

Title	実時間全方位視覚センサによる移動ロボットの誘導に関する研究
Author(s)	八木, 康史
Citation	大阪大学, 1991, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3054503">https://doi.org/10.11501/3054503</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

大阪大学 博士論文

実時間全方位視覚センサによる  
移動ロボットの誘導  
に関する研究

八 木 康 史

平成 3 年 1 月

大阪大学 博士論文

実時間全方位視覚センサによる  
移動ロボットの誘導  
に関する研究

八木康史

平成3年1月

# 実時間全方位視覚センサによる移動ロボットの誘導 に関する研究

## 目次

あらまし	1
1章 緒論	3
2章 移動ロボットセンサ	13
2-1. 単眼視(環境についての知識の利用)	13
2-2. ステレオ視、三眼視	17
2-3. 移動ステレオ視、動画像視	19
2-4. 光投影法、超音波計測	25
2-5. 全方位視	29
3章 全方位視覚センサCOPISシステム	34
3-1. ハードウェア構成	34
3-2. 光学構成	38
3-2-1. COPISの視野領域	38
3-2-2. COPISの光学原理	40
3-2-3. 光学系の設計	42
3-3. 円錐投影の基本原理	52
4章 静止環境での位置情報の獲得	56
4-1. 前提条件	56
4-2. 3次元情報の獲得	57
4-3. 写像点の移動軌跡	59
4-4. カメラ移動による位置情報の獲得	65
4-4-1. 写像点の軌道算出法	65
4-4-1-1. 前処理	65
4-4-1-2. 垂直エッジの検出	65
4-4-1-3. 対応付け	66
4-4-2. 位置情報の推定	74
4-5. 実験結果とその検討	75

5章 COPISによる移動物体との衝突回避	79
5-1. 前提条件	79
5-2. 写像点の移動軌跡	80
5-3. 衝突危険性の評価	82
5-4. 相対運動方向の算出	84
5-5. 衝突回避動作	90
5-6. 位置、運動の推定	92
5-6-1. $\tan \theta_{RB} \neq \tan \theta_{RA}$ の場合	92
5-6-2. $\tan \theta_{RB} = \tan \theta_{RA}$ の場合	93
5-7. 実験結果とその検討	95
6章 結論	108
謝辞	110
参考文献	112
研究業績	122
付録	124

## あらまし

人は物体までの正確な位置や物体の運動情報が得られなくとも、柱や自動車、さらに他の人などと衝突することなく歩き回ることができる。一方興味を持った対象に対しては、見たいところだけ詳しく観察することができる。これは、人が意志と感情を持つと言うことの他に、五体五感を持ち、多機能性、万能性、自立性などをコンパクトに備えているからである。人造人間と言う意味のロボットは、このようなヒューマンライクな機能が実現される必要がある。とりわけセンサ情報（人と言う五感）により周りの環境を把握することは、一般人間社会でロボットが人と共存するために不可欠な機能である。センサとしては、視覚、触覚、近接覚、聴覚などが考えられるが、中でも視覚はその情報量が豊富で重要な働きをする。

近年、環境を理解し移動することのできる視覚付き知能移動ロボットの研究が盛んに行なわれている。しかしこれらの研究では、静止した障害物のみを扱うケースが多く、例え動く物体があったとしても、ロボットはその移動物体がいなくなるまで停止し待つだけであった。すなわち従来の研究では、オフィスや公園、道路などを対象としているが、人や車など移動する物体がほとんど存在しない理想的な環境を扱っていた。しかし一般に我々が生活する日常環境には、自動車、自転車、人など様々な物体が混在し動き回っている。従って、車や一般人が混在する環境下でも移動物体を回避しながら移動できる現実的なロボットが必要である。

このような人工環境（工場内、オフィス、市街地など）では、必ずしも移動物体は前方より接近してくるとは限らない。側方、後方からの移動物体の接近による危険も生じうる。よって移動ロボットにおいても、移動しながら全方位の情報を獲得することが望ましい。本報告では、室内等の人工環境内を移動する物体を検出し、衝突回避を行なう全方位視覚センサCOPISシステムについて述べる。

ここではCOPISシステムについての構成と、ロボットが移動中に撮像した時系列画像から得られる物体の移動軌跡より、環境構造物までの距離を計測し環境モデルを構築する方法と、さらに衝突の危険がある障害物や移動物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について報告する。さらにここで提案した方法を用いて、移動物体がある建屋内をロボットが移動した場合の実証実験の結果を示す。

## 1章 緒論

人は物体までの正確な位置や物体の運動情報が得られなくとも、柱や自動車、さらに他の人などと衝突することなく歩き回ることができる。一方興味を持った対象に対しては、見たいところだけ詳しく観察することができる。これは、人が意志と感情を持つと言うことの他に、五体五感を持ち、多機能性、万能性、自立性などをコンパクトに備えているからである。人造人間と言う意味のロボットは、このようなヒューマンライクな機能が実現される必要がある。つまり産業用ロボットとの大きな違いは、ロボットが知能を持つか否かである。

今日のロボットの利用は、産業用が主であり未だ一般社会のニーズ、国民生活のニーズに直接寄与するまでには至っていない。その意味でロボットは初期段階にあると言える。しかし、やがて人と機械とが協同し、人の日常生活や労働を支援するシステムとして成長し、用途が拡大していくものと思われる。

知能ロボットに関する研究は、産業用ロボットが実用化され始めたころよりスタートしたが、この発達には、産業用ロボットの発達を抜きにしては語れない。ロボットの発達は、産業応用、つまり溶接、塗装、組立、検査の諸作業の自動化機器として始まった。当初は、人が行なっていた単純な繰り返し作業を自動化することが目的で、ティーチングプレイバック方式など単にその作業内容をロボットに教示するだけで十分であった。しかしロボットの有用性が認められる様になると、その作業内容も複雑化し、各種センサ情報をロボットにフィードバックする必要性が生まれた。例えば、組立作業の場合、数多くの部品が定められた場所に配置されることは少なく、またフィードフォワード的な教示法では、作業環境の変化に対処することは不可能である。この様な中から、ロボットの知能化が注目され始めた。

ロボットの知能化の目的は、人造人間と言う言葉の意味が示す通り、人の代わり



となって、作業を行なうことにある。とりわけセンサ情報（人と言う五感）により周りの環境を把握することは、一般人間社会でロボットが人と共存するために不可欠な機能である。即ちロボットの知能化において、センサ情報の持つウエートは大きい。ロボット用センサとしては、視覚、触覚、近接覚、聴覚などが考えられるが、中でも視覚はその情報量が豊富で重要な働きをする。ちなみに、人が得ている情報の90%近くは視覚情報から得られると言われている。

視覚情報処理の研究には、大別して二つの課題がある。一つは、物体認識、もう一方は、環境認識と呼ばれるものである。物体認識は、例えば工場に据え付けられ、固定型のロボットで、視野内にいくつかの対象物体が置かれている時に、それぞれを認識（位置決めなど）し、作業を行なうものである。いわゆる固定型知能ロボットの視覚機能である。それに対し、環境認識は、メカニズムやセンサに加えて、自らが働くためのエネルギー源や情報処理装置をすべて内蔵し、それ自体が一つの個体として自由に移動し作業を行なう自立移動ロボットを目指した研究である。

カーネギーメロン大学のMoravec氏は、知能のうち動物の持つ直感的な認識および行動の能力は、移動することと極めて密接に関係すると主張している[Tachi 86]。つまり、移動可能なロボットに必要な技術の方向は一般的な知能の方向に向かうのに対して、移動しないロボットの場合は、その作業に固有の特殊な解決法に終わることが多いとしている。自由に移動して回るということは、構造化されていない環境にも対処していかなければならないことを意味しており、既知の知識のみでは不十分となって、そこに人間や動物の持つ知能が必要となるのである。従って、固定型のロボットに対し、環境を認識して自律的に移動できるロボットは極めて広い応用分野を持つ。

環境内を自律的に移動できるロボットに対しては、工場内の搬送車やオフィス、プラント内を監視する巡視点検ロボットなど、多くのニーズがある。また自律機能

は、車載ナビゲーション用の視覚機能としても有望である。現在までに、白線などのガイド上を移動するロボットは、数多く開発されたが、自律的に移動できるロボットはない。これでは、今後増大するニーズに対処できないため、自律的に移動するための視覚機能が要望される。応用分野としては、野外の一般自然環境、屋内オフィス環境、水中、空中、宇宙、家庭内サービスという多岐にわたり、その社会的意義は大きく、その発展性が期待できる。

自律移動するロボットの研究は、米国のDARPAのAutonomous Land Vehicle計画やNASAのMars Rover計画を中心にMIT,カーネギーメロン大、スタンフォード大などで、視覚を用い、道路の検出、自己位置の同定などの環境を認識する研究が盛んに行なわれている。1970年代では、JPL（ジェット推進研究所）のMars Roverやスタンフォード大学のStanford Cartがその代表的なものであった。実用化にはほど遠いが、Stanford Cartは、室内の環境で、静止した障害物を回避しながら10分から15分ごとに1m移動できた[Moravec 83]。しかし、自律移動ロボットの研究が、現在の様に盛んにかつ大規模に行なわれる様になった直接的きっかけは、1984年のDARPA（国防省先進研究プロジェクト機関）によるAutonomous Land Vehicle(ALV)プロジェクトの開始である。

ALVプロジェクトでは、マーチンマリエッタ社が開発したテストベッド用の車（ALV）を用い、数々の環境でデモンストレーションを行なっている。このALVは図1-1に示すように幅2.7m、長さ4.2m、高さ3.1m、8輪独立懸架駆動で、悪路でも時速8km/hで走行できる。1986年のデモでは、カーブを含む5kmを最高速10km/hでビジョンセンサによる誘導で道路の識別を行ない移動できた[Tunk 87,88]。ALVプロジェクトには、もうひとつNAVLABという総合システムがある[Thorpe 88]。このシステムは、カラーカメラとERIM レーザレンジファインダ[Zuk 85]を主センサとして持つ（図1-2,1-3）。前期のマーチンマリエッタ社のALVが速度を主題としていたのに

対し、NAVLABは異なる天候下での動作、様々な道路環境への対応など高度な処理に重点が置かれていた。主に道路の識別、障害物の検出を行なっている。道路の識別は、道路の色情報と道路の幾何モデルを用いたSCARF(Supervised Classification Applied to Road Following)と呼ぶシステムを開発し、数種類の道路領域や非道路領域を示す色に関する知識を用いて、ベイズの定理により道路領域を検出し、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[Thorpe 88,Waxman 87]。障害物の検出は、ERIMの距離センサを用い、距離画像から各画素での面の法線ベクトルを求め、この法線ベクトルから障害物の有無を検出している[Hebert 89(b)]。

その他屋外道路環境を視覚誘導により走行する研究は、数多く行なわれている[Graefe 90][Mori 89]。最近では、NASAのMars Roverの計画により、火星探査ロボットの研究が、CMU[Kweon 90][Hebert 89(a)],テキサス大[Talluri 90]など多くの機関で活発化して来た[Leviit 90]。

自律移動ロボットは、その適用する場所によって、屋内用と屋外用に大別できる。前記のDARPA ALV,NASA Mars Roverは屋外型の代表である。屋内環境を対象とした研究も多くの研究機関で行なわれている。

CMUのH.Moravecらは、Pluto,Neptune,Uranusという小型ロボットを開発し、Denning社の監視ロボットに使われているソナーシステムを開発した[Moravec 83]。このロボットは、多くの研究機関でも活用されている。彼らは、解像度の低くノイズの多いソナーのデータを確率的な方法で融合することで信頼性の高い地図を作り上げるといったCertainty Gridという方法を研究している。さらにソナーとステレオのデータ融合も試みている[Elfes 87]。このセンサ融合と不確実性の系統的扱いについては、多くの研究がなされている。

SRIでは1970年代のSHAKEYにちなんでFLAKEYと名付けられた小型移動ロボット

を作り、動的に変化する環境に反応するシステムの研究を進めている。この研究の特徴は、他の移動ロボットの研究がヒューリスティックでinformalなアプローチが多い中formalで論理的な記述に基づいていることである[Kaelbling 86]。

環境認識といっても、屋内、屋外、さらに火星、海底などでは環境も異なり、必要とされる機能も変わる。しかしこれら環境の違いはあるが、移動ロボットを誘導するうえで、以下の視覚機能が共通して要求されるものと考ええる。

- (1) 走行路の認識（自己位置の同定、ランドマークの検出など）
- (2) 障害物の検出、衝突回避

(1) 走行路の認識では、今まで多くの研究が成されてきたが、(2)については、静止した障害物のみを扱うケースが多く、例え動く物体があったとしても、ロボットはその移動物体がいなくなるまで停止し待つだけであった。すなわち従来の研究では、オフィスや公園、道路などを対象としているが、人や車など移動する物体がほとんど存在しない理想的な環境を扱っていた。しかし一般に我々が生活する日常環境には、自動車、自転車、人など様々な物体が混在し動き回っている。従って、車や一般人が混在する環境下でも移動物体を回避しながら移動できる現実的なロボットが必要である。

ここで、このような人工環境（工場内、オフィス、市街地など）では、必ずしも移動物体は前方より接近してくるとは限らない。側方、後方からの移動物体の接近による危険も生じうる。事実、人が自動車を運転する場合も、発進や右折左折の際にルームミラーないしドアミラーで後方の確認を行なっている。、よって移動ロボットにおいても、移動しながら全方位の情報を獲得することが望ましい。

全方位の視覚情報を獲得する研究には、水平面内でカメラを回転させる方法

[Zheng 90a,90b][Ishiguro 90b]、魚眼レンズを鉛直に設置する方法[Oh 87][Cao 86]、円錐ミラーを用いる方法[Jarvis 88]などが提案されている。カメラを回転する場合、精度のよい全方位画像を得られるが、1シーンの撮像に時間を要するため、リアルタイムでの応答を必要とする衝突回避の問題には不向きである。魚眼レンズを利用する場合、得られる画像情報は、必ずしも観測する必要のない天井等を多く含むため、本来衝突回避に必要なロボット自身の側方の観測が不十分となりやすい。これらに対し、円錐ミラーの利用は、画像歪は発生するが、移動ロボットの周囲パノラマ状の視野領域を一度に観測できる利点を有する。Jarvisは、円錐ミラーを用いた能動方式の全方位レンジファインダを提案したが、著者の知る限り同センサによる実験結果は発表されていない。さらに従来の全方位視覚の研究では、いずれも移動物体を含むシーンには適用されていなかった。言うまでもなく、ロボットは移動しながら、環境内の静止・移動物体との衝突を回避する必要がある。筆者らは、Jarvisの研究とは関係なしに、円錐ミラーを用いる受動方式の全方位視覚センサCOPIS (Conic Projection Image Sensor) を提案し[Yagi 89,90]、このCOPISにより建屋内などの人工環境で考えられる一般的特徴と運動の一般的性質を利用することで、移動物体を含む環境でロボットが衝突することなく移動できるための視覚誘導の一方法を提案する。

ここではCOPISシステムについての構成と、ロボットが移動中に撮像した時系列画像から得られる物体の移動軌跡より、環境構造物までの距離を計測し環境モデルを構築する方法と、さらに衝突の危険がある障害物や移動物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について報告する。さらにここで提案した方法を用いて、移動物体がある建屋内をロボットが移動した場合の実証実験の結果を示す。

以下、本論文は、6章からなり、主題は第2章から第5章に示す。前半第2、3

章では、移動ロボット用センサについて、第4、5章では、視覚誘導の観点から位置情報の獲得方法、移動物体との衝突回避の方法について述べる。

第2章では、従来技術を移動ロボット用センサの違いから単眼視、複眼視、移動視、レンジセンサ、全方位視に分類し、その特徴と問題点について検討する。

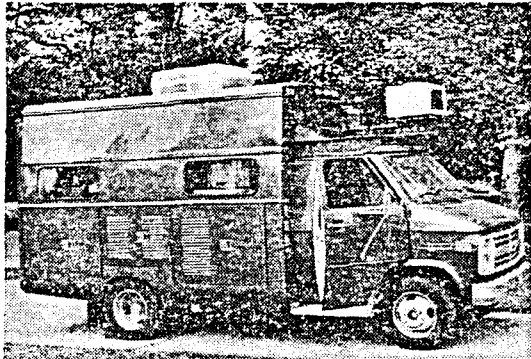
第3章では、第2章で示す問題点を解決するセンサとして、円錐ミラーを用いる受動方式の全方位視覚センサCOPIS (Conic Projection Image Sensor) を考案し、その基本原理について述べる。

第4章では、第3章で考案した全方位視覚センサCOPISを用い、ロボットが移動中に撮像した時系列画像から得られる物体の移動軌跡より、環境構造物までの距離を計測し環境モデルを構築する方法について述べる。さらに実際の屋内廊下で移動した場合の実験結果から、計測精度について考究する。

環境内に移動物体がある場合は、ロボット自身も動いているため、それらの位置や運動を推定し、衝突回避を行なうことは容易でない。しかし移動物体が直線運動すると仮定すれば、ロボット移動による物体の方位角の変化から、衝突の危険性がある移動物体や障害物を検出できる。第5章では、時系列画像から得られる物体方位角の移動軌跡から衝突の危険がある障害物や移動物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について報告する。さらにここで提案した方法を用いて、移動物体がある建屋内をロボットが移動した場合の実証実験の結果を示し、本方式の有効性について検討する。



Fig.1-1 DARPA-ALV の外観



(a) 外 観



(b) 内 部

Fig.1-2 CMU NAVLAB の外観



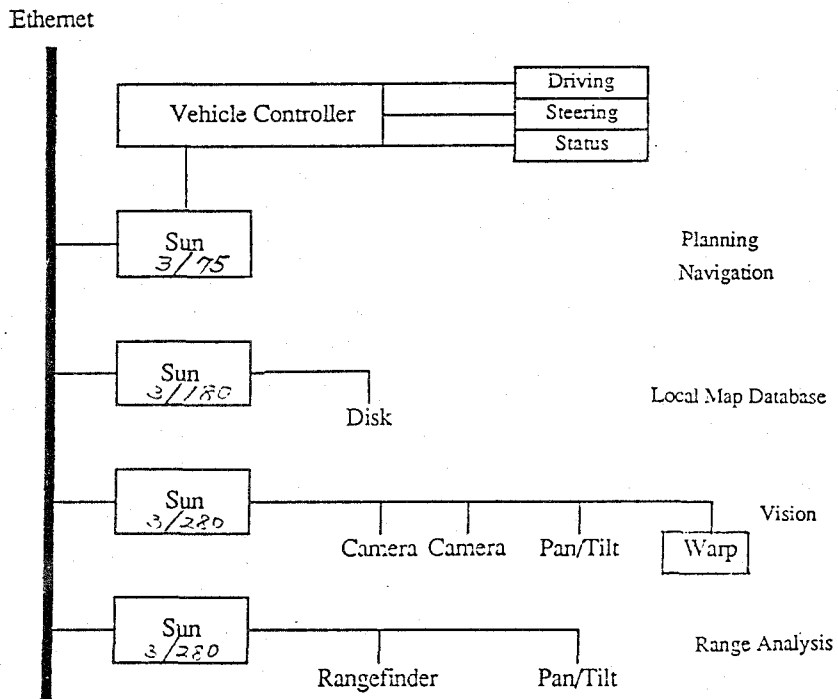


Fig.1-3 NAVLAB の計算機システム構成

## 2章 移動ロボット用センサ

本章では、移動ロボット用として利用されてきたセンサについて、1) 単眼視、2) ステレオ視、三眼視、3) 光投影法、超音波計測、4) 全方位視に分けて、その原理と代表的な従来研究について概説する。

### 2-1. 単眼視

一般に単眼視では、スケールファクタがないため、某かの前提条件を設けなければ、距離情報を得ることができない。前提条件としては、対象物体についての環境モデルを持つ方法と、環境についてのヒューリスティックな条件を設ける方法が、よく利用される。

Yachidaらは、環境モデルを利用し、経路発見や環境認識を行なう研究を行なった[Yachida 83]。図2-1に環境モデルの一例を示す。ロボットの内界センサ（位置センサなど）より得られた位置、姿勢情報を基に環境モデルから現在の視点（位置、姿勢）で見えるはずの画像を作成する。一方、入力画像からエッジを検出し、その中から安定して求めることのできる垂直エッジを検出する。この入力画像から検出された垂直エッジと前記画像モデルとの間で照合を行ない、位置、姿勢の正確な値を求める。さらに入力画像とモデルとを比較し、モデルにないものがあれば、異常として検出する。これらの処理は、所定量移動するたびに行ない、環境全体のモニタリングを行なった。

道路の認識では、環境についてのヒューリスティックな条件が利用される。Thropeは、道路の色情報（アスファルト色）と幾何モデルを用いることで、道路領域の識別を行なっている[Thrope 88]。よく利用される条件には、色情報の他に、図2-2に示す様に道路の端ないし中央の白線の幾何学的特徴（例えば、消失点）[Liou

87][Brzakovic 89]、道路標識[Mori 90][Blancard 90]がある。これら研究以外にも環境モデルとヒューリスティックな条件を利用した研究は多い[Waxman 87][Draper 89][Stephen 89]。ドイツのミュンヘン大学では、道路の両端の白線を追尾する方法で、アウトバーンを時速100kmで自動走行した[Mysliwetz 87][Greafe 90]。

産業応用としては、白線追尾によるロボットの誘導方式がある[Ishikawa 88]。ロボット上に搭載されたITV CAMERAからの視覚情報により、ガイドライン上を移動する。カメラはガイドの白線を観測できる様に、前方下方を観測する。ガイドラインは視野のなかで、上下方向の直線ないし曲線として現われる。そこで、水平方向に走査することで、ガイドラインを検出する。さらに異常なパターンが発生した時は、障害物として検出し、ロボットは衝突するまでに停止する。実験結果は、野外アスファルト上で行なわれている。

いずれにしろ単眼視の問題点は、環境に対し固有な拘束条件を利用するか、環境についてのある程度詳細なモデルを持たなければならないため、動的に環境が変化するオフィス、一般家庭では適用困難と考えられる。但し、産業応用の目的では、環境に対し特種な拘束、いわゆる白線を引くことだできるため適用可能である。

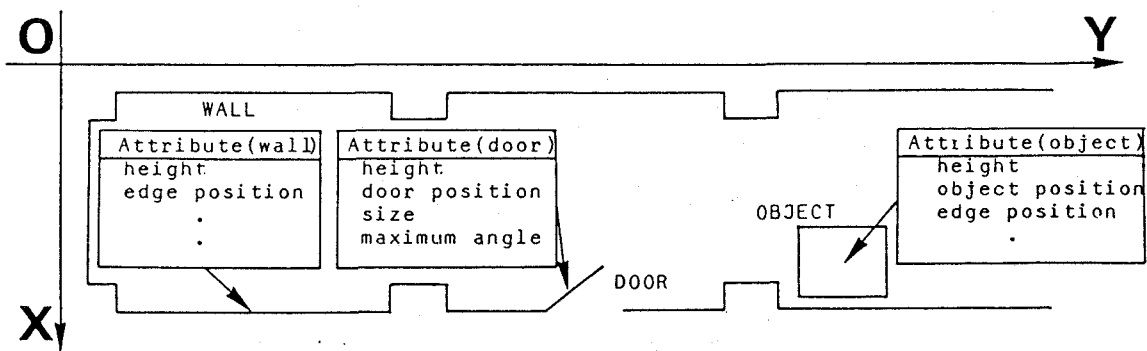


Fig.2-1 経路の環境モデルの一例

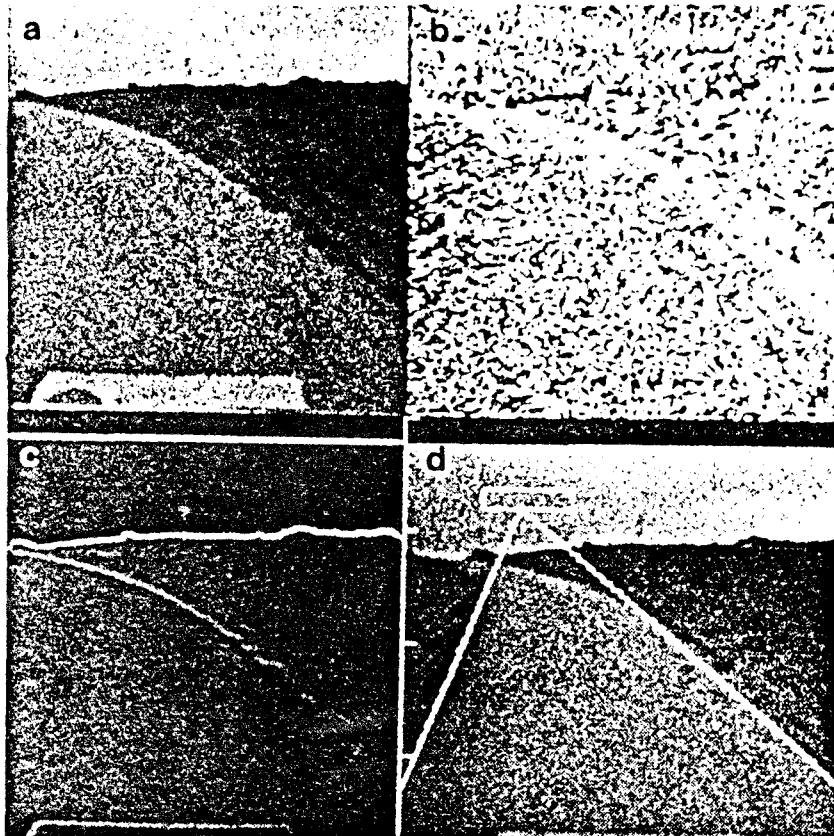


Fig.2-2 消失点を利用した道路検出 (Liou 87 参照)

