

JAERI-Tech  
95-012



移動ロボットの自己位置同定を目的とした  
特徴抽出画像処理プログラムの開発

1995年3月

海老原 健一

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)高野高速印刷

移動ロボットの自己位置同定を目的とした特徴抽出画像処理プログラムの開発

日本原子力研究所東海研究所情報システムセンター

海老原健一

(1995年2月1日受理)

原子力施設内において、作業員の代替として、巡回・点検作業を行なう知能ロボットにとって、環境内の任意の位置で自己位置を同定できる能力は、必要かつ重要な能力である。一般に、移動ロボットが、現在位置を同定する方法はいくつかあるが、人間のよう、受動的で、比較的広範囲の情報を検出できる視覚的なセンサによって検出された、環境中の機器の配置等の情報を用いて、自己位置の同定を行なうことは、望ましい方法の1つである。

そこで、本報告書では、知能ロボットの現在位置を同定することを目指して、CCDカメラによって検出される作業環境内の機器の画像から特徴抽出を行なう画像処理プログラムの開発について報告する。また、原子力施設内において巡回点検作業を行なう知能ロボットに搭載するために設計・製作したセンシングシステムについて概説し、さらに、このシステムに搭載されており、環境内の映像を得るためのCCDカメラの特性について記述する。

Program Development of the Feature Extraction from an Intensity Image  
for Identifying the Location of the Mobile Robot

Ken-ichi EBIHARA

Computing and Information Systems Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 1, 1995)

An intelligent robot, which autonomously patrols and inspects nuclear facilities instead of a human worker, needs to know its own position and orientation in the workspace. Generally, a mobile robot obtains its current position and orientation using the dead reckoning scheme in which the distance and orientation are measured by an odometer and gyrocompass. During the longtime movement of the robot, however, the accuracy of the location information gradually decreases because of accumulating error which is caused by some uncertain factors, such as slippage wheels and floor, and cannot be exactly estimated. Therefore it is necessary and important for the mobile robot to be able to correct the current location obtained by the dead reckoning scheme at anywhere in the workspace. There are some methods to correct the location information, such as infrared beacon system, detecting a mark which is put in the environment. It may be the most desirable method to estimate the position and orientation using some features extracted from an image of environmental objects taken by a CCD camera mounted on the robot.

This report describes the development of the program which extracts some features from an intensity image of equipments in the nuclear facility. The output data from the program will be used to identify the location of the mobile robot in the workspace. The overview of sensing system which includes a CCD camera to take necessary images and the characteristics of the CCD camera are also reported.

Keywords : Intelligent Robot, Sensing System, Estimation of Location, Feature  
Extraction

# 目 次

1. はじめに .....	1
2. 原子力施設巡回点検用センシングシステムの概要 .....	3
3. 環境内物体の画像からの特徴点抽出プログラムの開発 .....	14
3.1 細線化画像の生成 .....	15
3.2 領域抽出 .....	26
3.3 直線と交点の抽出 .....	33
4. センシングシステムから得られる画像に対するプログラムの適用 .....	37
5. まとめ .....	49
謝 辞 .....	51
参考文献 .....	51
付 録 .....	52

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Overview of Sensing System .....	3
3. Extraction of the Features from the Image of Some Environmental Objects .....	14
3.1 Producing the Thinning Image .....	15
3.2 Extraction of the Region .....	26
3.3 Extraction of Lines and an Intersection .....	33
4. Application of the Program to the Image Taken by Sensing System .....	37
5. Summary .....	49
Acknowledgements .....	51
Reference .....	51
Appendix .....	52

## 1. はじめに

原子力施設内の管理区域における高放射線下での作業のような、人間にとって危険かつ過酷な環境における作業を、人間の代替となるロボットにさせることは、作業員に対する安全性や労力の削減の点から、多くの人々によって望まれていることである。しかし、このような環境は、人間が作業をするにも困難な環境が多く、ましてロボットに対して好ましい状態に整備されていることはなく、むしろ予測できない事態が発生する可能性が非常に高い環境である。そのため、移動経路や作業内容が事前に決められ、繰り返し作業を行う産業用ロボットのなロボットに、そのような環境において作業を行わせることは不可能である。そこで、非日常的であり、かつ予測できない状況が起こる可能性がある環境において作業を行うロボットは、本来のロボットの特徵として考えられている耐環境性や持久性のほかに、環境変化に適切に対処するための適応性や柔軟性を持つ必要がある。つまり、過酷であり、予測不可能な状況が発生する可能性がある環境下で作業を行なうロボットは、そのときの環境の変化に応じて、自ら判断し行動する能力を持った自律的な知能ロボットでなければならない。

