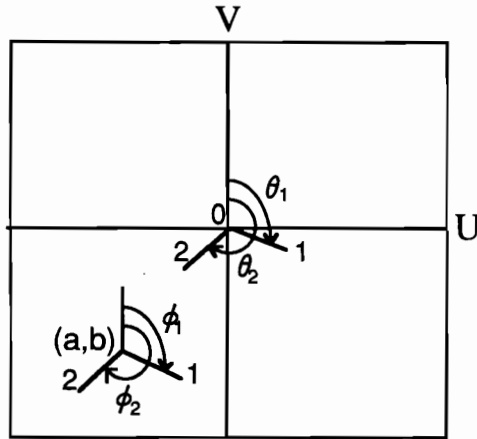


図 3.9 画面上の頂点の座標 (a, b) と各辺の方向角  $\phi_i$  から標準の位置での標準方向角  $\theta_i$  が定まる.

ただし,  $m = (m_1, m_2, m_3)^T$ ,  $m_3 > 0$  は画像面を 2次元射影平面とみなしたとき点 (a, b) の同次座標の単位列ベクトルであり,  $f$  はカメラの焦点距離である. そして, E, F, G は次のように定義する.

$$E = \frac{a^2 m_3 + b^2}{a^2 + b^2}, \quad F = \frac{ab(m_3 - 1)}{a^2 + b^2}, \quad G = \frac{b^2 m_3 + a^2}{a^2 + b^2} \quad (3.7)$$

$\tan^{-1}$  は 2 価関数のため  $\theta_i$  の値が 2 つ得られるが,  $\phi_i$  に近いほうを選ぶ<sup>8) 9)</sup>.

画像面上で標準の位置へ移した 2 辺のなす角 ( $\theta_2 - \theta_1$ ) が  $\pi/2$  より大きく  $\pi$  より小さければ, 突き当たりのような隅とみなす. このようにして隅の認識ができれば, 壁の線情報と仮想基準線とのなす角を方向修正の回転角とする. これは図 3.10 で示すような場合を含め, 一般性を失わずに隅の認識に利用できる. このように求められた角度は走行コマンド rotate の引数として走行モジュールに送られ, ロボットの向きを変えることができる.

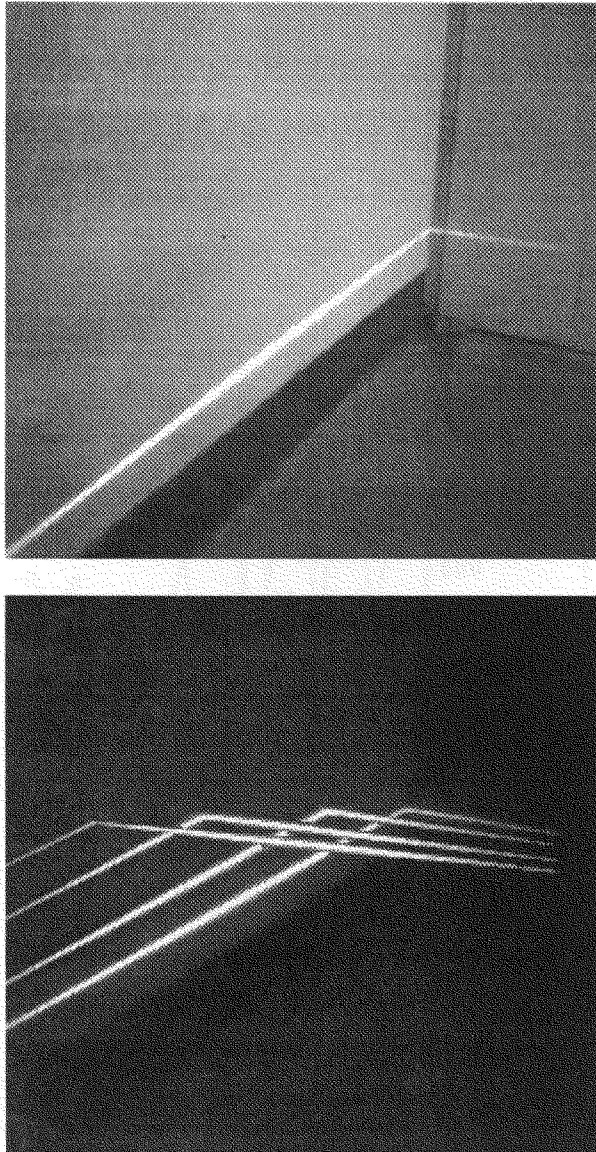


図 3.10 突き当たりの左隅(上)と向きを  
2° ずつ変えたときの投影像(下)

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 実環境での測距実験

図3.11に示すのは、3.1.3で述べた方法によって得られた進行方向での距離測定誤差である。このデータにはカメラとレーザ投光器の位置ずれや初期設定の不正確さなどによる誤差が含まれており、それは約400 cm先で5 cm以内の誤差である。これは移動ロボットの走行制御に影響を及ぼす範囲ではないことから、距離データを得るまでの処理時間、精度、信頼性においてもこの方法は移動ロボットの誘導に十分であると考えられる。

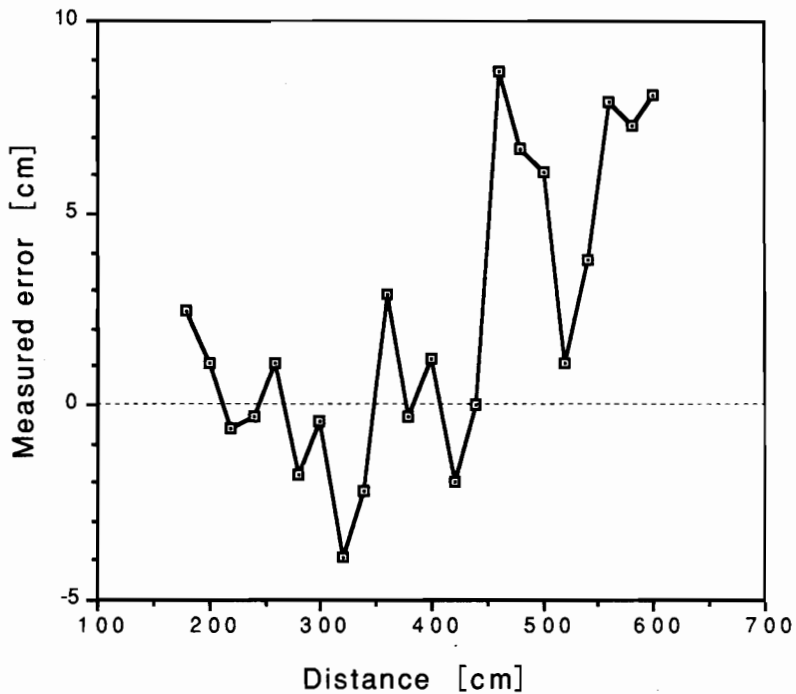


図 3.11 進行方向での距離測定誤差

### 3.3.2 障害物回避と走行の実験

実験環境は図 3.12 で示すように幅 190 cm の廊下で、各々異なる形の障害物を複数個床面上に置いて実験を行った。これは 3.2 で述べたアルゴリズムをプログラム (program) 化し、障害物回避走行を行った結果である。まず移動ロボットを中心として横 90 cm、縦 250 cm の視野角内を監視することで、移動可能領域を見つけだす。もし、監視領域内で障害物の置いてある位置までの距離が大きい場合は約 100cm 先になるまで接近してから、回避走行に入る。これは廊下のよ

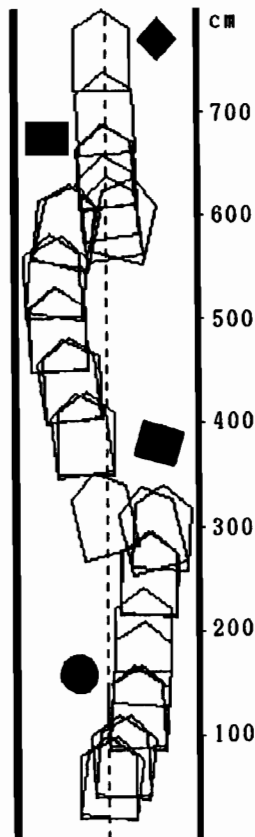


図 3.12 障害物回避走行の軌跡



うな狭い環境下で走行する場合，制御情報(角度や距離)の小さい誤差に対して影響されやすいからである．また図 3.13 は，実際取り込まれて処理される画像の流れを表している．これは進行方向への距離 400cm から 800 cm までの障害物回避走行を行う一連の投影パターンである．この図では 400 cm あたりの一次障害

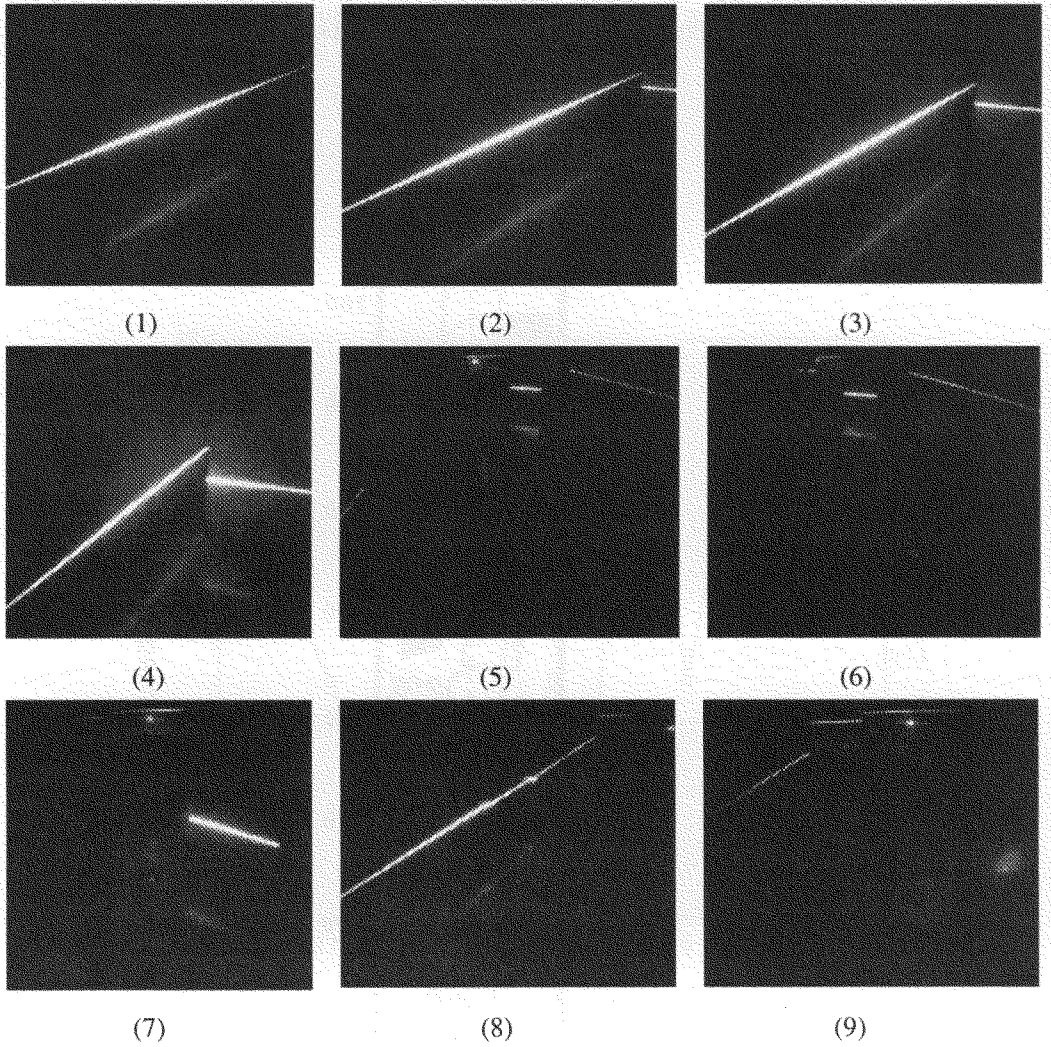


図 3.13 障害物回避走行の一連の投影像

物回避モードによる回避走行を行った後壁を向いたり、障害物の幅が長すぎたりしたときの二次障害物回避モードによって方向を変え、移動可能領域を見つげだすことを示している。

### 3.4 ま と め

今回開発したスリット光による距離センサとそれを搭載した移動ロボットRok-key II システムの紹介、および走行制御の実験結果について述べた。このセンサシステムは移動ロボットの経路計画の中で比較的ローカル(local)な経路が与えられたとき、その経路上の障害物の位置を把握し、状況判断による経路探索する場合に用いられる。

実験結果でもわかるようにこのスリット光による距離センサはTVカメラ、超音波センサより環境認識能力があり、実時間処理についてもその有効性を確認した。ここに示した障害物回避アルゴリズム(algorithm)では、幅が非常に長い障害物や壁そして隅に遭遇した場合、移動ロボットの方向転換は画像上での仮想基準線を設けることで解決を図った。

また、半導体レーザによる赤外線スリット光を利用することで、次のような長所があげられる。

- 1) 一般的な屋内環境の照明下でも測定が可能である。
- 2) 目標物抽出のための画像上でのノイズ(noise)除去が容易である。
- 3) 光束の広がりが少ないので、精度のよいデータ(data)が得られる。

一方、様々なセンサを用いなければならない移動ロボットは、いくつもの機能を分散したシステムである必要がある。今後、センサのモジュール化と地図作成及び位置同定が可能となり高い環境認識システムの実現を目指したい。