(a) original picture, (b) direction map

(c) magnitude map, (d) output picture

## 2-2. ステレオ視、三眼視

2台のカメラを用いると、単純な幾何学的原理（三角測量）に基づいて、シーンの三次元情報が直接的に得られる。その原理を図2-3に示す。 $F_1, F_2$ はそれぞれカメラ $C_1, C_2$ のレンズ中心（焦点）で、事前にその三次元位置はわかっているとす。今、空間中の点 $P$ が左右の画面 $C_1, C_2$ で、各々点 $p_1, p_2$ に映ったとす。そうすると、三次元位置は、 $F_1p_1, F_2p_2$ の2直線の交点として、三角測量により求めることができる。従ってステレオ視は、人と似た視覚系として多くの研究[Strojohann 90][Mowforth 90][Ferrari 90][Onoguchi 90]が続けられている。例えば、Faugerasらは、ステレオ視より得られた環境内の3次元情報をDelaunay Triangulationと呼ぶ三角形の空間領域によって表現し、ロボットが移動することで観測結果を徐々に更新していく方法を提案し、より正確な認識結果を出した[Faugeras 90]。しかしステレオ視の問題点として、シーン中で同一の点を両画面間で対応付ける必要がある。対応付けの手法としては、特徴照合法、動的計画法、Coarse-fine法など幾つか手法があるが完璧な方法はない。対応付けの曖昧さを減らす方法としては、1台カメラを増やす三眼視法がある[Kitamura 90]。Ayacheは、直線セグメントのような高次特徴を対応単位に用い、三眼視により得られる幾何学的拘束条件を併用することで、対応の曖昧さを大幅に小さくした[Ayache 87]。またステレオ視にレーザレンジファインダを融合することで信頼性を向上している研究もある[Grandjean 89]。しかし完全に対応付けの問題は解決されていない。

またこれらの方法を用いれば、対象物体の詳細な形状を獲得することができるため、ロボットが作業を行なう場合は特に有効な方法であるが、カメラの台数が増えれば増えるほど、観測可能な視野領域が狭くなるため、ナビゲーションの目的には不向きとも言える。

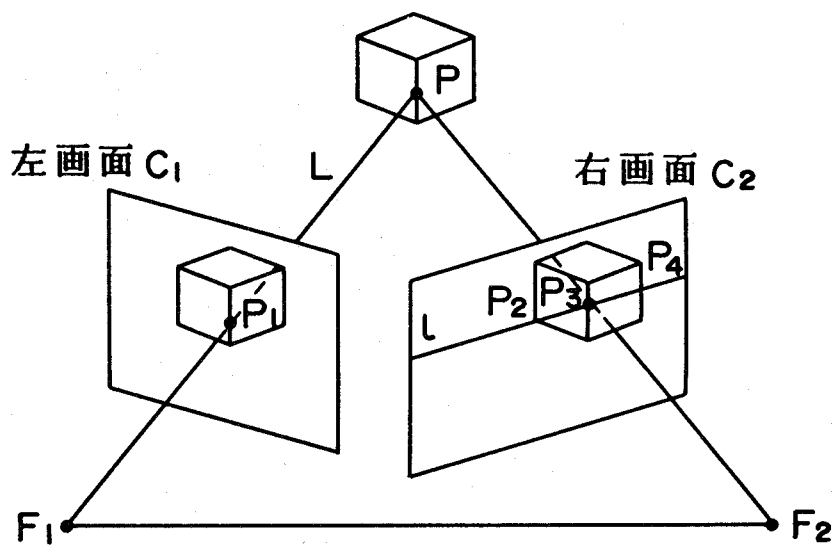


Fig.2-3 三角測量の原理

### 2-3. 移動ステレオ視、動画像視

移動ステレオ視、動画像視と呼ばれる動画像解析の基本的アプローチは、ある2つの時刻での入力画像を解析し、ある特徴点の移動ベクトル（オプティカルフロー）から物体の構造や運動を算出するものである。ステレオ視が空間的な位置の違いを利用したのに対し、動画像解析は3次元時空間内の幾何学構造を利用した。ステレオ視では、対応付けの問題が重要な課題であったが、動画像解析では、時系列画像間のサンプリングを短くすることで、対応点の探索範囲が小さくできるため、前記のオプティカルフローも容易にできる。当初、PrazdnyやBruss and Hornなどにより理論的に研究された[Prazdny 81][Bruss 83]。その原理を以下に示す。

今、観測者が並進速度(U,V,W),回転速度(A,B,C)で移動したとき(図2-4)、シーンの点P(X,Y,Z)のカメラ座標系での速度(X',Y',Z')は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} X' &= -U - BZ + CY \\ Y' &= -V - CX + AZ \\ Z' &= -W - AY + BX \end{aligned} \quad (2-1)$$

また点Pの像点p(x,y)でのオプティカルフロー(u,v)=(x',y')は、次式となる。

$$\begin{aligned} u &= (-U/Z - B + Cy) - x(W/Z - Ay + Bx) \\ v &= (-V/Z - Cx + A) - y(-W/Z - Ay + Bx) \end{aligned} \quad (2-2)$$

よって、5点以上でオプティカルフローが得ることができれば、各運動パラメータA,B,C,U/W,V/Wは計算できる。しかし実際のシーンから正確なオプティカルフローを抽出することは困難であり、実シーンへはほとんど応用されていなかった。



Yagiらは、運動パラメータを回転成分と並進成分に分割し逐次求めることで、屋内環境への適用を試みた[Yagi 85,86(b)][Tsuji 85]。彼らは、消失点や無限遠点などの並進成分の影響を受けない点を利用し回転成分を求め、回転成分が算出された後並進成分から得られる動きの無限遠点(FOE)とカメラ移動距離の情報から並進成分を求めた。図2-5に廊下を移動したときの入力画像、図2-6にカメラ移動により得られたオプティカルフローを示す。図2-7はオプティカルフローから算出した距離計測結果である。さらに彼らは、環境内に動物体を含む場合についても、オプティカルフローの相対的な大きさが動物体と背景で異なることを利用し、両者を分離し、移動ロボットの行動に必要な情報を得ることに成功した[Yagi 86(a)][Tsuji 86]。図2-8は動物体が検出された一例である。しかし、計測精度はあまり良くなく、移動速度が小さい物体に対しては十分な計測が行なえなかった。またこの手法で環境モデルを構築するには精度が低かった。

Spetskisらは、対象物体上の13本以上の直線が観測できれば、運動パラメータは計算できるという方法を提案し、シミュレーションで実験した[Spetskis 90]。しかし、実環境で同一物体上に13本もの直線が観測できることは稀であり現実性はない。しかしながら時間軸を考えた観測は、静止しては得られない運動の情報を獲得できる。またその上、積極的に動けば、観測しやすい様に自己を持っていくこともできる(Active Vision)。Ishiguroらは、カメラ回転台の正確な回転情報を基に注視点制御による3次元位置計測を行ない、注視点制御により精度が向上することを示した[Ishiguro 90(a)]。従って移動ロボットを誘導する目的に対しては、時空間の観測は非常に有効な計測手段である。

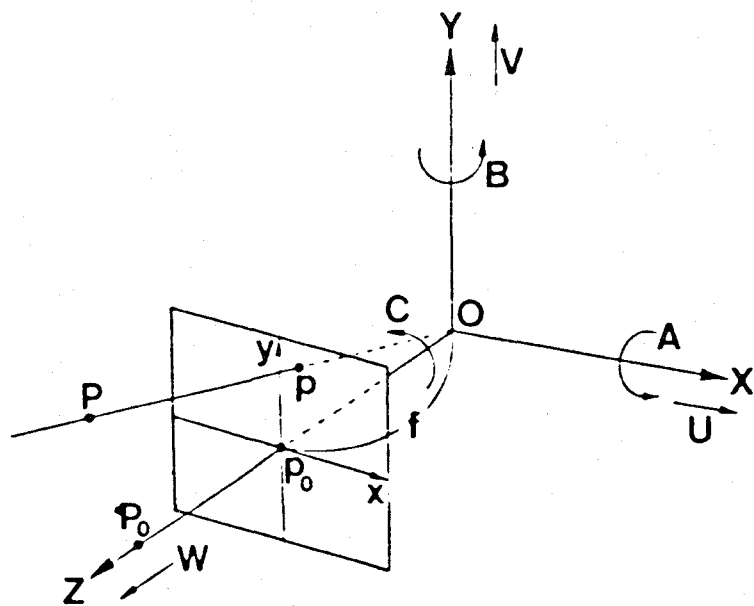


Fig.2-4 カメラ運動と座標系



Fig.2-5 入力画像の一例



Fig.2-6 オプティカルフロー

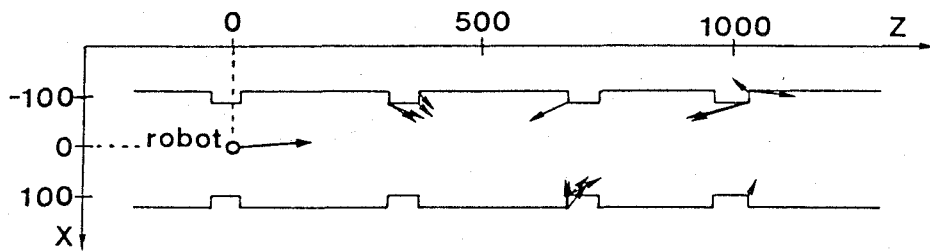
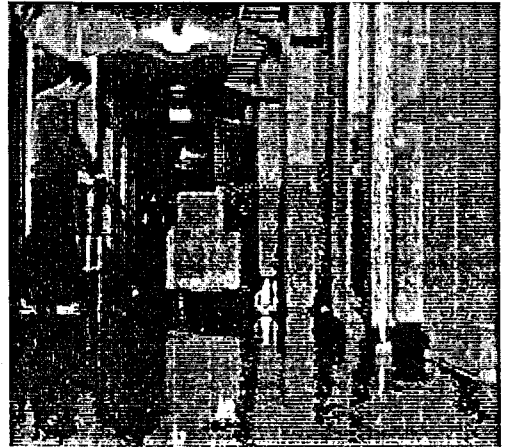
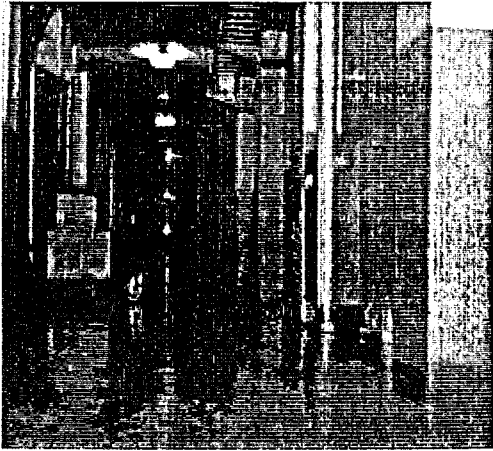
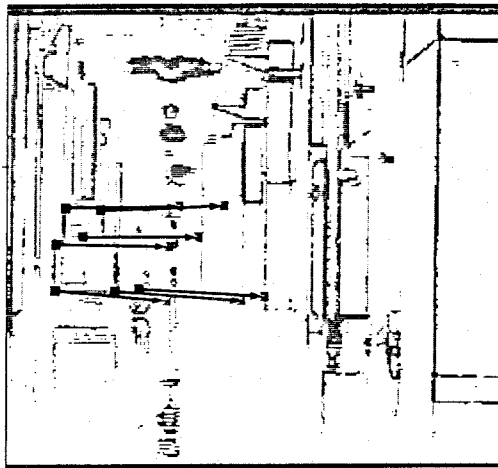


Fig.2-7 オプティカルフローによる距離計測結果



(a) 入力画像 (1 フレーム) (b) 入力画像 (8 フレーム)



(c) 動物体検出結果

Fig.2-8 動物体検出結果

## 2-4. 光投影法、超音波計測

光、音波などを対象に投射して、その伝播時間や変位などの反射を観測することで、能動的に対象までの距離を計測する方法がある。

Elfesは、ソナー情報を利用した地図作成および航行システムを開発した[Elfes 87]。移動と共に得られる新しいソナー情報を使ってロボットの真上から眺めた2次元地図を更新し障害物を検出している。彼は、抽象軸、分解能軸、地図軸の3つの軸からなるソナー地図の階層構造表現を提案している。またCrowleyは、ロボットの周囲に取付けられた24個の超音波センサからの距離情報をもとに、移動可能な空間を見つける方法（環境モデルの構築）を提案している[Crowley 89]。各視点での観測結果を統合し、環境のモデル（Composite Local Model）を構築した。観測されたLine segments(レンジデータの境界線)の照合からロボットの位置を更新するのにカルマンフィルタを用いた。このように自由空間を検出する研究[Noborio 90][Malkin 90]は多く行なわれているが、一般に音波、超音波を用いた場合、光と比べ指向性が低いため、得られる距離情報の精度があまりよくなく、また運動物体が複数存在する場合、その区別が困難であると言った問題点がある。

超音波に対し精度良く距離情報を獲得する方法に光投影法がある。光投影法には、大別して、1) 光の伝播時間を利用する方法（レーダ）と2) 三角測量に基づく方法とがある。

### 1) 光の伝播時間を利用する方法

正弦波のような一定周期の繰り返し波形では、時間遅れは位相差として観測できる。光パルスの帰還時間と言った瞬時の計測より波形全体を観測して、その位相差を求めるほうが精度の高い計測が期待できる。ALV用距離センサとして、ERIM社が開発した距離画像計測装置は、半導体レーザを7MHzでパルス変調し、反射光でPLL(Phase Locked Loop)を駆動し、デジタル位相検出を行なっている[Zuk 85]。一

波長は約43mであり、これを256クロックで位相検出するため、分解能は8cmとなる。高速入力性を持ち、256×64画素の距離情報を0.5秒で入力できる。Beyerは、DARPAのALVプロジェクトの一貫としてERIMで開発された Laser Range Imagerからの距離画像を利用したナビゲーションの研究を行なった[Beyer 90]。前方観測により得られた距離画像は、ガイドのための周りの環境のマップ情報および障害物の検出用として処理される。道の検出と追跡は、距離画像と反射率地図を用い、40 km/hrでロボットは野外環境を走行可能である。その他ERIMのレンジファインダは、多くの研究機関で利用されている[Bolles 89][Habert 89(a)(b)]。

Millerは、Range finderを回転させることで、全方位の視覚情報を獲得する研究を行なった[Miller 87]。計測原理は、Time-of-flightの考え方を利用している。2mW 0.82 $\mu$ のLEDを光源、フォトダイオードを受光系とし、ミラーを鉛直まわりに回転することで、全方位の距離画像を獲得する。計測精度は5 ft.で1 inch以下である。また最大20ft.まで観測できる。ミラーの回転速度は、一回転1秒以下である。特徴として、投光方式にLEDを用いているため、人に対しても安全である。ただしこれらの研究は、移動物体を含む環境に対して、相手の運動を考慮した研究はなされていない。

## 2) 三角測量に基づく方法

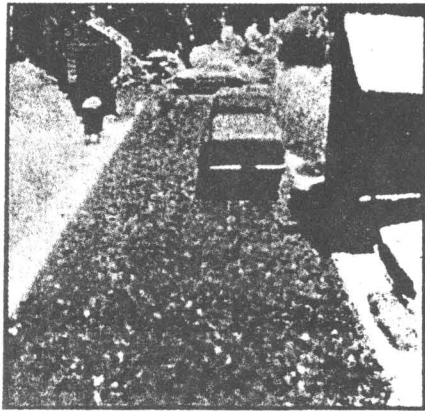
ステレオ視の一方の目を光を投影する装置に置き換えるもので、投影するパターンの種類により、スポット光、スリット光などの種類がある[Yachida 85]。ステレオ視では、対応付けの難しさと物体表面の情報が得にくいと言う問題があったが、この方法では、自ら光を物体に投射することで解決している。

Asadaは、投光法により距離画像を生成し、明度画像と合わせ、これらの情報を多視点で観測した。そして環境を階層構造で表現（ロボット中心の地図、物体中心の地図）することで、静止物体、動物体の区別、および動物体の追跡を可能とした

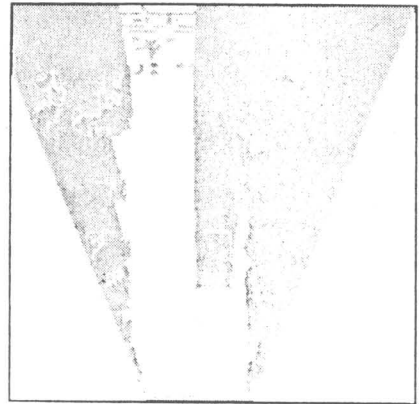
[Asada 89]。図2-9は、実験結果の一例で、交差点を右折するトラックがわかる。しかしこの方法は、実時間で距離画像を作ることが困難である。そのため動物体が存在する環境化では利用しにくい。

また安全性の問題からみれば、光投影法は、一般に人が生活する環境下で光を投射するため、人体に対する影響（失明など）の面で問題がある。

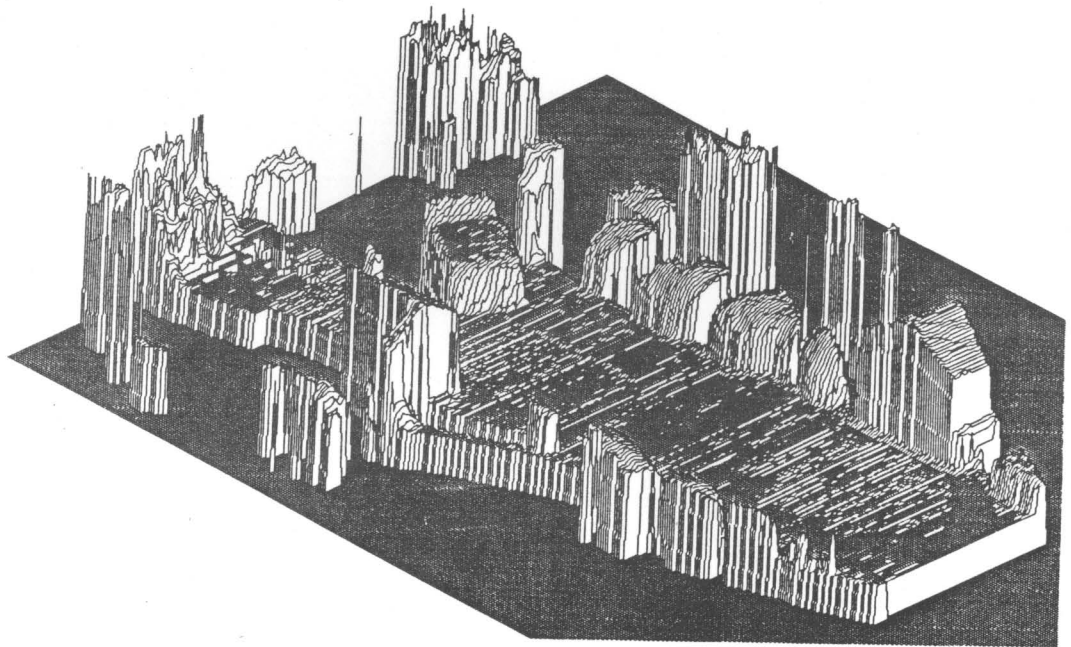




(a) 1枚目の明度画像とその分割



(b) 1枚目の高さ地図の分割  
(淡い灰色: 移動可能領域, 黒: 障害物,  
濃い灰色: 隠ぺい領域, 白: 未探索領域)



(c) 5枚の高さ地図の統合

Fig.2-9 高さ地図の統合結果

## 2-5. 全方位視

ロボットが一般の環境内を移動しようとした場合、単に前方のみを観測していたのでは、周りから近づく人などと衝突する危険性がある。そのため全方位の観測は有用である。

全方位視の方法には、カメラを回転する方法、魚眼レンズを利用する方法、そして本論文で提案する円錐ミラーを用いる方法がある。

カメラを回転する方法は、精度のよい全方位画像を得られるが、1シーンの撮像に時間を要するため、リアルタイムでの応答を必要とする衝突回避の問題には不向きである。Sarachikは、図2-10に示す様な上下2台のカメラによるステレオ視で、室内を巡回走査することで、室の大きさ、形状を決定し、ロボットが自己の位置を同定するための視覚情報を獲得する方式の提案した[Sarachik 89]。最終目標は、オフィスなどの環境マップを構築するためである。前提条件は、

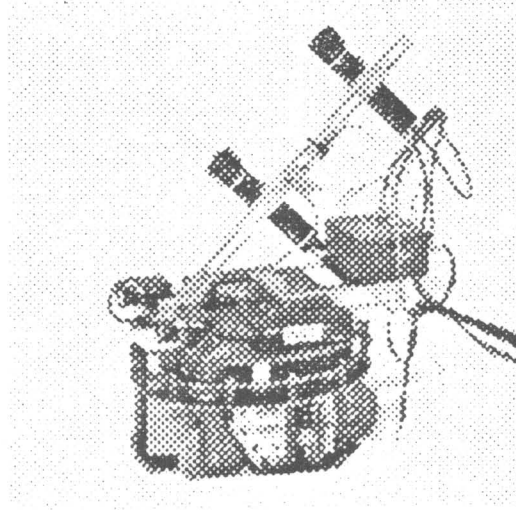
- 1 部屋は長方形である。
- 2 部屋は、壁と天井で構成され、その境界は十分な輝度差がある
- 3 天井は、平坦で傾いていない。
- 4 天井の高さは一定である。(ただし高さはunknown)

である。2台のカメラ間の対応づけは、各々のカメラの1ライン(ストライプ)のみを利用して、両ストライプ間でマッチングを行ない、壁と天井間の境界の垂直方向のオフセットをはかる。さらにこの計測を異なった位置で行ない、カメラの仰角を決定する。カメラの仰角が決定できれば、天井が一定の高さであることから、部屋の幅、高さを決定する。この方法では、室内の壁と天井が同時に観測できるように、カメラを斜め上方に設置し、鉛直軸周りに回転させている。Zhengらは、図2-11(a)に示す様に1台のカメラを回転することで全方位画像(パノラミックビュー)を得ている[Zheng 90a,90b]。彼らの研究では、最初にロボットがある経路を移動し、

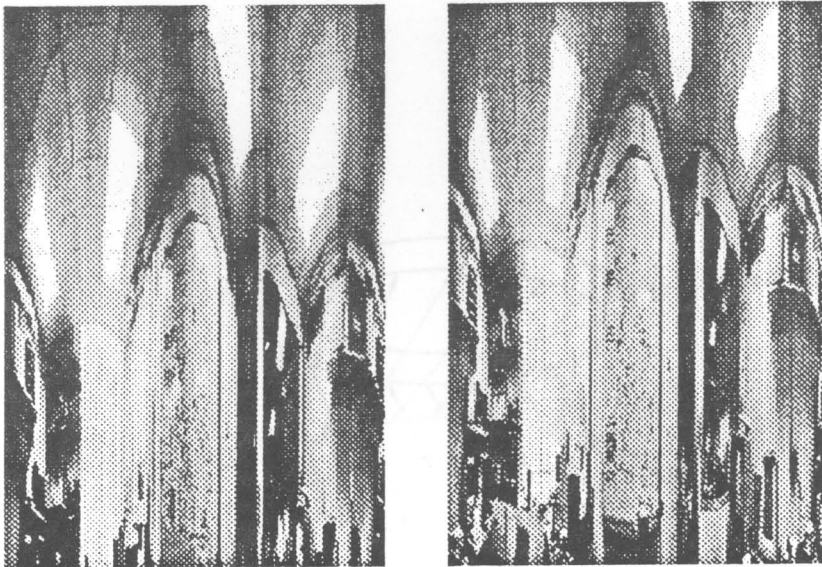
パノラミックビューを構築し環境モデルとする。次にロボットが移動したとき、先に構築した環境モデルと現在位置で得られるパノラミックビューを照合する。位置がずれていても、物体の出現順番は大きく変化しないため、循環型動的計画法を用い照合を行なう（図2-11(b)）。移動ロボットの定性的なナビゲーションには有効であると主張している。Zhengらが一本の垂直スリットからパノラミックビューを作ったのに対し、Ishiguroらは、画像面上に2本の垂直スリットを設け、両スリットの視差を用い、同一物体が両スリットで現われるカメラの回転角度の差から正確な距離を計測した[Ishiguro 90b]。