ここで、特に、上記のような知能ロボットが持つべき移動能力に注目し考察する。一般的にロボットの移動能力を考えたとき、さまざまな方法が考えられる。例えば、予め作業環境の正確な地図を記憶し、それに基づいて移動するもの、移動しながら作業環境内の地図を生成し、その結果の地図に基づいて移動するもの、さらに、作業環境内の事前の知識を全く持たず、人間のように常識的な知識のみを持って行動するものが考えられる。今、ロボットを知能ロボットに限定した場合、それに要求される能力から、自ずと必要とされる移動性能を見極めることができる。まず知能ロボットが作業を行なう環境は、ロボットのために整備された環境ではなく、予測できない事態が発生する可能性が非常に高い環境であるので、レール式やマーク追跡式の移動方法を用いることはできない、また予め移動経路を記憶させ、そのみに基づいて移動する方法も望ましくない。さらに知能ロボットが作業する環境は、作業中に変化する可能性がある環境であることから、予め与えられた地図のみを頼りに移動することも望ましくない。よって、知能ロボットは、その作業環境の地図を事前に持っているとしても、環境の変化に応じてその地図を更新しつつ、決められた経路だけでなく、環境中の任意の位置を移動する能力を持つことが理想的である。

そこで、環境変化を事前に持っている環境地図に反映させるためには、環境内の物体を検出し、その位置や方向を同定する必要がある。このとき、センシングの手法として能動的な (active) センシングと、受動的な (passive) センシングが考えられる。能動的なセンシングでは、例えば実際に触覚センサによって環境内の機器に触れることで、その機器についての情報を得ることや超音波やレーザー光を環境内の機器に向けて発し、そこからの反射を検出することによって情報を得ることができる。しかし、触覚センサを用いた方法では、触れることができる機器しか検出できず、また触れることにより、その機器を破損する可能性も考えられる。また、超音波やレーザーを用いた方法では、ある程度広い範囲内の詳細な物体形状を得ること

が、機能的、時間的に困難であり、さらに複数の知能ロボットを考えた場合、複数の超音波やレーザーの中から特定のロボットに関係する必要なデータを選び出すことも困難である。そこで、知能ロボットが環境内の機器等を検出する方法として、能動的センサでなく、人間の視覚のような受動的なセンサを使用することが望ましいと考える。さらに、その情報量の多さから、特に視覚的センサ (visual sensor) は、特に有用なセンサの1つであると考えられる。視覚的センサは、カメラによって環境物体を映像として検出するので、環境に対して何ら影響を与えず、また比較的広範囲の環境内の情報を一度に得ることが可能である。

本報告書では、まず原研情報システムセンターで開発した“原子力施設巡回点検用センシングシステム”について記述する。このシステムは、視覚的センサのほかに、聴覚的センサ、嗅覚的センサ、放射線センサを備えており、移動ロボットに搭載することが可能なシステムである。ついで、知能ロボットに、環境内の任意の位置を移動する能力を持たせることを目標とし、CCD カメラで撮った環境内の機器の画像から、機器の特徴点を抽出し、その情報からロボットの現在の位置情報を、より正確な値に修正することを目的として開発した画像処理プログラムについて報告する。

## 2. 原子力施設巡回点検用センシングシステムの概要

この章では、原子力施設巡回点検用センシングシステム (以下、センシングシステムとする。) [1] について記述する。

原研情報システムセンターでは、“人間動作シミュレーションプログラム:HASP” と称して、原子力施設内における知能ロボットによる巡回点検作業のシミュレーションを行なっている。知能ロボットによる巡回点検を模擬する場合、知能ロボットに搭載された各種センサによる周囲の環境状態のセンシングや、計算機を使った周囲環境の状態の認識を模擬することが必要となる。しかし、例えば、CCD カメラによって周囲環境の様子を画像として検出することを考えた場合、シミュレーションで得られる画像 (例えば、コンピュータグラフィックスを用いて生成した画像) によって、実際の CCD カメラで撮影した画像を正確に模擬することは不可能である。なぜなら、実際のカメラで撮影した画像は、カメラの光学系の歪みや画像転送時に生じるノイズ、また、さまざまな方向からの照明の反射光によってできる微妙な影などを、計算機によって正確に模擬することは不可能なためである。また、将来、知能ロボットを実現することを目指した要素技術開発を行なうためには、要素技術として開発される各種センサから得られたデータを処理するためのプログラムは、計算機によって模擬された理想的なデータに対して有効であるよりも、実際の環境から実際のセンサを用いて検出されたデータに対して使用可能なプログラムが望ましいことは明らかである。そこで、知能ロボットによるセンシングを実際に行なうために、将来の知能ロボットのセンサとなる“センシングシステム”を開発した。センシングシステムは、平成 4 年度に概念設計 [1] を行ない、平成 5 年度に製作したシステムである。