## 第 4 章

---

---

# スリット光距離センサによる 局所地図作成と移動ロボットの走行制御

未知環境内で移動ロボットが自律的な走行を行うためには、センサから得られる情報をもとにまわりの状況を知るといった環境認識能力が極めて重要である。特に屋内の通路のような壁や障害物の多い環境での移動ロボットは、スタート地点から障害物を回避しながら目標地点に到達する経路を自動的に決めなければならない。一般に移動ロボット用のセンサシステムとしてはテレビカメラ(TV camera)、超音波距離センサ、レーザレンジファインダ(laser range finder)などが使用されている<sup>11~31</sup>。しかし、テレビカメラを用いた画像処理のみによる方法は照明や背景との分離問題があり、必要な情報を取り出すまでの処理時間などの問題点が多い。また超音波距離センサは発射方向に対して垂直でない壁や障害物の検出能力および方向に対する分解能などに問題があり、環境認識能力に限界がある。筆者らはスリット光による距離センサの開発を行い<sup>41</sup>、これを利用して廊下のような屋内環境下で障害物回避を中心とした移動ロボットの走行実験を行ってきた<sup>51</sup>。

しかし、一般にテレビカメラを用いる場合、視野角に制限があり、廊下の曲がり角や障害物の横幅が長い場合など、それらの認識が困難な場合がある。

本章では、より広範囲な環境情報を得るため、スリット光とテレビカメラによ

る距離センサを水平に回転して複数の画像を取り込むことにより、視野角を広げること考えた。この方法により移動ロボットが現在の位置において周囲の局所地図を作成することができる。また、これを用いて障害物を回避したり方向を転換することによって、安全な走行を行うための方法を提案し、試作した移動ロボットを用いて行った走行制御の実験結果について述べる。

## 4.1 局所地図作成システム

### 4.1.1 スリット光距離センサ

本研究では距離センサを用いるが、これは第2章で述べたように水平スリット光とテレビカメラから構成され(以下スリット光距離センサと呼ぶ)、移動ロボットRokkey IIの先頭部に取付けられている。その構成図を図4.1に示す。テレビカメラはスリット光投光器の上方Hに位置し、その光軸はスリット光面と角度 $\alpha$ をなすように下方に向けられている。スリット光は、半導体レーザとコリメータにより作られる。前方に投射されたスリット光が、障害物上で生じたパターンをテレビカメラで捕える。得られた画像中の反射パターンの像を用いてロボットと

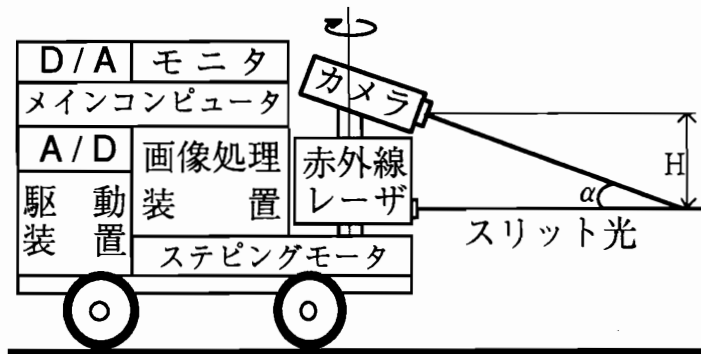


図 4.1 移動ロボットの構成図

障害物間の距離と障害物の横の広がりを知ることができる。半導体レーザは、一般的な屋内の照明下でも距離測定ができるように赤外光(波長 830 nm)を使用し、テレビカメラにはレーザの反射光のみを検出するために近赤外線透過用フィルタを取付けている。またカメラのレンズは焦点距離 8.5 mm の広角のものを使用している。

#### 4.1.2 スリット光距離センサによる地図作成方法

前述のスリット光距離センサによって得られた距離情報をもとにして壁面や床面上の障害物の位置検出が可能となる。しかし、スリット光距離センサがロボット(robot)に固定されている場合には、テレビカメラの視野角に制限があるので、左右の視野外の画像が得られず、ロボットの方向修正のための十分な情報を求めることができない場合がある。そこで、本研究ではスリット光距離センサ自体を水平方向に回転させることによって等価的に視野角を広げ、ロボット周囲の壁面や障害物までの距離情報をもとに局所地図を作成することにした。

図 4.1 に示すように、垂直な軸まわりに回転できる回転台上にテレビカメラとスリット光投光部を取付け、水平方向に  $36^\circ$  ずつ回転させ移動ロボットの前方向 5 方向の画像を取り込み、その各方向から得られる障害物までの距離データを合成する。すなわち、カメラの各方向における障害物の位置座標を地図上に順次変換合成することによって、距離センサの回転軸を原点としたロボット前方の環境地図が作成できる。カメラの視野角は  $45.6^\circ$  なので、距離センサの 1 つの回転角の変化 ( $36^\circ$ ) に対し、各視野に  $9.6^\circ$  ずつの重なる部分が生じるが、順次 5 方向の画像から求めた距離データを合成し、全体として  $189.6^\circ$  の範囲の局所地図が作成できる。

#### 4.1.3 距離データの導出

図 4.2 に示すように地図作成システムの座標系 (X, Y) は、床面に平行であるスリット光面とスリット光距離センサの回転軸が直交する点 O を原点とし、Y 軸

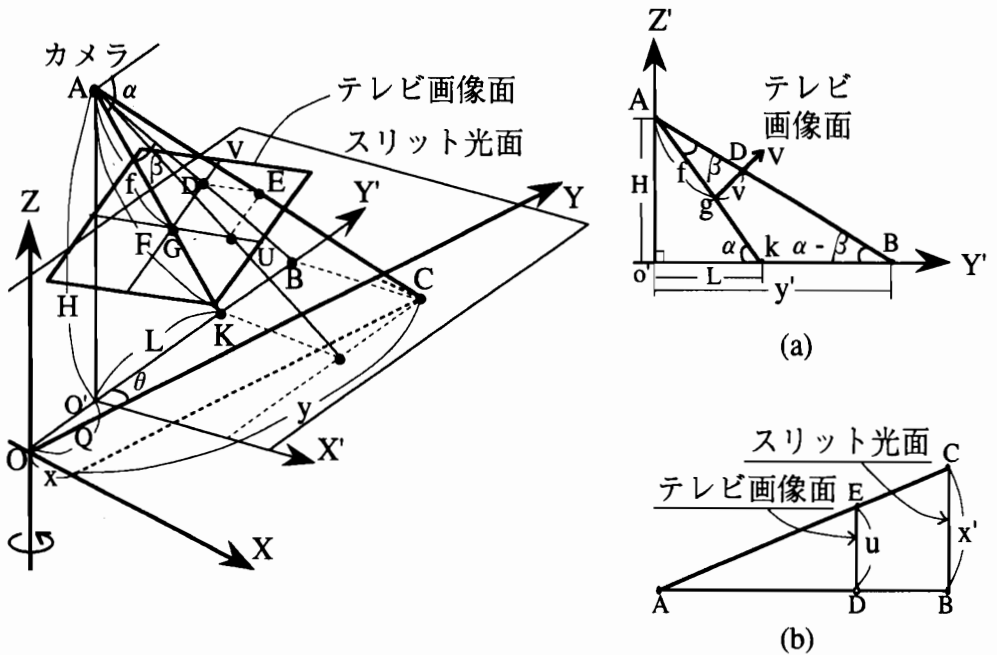


図 4.2 距離測定の説明図 (a) 側面図, (b) 平面図

をロボットの正面方向にとり,  $XY$  平面がスリット光面に一致するように設定する. スリット光距離センサは,  $Y$  方向より  $\theta$  だけ回転した  $Y'$  方向に向いているとする. カメラは  $A$  点にあるとし, その光軸は水平より角度  $\alpha$  だけ下を向けて固定し, カメラから見たスリット光面の座標系 (カメラ座標系) を  $(X', Y')$  とする. 計算の簡単のために, カメラの焦点距離を  $f$  とし,  $A$  より前方  $f$  の距離にテレビ画像面 (その座標軸を  $U, V$  とする) があるとすると, スリット光面上の点  $C$  とそのテレビ画面上の点  $E$  は  $A, E, C$  が一直線上に並ぶ関係となる. また, テレビ画像面の原点  $G$  の逆透視点が, スリット光面上では点  $K$  とする. いま, 逆透視変換を用いて, テレビ画像面上の点  $E(u, v)$  に対応するスリット光面上の点  $C(x, y)$  の座標を求める.

このため, 地図作成システムの原点  $O$  からカメラ座標系の原点  $O'$  までの距離を  $Q$  とし,  $O'$  の  $XY$  座標を  $(x_0, y_0)$  とする. また,

H : スリット光面からレンズの中心までの高さ

L : O' K 間の距離

F : A K 間の距離

$\beta$  :  $\angle$  BAG

とすると, 点 C の座標  $(x, y)$  は画像面上の点 E の座標  $(u, v)$  から次式によって求められる.

$$\begin{aligned} x &= \frac{H \cos \beta}{f \sin(\alpha - \beta)} + x_0 \\ &= \frac{H F \cos \theta - H(Lf + Hv) \sin \theta}{Hf - Lv} + Q \sin \theta \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{H}{\tan(\alpha - \beta)} + y_0 \\ &= \frac{H F \sin \theta + H(Lf + Hv) \cos \theta}{Hf - Lv} + Q \cos \theta \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで,  $\tan \beta = v/f$ ,  $\sin \alpha = H/F$ ,  $\cos \alpha = L/F$ ,  $\tan \alpha = H/L$  である.

このようにしてひとつの  $\theta$  に対して XY 平面上の障害物の地図が得られるが, この  $\theta$  を  $-72^\circ$ ,  $-36^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $72^\circ$  の 5 方向に変化させ, それぞれの場合に得られた障害物の位置を合成する. カメラの視野角は  $\pm 22.8^\circ$  の範囲であり,  $\theta$  は  $\pm 72^\circ$  の範囲をカバー (cover) するので, 合成された視野としては  $\pm 94.8^\circ$  の範囲となり, スリット光距離センサの回転軸を原点としたロボット前方の局所地図が作成できる. この方法で実際に得られた局所地図の例を図 4.3 (a) (b) (c) の各図の左側に示す. 各図の右側はロボットの進行方向のテレビ画像を示す.

## 4.2 走行制御のための移動経路の決定

### 4.2.1 移動可能方向の探索

移動ロボットが現在の位置から目的地まで障害物に衝突することなく走行できる経路の決定を自動的に行うため以下のような方法をとる. 目的地までの走行の

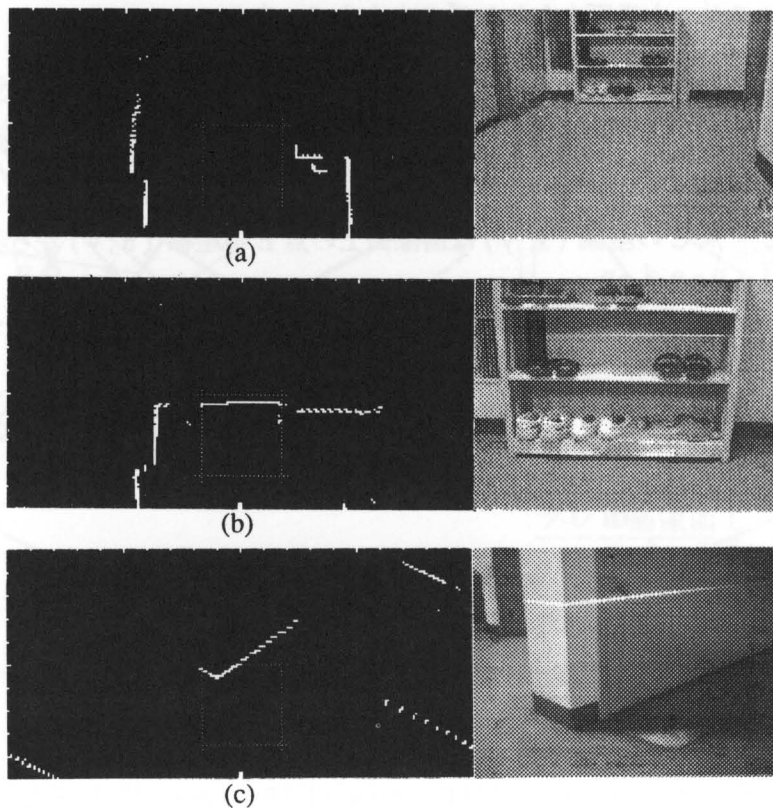


図 4.3 局所地図 (左) とテレビ画像 (右)

ためには、現在地より次のステップ(step)となるサブゴール(subgoal)を適切に決定し、そこまで走行する。つぎにその地点より次のサブゴールを決定して、そこまで走行するというプロセス(process)の繰返しとなる。

前節で述べた方法で得られた局所地図をもとに、現在地よりつぎのサブゴールに至る経路の方向と距離を求めることを考える。移動ロボットの現在地をその先端の点Oで代表させ、次のサブゴールの地点をBとする。

まず、Oを原点とするロボット前方の地図上に、図4.4のように $x = x_1$ ,  $x = -x_1$ ,  $y = y_1$ ,  $y = y_2$ の4本の直線(点線)を引き、全平面を9つの領域に分割する。このうちの中央の四角形を主探索領域とする。また、各領域内の障害物の有無とロボットの移動可能方向に関連して以下に述べる3つのモードを考える。以



下では次の記号を用いる.