次に魚眼レンズを利用する方法は、米国のCincinnati 大学で研究されている[Oh 87][Cao 86]。彼らは、芝刈り用ロボットと称し、ゴルフ場などの芝を刈るための視覚誘導を目的としている。図2-12に示す様に視覚センサは、魚眼レンズを鉛直上向きに取付け、上方半球の視野領域を一度に撮像することができる。作業領域に予めLEDなどの光源を複数個取付け、これらをランドマークとしてロボットの位置制御を行なっている。しかし魚眼レンズで全方位の視野画像を得た場合、得られる画像情報は室内で言えば天井ばかりを観測することになりやすい。即ち、必ずしも観測する必要のない上方の領域が多く、本来衝突回避に必要なロボット自身の側方の観測が不十分となりやすい欠点がある。

これらに対し、円錐ミラーの利用は、画像歪は発生するが、移動ロボットの周囲パノラマ状の視野領域を一度に観測できる利点を有する。次章では、本研究で提案する全方位視覚センサCOPIS (Conic Projection Image Sensor) について詳細に説明する。



(a) センサの外観



(b) 入力画像の一例

Fig.2-10 Sarachikのカメラ回転方法

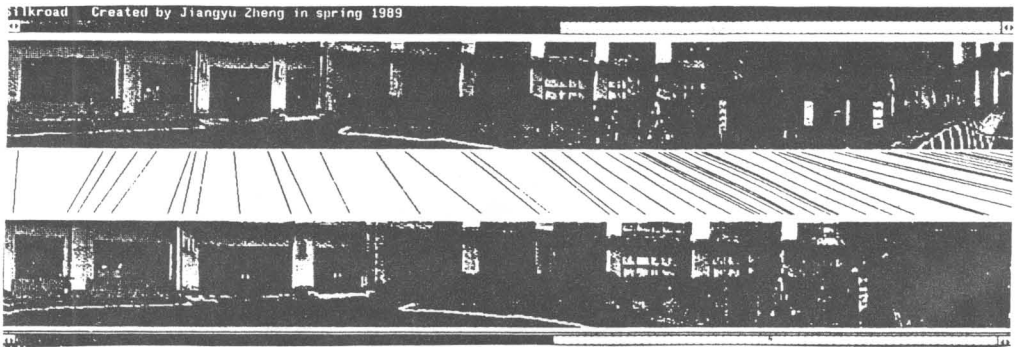


Fig.2-11(a) パノラミックビュー

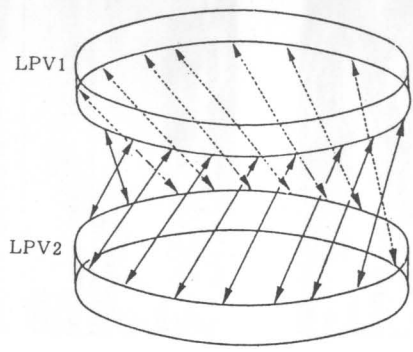


Fig.2-11(b) 循環型動的計画法

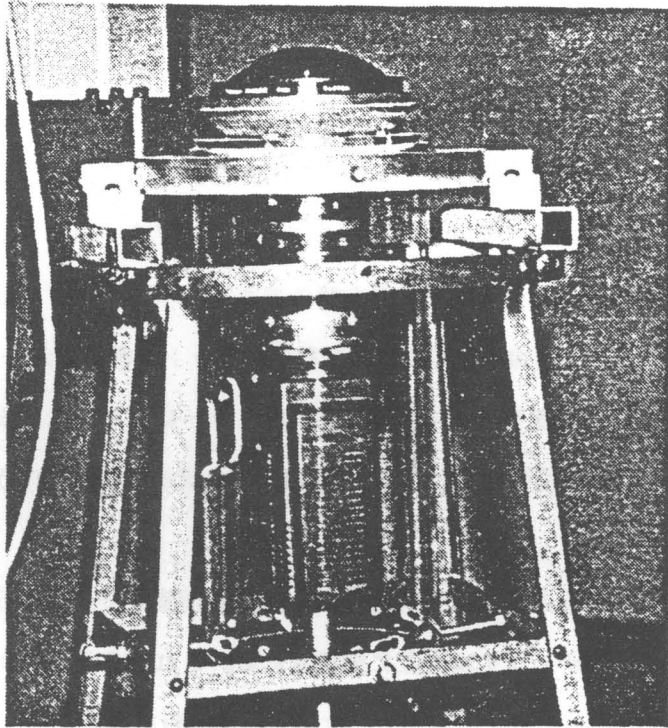


Fig.2-12 魚眼レンズを利用した方法

### 3 章 全方位視覚センサCOPISシステム

本章では、本論文で提案する移動ロボット用の全方位視覚センサについて、そのハードウェア構成、および光学構成と原理について述べる。

#### 3-1. ハードウェア構成

試作したCOPISシステムのハードウェア構成を図3-1に、COPISの外観と寸法を図3-2に示す。本システムは、円錐ミラー、ITVカメラ、ガラス管からなる移動ロボット上のCOPIS部と、地上側のモニタ、イメージプロセッサ、ワークステーションからなる画像処理部、および移動ロボットで構成される。

COPISでは、鉛直下向きに設置した円錐ミラーにより、水平面下方、鉛直軸回りに360度全周が視野領域となる。図3-3は、ロボット移動に伴う連続入力画像の一例である。

移動中に撮像した全方位連続画像信号は、画像処理装置を介して512×480点、各点8ビットのデジタル画像に変換される。これをCPUMC68020の32ビットワークステーションにより処理し、位置・運動情報を得る。

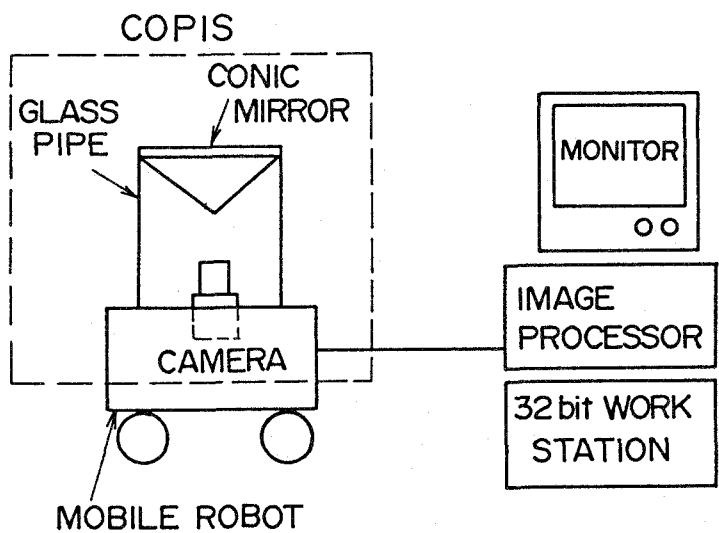


Fig.3-1 COPISハードウェア構成



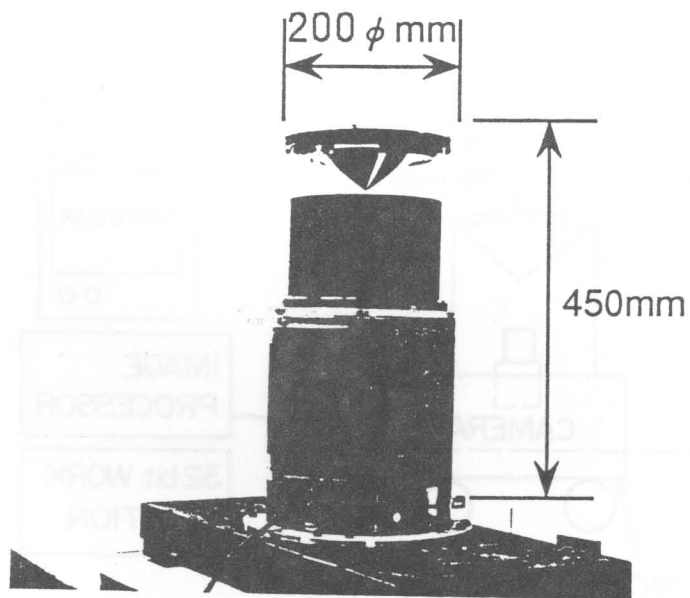


Fig.3-2 COPISの外観と寸法

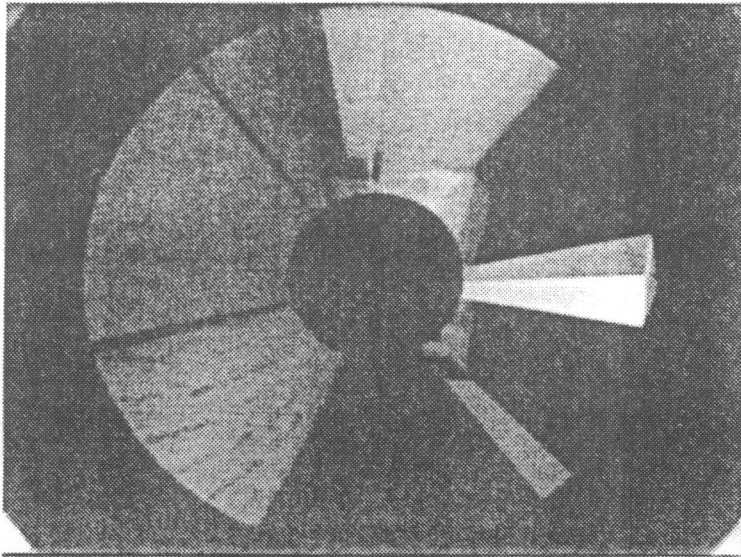


Fig.3-3 入力画像の一例

## 3-2. 光学構成

### 3-2-1. COPISの視野領域

COPISでは、図3-4に示すように鉛直下向きに設置した円錐ミラーにより、水平面下方、鉛直軸回りに360度全周が視野領域となる。そして上下方向の視野角 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ は、カメラレンズの画角 $\gamma$ と円錐ミラーの頂角 $\delta$ により次式で決定される。

$$\alpha_1 = \delta$$

$$\alpha_2 = \delta - 1/2\gamma \quad (3-1)$$

円錐ミラー面を介して見た入力画像では、ミラー面の曲率のため、鮮明な像を得ることが困難である。本システムでは、カメラレンズの焦点距離を短くすることにより、焦点深度を深くし、像のボケを極力抑えている。なお、画像化のための光学原理については、次節で詳細に述べる。

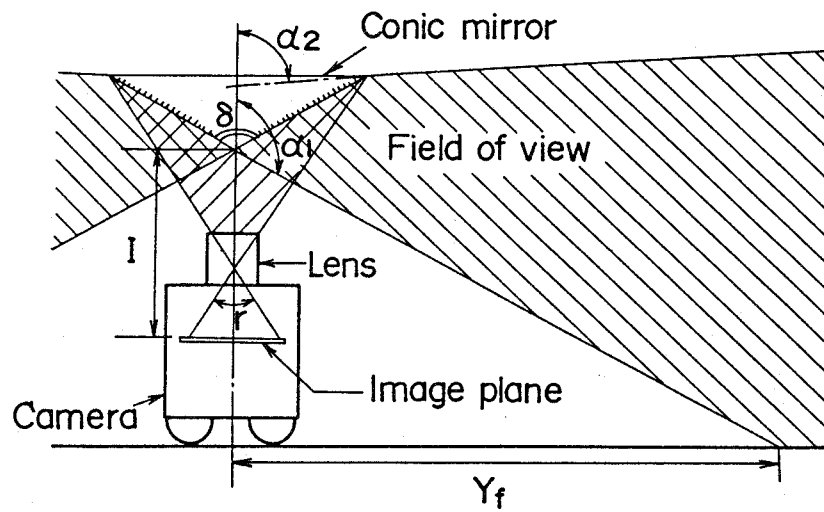


Fig.3-4 COPISの視野領域

### 3-2-2. COPISの光学原理

円錐ミラー面を介してカメラで撮像した場合、ミラー面の曲率のため、鮮明な像を得ることは困難である。一般に従来カメラで撮像した時に生じるボケは、カメラレンズのピントが対象物体に合っていないときに起きる。これは図3-5に示す様に、被写体上の任意の位置Oに焦点を合わせても、その前後では焦点外れとなり像が劣化する。この像の劣化がボケである。そしてこの劣化が許容できる被写体の範囲（奥行き）が物体深度 $O_1 \sim O_2$ である。図3-6に示す様に物体深度は、焦点距離 $f$ 、口径 $D$ のカメラレンズから距離 $s$ の被写体Oに焦点を合わせた時に、その前後の物点 $O_1, O_2$ が撮像面 $O'$ 上で許容されるボケの錯乱円 $\sigma$ を想定した時の幾何学的関係（式3-2）と、最大口径比（Fナンバー）の関係式 $F=f/D$ とを用いることで、許容できる前方物体深度 $O_1O$ 及び後方物体深度 $O_2O$ は、各々式3-3,3-4で表現される。

$$s_1' = Ds'/(D-\sigma), s_2' = Ds'/(D+\sigma), 1/s + 1/s' = 1/f \quad (3-2)$$

$$O_1O = s - s_1 \doteq \sigma Fs^2/(f^2 + Fs) \quad (3-3)$$

$$O_2O = s - s_2 \doteq \sigma Fs^2/(f^2 - Fs) \quad (3-4)$$

円錐ミラーにおけるボケの原因は、図3-7に示すように円錐ミラーの反射面の形状が軸を含む平面方向と軸に直交する面方向で異なるためである。即ち軸方向には平面ミラー、軸と直交する方向には凸面鏡の要素を持つからである。

軸方向については、平面ミラーにより光路が曲げられるだけであるのに対し、軸に直交する方向については、凸面鏡の影響により、実際の被写体位置よりも近い位置に被写体が存在する様に見える。これは、図3-8に示す様に物体 $O_{b1}$ の円錐ミラー面での反射による虚像 $O_{b1}'$ をカメラでは観測したことと同様になる。例えば、図3-9(a)に示す様に円筒管の内面に水平線と垂直線を描き、この円筒管の中心軸とC

O P I S の中心軸が一致する様に設置する。この時カメラレンズの焦点位置を円筒管内面に合わせると、図3-9(b)に示すように円筒管内面に描かれた線のうち、水平線のみが鮮明に観測できる。これは、上下方向には焦点が合うが、左右にははけていることを意味する。即ち軸方向の成分は、平面ミラーの作用で単に光路が曲げられるだけである。次にカメラレンズの焦点を円錐ミラーの近傍に合わせると、図3-9(c)に示すように今度は垂直線のみ鮮明な像が得られる。これは、軸方向に垂直な方向の影響で、対象物体の虚像が円錐ミラーの近傍にあることを意味する。即ち図3-10に示すように物点 $O_{b1}$ の虚像 $O_{b1}'$ が式3-5で表現される距離 $R'$ に存在する。

$$R' = R(2\cos^2\alpha - 1)/(2\cos\alpha) \quad (0 < \alpha < \pi/4) \quad (0 < R' < R/2) \quad (3-5)$$

$R$  : COPIS から物点までの距離

さらに円錐ミラーの近辺の物体 $O_{b2}$ については、 $O_{b2}$ からの円錐ミラーへの入射角が大きいため、虚像 $O_{b2}'$ は $O_{b1}'$ より短くなり、 $R'$ の範囲に含まれる。よって円錐ミラーにおける虚像の位置は円錐体より後方で、円錐体半径の1/2以下の距離になる。

そこでボケの影響を最小限にする方法は、まず第一に円錐ミラーの頂点（カメラとの最短距離）が前方物体深度より近くなるようにする。第二に後方物体深度は数m先の物体まで正確に観測できる様に2、3 mとする。即ち最小錯乱円の直径が画素下になる様にすることで、撮像面での分解能の低下が防げる。一例として、2/3インチの撮像素子の画素数を512x480(pixel)とした場合、最小錯乱円の直径 $\sigma$ を0.01375以下にすれば、1画素以下のボケとなる。また図3-11に上記最小錯乱円を仮定し、物体までの距離を200mmとした場合について、焦点距離 $f$ を4,8,16,32mmと変化させた時の物体深度を示す。さらに画像の分解能をきめる最小錯乱円の大きさについては、式3-3,3-4からもわかる通り、最小錯乱円の直径 $\sigma$ と、Fナンバーが

比例関係であることから、図3-11より最小錯乱円が異なった場合も想像できる。次節で、試作したCOPISの光学系について述べる。

### 3-2-3. 光学系の設計

ロボットを誘導する上で障害となる障害物や移動物体は、側方より接近する場合がほとんどで、上方より落下することは稀である。そこで光学系設計に当たっては、水平面方向から足元2～3mあたりまでが観測可能な視野領域を持つ光学系を設計する。さらに円錐ミラーを介して撮像した場合、画像中心（円錐ミラーの頂点）近傍では、著しく角度分解能が低い。そこで角度分解能が1度以下となる領域のみを観測領域とする。これらの条件のもとで、試作したCOPISの光学系の構成と特性値を表3-1に示す。

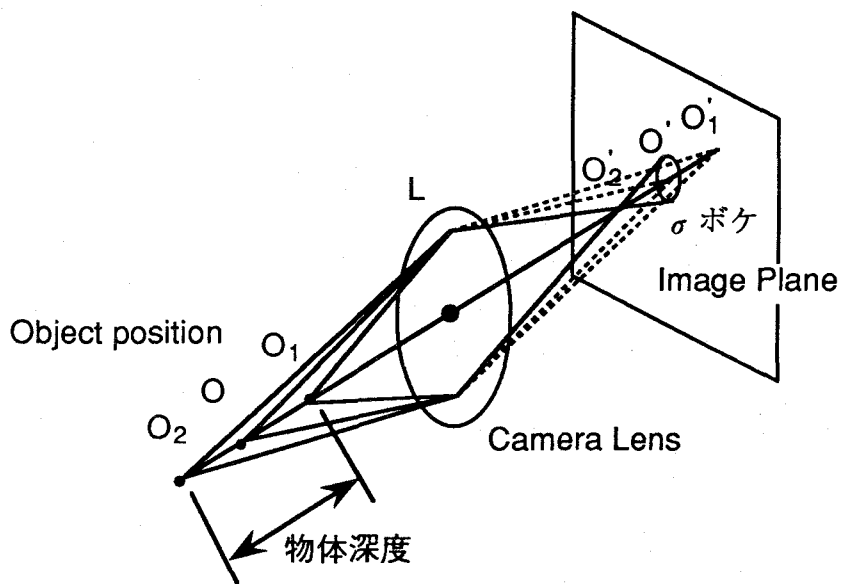


Fig.3-5 像の劣化 (ボケ)



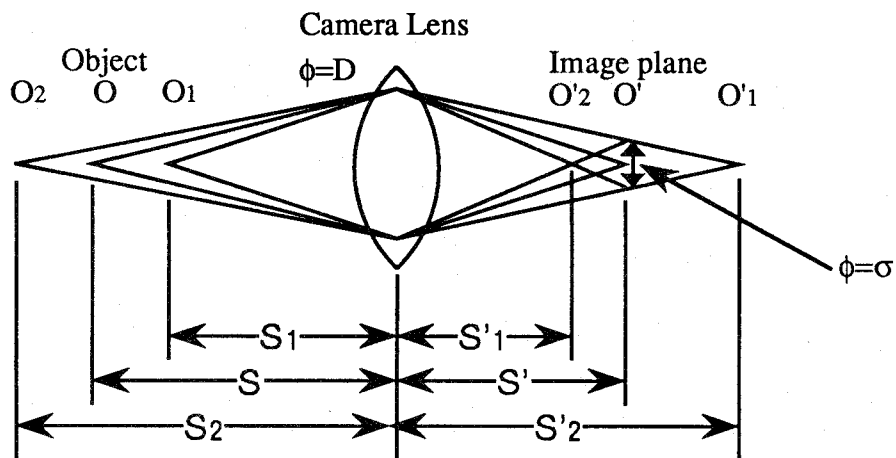


Fig. 3-6 物体深度と錯乱円の関係

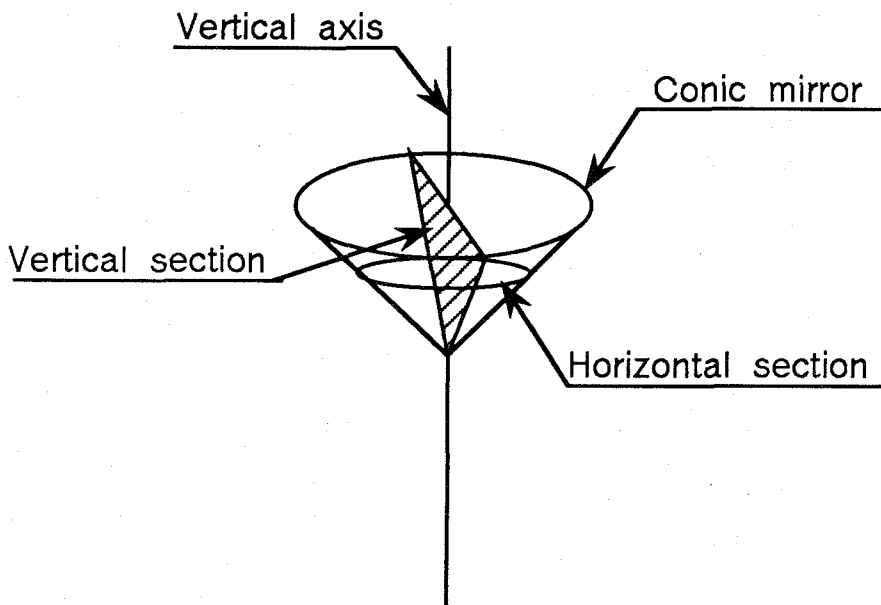


Fig.3-7 円錐ミラーの形状特徴

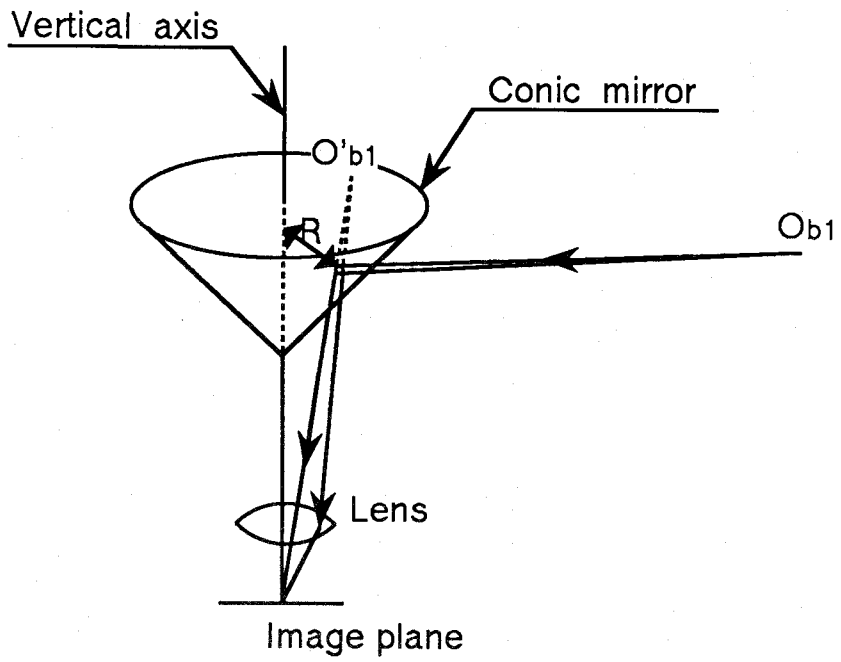
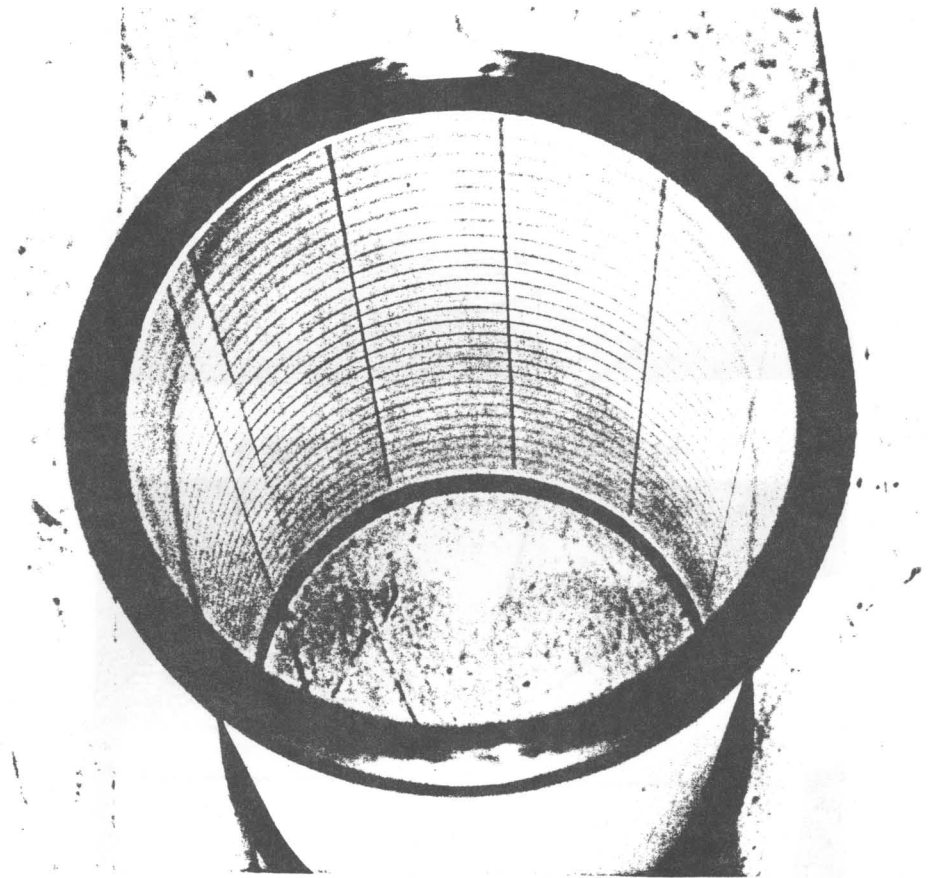
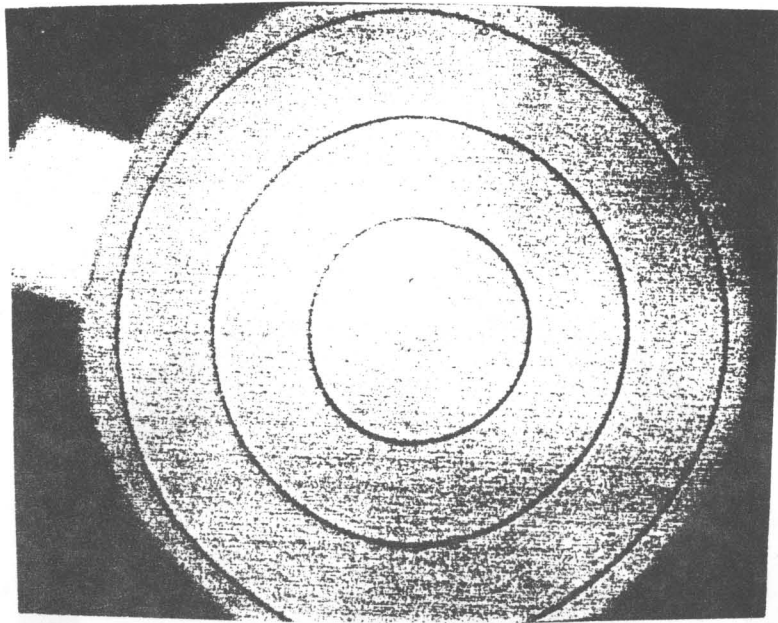