センシングシステムは、知能ロボットに搭載され、ロボットが人間の代替として原子力施設内において巡回点検を行なうときに、周囲環境の状態を検出する装置として設計された。原子力施設内で、人間である作業員は、その感覚器を用いて点検作業を行なっている。そのとき、特に、視覚、聴覚、嗅覚は重要な働きをする。例えば、機器からの漏水や蒸気漏れ、機器の破損、メータの読み取りなどは、すべて視覚によって行なわれる。また、回転機器の異常音の察知、潤滑油の焼けた臭いなどは、それぞれ聴覚、嗅覚によって行なわれる。そこで、今回、製作したセンシングシステムは、知能ロボットの視覚の働きをする視覚的センサ、聴覚の働きをする聴覚的センサ、嗅覚の働きをする嗅覚的センサを備えるものとして製作した。また HASP の研究では、知能ロボットの作業環境として、原子力施設内を想定していることから必要不可欠である放射線センサも備えている。

センシングシステムの視覚的センサは、人間の視覚のように周囲環境の状態を映像として検出し、また環境内の対象物までの距離を得るために、単板カラー CCD カメラとレーザー光を用いた距離センサを検出機器として使用している。カラー CCD カメラからは、640 × 480 ピクセルの大きさで、8 bit の輝度レベルを持つカラー画像を出力し、距離センサは、カラー画像と同じ大きさで、1 レベルが、実際の距離 2cm に対応するような距離画像を出力する。そ



それぞれの画像の例を Fig. 2.1, 2.2 に示す。聴覚的センサは、検出装置として指向性を持ったコンデンサマイクロホンを使用し、検出した音の周波数分布を出力する。CCD カメラとレーザー投光装置、マイクロホンは、同一の旋回台に設置され、上下左右のある範囲を動くことが可能である。嗅覚的センサは、検出部分に、4種の半導体ガスセンサを使用している。それぞれは、複合臭気、硫化水素、排ガス(有機溶剤が他の物質と反応することによって発生するガス)、可燃性ガスに対して反応するものである。また、気体分子の分布に影響のある温度、湿度を測定するための温度・湿度センサも備えている。嗅覚的センサは、出力として、半導体センサの抵抗の変化に比例して変化する電圧に関係した値を出力する。そのため、出力された値は、臭気気体の絶対的な量を検出するのではなく、むしろある基準値に対する相対的な値として以下の処理に使用するものである。実際の人間の嗅覚を考えても、人間はにおいの成分の絶対的な量を察知しているのではなく、そのにおいが、普通より強いかどうかを察知していることから、この出力値の扱いは妥当なものであると考えられる。放射線センサは、電離箱式サーベイメータを使用し、 $\gamma$ 線の量を測定する。このサーベイメータは、原子力施設内で作業員が使用するものと同程度のものである。そして、これらの各センサ機器は、ワークステーション(WS)によって制御され、検出されたデータはWS内のファイルとして保存される。