$\phi$ : O から B への方向

K: OB 間の距離

D: O より障害物までの最短距離

T: 障害物に対する接近禁止距離 (衝突を回避するための安全を考慮した値)

#### 4.2.1.1 直進モード

図 4.3 (a) に示すような場合, すなわち, 局所地図に点線の四角形で表わされた主探索領域内に障害物が存在しない場合, ロボットはそのまま方向を変えずに進むことになる. このとき移動距離 K は,

$$K = y_2 - T \tag{4.3}$$

である. また主探索領域内に障害物が存在しても, それが接近禁止距離 T 以上の

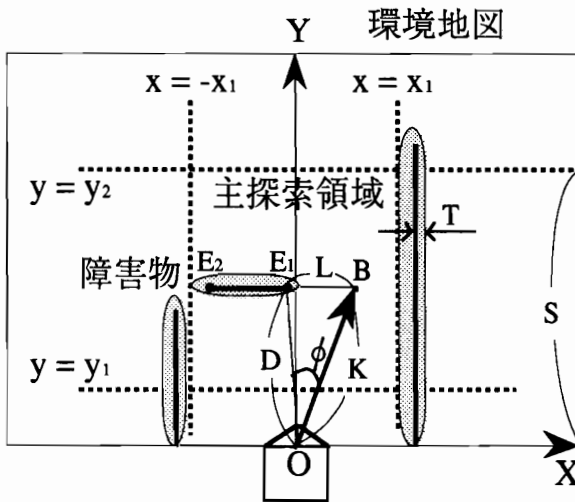


図 4.4 移動可能方向の探索 (I)

遠方である場合は、このモードを用いる。そして、移動ロボットの大きさやセンサ情報の誤差を考慮し、その障害物の回避が可能な限界まで接近する。すなわち、ロボットより障害物までの最短距離  $D$  の点を結ぶ線とロボットの進行方向との角度を  $\gamma$  とすると移動距離  $K$  は、 $K = D \cos \gamma - T$  として求められる。

4.2.1.2 障害物回避モード

このモードは、主探索領域内に障害物が存在し、この障害物の左右どちらかの方向に回避できる場合である。すなわち、図4.4に示すように主探索領域内に障害物があり、主探索領域の両側に他の障害物が存在する場合は、主探索領域内の障害物の端点  $E_1, E_2$  の中で、ロボットの進行方向に近い端点を選ぶ(図4.4の場合は  $E_1$  である)。この端点  $E_1$  とそれに向き合う障害物との最短距離  $N$  がロボットの幅  $W$  に対して

$$N > W + 2T \tag{4.4}$$

である場合、ロボットはこの間を通過可能であり、 $E_1$  の右(図4.4の場合)に次

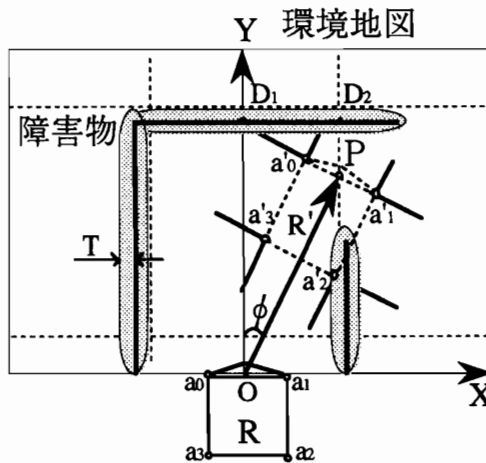


図4.5 移動可能方向の探索 (II)

式で示される  $L$  の位置にサブゴール  $B$  を定める。

$$L = W/2 + T \quad (4.5)$$

もし式 (4.4) の条件が得られない場合は、他方の端点  $E_2$  を用いてサブゴール  $B$  を  $E_2$  の左側に求め、上と同様のことを試みる。図 4.4 の場合、 $B$  点へ向かう方向  $\phi$  と距離  $K$  は  $E_1$  の座標を  $(x_E, y_E)$  とすると、

$$\phi = \tan^{-1}((x_E + L)/y_E) \quad (4.6)$$

$$K = ((x_E + L)^2 + y_E^2)^{1/2} \quad (4.7)$$

として得られる。

しかし、図 4.3 (b) に示すように横幅の長い障害物の場合には、次のような方法をとらなければならない。一般に図 4.5 に示すような場合では、つぎのようにしてサブゴール  $P$  を求める。すなわち、原点  $O$  より主探索領域内で最短距離にある障害物上の点を  $D_1$  とし、この点から  $X$  軸に平行に引いた線と主探索領域の縦境界線との交差する点を  $D_2$  とする。この境界線上でさきの式 (4.5) の  $L$  の値だけ  $D_2$  より離れた位置にサブゴール  $P$  を定める。図 4.5 の場合、 $P$  点へ向かう方向  $\phi$  と距離  $K$  は、 $P$  の座標を  $(x_p, y_p)$  とすると、

$$\phi = \tan^{-1}(x_p / y_p) \quad (4.8)$$

$$K = (x_p^2 + y_p^2)^{1/2} \quad (4.9)$$

として求められる。

しかし、上の値は次のサブゴールへの情報であって、実際の走行経路を求めるためには、移動ロボットの回転半径などの運動性能を考慮しなければならない。特に、障害物が複雑で比較的接近して存在する場合には、4.2.2 に示すような安全性のチェックと対策が必要である。

### 4.2.1.3 多方向モード

図 4.3 (c) のように主探索領域の両側に障害物が存在しない場合で、このとき

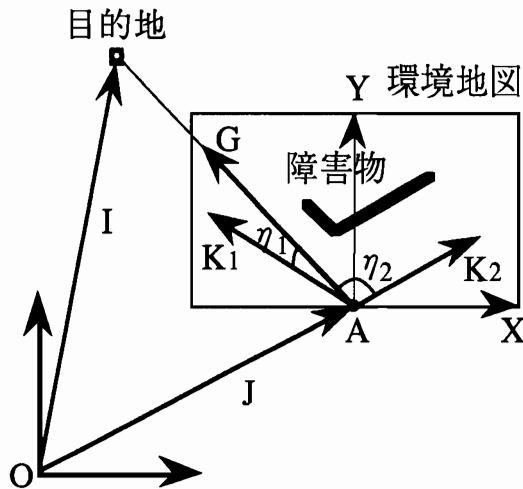


図 4.6 移動方向の決定

はゴールとの方向を考慮しなければならない。まず、図4.6に示すように与えられた経路内で現在位置 A を知っていると仮定し、そこから次のゴールへの方  
向を示すベクトル  $G$  と地図上で移動可能な方向を示すベクトル  $K_i$  とのなす角  $\eta_i$  が  
最小になる方向に回転する。すなわち、その  $\eta_i$  は

$$G = (I - J) / |I - J| \quad (4.10)$$

とおいたとき、

$$\eta_i = \cos^{-1}(G \cdot K_i / |G| \cdot |K_i|) \quad (4.11)$$

ただし、

$I$  : ゴールの位置ベクトル

$J$  : 移動ロボットの位置ベクトル

$K_i$  : 移動可能方向の単位ベクトル

である。

#### 4.2.2 走行における安全性の確認

移動ロボットが複雑な通路や直角に近い曲がり角を通過する場合、ロボットの回転半径(内輪差)の関係でロボットの一部が障害物に衝突する可能性がある。例えば、図4.5に示す障害物回避モードの場合、さきの方法で得られたサブゴールPは障害物の端点まわりの状況から求めるため、その地点に到達する経路の細部にわたっての安全性(障害物に衝突しないこと)については保証されていない。そこで、実際にロボットが走行する前に局所地図を用いて、安全性の確認のための走行チェック(check)をシミュレーション(simulation)で行う。

すなわち、ロボットと同じ大きさの領域R(ロボット領域と呼ぶ)を考え、図4.5に示すようにさきの方法で求められたサブゴールPまでの移動距離と方向を用いて、ロボット領域を移動させる。ロボット領域の先端OをサブゴールPに移動し、方向は $\phi$ だけ回転させる。このときロボット領域は、 $a'_0, a'_1, a'_2, a'_3$ で囲まれた領域R'となる。この場合、ロボット領域の境界点 $a_0, a_1, a_2, a_3$ の各座標点の変換式はX軸方向の移動量をh、Y軸方向の移動量をrとすると、次の式で求められる。

$$[x' \ y'] = [x \ y \ 1] M \quad (4.12)$$

ただし、

$$M = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \\ h \cos \phi - r \sin \phi & h \sin \phi + r \sin \phi \end{bmatrix}$$

である。

つぎに、式(4.12)から得られたロボット領域R'のロボットの境界線を形成する4本の直線の方程式を $y = t_i x + b_i$ 、( $i=0, 1, 2, 3$ )とする。地図上で障害物を表す点(接近禁止距離を考慮した点)の座標( $x, y$ )が次の関係式を満たすとき、ロボットは障害物と衝突状態したと判断する。

$$(y - b_1) / t_1 \leq x \leq (y - b_3) / t_3 \quad (4.13)$$

$$t_0 x + b_0 \leq y \leq t_2 x + b_2 \quad (4.14)$$

衝突する場合は、まず、直進モードにより式(4.3)に示すように障害物の回避が可能な限界まで直進してから、方向情報のみを使用してその場でロボットの向きだけをP方向へ変える。

### 4.3 走行実験及びその結果

今回実験に用いた移動ロボットRokkey IIの構成は図4.1に示す。さきに述べた局所地図作成法および移動経路の決定法により、移動ロボットRokkey IIを用いて走行実験を行なった。図4.1において、テレビカメラとスリット光面との距離Hは15.0 cmとし、角度 $\alpha$ は $19.2^\circ$ とした。本スリット光距離センサの有効測定距離は約300 cmで、その誤差は測定距離200 cmで2.5 cm以下であった。

テレビカメラの視野角は $45.6^\circ$ であるが、このスリット光距離センサを左右に旋回することにより $189.6^\circ$ 範囲で情報を獲得することができ、それに対応した局所地図としては前方視野角 $180.0^\circ$ の範囲で作成することができた。

ここに示した方法は、屋内の廊下で、特に曲がり角や横幅が長い壁のような場合、ロボット前方はもちろん、左右の障害物の位置情報も得ることができるので、安全な走行が可能であった。例として、図4.7の左は図4.8に示す環境下で行なった走行制御の各サブゴールで作成した一連の環境地図を示す。その右の図は、地図作成の各地点でのロボット進行方向のみのテレビ画像を示す。これらの図からわかるように、スリット光距離センサがロボットに固定された場合、テレビカメラの視野外にあって観測できない方向にある障害物等が、スリット光距離センサを旋回させることにより、その位置情報を明瞭に示し、局所地図が得られる。

図4.8に示すのは室内の狭い通路を通過して廊下に出る走行制御の一例である。これは、図4.7の左に示すように各地点で作成された局所地図上で求められた各サブゴールへの移動情報(距離と方向)を用い、グラフィックス(graphics)で再現したロボットの走行軌跡である。

本スリット光距離センサの距離測定法は、一般に距離が大きくなるにつれて誤

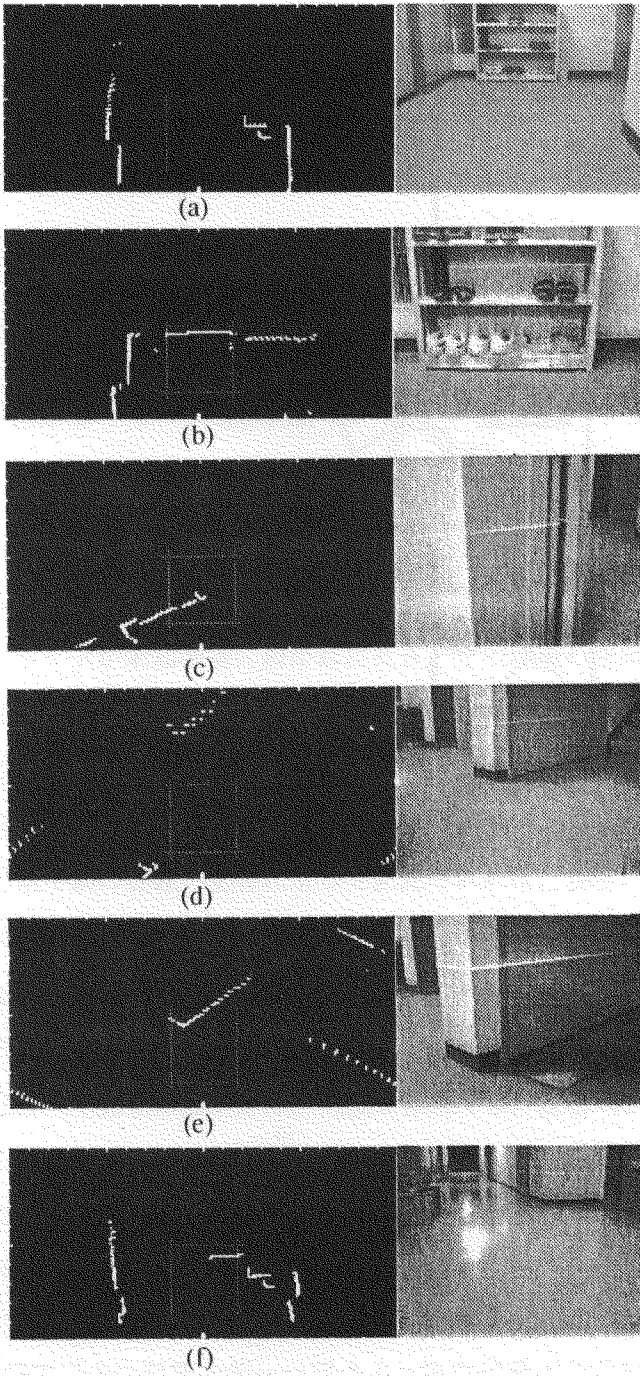


図 4.7 一連の局所環境地図

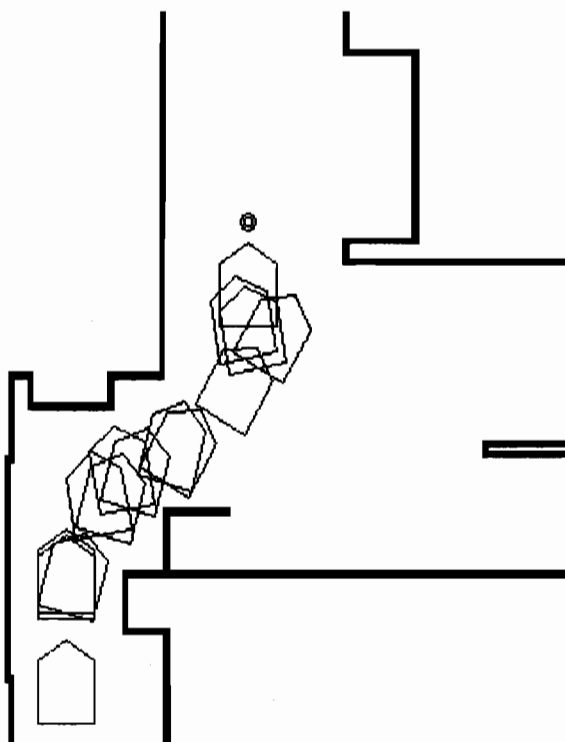


図 4.8 走行制御の一例

差が大きくなるが、人間が歩行する程度の速度である今回の移動ロボットの場合、環境地図作成や走行制御の面において十分な精度であった。

#### 4.4 ま と め

スリット光とテレビカメラによる距離センサを水平方向に旋回させ局所地図を作成する方法を示し、これを用いた移動ロボットの自律走行のための経路決定法を提案し、試作した移動ロボットを用い、屋内環境で走行実験を行った。この方法により前方  $180.0^\circ$  の広い範囲で周囲環境の地図が得られるので、かなり複雑な経路でも走行が可能であることが示された。