Fig.3-8 円錐ミラーの結像系

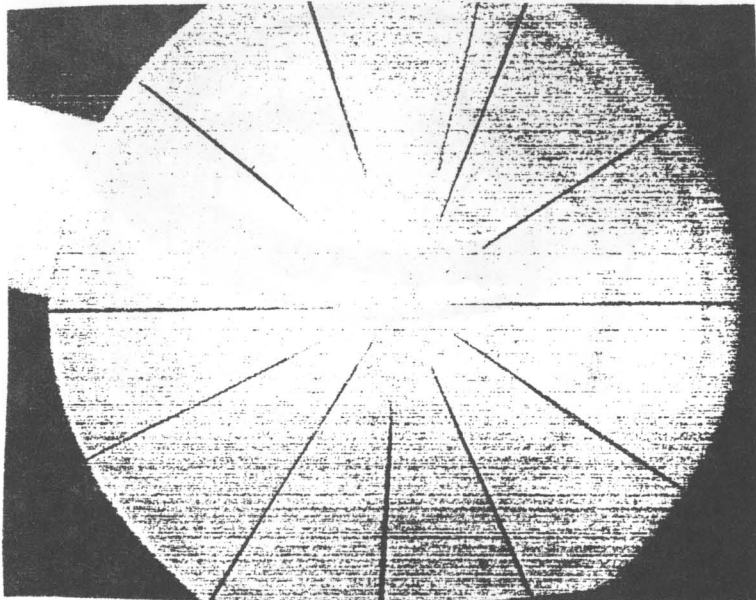


(a) 被写体（円筒管）の外観

Fig.3-9 被写体の見え方



(b) 被写体に焦点を合わせた場合



(c) 円錐ミラー近傍に焦点を合わせた場合

Fig.3-9 被写体の見え方

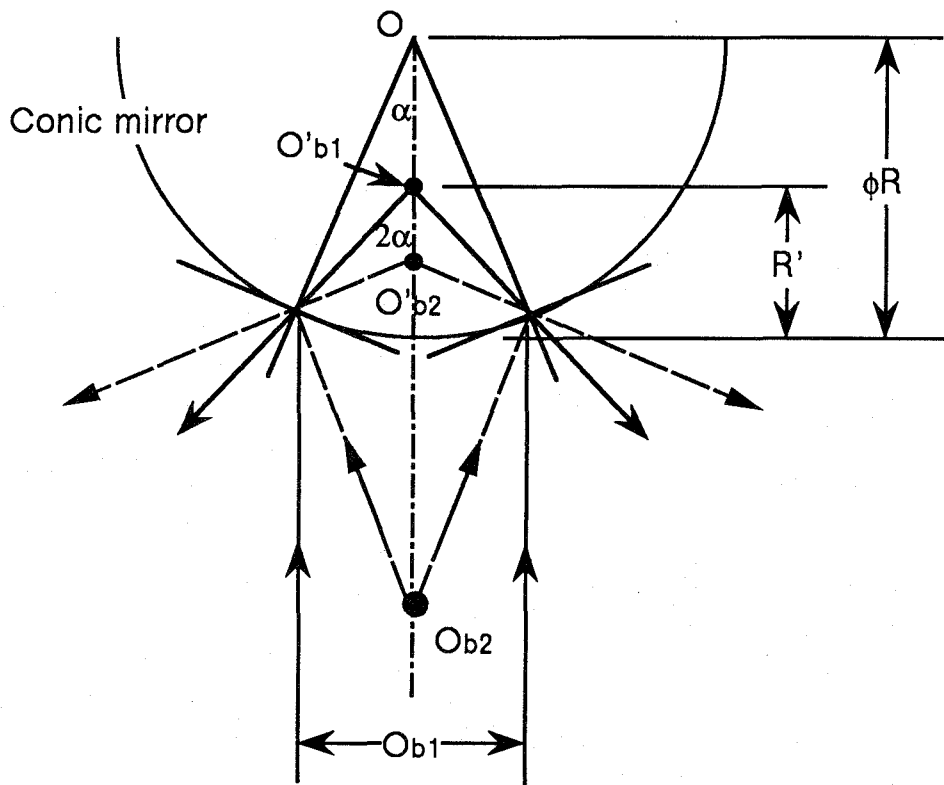


Fig.3-10 水平断面での虚像位置

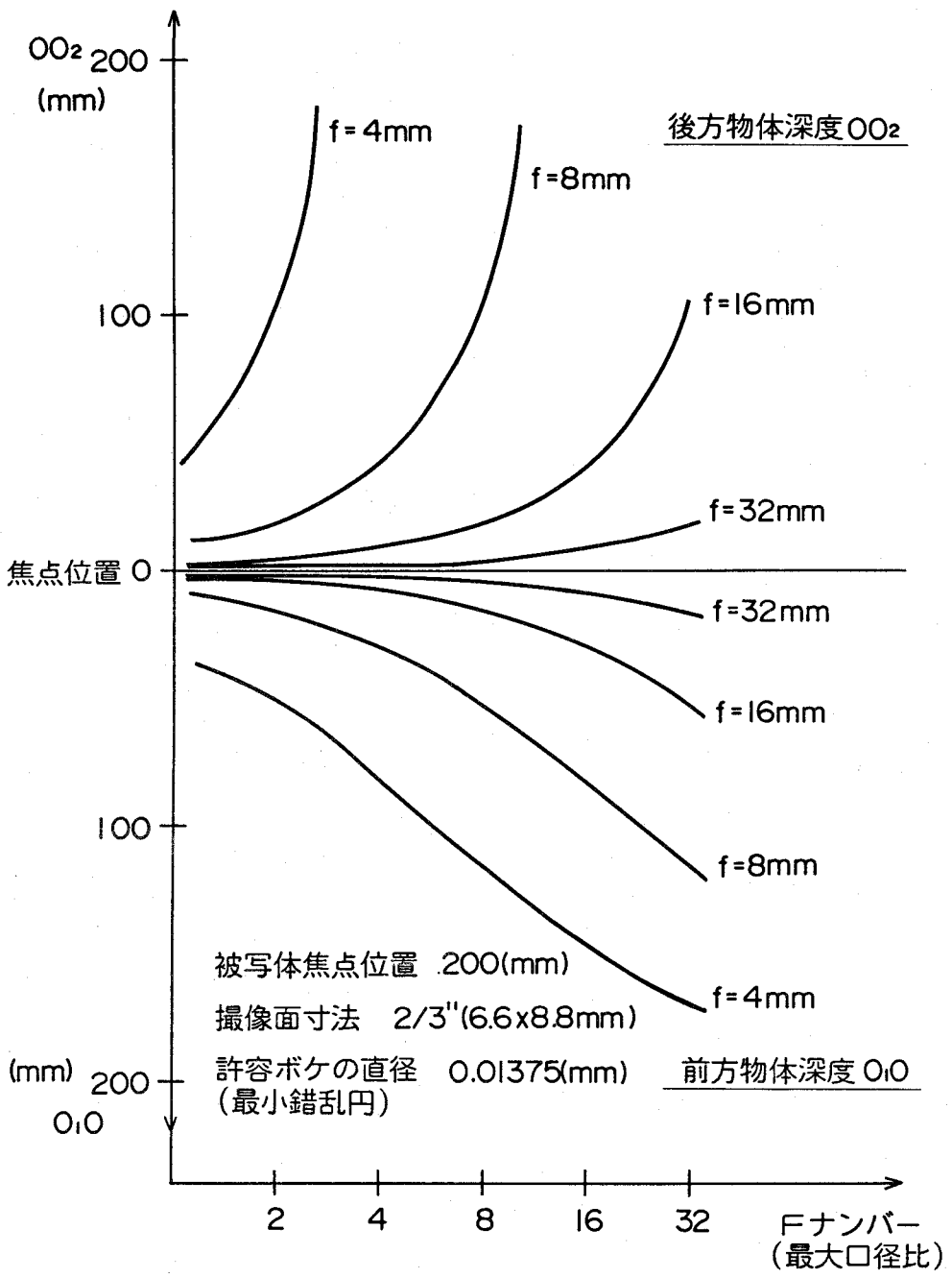


Fig.3-11 物体深度と最大口径比(Fナンバー)の関係

表3-1 光学系の構成と特性値

円錐ミラー頂角 $\delta$	112.6(deg)
円錐ミラー底面直径 R	120.0(mm)
カメラレンズ焦点距離 f	8.5(mm)
カメラレンズFナンバ	16
レンズ中心-円錐ミラー 頂点間距離 I	約110(mm)
下限視野角 $\alpha_1$	112(deg)
上限視野角 $\alpha_2$	90(deg)
可観測床面長 $Y_r$	約2.2(m)



### 3-3. 円錐投影の基本原理

図3-12 に示すようにカメラ光軸をZ軸（鉛直方向）とするカメラに固定したO—XYZ 3次元座標系を考える。座標原点Oは、時刻tにおけるカメラのレンズ中心とする。画像面xyは、XY平面に平行でカメラ焦点距離fだけ離れたZ軸上の点を通る面とする。

この時、図3-13(a) に示す様に距離計測を行なう任意の点P ( $X_p, Y_p, Z_p$ ) に対する画像面上の写像点をp ( $x_p, y_p$ )とすると、次式の関係がある。

$$\tan \theta = Y_p / X_p = y_p / x_p \quad (3-6)$$

即ち  $Y_p / X_p$  で定まる対象物体の方位角は、 $y_p / x_p$  で定まる画像面内の像の方位角を算出することで得られる。この様に360度パノラマ状の領域を円錐ミラーを介して、撮像面上に投影する本方式では、対象物体の方位角  $\theta$  が、その物体の画像面上の投影の方位として直接現われる。

図3-13(b) に示すように点Pと円錐ミラー軸Zを含む鉛直面を想定すると、点Pと写像点pとの間に次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= L / (H - Z_p) \\ L &= (X_p^2 + Y_p^2)^{1/2} \\ \alpha &= \pi - (\delta - \beta) \\ \beta &= \tan^{-1}(r / f) \\ r &= (x_p^2 + y_p^2)^{1/2} \\ H &= f \tan(\delta / 2) (\tan(\delta - \beta) - \tan \beta) / \tan(\delta - \beta) / (\tan(\delta / 2) - \tan \beta) \end{aligned} \quad (3-7)$$

$\delta$  : 円錐ミラーの頂角

f : カメラの焦点距離

I : カメラと円錐ミラー間の距離

式 (3-7) をまとめると次式の関係が得られる。

$$Z_p = I(1 - \cos \delta) + (L + I \sin \delta) / \tan(\delta - \beta)$$

$$\beta = \tan^{-1}(r / f) \quad (3-8)$$

$$r = (x_p^2 + y_p^2)^{1/2}$$

$$L = (X_p^2 + Y_p^2)^{1/2}$$

即ち、物体の位置 ( $X_p$ ,  $Y_p$ ) がわかれば、その物体の高さ  $Z_p$  は、天頂角  $\beta$  から一意にもとまる。式(3-8)算出の詳細については、付録Aを参照されたい。

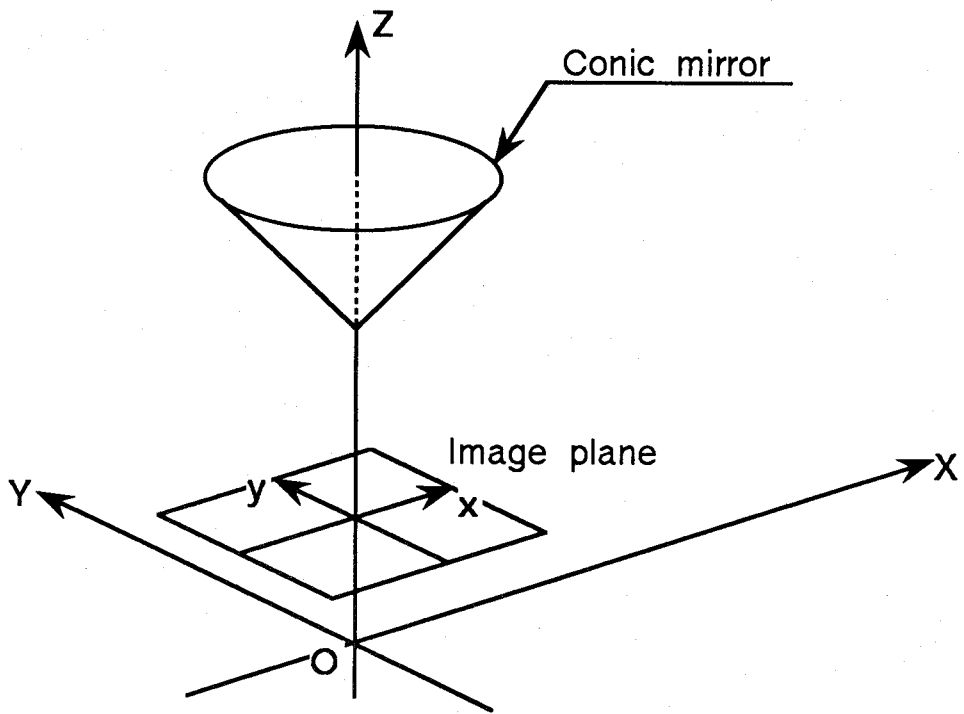
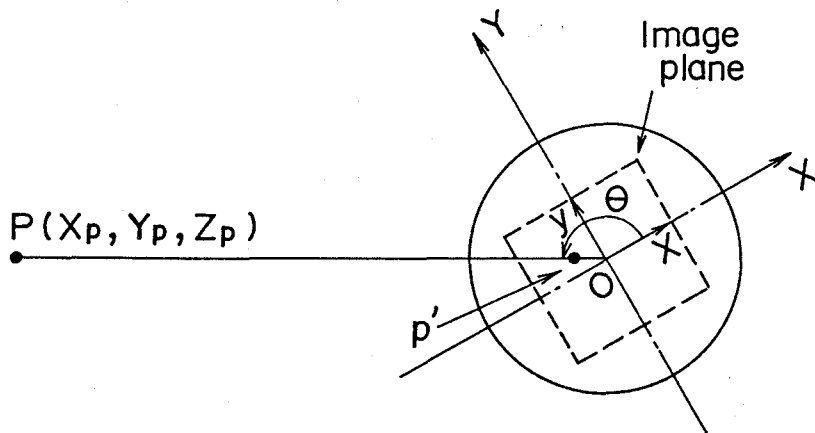
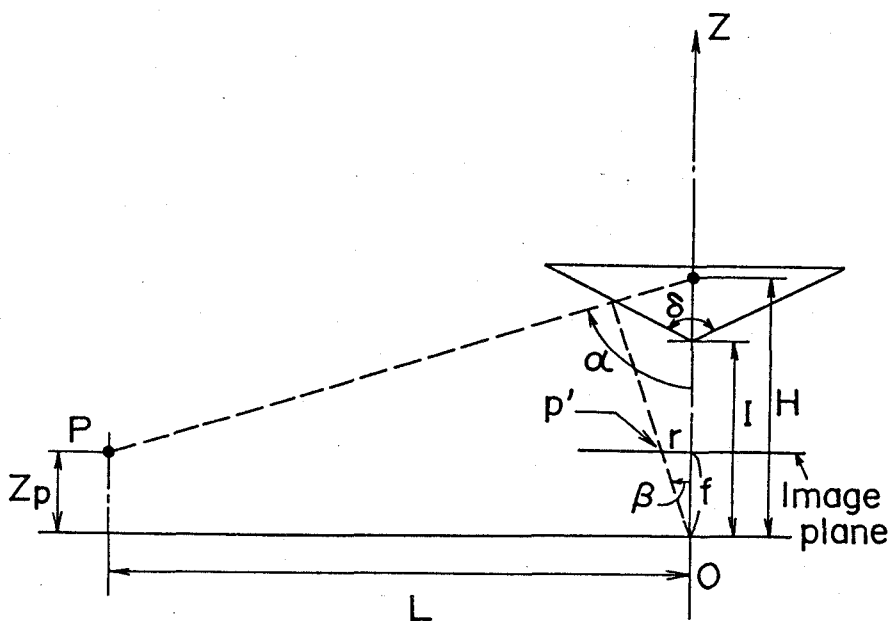


Fig.3-12 COPISの3次元座標系



(a) Invariability of azimuth angle in COPIS



(b) Linear relation of tilt angle in COPIS

Fig.3-13 物点と回転角の関係

## 4 章 静止環境での位置情報の獲得

本章では、第3章で提案したCOPISを用い、移動中に撮像した時系列画像から環境内構造物までの位置情報を求め、環境マップを生成する一処理方法を提案する[Yagi 89,90,91a]。位置情報を獲得するに当たっては、建物内に一般に存在する柱等の垂直エッジ成分を特徴量として、連続画像間に対応付けを行い、この特徴量の移動軌跡と移動ロボットの移動量とから位置情報を求める。さらにここで提案した方法を用いて、建屋内の廊下を移動した実証実験の結果を示す。

### 4-1. 前提条件

本章では、環境及びロボットに対し、以下の前提条件を置く。

#### (1) 環境

ロボットの移動空間は、人工の環境、例えば建屋内の廊下や室内とする。壁は平面で構成され床に対して垂直で、床はほぼ平坦である。また机や本棚等の構造物は、一般に床に対して垂直に立つ。

#### (2) ロボット

ロボットは、床面上を等速直進運動をする。

#### 4-2. 3次元情報の獲得

図4-1に示すようにY軸方向に移動しているときの任意の時刻  $t_1$ 、 $t_2$ における式(3-6),(3-8)のパラメータをそれぞれ添字1,2で区別する。この時、時刻  $t_1$ から見た時刻  $t_2$ でのロボット位置を  $(0, V_y, 0)$ とすると、時刻  $t_1$ から見た  $X_p$ 、 $Y_p$ の距離成分は、方位角  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ を観測することで三角測量により次式で表現される。

$$\begin{aligned} X_p &= -V_y / (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \\ Y_p &= -V_y \tan \theta_1 / (\tan \theta_2 - \tan \theta_1) \end{aligned} \quad (4-1)$$

高さ  $Z_p$ は、時刻  $t_1$ における式(3-8)の関係式と、式(4-1)とから次式で与えられる。

$$Z_p = I(1 - \cos \delta) + \frac{\sqrt{\frac{V_y^2(1 + \tan^2 \theta_1)}{(\tan \theta_2 + \tan \theta_1)^2} + I \sin \delta}}{\tan(\delta - \beta_1)} \quad (4-2)$$

ただし時刻  $t_2$ における式(3-8)の関係式を用いると、式(4-1)と同様に  $Z_p$ は次式でも与えられる。

$$Z_p = I(1 - \cos \delta) + \frac{\sqrt{\frac{V_y^2(1 + \tan^2 \theta_1)}{(\tan \theta_2 + \tan \theta_1)^2} + I \sin \delta}}{\tan(\delta - \beta_2)} \quad (4-3)$$

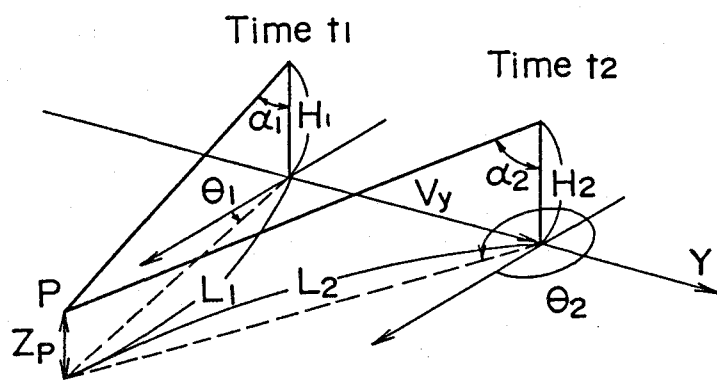


Fig.4-1 距離計測

### 4-3. 写像点の移動軌跡

図4-2(a)に示すようにCOPISがXY平面内を直線運動した場合を考える。この時、点Pの写像点pは、図4-2(b)に示すような移動軌跡を描く。これは、ロボットの前方遠くの物体がロボット移動により近づき、ロボットが点Pの横を通り去る時、物体の写像点は、ロボット前方の動きの無限遠点(FOE)からロボット後方のFOEへと移動する。この移動軌跡の形状は、ロボットと点P間の最接近距離 $L_{min}$ により決定される。即ち、写像点pの移動軌跡を観測することで、ロボットと点P間の位置関係が計測できる。さらにロボットが点Pと衝突する経路(衝突経路)を移動する場合、写像点pは、ロボットの前後のFOEを結ぶ直線軌道を描き、写像点pの方位角は一定となる。従って、物体の方位角の変化を観測することで、衝突の危険性がある物体を発見できる。

ここで図4-3(a)に示すように移動ロボットの移動速度を $(U_R, V_R, 0)$ と定義すると、点P $(X_p, Y_p, Z_p)$ の相対速度は次式で表現される。

$$(\partial X_p / \partial t, \partial Y_p / \partial t, \partial Z_p / \partial t) = (-U_R, -V_R, 0) \quad (4-4)$$

時刻 $t_1$ における点Pの座標位置を $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ とすれば、 $t$ 秒後の点Pの位置は式(4-4)より次式となる。

$$\begin{aligned} X_p &= -U_R t + X_1 \\ Y_p &= -V_R t + Y_1 \\ Z_p &= Z_1 \end{aligned} \quad (4-5)$$

点P $(X_p, Y_p, Z_p)$ とその写像点pの間の関係式(3-6),(3-8)に式(4-5)を代入し、



t を消去すると、画像中での点Pの移動軌跡は次式で表現される（図4-3(b)）。

$$\tan(\delta-\beta)\{I(1-\cos\theta)-Z_1\}+\left(\frac{U_R Y_1-V_R X_1}{U_R \sin\theta-V_R \cos\theta}\right)+I \sin\delta=0 \quad (4-6)$$

点Pの時刻 $t \rightarrow \infty$ における方位角 $\theta$ は、式(3-6),(4-5)より次式となる。

$$\tan\theta = V_R/U_R \quad (4-7)$$

同様に写像点pの画像中心からの距離rは、 $\tan\theta$ の結果を式(4-6)に代入することで導かれる（詳細は付録B）。

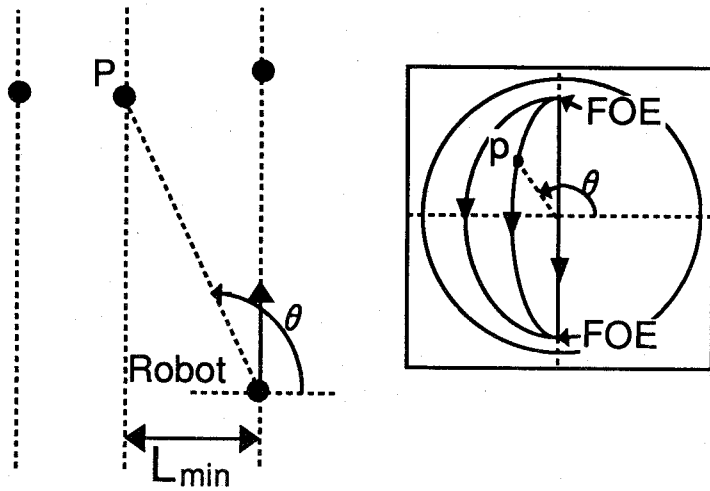
$$r = -f / \tan\delta \quad (4-8)$$

即ちロボットの移動により遠方まで遠ざかる対象物体の像は、動きの無限遠点(FOE)に収束する関係がある。例えば、図4-4(a)に示すようなCOPISの進行方向両側に特徴点P, Qがある場合、ロボット移動(0,  $V_R$ , 0)による観測点の軌跡は、式(4-6)より次式で表現され、前方の動きの無限遠点(FOE)は、進行方向、即ちY軸正方向となり、ロボットの移動によりY軸負方向に収束する（図4-4(b)）。

$$\tan(\delta-\beta)\{I(1-\cos\theta)-Z_1\}+\left(\frac{X_1}{\cos\theta}\right)+I \sin\delta=0 \quad (4-9)$$