さらに、このセンシングシステムの制御や状態表示を行なうためのGUI(Graphical User Interface)を開発した。Fig. 2.3に、センシングシステムの旋回台の向きや傾き、音の周波数分布、嗅覚的センサの出力値や温度湿度、さらに放射線量の変化を表示するセンシングシステム状態表示画面を示す。また、このパネルの各種のボタンを押すことによって、手動操作パネル、自動動作パネル、センシングシステム用サーバパネル、前処理設定変更パネルを表示させることができる。手動操作パネル(Fig. 2.4)では、旋回台の回転制御、CCDカメラのレンズのフォーカスやズーム、レーザーや照明のon/off、各種センサの動作を手動で行なうことが可能となる。このとき、各種センサの動作状態は、前処理設定変更パネル(Fig. 2.6)によって設定できる。このパネルでは、レーザー走査のピッチ、走査開始角度、終了角度、距離の測定を行なうときにレーザーの赤色を画像から検出するためのしきい値、聴覚、嗅覚、放射線センサのサンプリング数を設定することができる。また、自動動作パネル(Fig. 2.5)では、旋回台の回転角や照明のon/offに対する目標値を入力することによって、自動的にそれぞれの機器を動作させることが可能である。さらに、センシングシステム用サーバパネル(Fig. 2.7)を用いることにより、このGUIは、プロセス間通信の形式によって、すでに開発されている命令理解システム[2]及び特殊なマークを用いた自己位置同定システム[2]と接続し、データの送受信を行なうことが可能である。この接続により、センシングシステムは、原理的に命令理解システムに入力された日本語の命令の内容に従って動作することが可能となり、またセンシングシステムのCCDカメラを使用し、特殊なマークを撮影した画像を用いて、移動ロボットの自己位置を同定することも可能となる。

センシングシステムの移動ロボットに搭載される部分(つまり、各種センサや旋回台)と制御・データ処理用のWSとは、無線器を使った通信が可能である。また、状況に応じて有線による通信も可能である。ここで記述した機器の詳細な仕様についてはTable. 2.1, 2.2, 2.3においてまとめる。

以上のような仕様のセンシングシステムは、ハードウェアであることから、センサ等にそれぞれ固有の特性を持つ。ここでは、特に検出画像を用いて移動ロボットの位置や方向を同定するために必要な、センシングシステムに搭載された CCD カメラの光学系等のパラメータについて記述する。

検出画像を使った自己位置同定では、画像内の座標系、カメラ座標系、環境内の絶対座標系との間の座標変換 (付録参照) が必要となる。そして、このとき座標変換行列の各成分を決定するためには、以下に記述するような、画像を得るためのカメラのいくつかのパラメータが必要である。

- レンズの焦点距離  $f$

カメラ座標系での点を画像座標系に射影するために使われるパラメータ。

カメラ座標系での座標を画像座標系の座標に射影する場合、このパラメータによってその縮尺が決定する。焦点距離はズーム操作によって変化するが、現在は、ズームを完全に引いた場合の値  $f = 12.508 \text{ mm}$  を使用している。

- CCD 素子の 1 ピクセルの実際の大きさ 横  $px$  縦  $py$

CCD 素子上に配列しているピクセル 1 つの物理的な長さを表すパラメータ。

ピクセルが正方形でない場合、縦横の値が必要である。この値を用いて、ピクセル数で表される画像上のある長さを画像座標系上 (CCD 素子上) での実際の長さに変換する。画像に写った物体の縦方向と横方向の実際の長さを、比の計算を用いて、画像座標系での長さに変換し、その値を画像内で物体が占める縦と横のピクセル数で割ることによって、このパラメータを決定する。

いくつかの測定の結果、 $px = 0.0083 \text{ mm}$ ,  $py = 0.0081 \text{ mm}$  を用いることとした。実際、この値を用いて、部屋座標系のある長さの線分に相当する線分を画像上に引いた場合、画像上に引いた線分と画像に写った部屋座標系内の線分とが一致することからも、この値は妥当であると思われる。

- レンズの光軸を中心とした CCD 素子の回転のずれ  $\beta$

このパラメータが 0 でない場合、レンズの光軸に垂直となる面に引かれた垂直な線を、カメラを光軸を中心に回転させることなく撮影した場合、画像上において、その線が傾いて写っている現象を引き起こす。

傾きを測定することによって、この値を決定した。結果として、 $\beta = -0.75 \text{ deg}$  を得た。(光軸方向に対して、右ねじ方向を正とする。)

- レンズ光軸の CCD 素子に対する並進 横  $tx$ , 縦  $ty$

レンズ光軸の光軸に直交する軸に関する回転  $\rho, \sigma$

レンズ光軸の並進、回転のズレは、画像上で同様なズレを引き起こすので、同一の項目において記述する。

レンズ光軸の並進は、レンズの光軸が CCD 素子を貫く点と CCD 素子の中心とのずれを表し、また、レンズ光軸の回転は、レンズ光軸が、光軸に垂直な軸に関して回転してい