## 第 5 章

---

---

# 三角錐スリット光による 平面までの距離とその姿勢の計測

自律移動ロボットが未知環境におかれたとき、その環境の空間構成を認知したり、自分自身の位置決めをしたりするためには、自分まわりの物体の位置・姿勢を把握する必要がある。ところで、屋内環境をはじめ、人工的に作られた多くの物体は平面によって構成されている。したがって、ロボットまわりの環境構造が観測できる対象平面の位置・姿勢によって記述されれば、現在の状況からロボットが移動できる自由空間を求めたり環境モデルを作成したりすることが可能である。

物体までの距離・姿勢情報を得るには種々の方法があるが、その中の代表的な方法に両眼立体視と光投影法がある。両眼立体視では、左右両眼の画像中の対応点を検出することによって、画像内の任意の物体までの距離を計測している。しかし、対応点決定にはかなりの処理が必要である。これに対し、一方の眼を光の投影に置き換えた光投影法は、対応点決定の問題を避けることができるという利点から数多く研究されている。その中でもスリット光投影法は、物体までの距離と物体の幅(または高さ)情報を得る方法として多く用いられている。この方法は、水平のスリット光が対象物にあたった投影像をスリット光面と斜に交差する光軸を持つテレビカメラから入力し、画像処理によって物体までの距離などを求

める方法である。

1つの水平スリット光を対象平面に投影する方法では、対象物体までの距離だけでなく、その方向を計測することもできる。この方法を使った場合、テレビ画像面でのスリット光投影像の縦座標を利用しているが、計測の精度を向上させるため、投影像の中心位置を画素の光強度分布を利用して求めている<sup>1)</sup>。その他、画像の縦・横方向の画素の座標とその光強度からスリット光の幅の中心を算出する方法があり、移動ロボットの走行制御<sup>2)</sup>と環境地図作成<sup>3)</sup>や物体の形状測定<sup>4)</sup>などに利用されている。以上のスリット光を用いる多くの方法は、いずれも1つの水平スリット光を用いて対象平面(投影面)までの距離やその方向を求めるものであるが、その傾きは計測することができない。また、2つのスリット光を用いる方法では、対象平面までの距離とその方向および傾きが計測できるが、単純な組み合わせでは高い精度は得られない。

本章では、3つのスリット光を用いる三角錐スリット光投影法を提案し、対象平面の距離・姿勢を測定する方法を示した。また、この方法による装置の試作と実験を行なった。本方法では、対象平面上にできる三角形像を利用し、従来の方法よりも高精度の計測が可能である。

## 5.1 測定原理

三角錐スリット光投影法の説明図を図5.1に示す。ここで、3つのスリット光平面が正三角錐を作るようにその光源を配置する。このスリット光により対象平面上には三角形の投影像ができる。この像をテレビカメラでとり込み、対象平面までの距離とその方向および傾きを求める。

カメラレンズ(camera lens)の中心Oを原点とするXY平面を基準平面とする。この基準平面に垂直なZ軸にテレビカメラ(TV camera)の光軸を一致させる。また対象平面とZ軸が交わる点をPとし、そのZ座標を $z_0$ とする。この $z_0$ を測定すべき対象平面までの距離とする。またP点よりそれぞれX軸およびY軸に平行にX'軸Y'軸をとる。

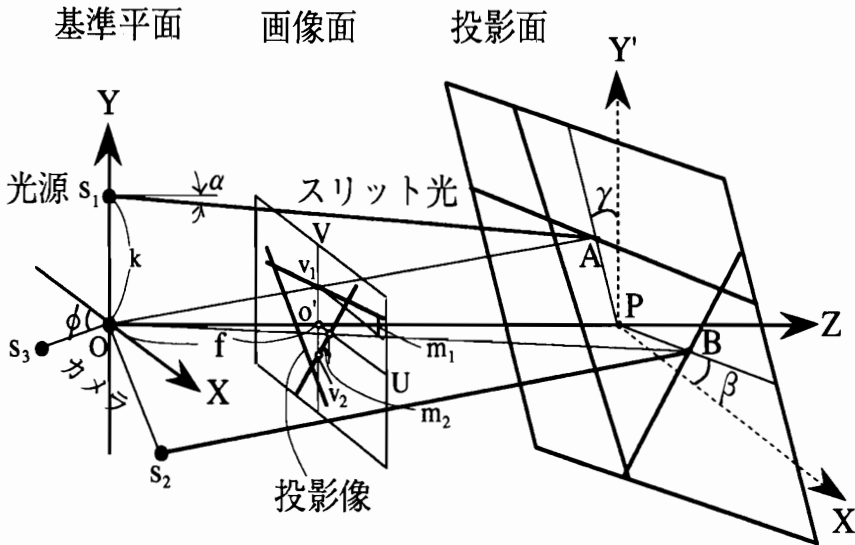


図 5.1 三角錐スリット光投影法の説明図

原点  $O$  から  $Y$  軸上の  $k$  の距離の位置にスリット光投光器  $s_1$  を設け、さらに  $s_1, s_2, s_3$  が正三角形をなすようにスリット光投光器  $s_2, s_3$  を  $XY$  平面上に配置する。この3つのスリット光平面が  $Z$  軸上に頂点をもつ正三角錐を形成するようにそれぞれの投光角度  $\alpha$  を設定する。いま、対象平面が  $Z$  軸上の  $z_0$  の位置にあるとすると、その上のスリット光像は図のように三角形を形成する。この対象平面にできる投影像をビデオカメラで撮像し、画像面データを演算処理することによって対象平面までの距離およびその姿勢を求める。テレビカメラの像は任意の大きさとなるが、解析を簡単にするためにその画像面を仮想的に図 5.1 のような位置にあるとする。すなわち、カメラの焦点距離を  $f$  として、原点  $O$  より  $Z$  軸上  $f$  の距離で基準平面と平行な位置にテレビ画像面があるとする(その座標系を  $U, V$  とする)。このようにすれば、画像面は対象平面の逆透視図となり、例えば、画像面上でスリット光像が縦軸と交わる点を  $v_1$  とすると、 $Ov_1$  の延長線が対象平面と交わる点  $A$  はスリット光像上にある。対象平面の姿勢を表す角度に

は2種類がある。対象平面が  $X'$  軸となす角度を  $\beta$ 、また  $Y'$  軸となす角度を  $\gamma$  とすると、この  $\beta$  と  $\gamma$  が対象平面の姿勢を決める量であり、以下  $\beta$  を方向、 $\gamma$  を傾きとする。

本方法は画像面上の3直線が形成している三角形から対象平面までの距離  $z_0$ 、対象平面の方向  $\beta$ 、傾き  $\gamma$  を求めるものである。また、この測定精度を上げるためにこの三角形からその内心を求め、その点から三角形の辺までの長さを利用する。

### 5.1.1 対象平面までの距離

図5.1においてスリット光源  $s_1, s_2, s_3$  の座標は、角  $\phi (=30^\circ)$  を図のようにとると、

$$s_1 \rightarrow (0, k, 0)$$

$$s_2 \rightarrow (k\cos\phi, -k\sin\phi, 0)$$

$$s_3 \rightarrow (-k\cos\phi, -k\sin\phi, 0)$$

となる。これらのスリット光のつくる平面がテレビカメラの光軸 ( $Z$  軸) と交わる角度は  $\alpha$  である。このとき、スリット光  $s_1, s_2, s_3$  によって作られる平面の方程式はそれぞれ、

$$y - z\tan\alpha = k \quad (5.1)$$

$$x\cos\phi + y\sin\phi - z\tan\alpha = k \quad (5.2)$$

$$x\cos\phi + y\sin\phi - z\tan\alpha = -k \quad (5.3)$$

となる。また、対象平面の姿勢には方向  $\beta$ 、傾き  $\gamma$  の2つがあり、この  $\beta$ 、 $\gamma$  を用いると対象平面の方程式は、

$$z - x\tan\beta = z_0 \quad (5.4)$$

$$z - y\tan\gamma = z_0 \quad (5.5)$$

と表すことができる。一方、 $f$  をカメラレンズの焦点距離とすると、画像面 ( $U, V$ ) と3次元空間 ( $X, Y, Z$ ) の関係式として、

$$u = f x / z \quad (5.6)$$

$$v = f y / z \quad (5.7)$$

が成り立つ。したがって、式(5.1)(5.4)～(5.7)から $x, y, z$ を消去すると、光源 $s_1$ による画像面上の投影像の方程式は、

$$v = \frac{f(z_0 \tan \alpha + k)}{z_0(1 + \tan \gamma \tan \alpha) + k \tan \gamma} + \frac{z_0 \tan \alpha \tan \beta}{z_0(1 + \tan \gamma \tan \alpha) + k \tan \gamma} u \quad (5.8)$$

と求められる。また光源 $s_2$ による画像面上の投影像の方程式は、式(5.2)(5.4)～(5.7)から

$$v = \frac{f(z_0 \tan \alpha + k)}{z_0 \sin \phi + z_0 \tan \gamma \tan \alpha + k \tan \gamma} + \frac{z_0 (\cos \phi - \tan \alpha \tan \beta)}{z_0 \sin \phi + z_0 \tan \gamma \tan \alpha + k \tan \gamma} u \quad (5.9)$$

となり、光源 $s_3$ による方程式も、同様にして式(5.3)(5.4)～(5.7)から

$$v = \frac{f(z_0 \tan \alpha - k)}{z_0 \sin \phi + z_0 \tan \gamma \tan \alpha - k \tan \gamma} + \frac{z_0 (\cos \phi - \tan \alpha \tan \beta)}{z_0 \sin \phi + z_0 \tan \gamma \tan \alpha - k \tan \gamma} u \quad (5.10)$$

と求められる。この3つのスリット光の投影像(直線)の画像が画像面の縦軸 $V$ と交わる点 $v_1, v_2, v_3$ は上式より $u=0$ として求まる。そして、対象平面までの距離 $z_0$ は式(5.8)(5.9)(5.10)のいずれかの第1項より導かれるが、例えば、式(5.8)からでは

$$z_0 = \frac{k(f - v_1 \tan \gamma)}{v_1(1 - \tan \gamma \tan \alpha) - f \tan \alpha} \quad (5.11)$$

となる。

また、式(5.8)(5.9)(5.10)の第2項の係数は、投影像の勾配を表し、これを $m_1, m_2, m_3$ とすると、それぞれ式(5.12), (5.13), (5.14)となる。

$$m_1 = \frac{z_0 \tan \alpha \tan \beta}{z_0(1 + \tan \gamma \tan \alpha) + k \tan \gamma} \quad (5.12)$$

$$m_2 = \frac{z_0(\cos\phi - \tan\alpha \tan\beta)}{z_0 \sin\phi + z_0 \tan\gamma \tan\alpha + k \tan\gamma} \quad (5.13)$$

$$m_3 = \frac{z_0(\cos\phi - \tan\alpha \tan\beta)}{z_0 \sin\phi + z_0 \tan\gamma \tan\alpha - k \tan\gamma} \quad (5.14)$$

### 5.1.2 対象平面の姿勢計測

対象平面の姿勢は、方向 $\beta$ と傾き $\gamma$ で表される。まず、方向 $\beta$ は式(5.12)より、光源 $s_1$ による画像面上の投影像の勾配 $m_1$ を求めることによって、

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{m_1(z_0(1 + \tan\gamma \tan\alpha) + k \tan\gamma)}{z_0 \tan\alpha}\right) \quad (5.15)$$

となる。

また、傾き $\gamma$ は式(5.13)より、光源 $s_2$ による投影像の勾配 $m_2$ を求めることによって次のようになる。

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{z_0(\cos\phi - \tan\alpha \tan\beta) - m_2 z_0 \sin\phi}{m_2(z_0 \tan\alpha + k)}\right) \quad (5.16)$$