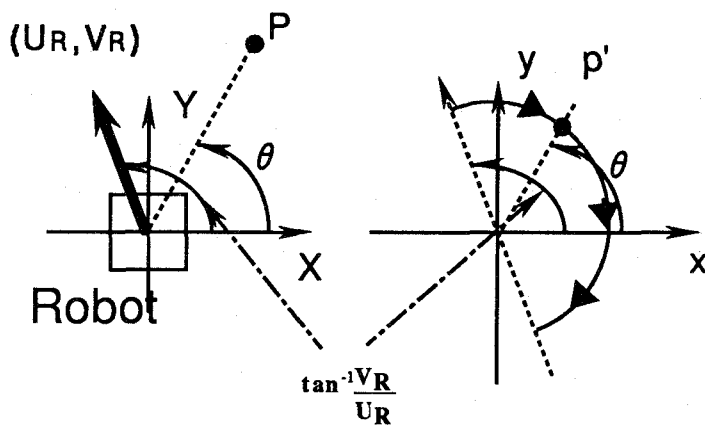
本研究では、対象環境は屋内環境とし、建物内で一般的特徴である柱、壁など

の構造物は床面に対し、垂直であるという前提を置いた。よって、図 4-4 (c) に示すような方位角  $\theta$  と移動量  $V(t)$  の関係については、第 3-3 節でも述べた様に、方位角  $\theta$  は観測点の高さ  $Z_1$  に依存せず計算できるため、壁や柱等の垂直エッジの位置は、方位角の移動軌跡を観測することで、同定することができる。次節 4-4. では、位置情報の獲得方法について述べる。



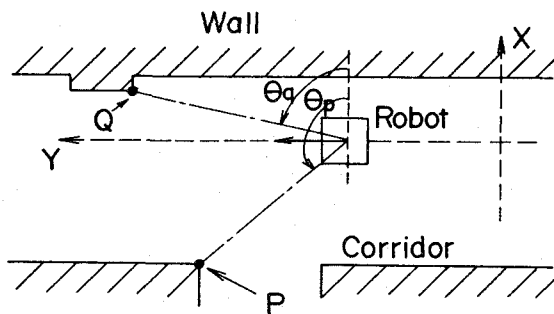
(a) Environmental model (b) loci of image points

Fig.4-2 ロボット移動と像軌跡の関係

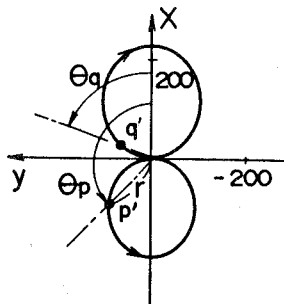


(a) Environment model (b) Locus of movement in image plane

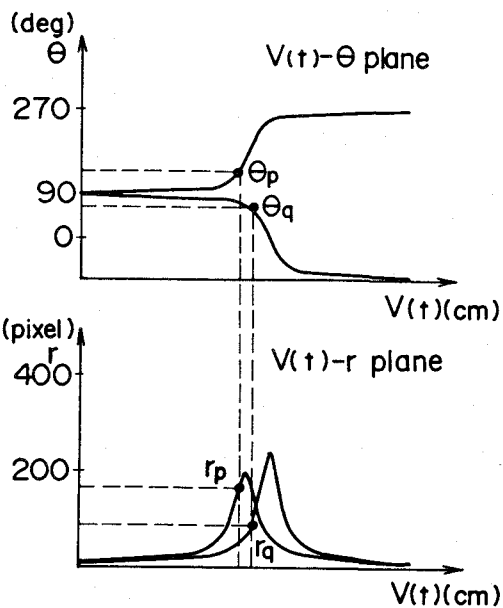
Fig.4-3 写像点の移動軌跡



(a) Environment model



(b) Locus of movements in image plane



(c) Relation to radius length and azimuth angle

Fig.4-4 観測点の移動軌跡

(ロボットがY軸方向に移動する場合)

円錐ミラー頂角=90(deg)

ロボット移動量=(0,1400,0)

観測点の位置 =P(-50,700,50),Q(20,800,50)

#### 4-4. カメラ移動による位置情報の獲得

##### 4-4-1. 写像点の軌道算出法

###### 4-4-1-1. 前処理

COPISによる環境マップ生成の処理手順を図4-5に示す。同図のスタート時点では移動ロボットは所定の位置に待機している。そしてスタートのサインと共に、任意の周期 $\Delta t$ で画像入力を行いながら移動する。ある時刻 $t$ に入力された画像(図4-6)に対し、ノイズ除去等の前処理および微分処理を施す(図4-7)。同微分画像を所定の閾値で2値化し、エッジの検出を行なう。このエッジ検出に当たっては、微分処理より得られた各画素におけるエッジ方向成分を利用し、原点より放射方向に延びた線分のみを検出する。この線分は実環境内で円錐ミラーの軸と平行なエッジ成分(柱等の垂直エッジ)である。

###### 4-4-1-2. 垂直エッジの検出

エッジ画像を次式により、 $r-\theta$ 座標系上に極座標変換する(図4-8)。

$$\begin{aligned} r &= (x^2 + y^2)^{1/2} \\ \theta &= \tan^{-1}(y/x) \end{aligned} \quad (4-10)$$

一本の垂直エッジ上の点は、高さに関わりなく、同一の方位角を示す。そこで図4-9に示すように座標変換画像の各回転角 $\theta$ ごとに画素数を計数する事で回転角方向への投影変換を行なう。投影データの計数値が所定のしきい値以上の領域を特徴領域とし、同領域内で投影データの平均回転角を抽出し、エッジ位置とする。投影

データはエッジの方向性を利用し、正のエッジと負のエッジに分けて計数することで作製する。ここで正および負エッジとは、白から黒、また黒から白に濃度勾配が変化するエッジのことである。

#### 4-4-1-3. 対応付け

一般に建物内の廊下では、両側の壁に凹凸がある。しかし、廊下内に移動物体がない場合、垂直な柱、壁の移動軌跡は、連続フレーム間で突発的に変化することはなく、誤差を見込んだ範囲内に収まる。そこで前2フレーム間で対応関係が得られる場合は、図4-10に示すように前フレームでの移動量 $\Delta \theta$ を次フレーム間での推定移動量とし、 $P_n$ を中心とした探索範囲 $S$ を設定し、対応付けを行う。

隣接フレーム間のエッジ位置の対応付けは、1次元投影データ間での相関値を計算することで行う。探索範囲の限定と1次元投影データ間での対応付けを行うことで、対応付けを2次元の相関法で行うのと比べ、処理が高速化される。

図4-11はカメラ移動にともない検出した垂直エッジ方向を現わす回転角をプロットしたものである。90度の位置が進行方向で、-90、270度が進行方向逆向きである。エッジ点は、90度から-90度ないし270度方向に移動している。

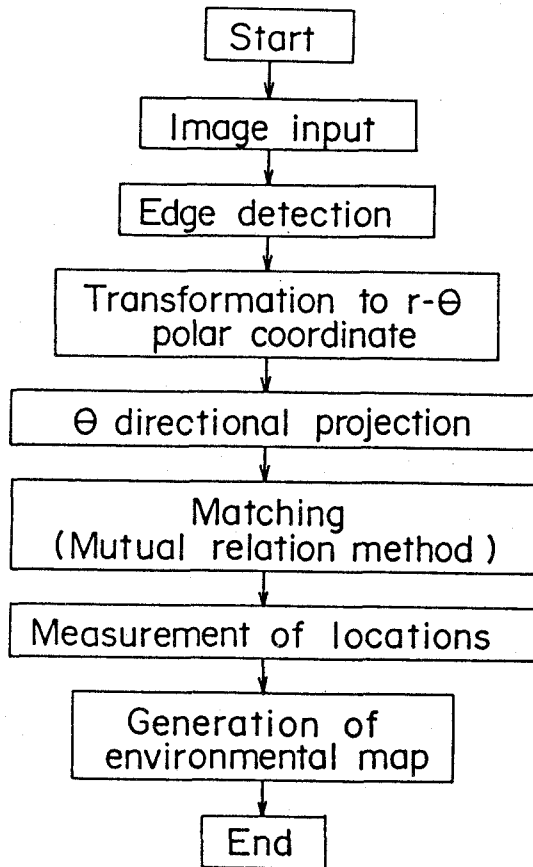


Fig.4-5 処理手順



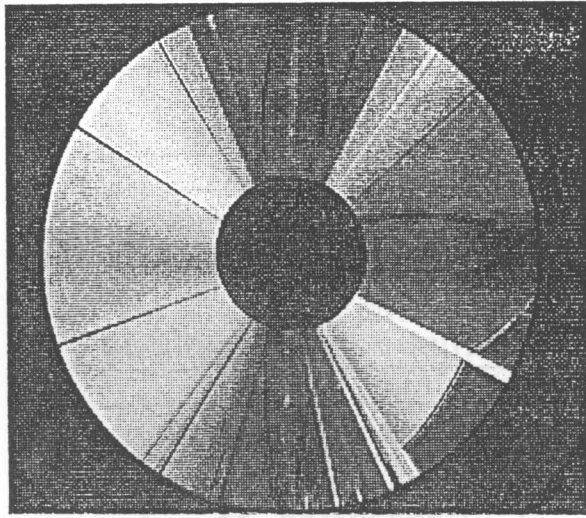


Fig.4-6 入力画像

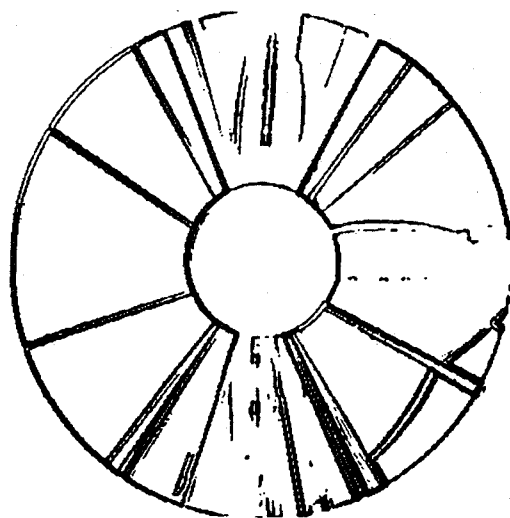


Fig.4-7 微分画像

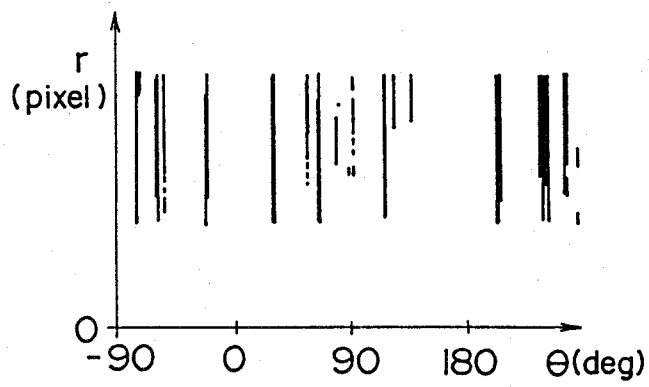


Fig.4-8  $r$ - $\theta$  極座標変換画像

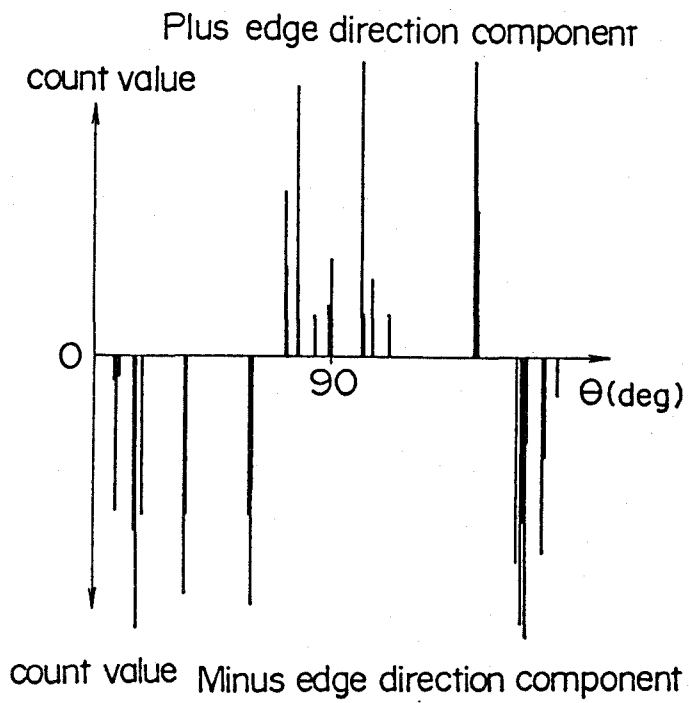


Fig.4-9 1次元投影データ

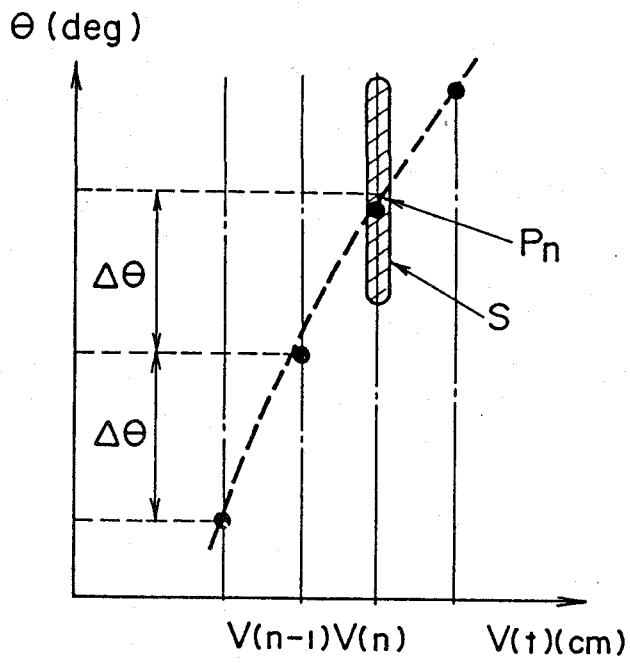


Fig.4-10 隣接フレーム間での対応付け

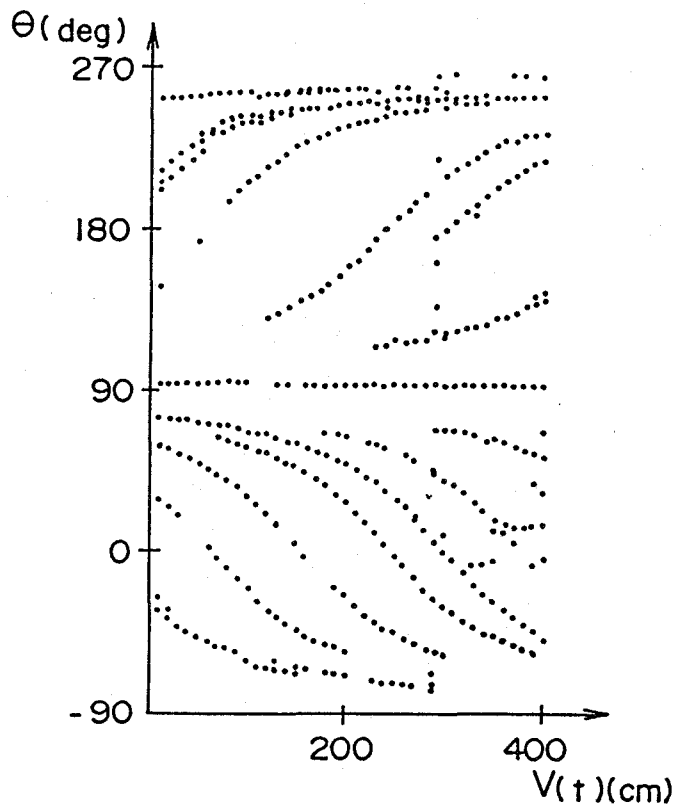


Fig.4-11 カメラ移動による垂直エッジの運動軌跡

#### 4-4-2. 位置情報の推定

位置情報は、ロボットの移動量と移動前後の2点の回転角より式(4-1)で計測することができるが、ロボットが移動する際の揺れに影響されやすい。そこで計測精度を向上させるために、垂直エッジの移動軌跡に規則性があることを利用し、一連の対応点から最小自乗法により(X, Y)の距離を算出した。最小自乗法を用いるに当たっては、次式に示す方位角のずれ量を誤差量dとした。

$$d = \tan^{-1}\theta_{(t)} - \tan^{-1}\left(\frac{Y_1 - V_R t}{X_1 - U_R t}\right) \quad (4-11)$$

環境マップは、算出された垂直エッジの位置情報を計算機内の2次元データ上にマップすることで生成する。

#### 4-5. 実験結果とその検討

実際の廊下でロボットの移動量を既知量として実験を行ない、背景の位置情報をもとめた。その結果を表4-1(a), 図4-12に示す。

図4-12は約2m幅の廊下を移動しながら垂直エッジまでの距離を計算し、重ねて表示したものである。画像撮像は、カメラ移動10cm/フレームで行っている。総移動距離4.0mで、連続7フレーム以上対応付いた垂直エッジについて位置を算出し、図中●印で記した。

位置算出の結果、平均誤差約6cmの精度で環境マップの生成ができた。一部大きな誤差を生じたが、ロボットが移動する上においては、問題ない精度と考えることができ、ロボット移動用の距離センサとして本方法の有効性を確認した。この誤差の原因としては、垂直エッジ位置の検出誤差によるところが大きい。

現在エッジ位置は、角度1度毎の1次元投影データより算出している。そのため垂直エッジが、密な領域では、各々のエッジ毎に投影データを分離することが困難である。表4-1(a)の5番では、エッジ位置の検出誤差により、30cmの誤差が発生した。

さらにエッジ位置の方位角分解能は1度のため、各エッジには、±0.5度の誤差が有り得る。ロボット移動量1mの時、2m幅程度の廊下環境では、前後4m範囲内で最大約15cmの誤差が想定される。

本システムでは、画面の外周で、約0.25度、画像中心より半径60画素の円周上で約1度の角度分解能を有する。そこで、画面の分解能を有効に利用できるように方位角の角度分解能を向上させることで、精度改善が可能である。

さらに画像中心からの距離毎の方位角分解能を共分散行列とすることで、角度誤差をモデル化すれば、カルマンフィルタを用い、角度分解能の変化を考慮したエッジの計測ができ、精度改善可能と考える。



次に移動ロボットの移動時の揺れの影響による進行方向の誤差について検討する。進行方向において、観測点が十分に遠方にある場合、移動しても回転角は殆ど変化しない。このことを利用し、無限遠点における垂直エッジの方位角を観測することで、移動ロボットの揺れの度合は観測可能である。

そこでこの方位角の変化量を補正量とし、環境マップを生成した結果を表 4-1(b)に示す。補正前と比較してもほぼ精度は変わらなかった。よって本方法では、最大 2 度までの揺れに対しては、影響なく観測可能であると考えられる。

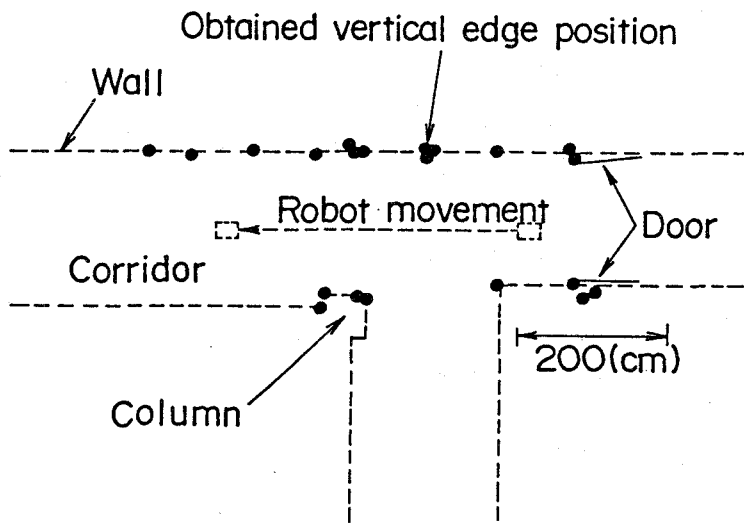


Fig.4-12 位置情報計測結果の一例

表4-1 位置情報算出結果の一例

	実測値		(a) 移動量利用				(b) 移動量 + 無限遠点利用			
	X (cm)	Y (cm)	実験値		位置誤差 D (cm)	実験値		位置誤差 D (cm)		
			X (cm)	Y (cm)		X (cm)	Y (cm)			
1	83	20	85.2	18.3	2.8	87.2	21.2	4.3		
2	95	13	101.1	14.5	6.3	99.9	14.5	5.1		
3	-96	-310	-96.7	-314.2	4.3	-94.7	-311.5	2.0		
4	95	-318	91.3	-317.5	3.7	92.9	-319.5	2.6		
5	-80	21	-90.5	48.9	29.8	-89.7	47.8	28.5		
6	-78	-82	-81.8	-82.0	3.8	-81.1	-82.4	3.1		
7	95	-174	90.7	-174.4	4.3	92.2	-174.8	2.9		
8	-97	-260	-97.4	-261.4	1.5	-97.8	-265.6	5.7		
9	97	-267	99.1	-268.8	2.8	106.8	-276.7	13.8		
10	-79	-78	-81.9	-76.7	3.2	-80.7	-77.5	1.8		
11	95	-82	98.9	-81.0	4.0	100.9	-80.1	6.2		
12	95	-267	96.7	-269.4	2.9	96.0	-269.6	2.8		
13	-100	-257	-100.3	-256.2	0.9	-101.0	-255.8	1.6		
14	95	-174	101.4	-173.5	6.4	100.1	-174.7	5.1		
15	95	-172	100.1	-167.7	6.7	99.4	-168.6	5.6		
16	100	-400	100.8	-403.7	3.8	99.1	-402.7	2.8		
17	97	-265	101.0	-260.2	6.2	99.7	-260.9	4.9		
18	94	-483	91.6	-486.9	4.6	92.6	-487.3	4.5		
19	97	-537	97.4	-542.2	5.2	99.1	-544.1	7.4		
20	-110	-320	-113.4	-316.9	4.6	-113.9	-317.0	4.9		
平均誤差 (cm)			5. 3 9			5. 7 8				
標準偏差 (cm)			5. 9 5			5. 9 8				

## 5 章 COPISによる移動物体との衝突回避

本章では、全方位視覚センサCOPISを用い、室内等の人工環境内を移動する物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について述べる。

環境内に移動物体がある場合は、ロボット自身も動いているため、それらの位置や運動を推定し、衝突回避を行なうことは容易でない。しかし移動物体が直線運動すると仮定すれば、ロボット移動による物体の方位角の変化から、衝突の危険性がある移動物体や障害物を検出できる。また時系列画像から得られる物体方位角の移動軌跡からは、ロボットと物体間の相対運動の方向を算出できる。さらに衝突回避動作として減速等の動作を行なうことで、それらの物体の運動並びに位置情報を得ることができる。

ここではロボットが移動中に撮像した時系列画像から得られる物体の移動軌跡より、衝突の危険がある障害物や移動物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について報告する。さらにここで提案した方法を用いて、移動物体がある建屋内をロボットが移動した場合の実証実験の結果を示す。

### 5-1. 前提条件

本報告では、環境並びにロボット・移動物体に対し、以下の前提を置く。

#### (1) 環境

ロボットの移動空間は、人工の環境、例えば建屋内の廊下や室内とする。壁は平面で構成され床に対して垂直で、床はほぼ平坦である。また机や本棚等の構造物は、一般に床に対して垂直に立つ。