また、光源 $s_3$ による投影像の勾配 $m_3$ を求め、式(5.14)を用いても同様なことがいえる。

しかし、式(5.11)(5.15)(5.16)から $z_0$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を導出することは、付帯条件なしで解を得るのが困難であるので、ここでは次のような方法をとる。すなわち、画像面上で三角形を形成している3直線の勾配 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ を用い、 $\gamma_E$ を方向 $\beta = 0$ と仮定したときの $\gamma$ の値とすると、

$$\gamma_E = \tan^{-1}((m_2 - m_3 - 2\sqrt{3}) \cdot (1 - m_1)) \quad (5.17)$$

であり、これを式(5.11)に用いて、

$$z_0 \equiv \frac{k(f - v_1 \tan \gamma_E)}{v_1(1 - \tan \gamma_E \tan \alpha) - f \tan \alpha} \quad (5.18)$$

となる。これらの値  $\gamma_E$ ,  $z_0$  を用いて

$$\beta \equiv \tan^{-1} \left( \frac{m_1(z_0(1 + \tan \gamma_E \tan \alpha) + k \tan \gamma_E)}{z_0 \tan \alpha} \right) \quad (5.19)$$

として  $\beta$  の近似値が得られる。また、この  $\beta$  の値を用いて

$$\gamma \equiv \tan^{-1} (\tan \gamma_E + m_1 \tan \beta) \quad (5.20)$$

として  $\gamma$  の近似値を得る。この値  $\gamma$  を用いて式 (5.11) から  $z_0$  を求め、この  $z_0$  と  $\gamma$  を用いて式 (5.15) および式 (5.16) からそれぞれ  $\beta$  と  $\gamma$  を求めることができる。

## 5.2 測定精度の向上法

画像面の三角形を構成している各直線は、実際には、数画素にわたる幅を持っているので、測定精度を向上させるために以下のように行なう。

### 5.2.1 スリット投影像の近似

あらかじめ測定した背景雑音の大きさを考慮して簡単なしきい値処理を施すことによって、UV 画像面上のスリット投影像の雑音を除去する。この画像の画素を対象にして、最小 2 乗法による直線のあてはめを考える。すなわち、図 5.2 に示すようにある画素  $p_i (u_i, v_i)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) とあてはめらるべき直線  $L$  との距離を  $d(p_i, L)$  とし、 $\sum d(p_i, L)^2 \rightarrow \min$ , ( $i=1, 2, \dots, N$ ) となる直線  $L$  を求める。

近似すべき直線  $L$  の方程式を  $u \cos \theta + v \sin \theta = h$ ,  $h > 0$  とすると、 $\theta$  と  $h$  は次式から求められる。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2 \sum_{i=1}^N u_i' v_i'}{\sum_{i=1}^N u_i'^2 - \sum_{i=1}^N v_i'^2} + \frac{n\pi}{2} \quad (5.21)$$

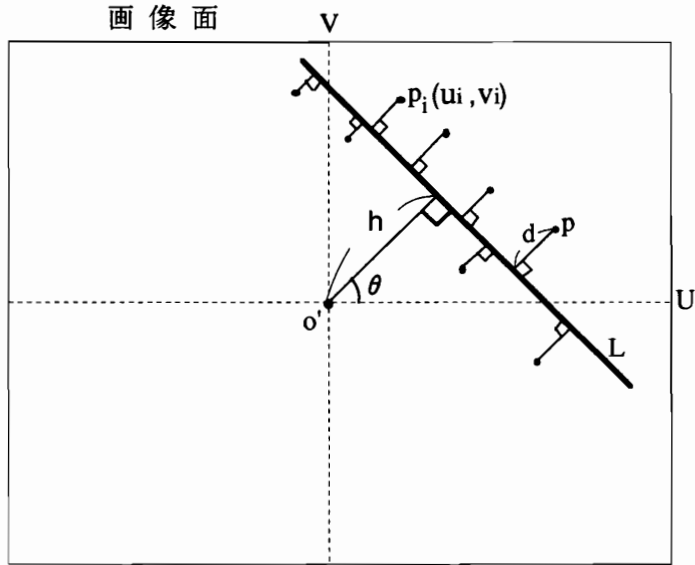


図 5.2 直線のあてはめ法

$$h = \bar{u} \cos \theta + \bar{v} \sin \theta \quad (5.22)$$

ただし,

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, \quad \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i, \quad u'_i = u_i - \bar{u}, \quad v'_i = v_i - \bar{v}$$

である。

上の式 (5.21) で  $n$  は任意の整数であるから  $0 \leq \theta < 2\pi$  の範囲に4個の解があるが、 $\sum u'_i v'_i > 0$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) ならば  $\pi/2 < \theta < \pi$ ,  $3\pi/2 < \theta < 2\pi$  であり、 $\sum u'_i v'_i \leq 0$ , ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) ならば  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ,  $\pi \leq \theta \leq 3\pi/2$  であって、かつ  $h \geq 0$  のものを選ぶ<sup>51</sup>。

式 (5.21) と式 (5.22) により図 5.2 に示すように直線 L を求め、数画素にわたる幅を持つ投影像を近似する。



## 5.2.2 投影像三角形の内心の利用

画像面  $(U, V)$  上でスリット光投影線が縦軸  $V$  と交わる点を  $v_1$  とすると、 $o'v_1$  の長さ、すなわち  $V$  軸の切片の座標は、対象平面までの距離が大きくなるにつれてその誤差は大きくなる。その理由は、カメラが有限の走査線(画素)をもつこと、スリット光のスリット幅がある値をもつこと、レンズの収差などによる画像歪曲など、種々の原因によるものである。これらの影響を減少させるため、本方法では投影像三角形の内心を利用する。

図 5.3 において、前節の方法で求めた画像面上の 3 本のスリット投影線  $L_i$  の方程式を  $u \cos \theta_i + v \sin \theta_i = h_i$ , ( $h_i \geq 0, i=1, 2, 3$ ) とし、画像面上の点  $G$  と直線  $L_i$  との距離をそれぞれ  $d(G, L_i)$  とすると、 $\sum d(G, L_i)^2 \rightarrow \min, (i=1, 2, 3)$  となる点  $G(u_0, v_0)$  は 3 つの直線  $L_i$  から等距離にある。この点  $G$  を投影像三角形の内心と呼ぶと、この座標  $(u_0, v_0)$  は次式で求めることができる。

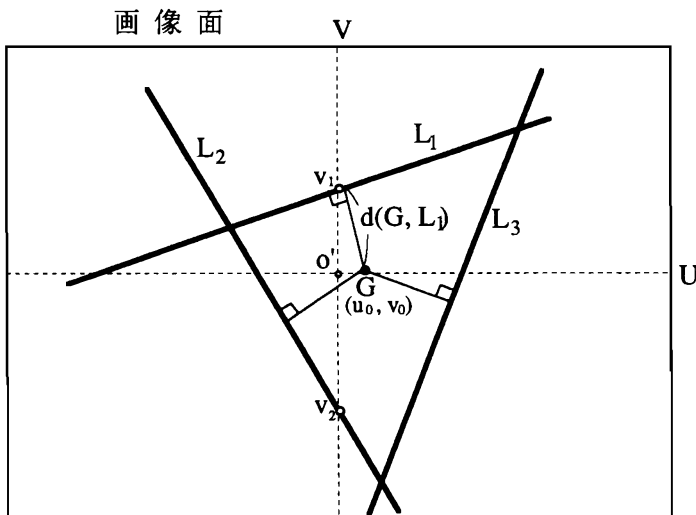


図 5.3 画像面上の三角形の内心

$$u_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i \cos \theta_i \sum_{i=1}^3 \sin^2 \theta_i - \sum_{i=1}^3 h_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^3 \cos \theta_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^3 \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^3 \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^3 \cos \theta_i \sin \theta_i)^2} \quad (5.23)$$

$$v_0 = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i \sin \theta_i \sum_{i=1}^3 \cos^2 \theta_i - \sum_{i=1}^3 h_i \cos \theta_i \sum_{i=1}^3 \cos \theta_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^3 \cos^2 \theta_i \sum_{i=1}^3 \sin^2 \theta_i - (\sum_{i=1}^3 \cos \theta_i \sin \theta_i)^2} \quad (5.24)$$

そして、その内心 G からその三角形の辺までの距離を  $v_g$  とすると、

$$v_g = |u_0 \cos \theta_1 + v_0 \sin \theta_1 - h_1| \quad (5.25)$$

となる。以下これを内心距離と呼ぶ。

対象平面が Z 軸に垂直、すなわち傾き  $\gamma = 0$  の場合、対象平面までの距離  $z_0$  の式 (5.11) 中の変数  $v_1$  を内心距離  $v_g$  で書き替えることによって次の式を得る。

$$z_0 \doteq \frac{fk}{v_g - f \tan \alpha} \quad (5.26)$$

### 5.3 装置と実験

今回実験に用いたスリット光投光器は、波長 830 nm の赤外線半導体レーザを用い、シリンダリカルレンズ (cylindrical lens) で光束をスリット状にしている。また、カメラレンズには赤外線透過用フィルタを取付け、通常照明下でもスリット光の検出を容易にし、背景雑音を十分に小さくなるようにしている。投影されたスリット光は、対象平面上で直線状の投影像を作る。画像入力装置のフレームメモリ (frame memory) にとり込まれる実際の投影像は、数画素にわたる幅を持っている。図 5.4 はこの様子を示したもので、カメラの縦方向の各画素の光強度を調べた例である。この図の横軸はビデオ画像面のラスタ番号で縦方向の画素番

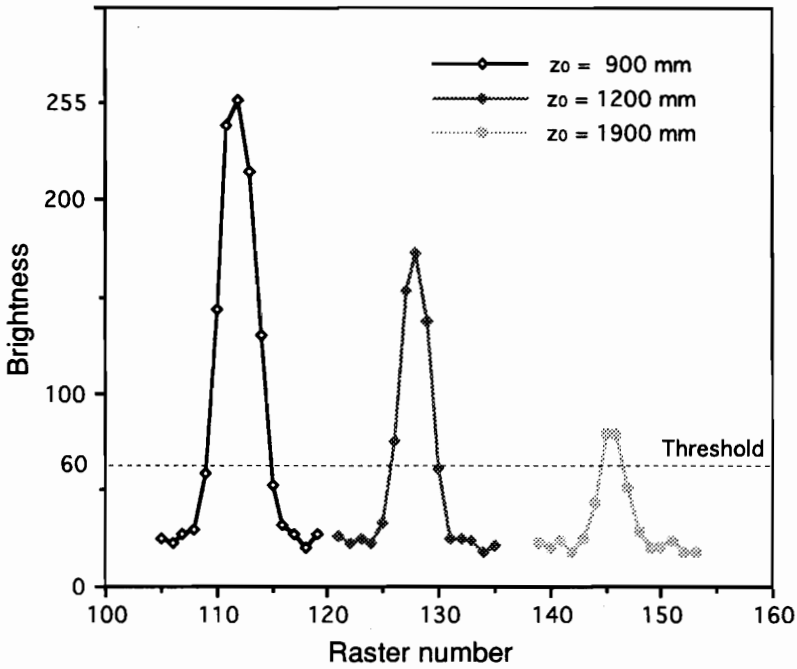
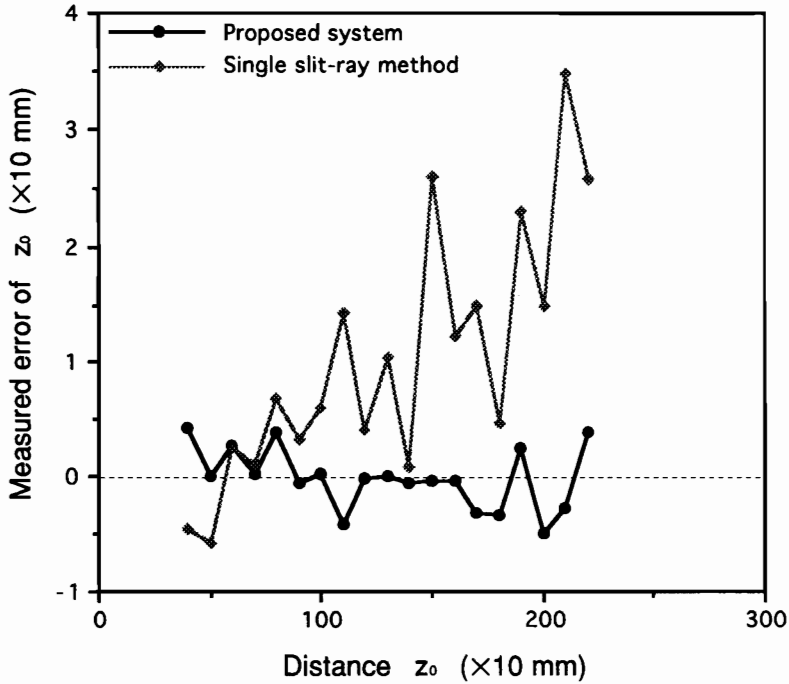


図 5.4 ラスター番号の画素に対する光強度分布

号に等しく、対象平面までの距離に応じて異なった画素位置にピーク (peak) を持ち、また、投影像は複数画素にわたって幅を持っていることが示されている。なお、本図を得るとき、光強度が飽和しない程度に絞りを自動調整している。以下の実験でも絞りは同様である。

### 5.3.1 対象平面までの距離測定

5.2.2 の要領で求められる内心距離  $v_g$  を用いて、対象平面までの距離  $z_0$  は式 (5.26) で求めることができる。ここでは、 $\alpha = 5.8^\circ$ 、 $f = 284.0$ 、 $k = 120$  mm とし、対象平面を Z 軸に沿って 400 ~ 2200 mm まで 100 mm ずつ移動させ、 $z_0$  の実測を行なった。その結果の誤差を図 5.5 に示す。同図には、比較のために光源  $s_1$  のみを用いる単一スリット光の場合も示した。