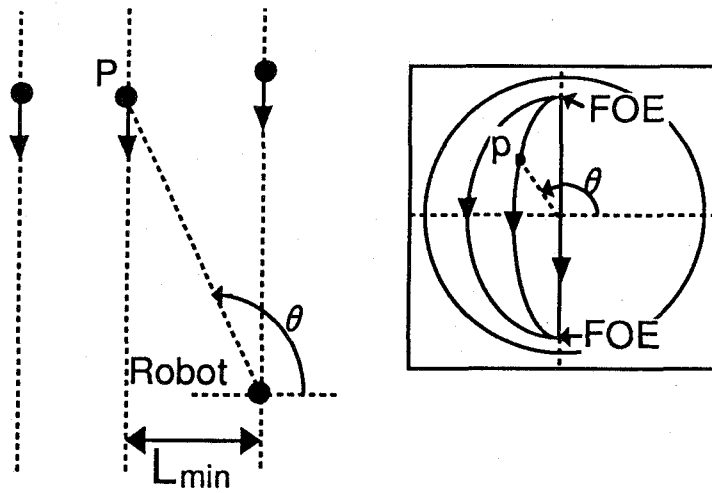
#### (2) ロボット・移動物体

ロボットと移動物体は、床面上を等速直進運動をする。移動物体は静止環境の

構造物と同様に床に対し垂直に立つ。

## 5-2. 写像点の移動軌跡

図 5-1(a) に示すように XY 平面内を COPIS と点 P が移動する場合を考える。この時、点 P の写像点  $p$  は、図 5-1(b) に示すような移動軌跡を描く。これは、ロボットの前方遠くから近づいてきた物体がロボットの横を通り去る時、物体の写像点は、ロボット前方の動きの無限遠点 (FOE) からロボット後方の FOE へと移動する。この移動軌跡の形状は、ロボットと点 P 間の最接近距離  $L_{\min}$  とロボットと点 P 間の相対運動方向により決定される。点 P がロボットと衝突する経路 (衝突経路) を移動する場合、写像点  $p$  は、ロボットの前後の FOE を結ぶ直線軌道を描き、写像点  $p$  の方位角は一定となる。従って、物体の方位角の変化を観測することで、衝突の危険性がある物体を発見できる。なお、移動軌跡についての詳細は、第 4 章を参照されたい。



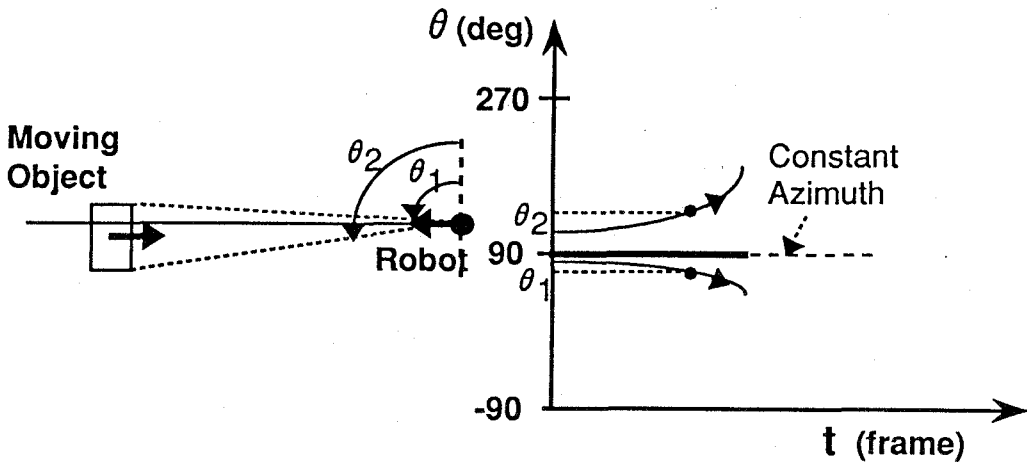
(a) Environmental model (b) loci of image points

Fig.5-1 写像点の移動軌跡

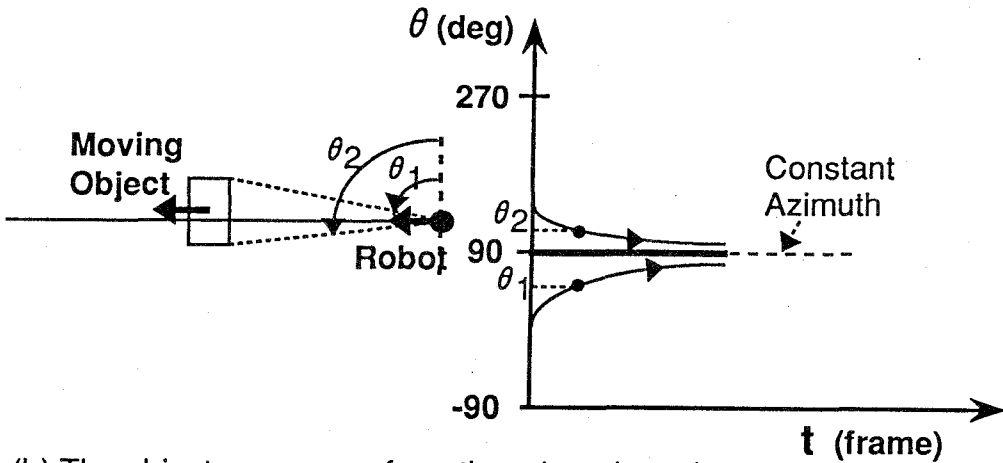
### 5-3. 衝突危険性の評価

第 5.2 節で述べた通り、衝突の危険性がある物体の発見は、物体の方位角の変化を観測することで可能となる。しかし、衝突経路上を移動する物体は、移動方向に関わらず、方位角は一定となる。そのため方位角の変化を観測しただけでは、衝突経路上の物体が相対的に近づく場合と遠ざかる場合の区別ができない。しかし、実環境では物体は大きさを持つ。そこで物体の両端には垂直なエッジが現われるとすると、上記の区別が可能となる。

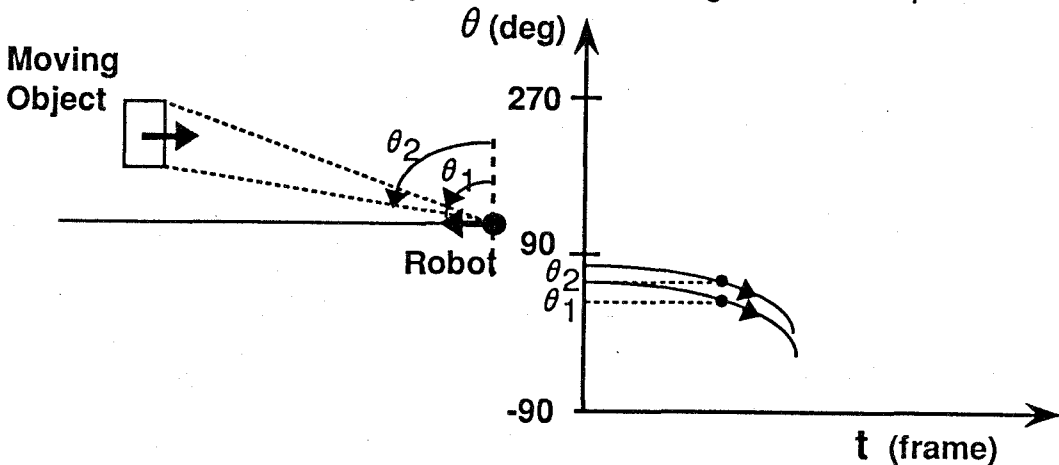
まず初めに図 5-2(a) に示すように、物体が衝突経路に沿って接近する場合を考える。この場合、物体の両端のエッジでの方位角は、ロボットに対し発散する方向に変化する。そして両エッジ間には、方位角不変の点が存在する。それに対し、図 5-2(b) に示すように物体が衝突経路に沿って遠ざかる場合は、方位角不変の点は存在するが、両エッジの方位角は、ロボットに対し、収束する方向に変化する。さらに図 5-2(c) に示すように、物体が衝突経路上を移動しない場合は、方位角不変の点は存在せず、また両エッジでの方位角は、共に同じ方向に収束ないし発散する。したがって、方位角の変化を観測すれば、物体との衝突危険性の評価は可能である。



(a) The object comes up to the robot along the collision path



(b) The object goes away from the robot along the collision path



(c) The object does not collide with the robot

Fig.5-2 衝突可能性の評価



#### 5-4. 相対運動方向の算出

ロボット及び物体がともに移動する場合、本COPISは単眼視のためスケールファクタが決定されない。そのため、物体の位置・運動を推定することは困難である。しかし、物体の移動軌跡を利用すれば、ロボットに対する相対的は運動の方向は算出できる。またこの相対運動方向から、衝突危険性の評価を行なうこともできる。

環境内の移動物体を点Pとする。この時、ロボットの移動速度を  $(U_R, V_R, 0)$ 、点Pの移動速度を  $(U_M, V_M, 0)$  とすれば、点Pの相対速度は次式で表現される。

$$\begin{aligned} & (\partial X_p / \partial t, \partial Y_p / \partial t, \partial Z_p / \partial t) \\ & = (U_M - U_R, V_M - V_R, 0) \end{aligned} \quad (5-1)$$

時刻  $t_1$  における点Pの座標位置を  $P_1 (X_1, Y_1, Z_1)$  とすれば、 $t$  秒後の点Pの位置は次式となる。

$$\begin{aligned} X_p &= (U_M - U_R) t + X_1 \\ Y_p &= (V_M - V_R) t + Y_1 \end{aligned} \quad (5-2)$$

$(t > 0)$

よって、時系列画像より得られる点Pの方位角  $\theta$  の移動軌跡は、式(3-6),(5-2)から次式で表現される。

$$\tan \theta = \frac{(V_M - V_R) t + Y_1}{(U_M - U_R) t + X_1} \quad (5-3)$$

本COPISは、単眼視のためスケールファクタは決定できず、例えば $U_M - U_R$ との比が算出できる。式(5)において、ロボットの移動速度( $U_R, V_R, 0$ )が既知としても、 $U_M, V_M, X_1, Y_1$ の4つの未知数を含む。そこで3ヶ所での方位角 $\theta$ を観測すれば、次式の関係から移動物体の相対運動方向 $\theta_R$ が算出できる。

$$\begin{bmatrix} \frac{V_M - V_R}{U_M - U_R} \\ \frac{X_1}{U_M - U_R} \\ \frac{Y_1}{U_M - U_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_2 & -\tan \theta_2 & 1 \\ t_3 & -\tan \theta_3 & 1 \\ t_4 & -\tan \theta_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_2 \tan \theta_2 \\ t_3 \tan \theta_3 \\ t_4 \tan \theta_4 \end{bmatrix} \quad (5-4)$$

$\theta_2, \theta_3, \theta_4$ :  $t_2, t_3, t_4$ 秒後の観測方位角

ただし $\theta_2 = \theta_3 = \theta_4$ の場合は、式(5-4)の逆行列が存在しないため、相対運動方向 $\theta_R$ は、次式の関係となる。

$$\tan \theta_R = \tan \theta_i \quad (i=2,3,4) \quad (5-5)$$

点Pがロボットが衝突するためには、点Pがロボットに向かって接近し、両者間の相対位置( $X_p, Y_p$ )が(0, 0)になる必要がある。言い替えれば、物体とロボットが等速直線運動する前提では、図5-3に示す通り、点Pの方位角 $\theta$ がロボットと点P間の相対運動の方向 $\theta_R$ と180度異なる場合に両者が衝突することを意味する。よって次式を満たすとき、点Pはロボットと衝突する。

$$t = -\frac{X_1}{U_M - U_R} = -\frac{Y_1}{V_M - V_R} > 0 \quad (5-6)$$

式(5-6)の関係は、次式に示すように点Pの方位角 $\theta$ と相対運動の方向 $\theta_R$ とを意味する。

$$\tan \theta = \frac{Y_1}{X_1} = \frac{V_M - V_R}{U_M - U_R} = \tan \theta_R \quad (5-7)$$

$$|\theta - \theta_R| = 180(\text{deg})$$

この事から、衝突危険性の評価は、物体の方位角 $\theta$ と相対運動方向 $\theta_R$ とを算出することでも可能となる。

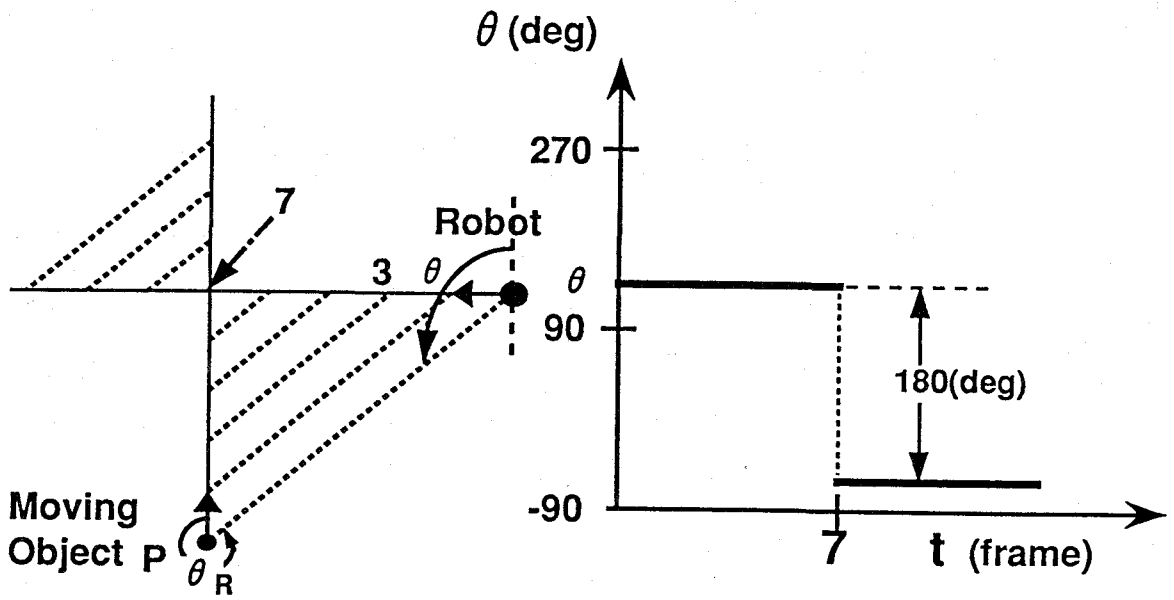
ここで、式(5-5)に示すようにロボット移動により物体の方位角 $\theta$ が変化しない場合、相対運動方向 $\theta_R$ は一意に決定できない。これは、図5-2(a),(b)に示したように、衝突経路を移動する物体は、遠ざかる場合も、近づく場合もともに、方位角が変化しないためである。しかし、実際の環境では、物体は大きさを持ち、その両端には垂直なエッジが現われる。従って、少なくとも一方では、方位角は変化する。そこで図5-4に示す様に両エッジでの方位角を $\theta_1$ 、 $\theta_2$ とすれば、次式に示すように $\theta_1 \sim \theta_2$ の範囲内で相対運動方向 $\theta_R$ と180度角度が異なる場合、衝突の危険性があると評価できる。

$$|\theta - \theta_R| = 180(\text{deg}) \quad (5-8)$$

$$\theta_1 < \theta < \theta_2$$

実際には、ロボットの走行時の揺れなどで方位角 $\theta$ に観測誤差がある。そのため、ロボットの移動に伴う方位角 $\theta$ の移動軌跡から、最小自乗法により $\theta_R$ を求める。また式(5-8)の評価は、 $\theta$ 、 $\theta_R$ の計測誤差を考慮し、次式に示すように $\Delta\theta$ が所定のしきい値 $\theta_{LIMIT}$ 以下となるとき、衝突危険性があると評価する。

$$\Delta\theta = | |\theta - \theta_R| - 180 | < \theta_{LIMIT} \quad (5-9)$$



(a) Environmental model

(b) Relation to azimuth angle

Fig.5-3 衝突の条件

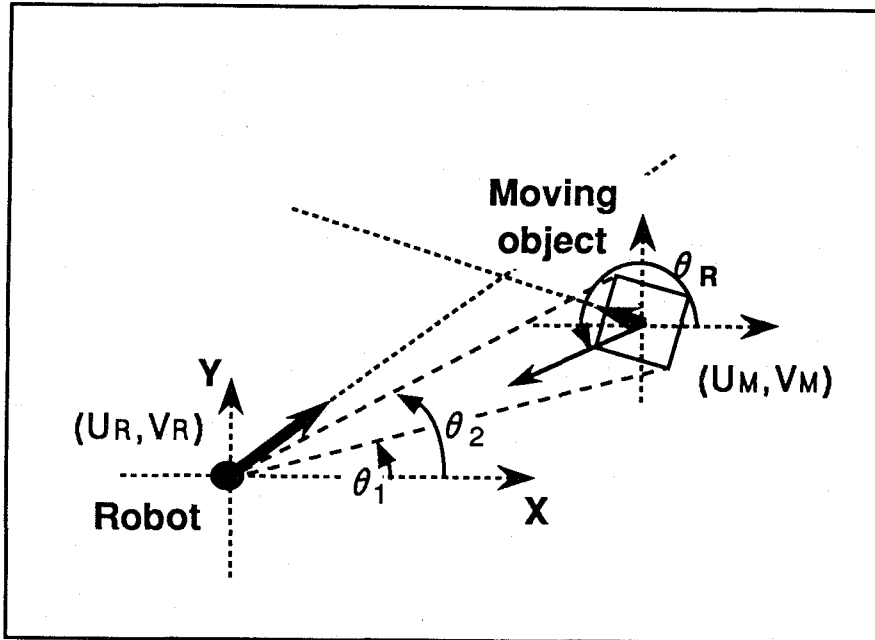
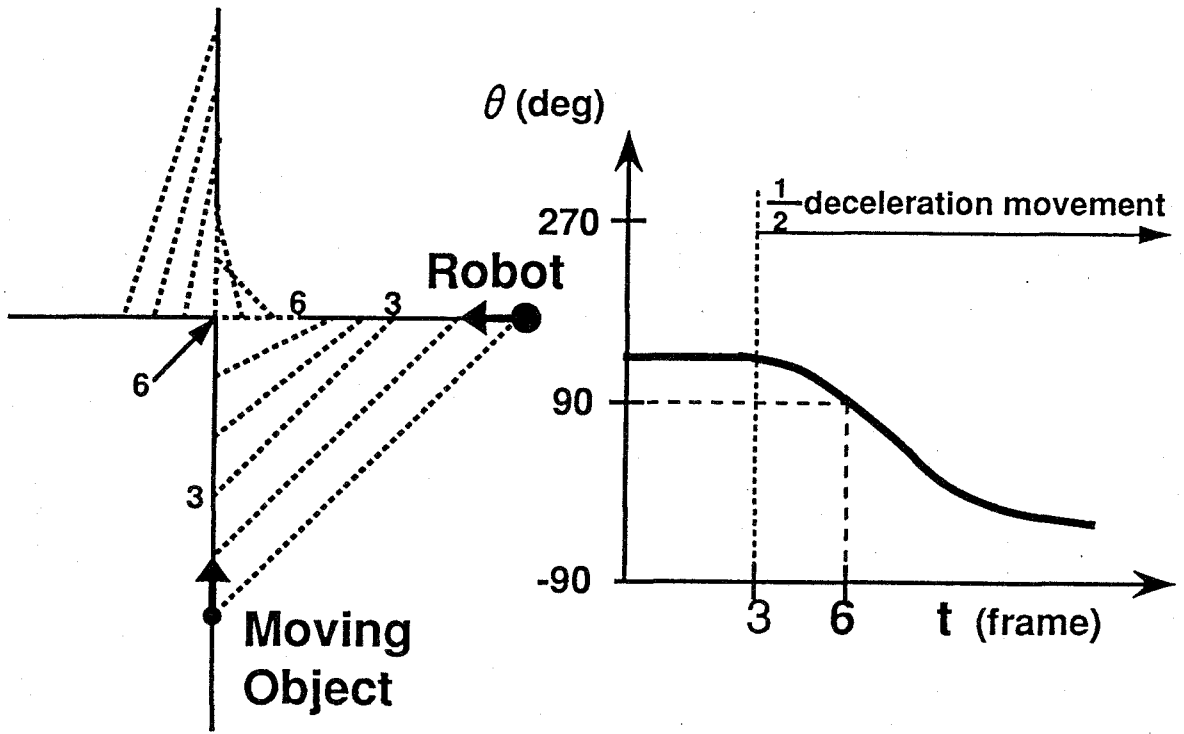


Fig.5-4 相对運動方向の利用による衝突危険性の評価

## 5-5. 衝突回避動作

COPISが衝突経路に沿って接近する物体を検出したとする。この時衝突回避のためには、ロボットの運動を変更すればよい。運動を変更する動作には、速度の変更と経路の変更がある。物体がロボットの進行方向と一致する時は、速度変更を行っても衝突を回避することができず、経路を変更する必要がある。ロボットの進行経路と衝突経路が異なる場合は、速度変更により衝突回避を行なうことが可能である。

図5-5は、前方を横切る移動物体を減速動作により回避する一例である。この例では、3フレーム目までの観測では、方位角と相対運動方向が変わらないため、衝突の危険性ありと評価し、4フレーム以後は1/2の速度で、衝突の回避を行なっている。



(a) Environmental model

(b) Relation to azimuth angle

Fig.5-5 衝突回避動作



## 5-6. 位置・運動の推定

速度を変える動作を行なえば、衝突回避を行えるばかりでなく、静止物体と移動物体を識別し、さらに物体の移動速度ならびに位置が算出可能となる。速度変更前後のロボットの移動速度及び相対運動方向を各々  $(U_{RB}, V_{RB}, 0)$ ,  $(U_{RA}, V_{RA}, 0)$ 、相対運動方向を  $\theta_{RB}$ ,  $\theta_{RA}$  とする。この時、 $\tan \theta_{RB} \neq \tan \theta_{RA}$  の場合と  $\tan \theta_{RB} = \tan \theta_{RA}$  の場合とに分けて、位置・運動の推定方法について以下に述べる。

### 5-6-1. $\tan \theta_{RB} \neq \tan \theta_{RA}$ の場合

速度変更前後のロボットの相対運動方向  $\theta_{RB}$ ,  $\theta_{RA}$  には、次式の関係がある。

$$\tan \theta_{RB} = \frac{V_M - V_{RB}}{U_M - U_{RB}} \quad (5-10)$$

$$\tan \theta_{RA} = \frac{V_M - V_{RA}}{U_M - U_{RA}} \quad (5-11)$$

よって、式(5-10), (5-11)より次式のように点Pの移動速度は算出できる。

$$\begin{bmatrix} U_M \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tan \theta_{RB} & 1 \\ -\tan \theta_{RA} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{RB} - U_{RB} \tan \theta_{RB} \\ V_{RA} - U_{RA} \tan \theta_{RA} \end{bmatrix} \quad (5-12)$$

$$\tan \theta_{RB} \neq \tan \theta_{RA}$$

さらに物体の移動速度が算出できれば、式(5-4)より位置も算出できる。

### 5-6-2. $\tan \theta_{RB} = \tan \theta_{RA}$ の場合

相対運動方向がロボットの速度変更の前後で変化しないのは、物体がロボットの進行方向と平行に移動する場合である。この場合は、以下の方法により物体の運動・位置情報を得る。

速度変更前において  $t_{B1}$ ,  $t_{B2}$  秒後の物体の方位角を  $\theta_{B1}$ ,  $\theta_{B2}$  とすると、式 (5-3) より次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_B \begin{bmatrix} U_M - U_{RB} \\ V_M - V_{RB} \end{bmatrix} \quad (5-13)$$

$$(\tan \theta_{B1} \neq \tan \theta_{B2})$$

$$\mathbf{M}_B = \begin{bmatrix} -\tan \theta_{B1} & 1 \\ -\tan \theta_{B2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -t_{B1} \tan \theta_{B1} & t_{B1} \\ -t_{B2} \tan \theta_{B2} & t_{B2} \end{bmatrix}$$

同様に、速度変更前の移動時間を  $t_B$  とし、速度変更後において、 $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$  秒後の物体の方位角を  $\theta_{A1}$ ,  $\theta_{A2}$  とすると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_A \begin{bmatrix} U_M - U_{RA} \\ V_M - V_{RA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_B & 0 \\ 0 & t_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_M - U_{RB} \\ V_M - V_{RB} \end{bmatrix} \quad (5-14)$$

$$(\tan \theta_{A1} \neq \tan \theta_{A2})$$

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} -\tan \theta_{A1} & 1 \\ -\tan \theta_{A2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -t_{A1} \tan \theta_{A1} & t_{A1} \\ -t_{A2} \tan \theta_{A2} & t_{A2} \end{bmatrix}$$

よって式(5-13),(5-14)より  $(X_1, Y_1)$  を消去すると、次式のように移動物体の速度は計算できる。

$$\begin{bmatrix} U_M \\ V_M \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_B - \mathbf{M}_A - \begin{bmatrix} t_B & 0 \\ 0 & t_B \end{bmatrix})^{-1} \{ (\mathbf{M}_B - \begin{bmatrix} t_B & 0 \\ 0 & t_B \end{bmatrix}) \begin{bmatrix} U_{RB} \\ V_{RB} \end{bmatrix} - \mathbf{M}_A \begin{bmatrix} U_{RA} \\ V_{RA} \end{bmatrix} \} \quad (5-15)$$

$$(\tan \theta_{B1} \neq \tan \theta_{B2}, \tan \theta_{A1} \neq \tan \theta_{A2})$$

式(5-15)より移動物体の移動速度  $(U_M, V_M)$  が求めれば、式(5-13),(5-14)より位置情報も算出可能となる。ここで式(5-15)では、 $\tan \theta_{B1} \neq \tan \theta_{B2}$ ,  $\tan \theta_{A1} \neq \tan \theta_{A2}$  の拘束条件がある。この拘束条件を満たさないのは、ロボットの進行方向と同軸上を対象物体が移動する場合である。このような場合、移動物体の位置・運動情報は算出不可能である。しかし一般に物体は大きさを持ち、進行軸上に物体上のすべての点に乗ることは稀である。従って、位置・運動情報は算出可能であり、実用上問題ないを考える。

## 5-7. 実験結果とその検討

以下に約2 m×3 mの広さの室内を移動物体が1 m程度離れた側方から接近してくる場合について実シーンへの適用例を示す。画像撮像は、ロボット及び移動物体が各々4 cm、5 cmずつ移動しながら行った。この適用例では、40フレーム目で衝突する。観測点は一般に環境内の物体で見られる垂直エッジを利用した。

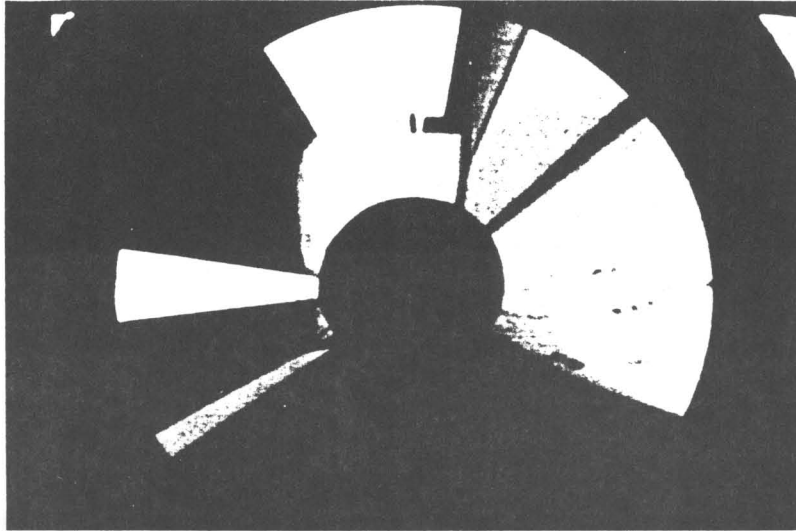
衝突危険物体の検出は15フレームの時点（5.6 cm移動後）に行なう。図5-6(a), (b)にそれぞれ1フレーム、15フレームでの入力画像を示す。移動軌跡の抽出手順を図5-7に示す。入力画像に対し微分処理を施し（図5-8）、次に微分処理より得られた各画素におけるエッジ方向成分を利用し、原点より放射方向に延びた線分のみを検出し、原点を中心とした極座標系に変換する（図5-9）。さらに図5-10各角度ごとの投影値を求める。時系列間の対応付けはこの投影データ間で行なう。なお移動軌跡の抽出の詳細は、第4章を参照願う。図5-11はカメラ移動に伴い検出した垂直エッジ方位を表わす回転角をプロットした移動軌跡である。15フレームまでの観測で、方位角90度及び180度近傍の垂直エッジはその方位角が殆ど変化せず、衝突危険領域と判断された。また図5-12に示す $\Delta\theta$ の関係でも、方位角 $\theta$ が90度と180度の近傍にて、 $\Delta\theta$ がしきい値以下となり、衝突危険領域と評価された。図5-13は検出された衝突危険領域で、90度近傍の進行方向前方の障害物と180度近傍の移動物体とが検出された。

衝突危険物体を検出した後は、ロボットは1/2減速動作により衝突回避を行なう。図5-11に示すように15フレーム以降180度近傍の移動物体上のエッジの方位角は、90度方向（ロボットの前方）に変化し、衝突危険状態を回避している。

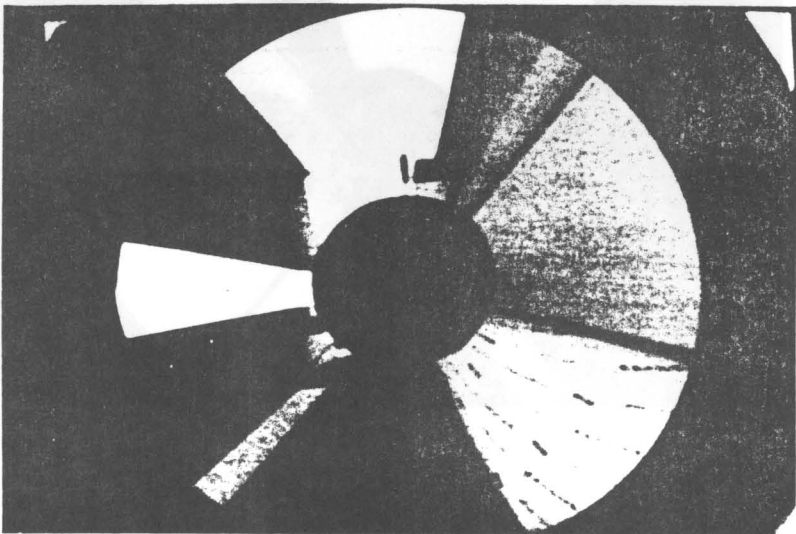
位置・運動情報は15フレーム以降、1/2減速動作で5.0 cm移動後、40フレームで算出した。図5-6(c)に40フレームでの入力画像を示す。図5-14は観測された垂直エッジの位置を計算し、室内のレイアウト図に重ねて表示したものであ

る。図中、静止物体については■印、移動物体については□印で記した。移動速度の大きさが1cm未満の物体は、静止した物体とした。さらに表5-1に位置・運動の計測結果を示す。位置情報は平均誤差約4.6cmで計測ができた。さらに移動物体の運動情報は、1回の移動量が5cmのところ5.13cm、移動方位にして1.8度の平均誤差で計測できた。また静止した物体の運動情報は、最大でも0.6cm程度の誤差で計測できた。ただしロボットの前方では、他の方位に比べ、位置の計測精度が悪く10cm程度であった。これは、観測された方位角の時系列間での変化が小さいことで、移動軌跡の計測精度が悪かったためである。しかしロボットが衝突回避する上においては、問題ない精度と考えることができる。

本COPISは、現在方位計測を1度刻みで行っている。そのため、衝突経路上を幅のせまい物体が、移動して来た場合、方位角の変化が現われにくい。例えば、1mまで接近して来た物体は、その幅が1.6cm以下の時、物体の両端のエッジの方位角は変化しない場合がある。そのため、方位角の観測だけでは衝突の評価ができない。だがこのように細い物体は稀であり、実用上は問題ないと考える。またこの問題については、式(3-8)に示す物体の高さ $Z_p$ と距離 $L$ に対する画像中心から写像点 $p$ までの長さ $r$ の関係を利用すれば、 $r$ の移動軌跡を観測することで、接近する物体の検出が可能と考える。

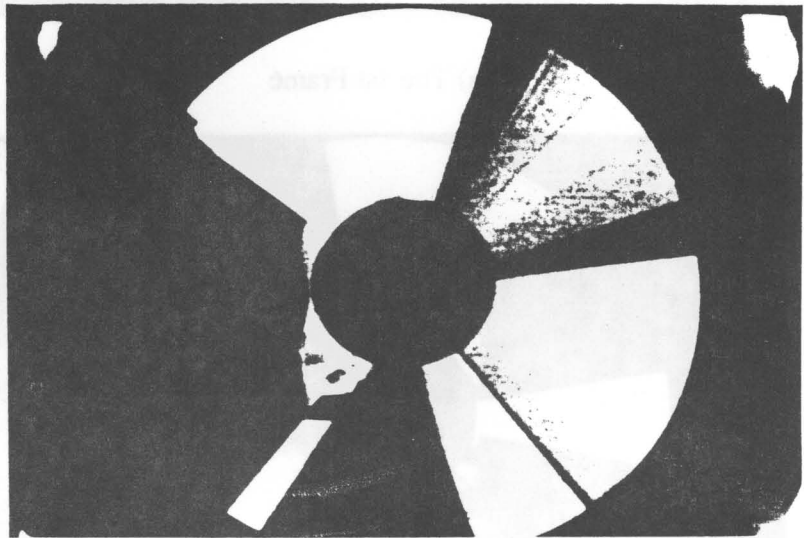


(a) The 1st Frame



(b) The 15th Frame

Fig.5-6 時系列入力画像の一例



(c) The 40th Frame

Fig.5-6 時系列入力画像の一例

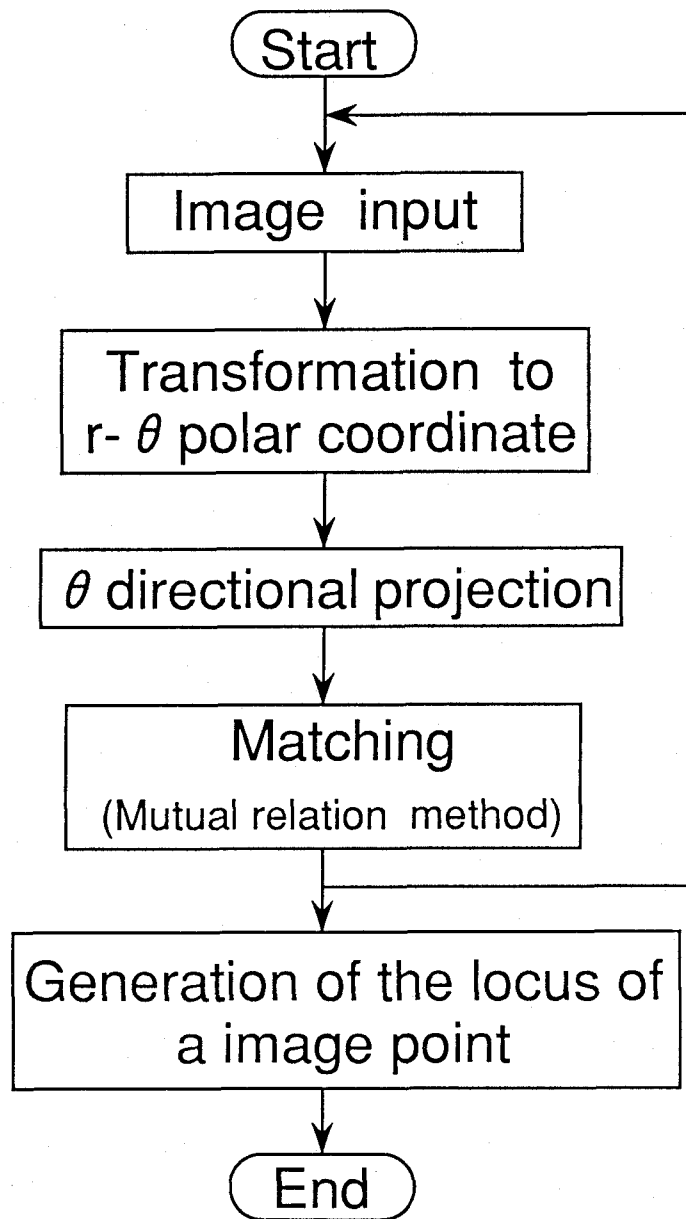


Fig.5-7 处理手順



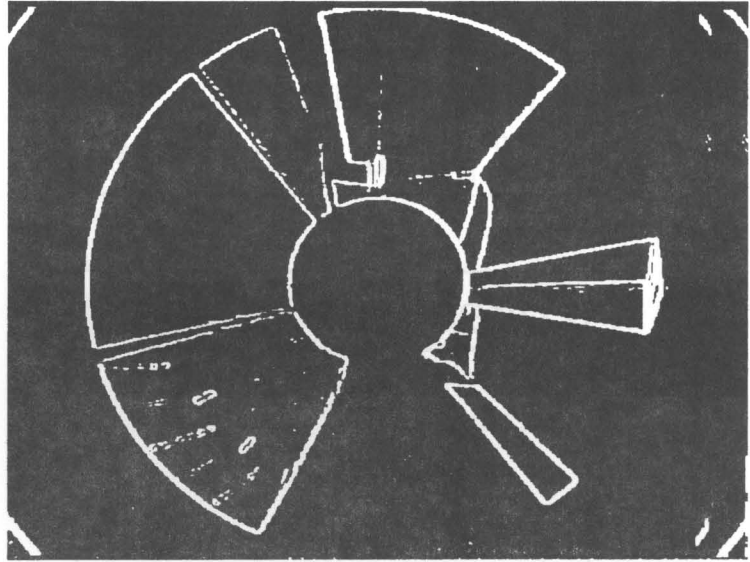


Fig.5-8 微分画像

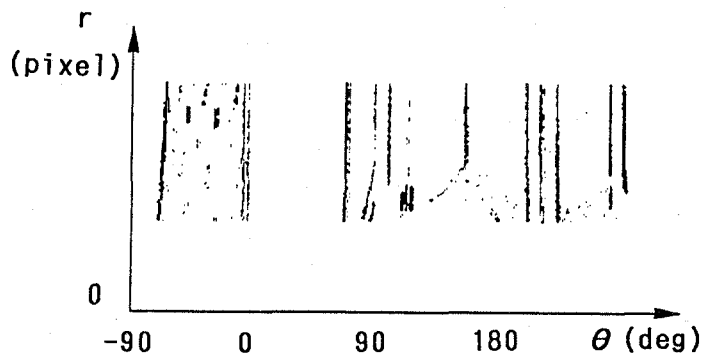
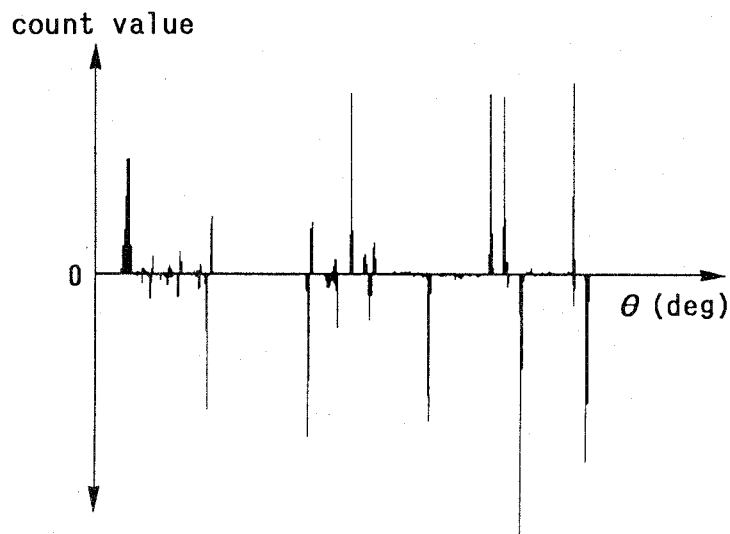


Fig.5-9 r- $\theta$  極座標変換画像

Plus edge direction component



Minus edge direction component

Fig.5-10 1次元投影データ

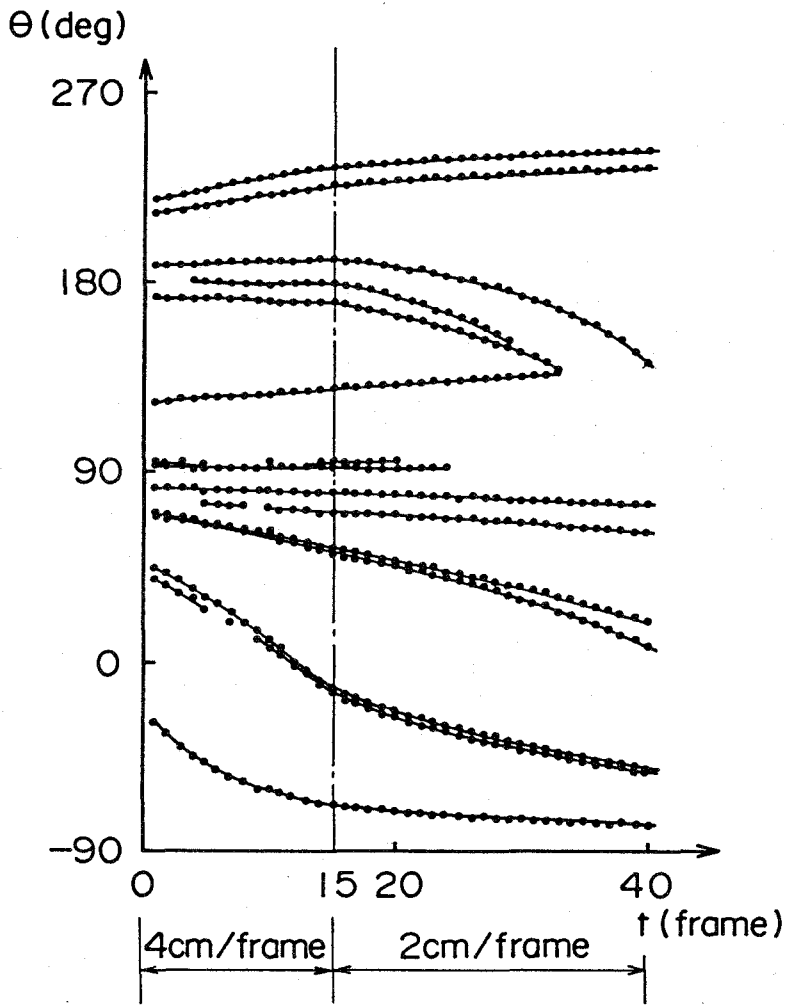


Fig.5-11 カメラ移動による垂直エッジの運動軌跡

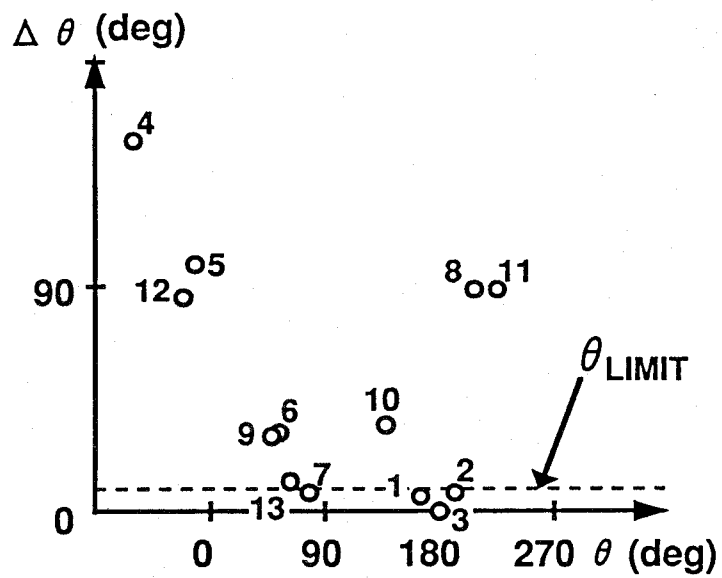


Fig.5-12 衝突危険領域の推定

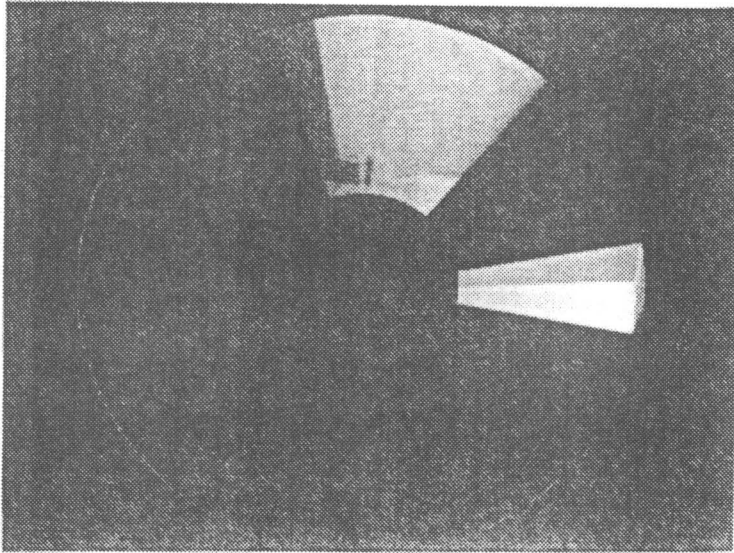


Fig.5-13 衝突危險領域抽出結果

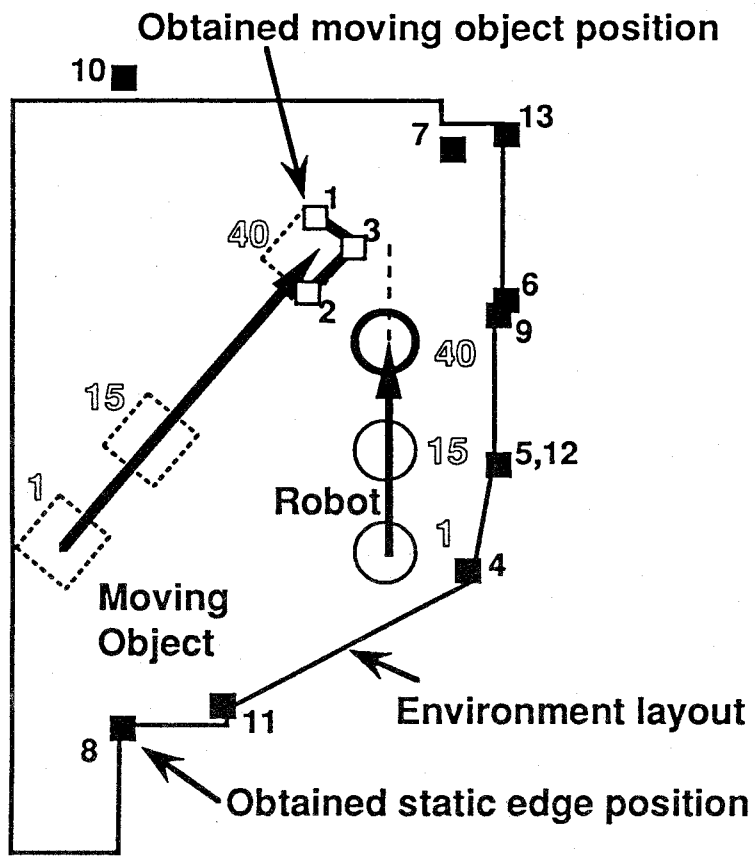


Fig.5-14 位置情報の算出結果

表5-1 運動および位置の算出結果

	Right value				Measurement value				Location error	Motion error
	X(cm)	Y(cm)	U <sub>x</sub> (cm)	U <sub>y</sub> (cm)	X(cm)	Y(cm)	U <sub>x</sub> (cm)	U <sub>y</sub> (cm)	(cm)	(cm)
<b>Moving object</b>										
1	37	-178	-3.13	3.9	36	-172	-3.27	3.8	6.1	0.04
2	35	-136	-3.13	3.9	39	-142	-3.35	4.0	7.2	0.18
3	15	-160	-3.13	3.9	16	-159	-3.4	3.9	1.4	0.17
<b>Static object</b>										
4	-35	10	0.0	0.0	-31	7	0.07	0.36	5.0	0.37
5	-48	-51	0.0	0.0	-51	-52	0.0	-0.53	3.2	0.53
6	-48	-122	0.0	0.0	-49	-125	0.06	0.59	3.2	0.59
7	-27	-216	0.0	0.0	-31	-205	0.04	0.55	11.7	0.55
8	140	79	0.0	0.0	140	79	-0.06	0.50	0.0	0.50
9	-48	-121	0.0	0.0	-49	-119	-0.15	0.25	2.2	0.21
10	140	-230	0.0	0.0	140	-236	-0.07	0.18	6.0	0.19
11	90	70	0.0	0.0	94	68	-0.19	0.12	4.5	0.22
12	-48	-50	0.0	0.0	-51	-49	-0.06	0.17	3.2	0.18
13	-54	-216	0.0	0.0	-57	-210	0.04	-0.55	6.7	0.55



## 6章 結論

本論文では、移動ロボット用視覚センサとして円錐ミラーを用いたCOPIS (Conic Projection Image Sensor) を考案し、このセンサを用いたロボットの視覚誘導方式を提案した。

まず、従来技術を移動ロボット用センサの違いから単眼視、複眼視、移動視、レンジセンサ、全方位視に分類し、その特徴と問題点について検討した。そしてこの問題点を解決するセンサとして、円錐ミラーを用いる受動方式の全方位視覚センサCOPIS (Conic Projection Image Sensor) を考案し、その基本原理について述べた。このセンサの特徴は、

- 1) 円錐ミラーとTVカメラのシンプルな構成である
- 2) 全方位が一度に観測できる (実時間移動向き)
- 3) 光学系のセッティングが容易である

である。

次に、全方位視覚センサCOPISを用い、ロボットが移動中に撮像した時系列画像から得られる物体の移動軌跡より、環境構造物までの距離を計測し環境モデルを構築する方法について述べた。この処理方法では、COPISにより移動中に撮像した連続画像から環境内の位置情報を求めた。位置情報を獲得するに当たっては、建物内に一般に存在する柱等の垂直エッジ成分を特徴量として、連続画像間で対応付けを行い、この特徴量の移動軌跡と移動ロボットの移動量とから位置情報を求めた。その結果、環境マップの計測精度は、視覚誘導を行なう上で十分な精度と考えることができ、ロボット移動用の距離センサとして本方法が有効であることを確認した。本手法は、多くの人工環境で成立する性質を利用しているため、汎用性に富む。本処理方法には、距離計測の際、十分な視差長が取れるため位置計測精度がよ