図 5.5 距離  $z_0$  に対する測定誤差

本三角錐スリット光による方法は、従来の単一スリット光による1画素単位の測定法に比して測定誤差は、約1桁小さいことがわかる。例えば、対象平面までの距離  $z_0$  を 1500 mm, 2100 mm とし、光源  $s_1$  のみを用いる従来方法<sup>6)</sup>による投影像の中心位置がそれぞれ-24画素、-31画素と得られた。これらの投影像中心位置の計測精度は0.5画素であるから、式(5.26)を用いて算出するとこの実測値の誤差は、それぞれ25.9 mm, 13.6 mmとなる。これらの測定誤差と比べ、内心距離  $v_g$  による距離の測定誤差 0.3 mm, 2.8 mm は約1桁小さい。

図 5.5 では、距離  $z_0$  の 400 ~ 2200 mm の範囲を示しているが、これは対象平面が近い場合、投影像が画像面からはみ出し、また、遠方になると十分な光強度が得られず測定不可能となるからである。測定可能範囲での測定精度は5 mm 以下となった。

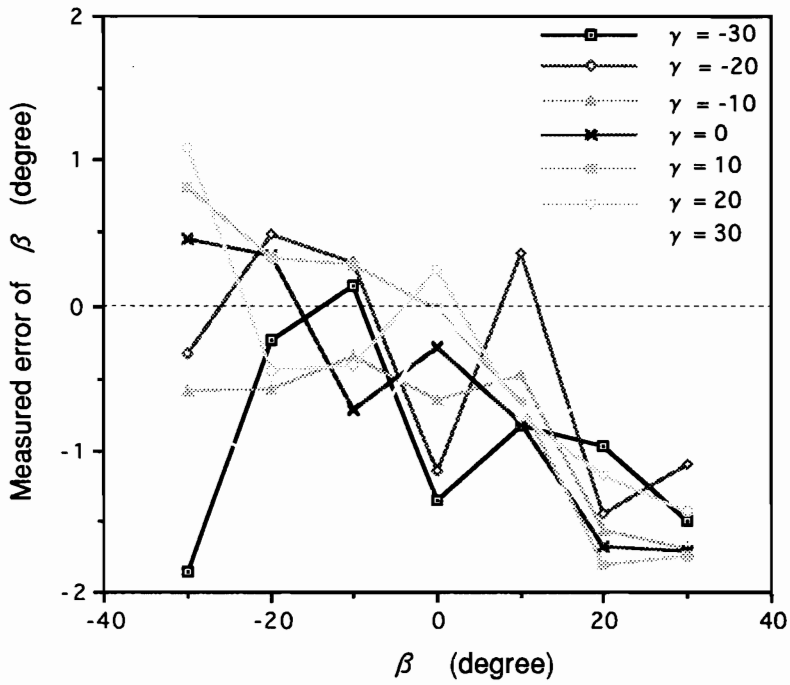


図 5.6 傾き  $\gamma$  に対する方向  $\beta$  の測定誤差

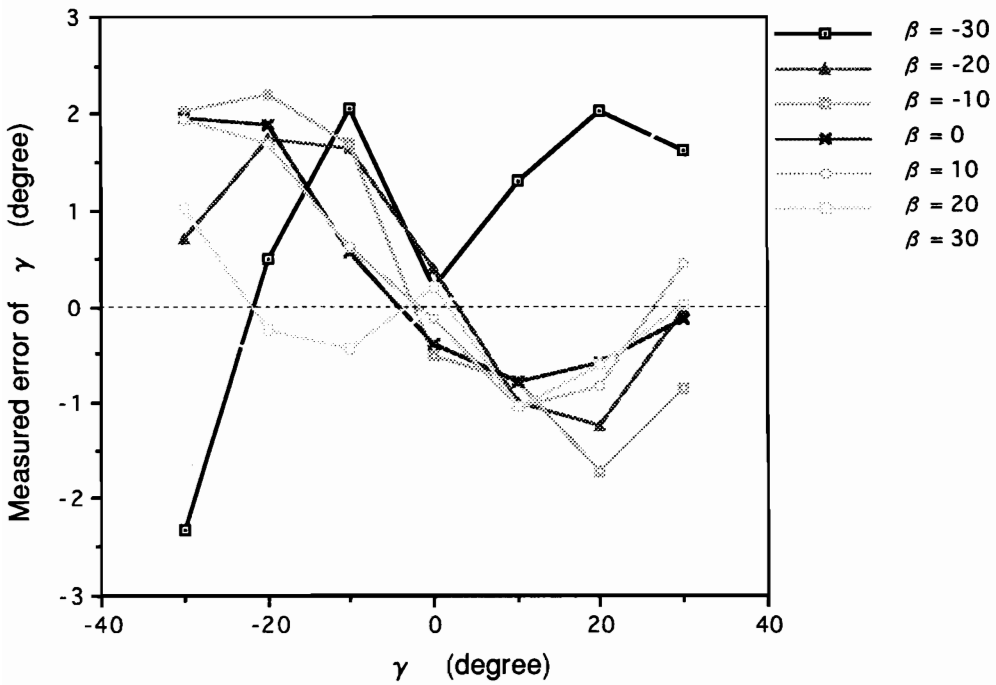


図 5.7 方向  $\beta$  に対する傾き  $\gamma$  の測定誤差

### 5.3.2 対象平面の姿勢測定

距離  $z_0 = 1300 \text{ mm}$  として方向  $\beta$  および傾き  $\gamma$  を  $-30^\circ$  から  $30^\circ$  まで  $10^\circ$  ずつ変化させ実測を行なった。図 5.6 は、 $\gamma$  をパラメータ (parameter) として  $\beta$  とその測定誤差の関係を示したものである。図 5.7 は、 $\beta$  をパラメータとして  $\gamma$  とその測定誤差の関係を示したものである。実験の範囲では、方向  $\beta$  の精度は  $\pm 2^\circ$  以内であり、傾き  $\gamma$  の誤差は  $\pm 3^\circ$  以内であるという結果を得た。

### 5.3.3 焦点距離の測定

試作システムでは既製のテレビカメラを用いたため、焦点距離  $f$  の値が未知であったので、この値を実測した。つぎに、カメラの焦点距離の測定法を示す。カメラ光軸と垂直な投影面上の上下に 2 個のマーカ  $M_1$ ,  $M_2$  を付け、このマーカをテレビ画像面におけるラスタ番号  $p_{v_1}$  および  $p_{v_2}$  上の画素に一致するようにカメラと投影面との距離を調整する。このとき、基準平面から投影面までの距離  $z_0$  の実測値 (物指し等による) とマーカ間の距離  $s_M$  を利用し、カメラの縦方向の画角  $2\theta$  を求めることができる。マーカを表示しているラスタ番号の差  $p_v$  を、 $p_v = |p_{v_1} - p_{v_2}|$  とすると、幾何学的関係から焦点距離  $f$  は、

$$f = p_v / 2 \tan \theta \quad (5.27)$$

となる。この値は焦点距離を画像面の座標系の単位、すなわちラスタ番号で表したものである。テレビ画像面を最大に使って、ラスタ番号 0 と 255 を利用すると、 $f = 255 / 2 \tan \theta$  となる。

しかし、上記の方法で求めた  $f$  の値には誤差が含まれており、これをより小さくするために、以下の方法をとる。式 (5.27) より求めた値を  $f$  の第 1 近似値とし、 $f_0$  とする。この  $f_0$  を式 (5.26) に代入して対象平面までの距離  $z_0$  を計算する。次に、この  $f_0$  と  $z_0$  の関係をもとに、誤差を小さくする新しい  $f_0$  を式 (5.26) より求め、新しい  $z_0$  を求める。この手順を  $z_0$  の値が収束するまで繰り返す。

今回のシステムではスリット光投光器の位置  $k$  を  $200 \text{ mm}$  とし、光軸と垂直

な投影面の上下方向にマーカ間距離  $s_M = 240 \text{ mm}$  で2つのマーカを付け、 $p_v = 255$  となるように撮像したとき、投影面までの距離は  $515 \text{ mm}$  であった。これらの値を式(5.27)に代入し、最初に求まる誤差を含んでいる焦点距離  $f_0$  は  $274.7$  を得た。この値を式(5.26)に代入し、距離  $z_0$  を実測した。次に  $z_0$  の誤差を小さくする新しい値  $f_0 = 286.0$  が求まった。図 5.8 は、焦点距離  $f_0$  が対象平面までの距離  $z_0$  に及ぼす影響を調べるため、実測した測定誤差を示す。ここでは、図 5.8 に示すように  $f_0 = 284.0$  を採用した。

### 5.3.4 距離測定における投光器位置の影響

スリット光投光器の位置  $k$  の値について検討する。この  $k$  は測定装置の大きさや測定距離の範囲を考慮して決めることになる。図 5.9 は、 $k$  をパラメータとして距離  $z_0$  に対するその測定誤差の関係を調べたものである。  $k = 100 \text{ mm}$  の場合、距離  $z_0$  が大きくなるにつれてその誤差が極めて大きくなっている。このことは距離  $z_0$  の測定精度は、スリット光投影器の位置  $k$  とも関係が深いことを示している。すなわち、図 5.1 においてスリット光面が Z 軸とのなす角度  $\alpha$  は、ある値以上とする必要がある。

### 5.3.5 従来の測定方法との比較

内心距離  $v_g$  による距離の測定方法と従来の単一スリット光による方法を比較するため、光源  $s_1$  のみによる距離  $z_0$  を実測した。

画像面の V 軸上におけるスリット光投影像の中心線による切片  $v_1$  と、スリット光投影像の縦方向の光強度を利用して算出した中心  $v_b = \Sigma (v_j \cdot b_j) / \Sigma b_j$  とを求めた。ただし、 $v_j$  は V 軸上の画素であり、 $b_j$  はその画素の光強度である。これらの計測結果を図 5.10 に示す。この実験結果の比較から内心距離  $v_g$  は、従来方法より高精度で測定できることが明らかになった。

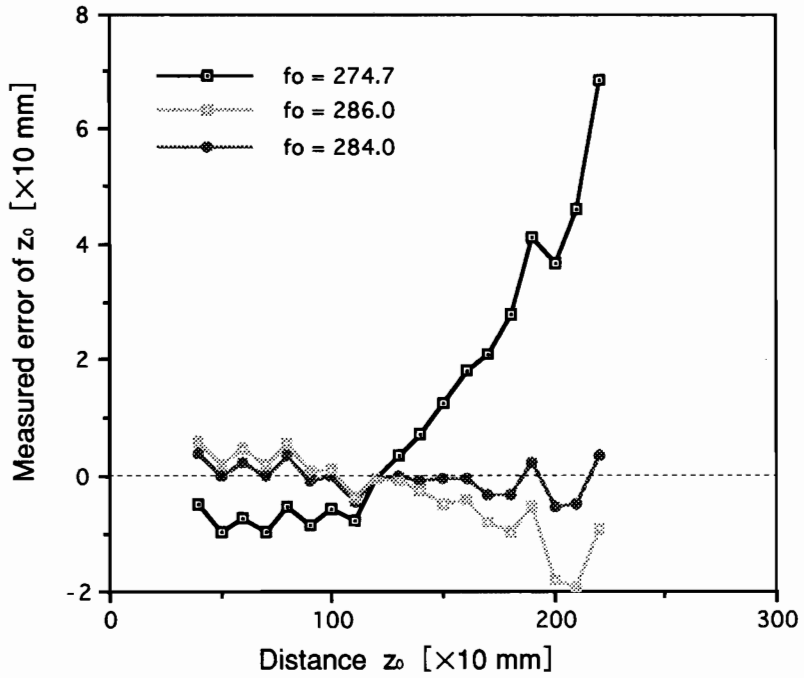


図 5.8 焦点距離に対する距離  $z_0$  の測定誤差

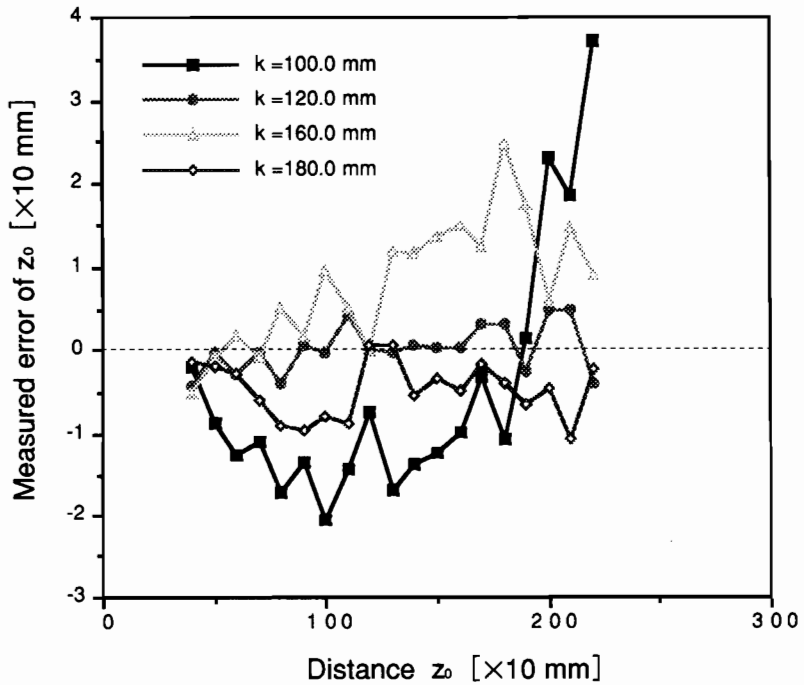


図 5.9 投光器の位置に対する距離  $z_0$  の測定誤差



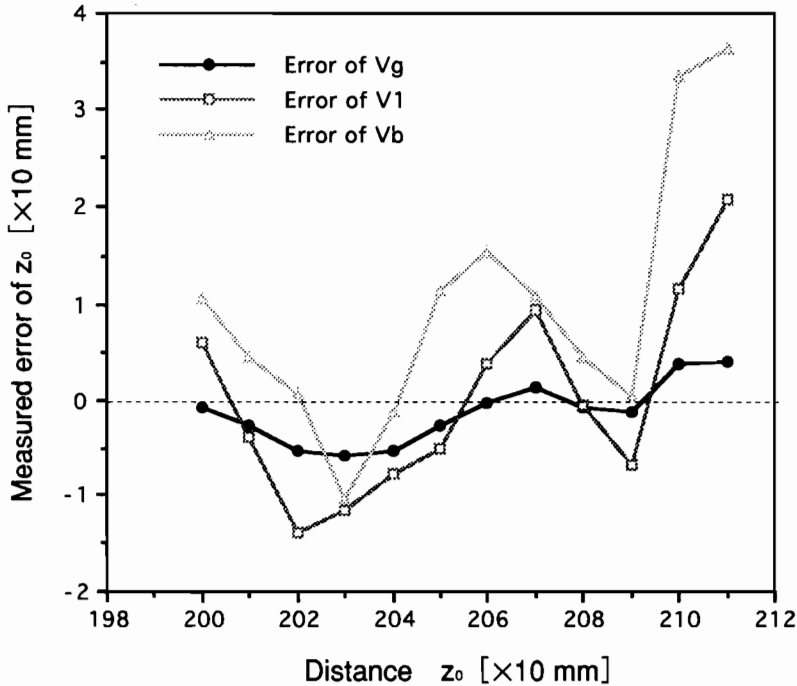


図 5.10 従来方法との誤差比較

## 5.4 まとめ

三角錐スリット光を用いて対象平面までの距離およびその姿勢を高い精度で求める方法を提案し、装置を試作し実験結果を述べた。

本章の内容をまとめると、

- (1) 三角錐スリット光によって画像面に投影された三角形は、対象平面までの距離が大きくなるにつれて1点に収束してから、上下、左右逆になって現われる。この三角形の大きさと正三角形からのずれの程度を利用することによって対象平面までの距離のみならず、従来の方法では得られなかった方向と傾きの計測が可能であること。
- (2) スリット投影像の幅による誤差を減少させるため、複数画素に最小2乗法による直線のあてはめを行なっている。

- (3) 画像面で得られた三角形の内心から各辺までの内心距離を利用することによって、距離計測の精度を向上させている。
- (4) 対象平面までの距離については、単一スリット光の従来法と比べて約 1 桁の精度向上を達成した。また、その姿勢計測では方向および傾きの最大誤差はそれぞれ  $\pm 2^\circ$  以下、 $\pm 3^\circ$  以下であった。

## 第 6 章

---

---

### 結 論

未知環境内で移動ロボットが自律的な走行を行うためには、各種センサから得られる情報をもとにまわりの状況を知るという環境認識能力が極めて重要である。特に障害物が散在している環境での移動ロボットは、スタート地点から障害物を回避しながら目標地点に到達する経路を自動的に決めなければならない。比較的ローカルな経路が与えられたとき、その経路上の障害物の位置を把握し、環境認識による進路探索を行なう機能として、前方の障害物までの距離情報が得られるセンサが必要である。

一般に距離情報の獲得手段として、両眼立体視のようなカメラによる受動的方法やレーザや超音波による能動的方法がよく用いられる。しかし、両眼立体視では左右両眼の画像の対応点決定にかなりの処理時間が必要である。また、超音波距離センサの場合は、斜に置かれている障害物の検出能力と角度に対する分解能などの制約があり、環境認識能力に限界がある。そこで、著者は比較的装置が簡単で機能の高い半導体レーザのスリット光とテレビカメラによる距離センサを開発した。これは、赤外線スリット光を床面に対して水平に投影し、壁や障害物に映った像をカメラで入力し、画像中のスリット像の位置から三角測量の原理でロボットと障害物間の距離を求めるものである。光源は、一般的な屋内環境の照

明下でも距離測定が可能な半導体レーザ (830 nm, 30 mW) を使用し、カメラレンズに赤外線透過用フィルタを取付けることにより、画像上でのノイズの除去が容易で、かつ精度のよいデータが得られた。

本論文は、この距離センサを研究室で試作した自律型移動ロボット Rokkey II に装着させ、周囲の環境認識による障害物回避を中心とした走行や局所地図作成による走行の実験の結果を示したものであり、また、従来の方法では対象平面までの距離とその姿勢の高精度計測が同時にできないので、3つのスリット光を用いた三角錐スリット光による平面までの距離およびその姿勢の測定方法を提案し、それによる実験結果をまとめたものである。

第2章では、実際に実験で用いた移動ロボット Rokkey II のシステム構成およびより正確な誘導の実現のための改良すべき点について述べた。

第3章では、障害物の幅が広いときと移動ロボットが壁を向いてしまったとき、また廊下の突き当たりのような隅に遭遇した場合などでも障害物回避行動ができる柔軟性のあるアルゴリズムを提案し、それによって行なった走行実験とその結果を示した。

ロボットは、カメラの視野角内に投影されるスリット光の投影パターンの画像を解析することにより、障害物の配置やロボット自身の姿勢を認識して移動可能領域をみつけだし、走行情報(進行方向と移動距離)を求めることができた。カメラの視野角内で移動可能領域が見つからない場合、すなわち横幅が広い障害物や壁を向いているとき、および、突き当たりのような隅の場合は、画像上で得られる障害物からの反射光による線情報を利用し、変えようとする方向への角度を求めなければならない。そこで、廊下の壁は平衡であることを前提として、ロボットが廊下の方向に正しく向いておれば、観測されるであろうスリット光の反射像を想定(これを基準線と呼ぶ)し、この基準線の方角ベクトルと障害物からの反射光によって得られた線分の方角ベクトルとのなす角度を進行方向の修正角度とすることによって障害物回避走行が可能になった。この走行実験の結果より、カメラのみによる走行、超音波距離センサによる走行に比べ、処理時間や環境認識能力の面においてスリット光による距離センサが有効であることを確認した。

しかし、テレビカメラの視野角には制限があるので、廊下の曲がり角や障害物の横幅が長い場合など、それらの認識が困難な場合がある。

第4章では、より広範囲な環境情報を得るため、移動ロボットが現在の位置において周囲の局所地図を作成し、これを用いて安全な走行を行なうための方法を提案し、それによって行なった走行実験とその結果を示した。

この方法は、スリット光による距離センサを水平に回転して複数の画像を取り込むことにより、総合的に視野角を広げることを考えた。これは床面に垂直な軸まわりに回転できる回転台上にスリット光による距離センサを取付け、旋回させながら移動ロボットの前方5方向の画像を撮像する。各方向から得られた距離データを合成することにより、移動ロボットの現在の位置を中心として周囲の局所地図を作成することができる。これは、ロボットの前方はもちろん、左右の障害物の位置情報を得ることができるので、より複雑な地形においても障害物を回避したりロボットの方向を転換することによって、走行が可能となる。実験の結果、複雑な形の通路や障害物がある場合の走行に有効であることが確かめられた。

ここに示した距離測定法は、一般に距離が大きくなるにつれてスリット像の幅が大きくなるので、測定誤差が大きくなるが、その誤差は測定距離200cmで2.5cm以下であった。また測定可能距離は約300cmで、これは人間が歩行する程度の速度である移動ロボットの場合、環境地図作成や走行制御の面において十分な値であった。

また、ロボットまわりの環境構造が、複数の平面の位置や姿勢によって記述されれば、環境モデルを作成したりすることが可能である。そこで、三角錐スリット光を用いて対象平面までの距離およびその姿勢を求める方法を提案し、装置の試作と実験結果を第5章に示した。

三角錐スリット光を対象平面に投影して得られた三角形の像は、対象平面までの距離が大きくなるにつれて小さくなり、1点に収束してから、上下、左右逆になって現われる。この三角形の大きさと正三角形からのずれの程度を観測することによって対象平面までの距離のみならず、従来の方法では得られなかった方向

と傾きの同時計測が可能であることを示した。さらに、スリット光投影像の幅による誤差を減少させるため、複数画素に最小2乗法による直線のあてはめを行ない、画像面で求めた三角形の内心から各辺までの距離を利用することによって距離測定精度を向上させている。

実験の結果、対象平面までの距離については、単一スリット光の従来法と比べて約1桁の精度向上を達成している。また、その姿勢の計測誤差、すなわち方向および傾きの誤差はそれぞれ $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ 以下が得られた。

本研究で用いたスリット光投影法は、以上の研究成果から屋内環境下で移動するロボットの自律化を実現するためのセンシング機能の要素技術として有効であると考えている。移動ロボットの対象とする環境は時々刻々変化するので、要素性能の更なる高速化・小型化が望まれるが、処理目的に応じた種々センサ情報の役割分担や有機的な融合方法が今後の課題であると思われる。

## 謝 辞

本研究は、神戸大学大学院自然科学研究科 前川 禎男 教授の御指導のもとに行なわれたもので、同教授の終始懇切なる御教示と御鞭撻の結果、達せられたものであります。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、神戸大学大学院自然科学研究科 平井 一正 教授および 北村 新三 教授の御教示、御指導を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

また、本研究を進めるにあたり、いろいろな面において御指導いただきました姫路工業大学工学部 高橋 豊 教授に心から感謝致します。

著者の質問や要望に対し、常に御親切に教えて下った神戸大学工学部 上原邦昭 助教授、中條 拓伯 助手に感謝致します。

同研究室において共に研究し、数々の助言を頂いた 羅偉氏, Mahdad Nouri Shirazi 氏, 土屋英昭氏の御夫妻および情報知能工学科 (旧システム工学科) 第4 講座の諸氏に感謝します。

さらに、長期間の留学生活にあたり、奨学金などの経済的な御援助をいただきましたLISA 奨学会, 日本文部省, 菅原奨学会 (神戸市アジアセンター), ならびに私事に多大な御支援をいただいた 高橋正明 氏, 藤井隆佳 氏, 藤井佳幸 氏, 席定勝美 氏, 松田光雄 氏, 村上康太 氏の御家族に深く感謝の意を表します。

最後に、日頃身近なところで常に暖かく激励してくれた味楽園の兄, 姉をはじめ、母国で声援してくれた家族, そして心の支えになってくれた妻と元気に育ってくれた息子に、この紙面を借りて感謝の意を表します。

## 本研究に関連する発表論文

### 学 術 論 文

- [1] 崔龍雲, 前川禎男: スリット光の投影パターンを用いた自律型移動ロボットの走行制御; 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 11-B, pp. 79 - 90 (1993)
- [2] 崔龍雲, 前川禎男: スリット光距離センサによる局所地図作成と移動ロボットの走行制御; 電気学会論文誌, No. 6 - 688, 投稿中 (1994)
- [3] 崔龍雲, 高橋豊, 前川禎男: 三角錐スリット光投影法による対象平面の距離とその姿勢計測; 計測自動制御学会論文誌, No. 4283, 投稿中 (1994)

### 学 術 講 演

- [1] 前川禎男, 崔龍雲: スリット光投影法を用いた移動ロボットの移動可能領域の抽出手法; 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G2-5 (1990)
- [2] 前川禎男, 崔龍雲: スリット光による距離センサを用いた自律型移動ロボットの走行制御; 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G2 - 19 (1991)
- [3] 崔龍雲, 前川禎男: スリット光距離センサによる自律型移動ロボットの障害物回避; 第36回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp. 447 - 448 (1992)
- [4] 崔龍雲, 前川禎男: スリット光距離センサを用いた局所地図作成と移動ロボットの走行制御; 第37回システム制御情報学会研究発表講演会論文集 pp. 567 - 568 (1993)



- [5] 崔龍雲, 前川禎男: 未知空間における移動ロボットの局所地図作成と走行制御; 日本ロボット学会第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp.7-12, (1993)
- [6] 崔龍雲, 前川禎男: 光距離センサを用いた未知環境の局所地図作成と移動ロボットの走行制御; 韓国科学技術団体総連合会, 世界韓民族科学技術者総合学術大会論文集, pp. 739 - 746 (1993)
- [7] 崔龍雲, 高橋豊, 前川禎男: 三角錐スリット光による距離と方向計測; 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G2 - 65 (1993)
- [8] 崔龍雲, 前川禎男: 赤外スリット光を用いた測距センサによる移動ロボットの局所地図作成と走行制御; ビークルオートメーション技術研究会, 第7回 ADVANTY Symposium 講演論文集, pp. 81 - 84 (1994)