いという特徴がある。

さらに、時系列画像から得られる物体方位角の移動軌跡から衝突の危険がある障害物や移動物体を検出し、衝突回避を行なう一方法について報告した。この処理方法では、COPISにより移動中に撮像した時系列画像から得られる特徴エッジの移動軌跡をもとに相対運動方向を求め、衝突危険性の評価を行なった。この評価方法の特徴はでは、環境に対する拘束を設けず、運動の一般的性質のみを利用している点と、移動しながら運動が観測できる点で、汎用性、適用性に富むものと考えられ、一般の環境へ適用可能と考える。また減速等の回避動作によりロボットの移動速度が異なる移動軌跡を生成し、両者の移動軌跡から環境内の位置情報と移動物体の位置・運動情報を求めた。位置・運動の計測精度は、視覚誘導を行なう上で十分な精度と考えることができ、ロボット移動用の距離センサとして本方法が有効であることを確認した。以上が本研究により得られた結果である。

緒論において述べたが、人は物体までの正確な位置や物体の運動情報が得られなくとも、柱や自動車、さらに他の人などと衝突することなく歩き回ることができる。一方興味を持った対象に対しては、見たいところだけ詳しく観察することができる。これは、人が意志と感情を持つと言うことの他に、五体五感を持ち、多機能性、万能性、自立性などをコンパクトに備えているからである。工場、宇宙、極限作業と言った環境では、このような機能の実現はロボットに必要とは限らない。しかし我々がくらす社会の中でロボットが共存するためには、必要不可欠と考える。即ち、ヒューマンライクな機能が実現されることが、知能移動ロボットにとって本来のそして究極の目的ではないかと考える。五感、さらに感性など人の持つ機能は計り知れない。今回提案した方法も、その中のほんの一部分に過ぎない。しかし本研究は、人が大局的にものを見る視覚機能（大局視）をロボット上で実現するための基礎的な発展に寄与するものと確信する。

## 謝辞

本研究は、著者が三菱電機在職中に行なった研究を中心にまとめたものである。この研究の基盤となる動画像および移動ロボットに関する知識は、著者が辻三郎教授のご指導のもと大阪大学基礎工学部制御工学科在学中に行なった移動ロボットの研究が大きく影響している。辻三郎教授には、大学在学中ばかりでなく、私が卒業後もことあるごとにご指導賜りまた勇気付けて頂き、本論文の遂行に当たっては懇切なる討論、創造溢れるご指導、ご鞭撻を賜り、ここに心から深く感謝致します。

浅田稔助教授には、大阪大学在学中直接のご指導を頂き、私がロボットビジョンの研究に興味を抱くきっかけとなりました。ここに非常に感謝致します。谷内田正彦教授にはこの分野についての先端のご指導を賜り有難うございました。井口征士教授、北橋忠宏教授には、新幹線の中など様々な機会にご指導賜り有難うございました。

本研究を進めるに当たり、当初この研究の遂行を積極的に支援して頂きました三菱電機産業システム研究所所長弘中一光氏に深く感謝致します。また弘中氏に続いてご鞭撻賜りましたFAシステム開発部部长渡辺光人氏に感謝致します。本研究を学術論文誌に投稿する折など手取り足取り懇切丁寧にご指導賜りました産業システム研究所企画グループリーダー萩原史朗博士に心から感謝の意を表します。亀井光仁主幹、中島利郎主事、土井博氏には、本センサの光学系設計において熱心なご討論、ご検討賜りましたことを大変感謝致します。さらに私の三菱時代の直属の上司として、熱き討論をして頂きました川戸慎二郎主幹に、深く御礼申し上げます。また三菱時代、日頃の討論、雑談、会社生活などを通じ、同年代の研究者として互いに刺激し合いまた助け合うことのできました、鷲見和彦氏、長田典子氏、佐竹彰氏、三木美和子（旧姓広岡）氏、牧田裕行氏、橋本学氏には、様々なご協力ご理解を賜り

有難うございました。また井上驍主幹、小平紀生主幹、堀江芳枝氏ほか産業システム研究所の皆様にはいろいろとご鞭撻賜りました。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- [Asada 89] Minoru Asada and Yoshiaki Shirai, " Building A World Model for A Mobile Robot Using Dynamic Semantic Constraints ", Proc. of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.1629-1634, (1989)
- [Ayache 87] N. Ayache and F. Lustman , " Fast and Reliable Passive Trinocular Stereo Vision , " Proc. the First Int. Conf. on Computer Vision, pp422-427, (1987)
- [Beyer 87] James Beyer, Charles Jacobus and Frank Pont, " Autonomous Vehicle Guidance Using Laser Range Imagery ", Proc. of SPIE Mobile Robots II, Vol.852, pp.34-42, (1987)
- [Bolles 89] Robert C. Bolles and Aaron F. Bobick, " Exploiting Temporal Coherence in Scene Analysis for Autonomous Navigation ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.990-996, (1989)
- [Bruss 83] A. R. Bruss and B. K. P. Horn , " Passive navigation ", CVGIP, Vol.21, No.1, pp.3-20, (1983)
- [Brzakovic 89] D. Brzakovic and L. Hong, " Road Edge Detection for Mobile Robot Navigation ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.1143-1147, (1989)

- [Cao 86] Zuo L. Cao, Sung Jun Oh and Ernest L. Hall, " Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots ", Journal of Robotic Systems, 3(1), pp.5-17, (1986)
- [Crowley 89] James L. Crowley, " World Modeling and Position Estimation for a Mobile Robot Using Ultrasonic Ranging ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.674-680, (1989)
- [Draper 89] Bruce A. Draper, Robert T. Collins, John Brolio, Allen R. Hanson and Edward M. Riseman, " The Schema System ", International Journal of Computer Vision, 2, pp209-250, (1989)
- [Elfes 87] A. Elfes , " Sonar-based Real World Mapping and Navigation", IEEE journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, pp.249-265, (1987)
- [Faugeras 90] O.D. Faugeras, E. Le Bras-Mehlman and J. D. Boissonnat , " Representing Stereo Data with the Delaunay Triangulation ", The International Journal of Artificial Intelligence, 44, pp.41-87, (1990)
- [Ferrari 90] F. Ferrari, E. Grosso, G. Sandini and M. Magrassi , " A Stereo Vision System for Real Time Obstacle Avoidance in Unknown Environment ", Proc. of the International Workshop on Robots and Systems, pp.703-708, (1990)
- [Graefe 90] Volker Graefe , " An Approach to Obstacle Recognition for

Autonomous Mobile Robots ", Proc. of the International Workshop on Robots and Systems, pp.151-158, (1990)

[Grandjean 89] Pierrick Grandjean and Arnaud Robert De Saint Vincent , " 3-D Modeling of Indoor Scenes by Fusion of Noisy Range and Stereo Data ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.681-687, (1989)

[Hebert 89a] M. Hebert, C. Caillas, E. Krotkov, I. S. Kweon and T. Kanade , " Terrain Mapping for a Roving Planetary Explorer ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.997-1002, (1989)

[Hebert 89b] Martial Hebert , " Building and Navigating maps of road scenes using an active sensor ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.1136-1142, (1989)

[Ishiguro 90a] Hiroshi Ishiguro, Patrick Stelmaszyk and Saburo Tsuji, " Acquiring 3-D Structure by Controlling Visual Attention of a Mobile Robot ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.755-760, (1990)

[Ishiguro 90b] Hiroshi Ishiguro, Masashi Yamamoto and Saburo Tsuji, " Analysis of Omni-Directional Views at Different Location ", Proc. of the International Workshop on Robots and Systems, pp.659-664, (1990)

- [Ishikawa 88] Shigeki Ishikawa, Hideki Kuwamoto and Shinji Ozawa ,"  
Visual Navigation of an Autonomous Vehicle Using White Line  
Recognition ", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine  
Intelligence, Vol.10, No.5, pp.743-749, (1988)
- [Jarvis 88] R.A.Jarvis and J.C.Byrne, " An Automated Guided Vehicle with  
Map Building and Path Finding Capabilities ", Proc. of 4th ISSR,  
pp.497-504, (1988)
- [Kaelbling 86] L. P. Kaelbling , " An Architecture for Intelligent Reactive  
Systems ", Technical Report of SRI International #400, (1986)
- [Kitamura 90] Y. Kitamura and Y. Yachida , " Three-dimensional Data  
Acquisition by Trinocular Vision ", Advanced Robotics, Vol.4,  
No.1, pp.29-42, (1990)
- [Kweon 90] In So Kweon and Takeo Kanade , " High Resolution Terrain  
Map from Multiple Sensor Data ", Proc. of the International  
Workshop on Robots and Systems, pp.127-134, (1990)
- [Levitt 90] Tod S. Levitt and Daryl T. Lawton , " Qualitative Navigation for  
Mobile Robots ", The International Journal of Artificial Intelligence,  
pp.305-360, (1990)
- [Liou 87] Shih-Ping Liou and Ramesh C. Jain , " Road Following Using  
Vanishing Points ", The International Journal of Computer Vision,  
Graphics, and Image Processing, 39, pp.116-130, (1987)



- [Malkin 90] Peter K. Malkin and Sanjaya Addanki, " LOGnets: A Hybrid Graph Spatial Representation for Robot Navigation ", Proc. of the National Conference on Artificial Intelligence, pp.1045-1050, (1990)
- [Miller 87] Gabriel L. Miller and Eric R. Wagner, " An Optical Rangefinder for Autonomous Robot Cart Navigation ", Proc. of SPIE Mobile Robots II, Vol.852, pp.132-144, (1987)
- [Moravec 83] Hans P. Moravec , " The Stanford Cart and the CMU Rover ", Proc. of the IEEE, Vol.71, No.7, pp.872-884, (1983)
- [Mori 90] Hideo Mori , " Active Sensing in Vision-Based Stereotyped Motion ", Proc. of the International Workshop on Robots and Systems, pp.167-174, (1990)
- [Mowforth 90] P. Mowforth and J. Shapiro , " 3D Data Fusion for A Mobile Robot ", Proc. of the International Workshop on Robots and Systems, pp.1015-1020, (1990)
- [Mysliwetz 87] Birger D. Mysliwetz and E. D. Dickmanns , " Distributed Scene Analysis for Autonomous Road Vehicle Guidance ", Proc. of SPIE Mobile Robots II, Vol.852, pp.72-79, (1987)
- [Noborio 90] Hiroshi Noborio, Kazuya Kondo and Akiyuki Noda, " A Good Extension Method of Free Space in an Uncertain 2D Workspace by Using an Ultrasonic Sensor ", Proc. of the

- International Workshop on Robots and Systems, pp.665-671,  
(1990)
- [Oh 87] Sung Jun Oh and Ernest L. Hall, " Guidance of a Mobile Robot  
Using an Omnidirectional Vision Navigation System ", Proc. of  
SPIE Mobile Robots II, Vol.852, pp.288-300, (1987)
- [Onoguchi 90] Kazunori Onoguchi, Mutsumi Watanabe, Yasukazu  
Okamoto, Yoshinori Kuno and Haruo Asada , " A Visual Navigation  
System Using A Multi-Information Local Map ", Proc. of the  
International Conference on Robotics and Automation, pp.767-774,  
(1990)
- [Prazdney 81] K. Prazdney , " Determining instantaneous direction of motion  
from optical flow generated by a curvilinearly moving observer ",  
CGIP, Vol.17, p.238, (1981)
- [Sarachik 89] Karen. B. Saraclik, " Characterizing an Indoor Environment  
with a Mobile Robot and Uncalibrated Stereo ", Proc. of the  
International Conference on Robotics and Automation, pp.984-989,  
(1989)
- [Spetsakis 90] Minas E. Spetsakis and John (Yiannis) Aloimonos ,"  
Structure from Motion Using Line Correspondences ", International  
Journal of Computer Vision, 4, pp.171-183, (1990)
- [Stephens 89] M. J. Stephens, R. J. Blissett, D. Charnley, E. P. Sparks and

- J. M. Pike , " Outdoor Vehicle Navigation Using Passive 3D Vision  
", Proc. of the International Conference on Computer Vision and  
Pattern Recognition, pp.556-562, (1989)
- [Storjohann 90] K. Storjohann, Th. Zielke, H. A. Mallot and W. Von  
Seelen , " Visual Obstacle Detection for Automatically Guided  
Vehicles ", Proc. of the International Conference on Robotics and  
Automation, pp.761-766, (1990)
- [Tachi 86] 館 すすむ , " 移動ロボットの知的制御 ", 電気学会誌, 106,  
8, pp.771-776, (1986)
- [Talluri 90] Raj Talluri and J. K. Aggarwal , " Position Estimation for A  
Mobile Robot in An Unstructured Environment ", Proc. of the  
International Workshop on Robots and Systems, pp.159-166,  
(1990)
- [Thorpe 88] Charles Thorpe, Martial Hebert, Takeo Kanade, Steven Shafer ,  
" Vision and Navigation for the Carnegie Mellon NAVLAB. ",  
IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10,  
No.3, pp.362-373, (1988)
- [Tsuji 85] S. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada , " Dynamic Scene Analysis for a  
Mobile Robot in A Man-Made Environment ", Proc. of the  
International Conference on Robotics and Automation, pp.850-855,  
(1985)

- [Tsuji 86] S. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada , " Finding of Objects Moving in A Pathway by A Moving Observer ", Proc. of the 8th International Conference on Pattern Recognition, pp.1103-1106, (1986)
- [Tunk 87] Matthew A. Tunk, David G. Morgenthaler, Keith D. Gremban and Martin Marra , " A Video Road-Following for the Autonomous Land Vehicle ", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.1, pp.273-280, (1987)
- [Tunk 88] Matthew A. Tunk, David G. Morgenthaler, Keith D. Gremban and Martin Marra , " VITS - A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation ", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.10, No.3, pp.342-361, (1988)
- [Waxman 87] A. M. Waxman, J. J. LeMoigne and B. A. Seinvasan , " A visual navigation system for autonomous land vehicles ", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-3, No.2, pp.124-141, (1987)
- [Yachida 83] M. Yachida, T. Ichinose and S. Tsuji , " Model-Guided Monitoring of a Building Environment by a Mobile Robot ", Proc. of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol.2, pp.1125-1127, (1983)
- [Yachida 85] 谷内田正彦 , " 視覚を用いた 3次元位置、形状の計測とその応用 ", システムと制御, 29, 10, 631, (1985)

[Yagi 85] 八木康史, 浅田稔, 谷内田正彦, 辻三郎, " 動画像を用いた移動ロボットの環境認識 ", 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, CV35-5, pp.1-6, (1985)

[Yagi 86] 八木康史, 浅田稔, 辻三郎, " 移動カメラで撮像した環境内の運動物体の検出 ", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D No.5, pp.794-801, (1986)

[Yagi 86] 八木康史, 浅田稔, 谷内田正彦, 辻三郎, " 動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識 ", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D No.6, pp.967-974, (1986)

[Yagi 89] 八木康史, 川戸慎二郎, " 円錐投影による全方位環境認識 ", 電子情報通信学会パターン認識と理解技術報告, PRU89-46, pp.47-53, (1989)

[Yagi 90] Y. Yagi and S. Kawato, " Panorama Scene Analysis with Conic Projection ", Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90, pp.181-187, (1990)

[Yagi 91a] 八木康史, 川戸慎二郎, " 円錐ミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得 ", 電子情報通信学会論文誌, (1991) [採録決定]

[Yagi 91b] Y.Yagi, S. Kawato and S. Tsuji, " Collision Avoidance for Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor (COPIS) ", the International Conference on Robotics and Automation, (1991)

[submitted]

[Yagi 91c] 八木康史、川戸慎二郎、辻三郎, " 全方位視覚センサ  
COPIS を用いた衝突回避", 電子情報通信学会論文誌, (1991)  
[採録決定]

[Zheng 90a] Jiang Yu Zheng and Saburo Tsuji, " Panoramic Representation  
of scenes for route understanding ", Proc. of the 10th International  
Conference on Pattern Recognition, pp.161-167, (1990)

[Zheng 90b] Jiang Yu Zheng and Saburo Tsuji, " From Anorthoscope  
perception to Dynamic Vision ", Proc. of the International  
Conference on Robotics and Automation, pp.1154-1160, (1990)

[Zuk 85] D. Zuk and M. Dell'eva. , " 3D Sensor for Autonomous Land  
Vehicle ", Technical Report, Environmental Research Institute of  
Michigan, (1985)

## 研究業績

### 学術論文

- [1] 八木康史, 浅田稔, 辻三郎, " 移動カメラで撮像した環境内の運動物体の検出 ", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D No.5, pp.794-801, (1986)
- [2] 八木康史, 浅田稔, 谷内田正彦, 辻三郎, " 動画像処理を用いた移動ロボットの環境認識 ", 電子通信学会論文誌, Vol.J69-D No.6, pp.967-974, (1986)
- [3] 八木康史, 川戸慎二郎, " 円錐ミラーを用いた全方位視覚センサによる位置情報の獲得 ", 電子情報通信学会論文誌, (1991) [採録決定]
- [4] 八木康史, 川戸慎二郎, 辻三郎, " 全方位視覚センサ COPIS を用いた衝突回避 ", 電子情報通信学会論文誌, (1991) [採録決定]

### 口頭発表

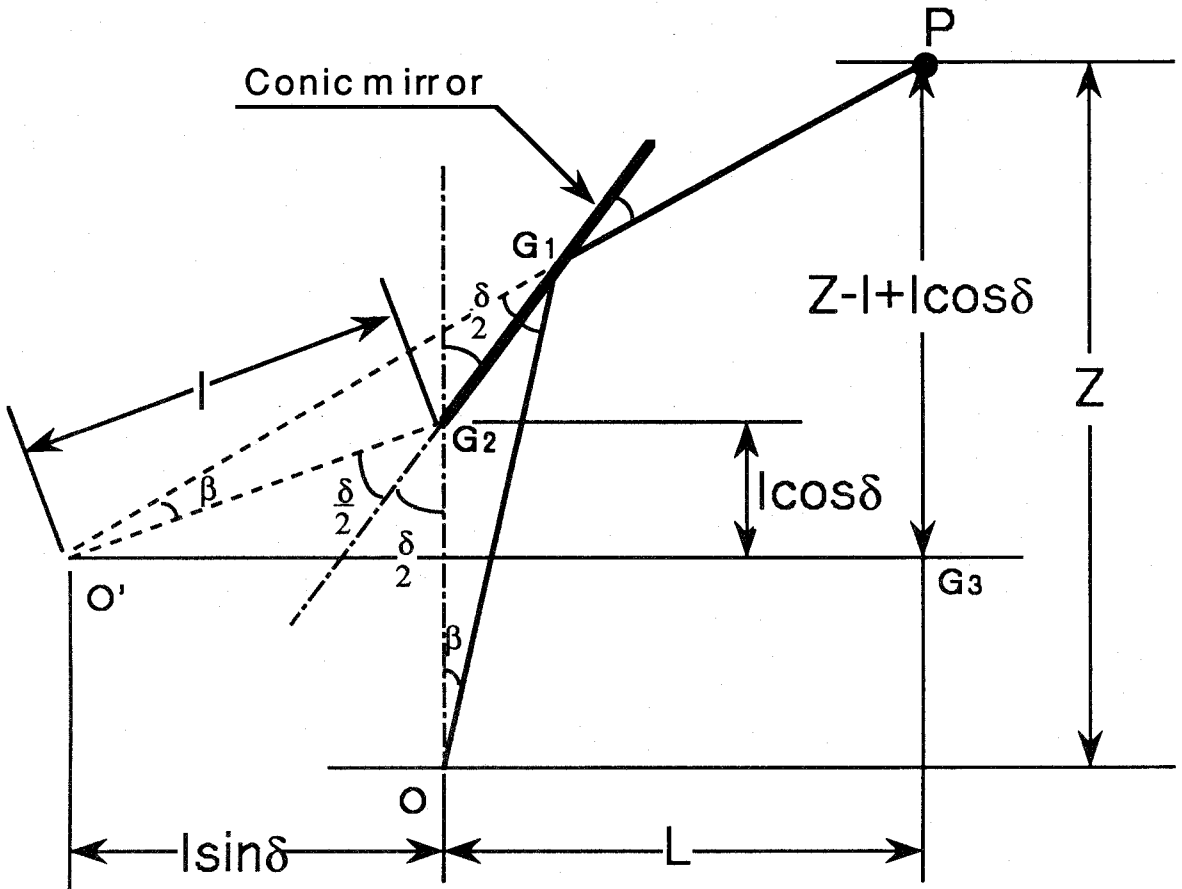
- [1] S. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada, " Dynamic Scene Analysis for a Mobile Robot in A Man-Made Environment ", Proc. of the International Conference on Robotics and Automation, pp.850-855, Missouri, (1985)
- [2] S. Tsuji, Y. Yagi and M. Asada, " Finding of Objects Moving in A Pathway by A Moving Observer ", Proc. of the 8th International Conference on Pattern Recognition, pp.1103-1106, France, (1986)
- [3] Y. Yagi and S. Kawato, " Panorama Scene Analysis with Conic Projection ", Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '90, pp.181-187, Tsuchiura, (1990)
- [4] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji, " Collision Avoidance for Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor (COPIS) ", the International Conference on Robotics

and Automation, Sacramento, (1991) [submitted]

- [5] Y.Yagi and Y. Yachida , " Real-time Generation of Environmental Map and Obstacle Avoidance using Omnidirectional Image Sensor with Conic Mirror ", IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hawaii, (1990) [submitted]



付録A



三角形OG<sub>1</sub>G<sub>2</sub>と三角形O'G<sub>1</sub>G<sub>2</sub>は、ミラー面を軸に対称形である。よって、三角形O'PG<sub>3</sub>を想定すれば、次式の関係が得られ、点Pの高さZは計算できる。

$$\tan \left( \frac{\pi}{2} - (\delta - \beta) \right) = \frac{Z - I + I \cos \delta}{L + I \sin \delta}$$

$$Z = I(1 - \cos \delta) + \frac{L + I \sin \delta}{\tan (\delta - \beta)}$$

## 付録B

式(3-8)より

$$Z_P = I(1 - \cos \delta) + \frac{L + I \sin \delta}{\tan(\delta - \beta)} \quad (3-8)$$

式(3-8)を変形すると、

$$\{Z_P - I(1 - \cos \delta)\} \tan(\delta - \beta) = L + I \sin \delta \quad (B-2)$$

さらに、式(B-2)の  $\tan(\delta - \beta)$  を展開する。

$$\{Z_P - I(1 - \cos \delta)\} \frac{\tan \delta - \tan \beta}{1 + \tan \delta \tan \beta} = L + I \sin \delta \quad (B-3)$$

$$\begin{aligned} & \{Z_P - I(1 - \cos \delta)\} (\tan \delta - \tan \beta) \\ & = (L + I \sin \delta) (1 + \tan \delta \tan \beta) \end{aligned}$$

$\tan \beta$  の項を右辺にまとめると

$$\begin{aligned} \text{右辺} &= \{Z_P - I(1 - \cos \delta)\} \tan \delta - (L + I \sin \delta) \\ \text{左辺} &= \{Z_P - I(1 - \cos \delta) + (L + I \sin \delta) \tan \delta\} \tan \beta \quad (B-4) \end{aligned}$$

よって  $\tan \beta$  は次式となる。

$$\tan \beta = \frac{\{Z_P - I(1 - \cos \delta)\} \tan \delta - (L + I \sin \delta)}{Z_P - I(1 - \cos \delta) + (L + I \sin \delta) \tan \delta} \quad (B-5)$$

式(B-5)を整理すると、

$$\tan \beta = \frac{(Z_P - I) \tan \delta - L}{Z_P + I\left(\frac{1}{\cos \delta} - 1\right) + L \tan \delta} \quad (\text{B-6})$$

ここで、式(3-8),(4-5)より次式の関係が得られる。

$$L = \sqrt{X_P^2 + Y_P^2} = \sqrt{(-U_{Rt} + X_1)^2 + (-V_{Rt} + Y_1)^2}$$

よって式(B-6)は次式で表現される。

$$\tan \beta = \frac{(Z_P - I) \frac{\tan \delta}{t} - \sqrt{\left(-U_R + \frac{X_1}{t}\right)^2 + \left(-V_R + \frac{Y_1}{t}\right)^2}}{\frac{Z_P}{t} + I\left(\frac{1}{t \cos \delta} - 1\right) + \sqrt{\left(-U_R + \frac{X_1}{t}\right)^2 + \left(-V_R + \frac{Y_1}{t}\right)^2} \tan \delta} \quad (\text{B-7})$$

ここで  $t \rightarrow \infty$  にすると、

$$\tan \beta = \frac{-\sqrt{U_R^2 + V_R^2}}{\sqrt{U_R^2 + V_R^2} \tan \delta} = \frac{-1}{\tan \delta} \quad (\text{B-8})$$

よって、式(3-8)より、式(4-8)は導き出される。

$$r = f \tan \beta = f \frac{-1}{\tan \delta} \quad (\text{4-8})$$