# 文 献

## 第1章 序 論

- [1] 白井良明, 井上昌彦: 知能ロボット研究の展望 —モデルベスト・ロボティックス—; 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 6, pp. 462 - 469 (1987)
- [2] 小森谷清, 小谷範穂: 移動ロボットの知能; 日本ロボット学会誌, Vol. 9 No. 1, pp. 100 - 111 (1991)
- [3] R. A. Brooks: A Robust Layered Control System for a Mobile Robot; *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14 - 23 (1986)
- [4] R. D. Beer, H. J. Chiel and L. S. Sterling: A Biological Perspective on Autonomous Agent Design; *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 169 - 186 (1990)
- [5] 人工知能学会編: 人工知能ハンドブック; オーム社, pp.914 - 929 (1990)
- [6] 日本ロボット学会編: ロボット工学ハンドブック; コロナ社, pp.343 - 370 (1990)
- [7] 柿倉正義: 自律移動ロボットの経路探索問題; 電子情報通信学会誌, Vol. 73, No. 7, pp. 743 - 753 (1990)
- [8] 谷内田正彦: ロボットビジョン; 昭晃堂 (1990)
- [9] 坪内孝司, 山本越生, 有本卓: 移動ロボットのTVカメラおよび環境モデルを用いる画像間のマッチングと自己位置同定; 日本ロボット学会第3回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 91 - 96 (1993)
- [10] 佐藤淳, 富田文明: 自律走行車のためのステレオビジョンによる道路面と移動物体の認識; 情報処理学会研究報告, 91 - CV - 73(13) (1991)
- [11] 尾崎暘, 大空真由美, 平塚芳隆: 自律走行車用視覚情報処理システム; 情報処理学会研究報告, 90 - CV - 69(8) (1990)

- [12] O. D. Faugeras, E. Le Bras-Mehlma and J. D.Boissonnat : Representing Stereo Data with the Delaunay Triangulation ; *Artificial Intelligence*, Vol. 44, pp. 41 - 87 (1990)
- [13] W. Bruger and B. Bhanu : Estimating 3D Egomotion from Perspective Image Sequences ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. 12, No. 11, pp. 1040 - 1058 (1990)
- [14] 高橋裕信, 富田文明 : ラージスケールステレオ ; 情報処理学会研究報告, 91 - CV - 73 (14) (1991)
- [15] C. Thrope, M. H. Hebert, T. Kanade and S. A. Shafer : Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. PAMI -10 , No. 3, pp. 362 - 373 (1988)
- [16] E. D. Dickmanns and V. Graefe : Dynamic Monocular Machine Vision ; *Mmachine Vision and Application* , Vol. 1, pp. 223 - 240 (1988)
- [17] I. S. Kweon and T. Kanade : High-Resolution Terrain Map from Multiple Sensor Data ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. PAMI -14 , No. 2, pp. 278 - 292 (1992)
- [18] 辻三郎 : 知的ロボティックスの幾つかの問題 ; 日本ロボット学会誌, Vol. 9 , No. 1 , pp. 79 - 84 (1991)
- [19] 荒川賢一, 池内克史 : 知能ロボットの3次元視覚 ; 日本ロボット学会誌, Vol. 9 , No. 1 , pp. 92 - 99 (1991)
- [20] 池内克史 : アメリカにおけるロボットビジョンの研究動向 ; 日本ロボット学会誌, Vol. 10 , No. 2 , pp. 146 - 152 (1991)
- [21] D. H. Ballard : Reference Frames for Animate Vision ; *Proc. 11 th Int. Joint Conf. Artif. Intell.* , pp. 1635 - 1641 (1989)

## 第2章 自律型移動ロボットRokkey II のシステム構成

- [ 1 ] R. A. Jarvis : A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision ;

- IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI -5 , No. 2, pp. 362 - 373 (1983)
- [ 2 ] 三浦宏文：ロボットの未来学；読売科学選書 (1986)
- [ 3 ] 中村晶：自律型移動ロボットの誘導に関する研究；平成2年度神戸大学大学院工学研究科(システム専攻)修士論文 (1990)
- [ 4 ] 前川禎男, 中村晶：自律型移動ロボットRokkey IIの高性能化；電気関係学会関西支部連合大会, G8 - 19 (1989)
- [ 5 ] M. Drumheller：Mobile Robot Localization Using Sonar；*IEEE Trans. Pattern Anal. and Machine Intell.*, Vol. PAMI -9 , No. 2, pp. 325 - 332 (1987)
- [ 6 ] A. C. Knoll：Ultrasonic Holography Techniques for Localizing and Imageing Solid Objects；*IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 7 , No. 4, pp. 449 - 467 (1991)
- [ 7 ] 金山裕, 油田信一, 高田雅行, 飯田純一：車輪型移動ロボットのための走行制御もジュール；日本ロボット学会誌, Vol. 2, No.5, pp.18 - 31(1984)
- [ 8 ] 油田信一, 飯田純一：自律移動ロボットのコントローラのためのマルチプロセスアーキテクチャー機能単位のモジュール化と状態表示パネルによるプロセス間通信ー；第5回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, pp. 1 - 5 (1990)

### 第3章 スリット光投影法による距離センサと、移動ロボットの走行制御

- [ 1 ] M. Waxman, J. Lemoigne, S. Davis, B. Srinivasan, R. Kushner, E. Liang, T. Siddalingaiah：A Visual Navigation System for Autonomous Land Vehicles；*IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 2, pp124-141 (1987)
- [ 2 ] A. Elfes：Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation；*IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 3, pp 249 - 265 (1987)
- [ 3 ] C. Thorpe, H. Hebert, T. Kanade, A. Shafer：Vision and Navigation for the Car-

- negie-Mellon Navlab ; *IEEE Trans., Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 10, No. 3, pp 362 - 373 (1988)
- [ 4 ] 小森谷清, 谷和男 : 1112 超音波レンジデータによる壁面衝突回避 ; 日本ロボット学会, 第7回学術講演会予稿集, No. 1, pp 31 - 32 (1989)
- [ 5 ] 飯田重喜, 斉藤雄一, 油田信一, 飯島純一 : スリット光を用いたレーザレンジファインダを有する自律型移動ロボットと障害物回避走行 ; 第5回知能移動ロボットシンポジウム資料, pp121 - 126 (1990)
- [ 6 ] P. Mansbach : Calibration of a Camera and Light Source by Fitting to a Physical Model ; *Computer Vision, Graphics, Image Processing*, Vol. 35, pp200 - 219 (1986)
- [ 7 ] 久保田孝, 橋本秀紀, 原島文雄 : 1103 視覚情報を用いた移動ロボットの障害物の回避 ; 日本ロボット学会, 第7回学術講演会予稿集, No. 1, pp 5 - 8 (1989)
- [ 8 ] Y. Liu, T. S. Huang and Faugeras : Determination of Camera Location from 2-D to 3-D Line and Point Correspondences ; *IEEE Trans., Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 12, No. 1, pp 28 - 37 (1990)
- [ 9 ] 小野寺康浩, 金谷健一 : 計算射影幾何学 ; 情報処理学会研究報告, 89 - CV - 61 (1989)
- [10] 金谷健一 : 画像理解 - 3次元認識の数理 - ; 森北出版, pp 59 - 69 (1990)
- [11] P. Saint-Marc, J. L. Jezouin, G. Medioni : A Versatile PC-Based Range Finding System ; *IEEE Trans., Robotics and Automation* , Vol. 7, No. 2, pp 250 - 257 (1991)
- [12] J. Borenstein and Y. koren : The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots ; *IEEE Trans., Robotics and Automation* , Vol. 7, No. 3, pp 278 - 288 (1991)

#### 第4章 スリット光距離センサによる局所地図作成と移動ロボットの走行制御

- [ 1 ] William M. Wells : Visual Estimation of 3-D Line Segments from Motion - A Mobile Robot Vision System ; *IEEE Trans. Robotics and Automation* , Vol. RA-5, No. 6, pp. 820 - 825 (1989)
- [ 2 ] R. Kuc and M. W. Siegel : Physically Based Simulation Model for Acoustic Sensor Robot Navigation ; *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-9, No. 6, pp. 766 - 778 (1987)
- [ 3 ] 渡辺豊, 油田信一 : 灯台とデッドレコニングを用いた移動ロボットポジショニング ; 第7回日本ロボット学会学術講演会, pp. 41 - 44 (1989)
- [ 4 ] 前川禎男, 崔龍雲 : スリット光による距離センサを用いた自律型移動ロボットの走行制御 ; 電気関係学会関西連合大会, G2 - 19 (1991)
- [ 5 ] 崔龍雲, 前川禎男 : スリット光距離センサによる自律型移動ロボットの障害物回避 ; 第36回システム制御情報学会講演論文集, pp. 447 - 448 (1992)
- [ 6 ] Alberto. Elfes : Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation ; *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA- 3, No. 3, pp. 249 - 265 (1987)
- [ 7 ] Z. Zhang and O. Faugeras : A 3D World Model Builder with a Mobile Robot ; *Int. Journal of Robotics Research* , Vol. 11 , No. 4 , pp. 269 - 285 (1992)
- [ 8 ] J. J. Leonard , H. F. Durrant-Whyte and I. J. Cox : Dynamic Map Building for an Autonomous Mobile Robot ; *Int. Journal of Robotics Research* , Vol. 11 , No. 4 , pp. 286 - 298 (1992)
- [ 9 ] D. J. Kriegman, E. Triendl and T. O. Binford : Stereo Vision and Navigation in Buildings for Mobile Robot ; *IEEE Trans. Robotics and Automation* , Vol. RA-5, No. 6, pp. 792 - 803 (1989)
- [10] V. Lumelsky , S. Mukhopadhyay and Kang Sun : Sensor-Based Terrain Acquisition : a "Seed Spreader" ; *IEEE / RSJ Int. Workshop on Intell. Robots and Systems '89* , Japan , pp. 62 - 67 (1989)

- [11] I. S. Kweon and T. Kanade : High-Resolution Terrain Map from Multiple Sensor Data ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. PAMI -14 , No. 2 , pp. 278 - 292 (1992)
- [12] 飯島純一, 川崎宜史, 油田信一 : 自律移動ロボットによる屋内未知環境の地図生成 ; 第6回知能移動ロボットシンポジウム, pp.93 - 98 (1992)
- [13] 広瀬茂男, 前川和信, 梅谷陽二 : 地図作成型視覚システムの情報処理 ; 日本ロボット学会誌, Vol. 2 No.3 pp. 191 - 199 (1984)
- [14] 目崎裕史, 増田功 : 階層的プランニングによる室内地図の自動生成 ; 情報処理学会研究報告, 91 - CV - 70(14) (1991)
- [15] H. Ishiguro , M. Yamamoto and S. Tsuji : Omnidirectional Stereo for Making Global Map ; *Proc. 3rd Int. Conf. Computer Vision* , pp. 540 - 547 (1990)
- [16] A. M. Flynn : Combining Sonar and Infrared Sensors for Mobile Robot Navigation ; *Int. Journal of Robotics Research* , Vol. 7 , No. 6 , pp. 5 - 14 (1988)
- [17] K. Sugihara : Some Location Problems for Robot Navigation Using a Single Camera ; *Computer Vision Graphics and Image Processing* , Vol. 42, pp. 112 - 129 (1988)
- [18] 石黒浩, 山本雅史, 辻三郎 : 全方位視野像の解析 ; 情報処理学会研究報告, 89 - CV - 61(8) (1989)
- [19] 八木康史, 川戸慎二郎, 辻三郎 : 全方位視覚センサ COPIS を用いた移動物体の発見と衝突回避 ; 情報処理学会研究報告, 91 - CV - 75(7) (1991)
- [20] 石黒浩, 山本雅史, 辻三郎 : 全方位視野の距離情報獲得 ; 電子情報通信学会誌 D-II , Vol. J74 - D-II , No. 4 , pp. 500 - 508 (1991)
- [21] 八木康史, 川戸慎二郎 : 全方位視野の距離情報獲得 ; 電子情報通信学会誌 D-II , Vol. J74 - D-II , No. 1 , pp. 19 - 26 (1991)
- [22] J. Hong, X. tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman : Image-based homing ; *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation* , pp. 910 - 915 (1991)

## 第5章 三角錐スリット光投影法による対象平面の距離とその姿勢の計測

- [ 1 ] 成瀬央, 野村由司彦, 山本俊雄: スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J69 - D, No. 12, pp.1888 - 1895 (1986)
- [ 2 ] 飯田重喜, 斉藤雄一, 油田信一, 飯島純一: スリット光を用いたレーザレンジファインダを有する自律型移動ロボットとその障害物回避走行; 第5回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, pp. 121-126 (1990)
- [ 3 ] 飯島純一, 河崎宜史, 油田信一: 自律移動ロボットによる屋内未知環境の地図生成; 第6回知能移動ロボットシンポジウム予稿集, pp. 93 - 98 (1992)
- [ 4 ] P. Saint-Marc, J. L. Jezouin and G. Medioni: A Versatile PC-Based Range Finding System; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 2, pp. 250 - 256 (1991)
- [ 5 ] 金谷健一: 画像理解-3次元認識の数理-; 森北出版, pp. 26-27 (1990)
- [ 6 ] 小関修, 中野倫明, 山本新: 光切断法を用いた実時間距離検出装置; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J68 - D, No. 5, pp.1141 - 1148 (1985)
- [ 7 ] R. K. Lenz and R. Y. Tsai: Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI -10, No. 5, pp. 713 - 720 (1988)
- [ 8 ] P. Puget and T. Skordas: Calibrating a mobile camera; *image and vision computing*, Vol. 8, No. 4, pp.341 - 348 (1990)
- [ 9 ] R. Horaud, R. Mohr and M. Lorecki: On Single-Scanline Camera Calibration; *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.9, No. 1, pp. 71 - 75 (1993)
- [ 10 ] W. I. Grosky and L. Tamburino: A Unified Approach to the Linear Camera Calibration Problem; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI -12, No. 7, pp. 663 - 671 (1990)



- [11] J. Ens and P. Lawrence : An Investigation of Methods for Determining Depth from Focus ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. PAMI -15 , No. 2, pp. 97 - 107 (1993)
- [12] J. Y. S. Luh and J. A. Klaasen : A three-Dimensional Vision by Off-Shelf System with Multi-Cameras ; *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* , Vol. PAMI - 7 , No. 1, pp. 35 - 45 (1985)