ることによるパラメータである。

まず、回転について考えた場合、パン軸に平行な軸周り、チルト軸に平行な軸回り、二通りの回転が考えられる。もし、光軸が回転しているのであれば、焦点の位置がズレることから、レンズの真正面の点の画像内での像は、カメラからその点までの距離を変化させたとき、画像内で移動するはずである。そこで、そのような実験をおこなった結果、レンズ真正面の点の画像内での像は、測定誤差の範囲内で移動していなかったため、光軸の回転によるズレは、無視してよいと考えられる。

次に、光軸の並進によるズレは、レンズの真正面の点の像が、画像内で、(328, 273) のピクセルに写っていたので、その点を画像の中心と考える。今、画像は、640 × 480 であるので、 $tx = 8$  (ピクセル)、 $ty = 33$  (ピクセル) とする。

- レンズの周辺における歪み

レンズの一般的性質からレンズの中央からレンズの周辺へ向かうほど画像が歪むが、その歪みが大きい場合、補正をする必要がある。センシングシステムを用いて、床面上のマークを撮影し、画像の中心付近に写った場合と周辺付近に写った場合を比較したとき、検出できるだけの差がなかったため、センシングシステムのカメラレンズの周辺の歪みは、無視することとした。

一般に画像を使った測定を行なうとき、決定すべきパラメータは、そのカメラで撮影された画像を使用し決定されるべきであり、実際、上記のパラメータは、焦点距離を除いて、すべてそのような方法で決定されている。

Table 2.1 The specification of the sensor part of sensing system

視覚的センサ	CCD カメラ	種別	単板カラー CCD カメラ
		画素数	769 × 494
		解像度	水平 460 本, 垂直 350 本
	レンズ	種別	電動ズームレンズ
		焦点距離	12.5mm ~ 75mm
		絞り範囲	F1.8 ~ F360
		フォーカス	1m ~ ∞
		画角範囲	28.7°・7° ~ 4.9° × 3.7°
	レーザー投光装置	光源	半導体レーザー
		水平走査	方式 ガルバノミラーによる 連続走査
		走査範囲	45°
		走査速度	480 Hz
		垂直走査	方式 ガルバノミラーによる方位制御
		走査範囲	50°
		方位分解能	0.1°
	受光装置		CCD カメラを兼用
	旋回台	種別	電動 2 軸 (パン, チルト)
		旋回範囲	左右 各 90°
			上下 上 60° 下 90°
		旋回速度	左右 約 15° /s
			上下 約 15° /s
		停止精度	± 1° 以下
聴覚的センサ	マイクロホン	種別	コンデンサマイクロホン
		周波数特性	100 ~ 10000 Hz
		指向特性	全指向/単一指向/鋭指向 切り替え式
	旋回台		視覚センサと兼用
嗅覚的センサ	ガスセンサ	種別	半導体ガスセンサ (基盤型薄膜及び, 熱線型焼結半導体 センサ)
	温度・湿度センサ	検知方式	自然拡散ガス検知式
放射線センサ	検出装置	種別	電離箱式サーベイメータ
		測定線量	30keV ~ 2Mev の γ 線
		測定範囲	1μSv/h ~ 100mSv/h
		時定数	μSv/h レンジ 約 6 秒, mSv/h レンジ 約 1 秒

Table 2.2 The specification of the communication part of sensing system

ロボット側通信装置	送信部	映像音声信号	方式	NTSC
			周波数	97.25 MHz (映像) 101.75 MHz (音声)
			出力レベル	110 dB $\mu$
		データ信号	方式	FSK
			周波数	74.5 MHz
			出力レベル	100 dB $\mu$
			伝送速度	4800 BPS
	受信部	データ信号	方式	FSK
			周波数	43.5 MHz
			入力レベル	50 ~ 90 dB $\mu$
固定局通信装置	送信部	データ信号	方式	FSK
			周波数	43.5 MHz
			出力レベル	120 dB $\mu$
			伝送速度	4800 BPS
	受信部	映像音声信号	方式	NTSC
			周波数	97.25 MHz (映像) 101.75 MHz (音声)
			出力レベル	60 ~ 85 dB $\mu$

Table 2.3 The specification of control part of sensing system

ワークステーション	機種	ラップトップ型ワークステーション P2200 (Panasonic)
	CPU	Super SPARC CPU (33 MHz)
	メモリ	メイン 32MB, フレームメモリ 1MB
	OS	PanaOS/S 1.0 (Solaris 1.0 相当 + JLE)

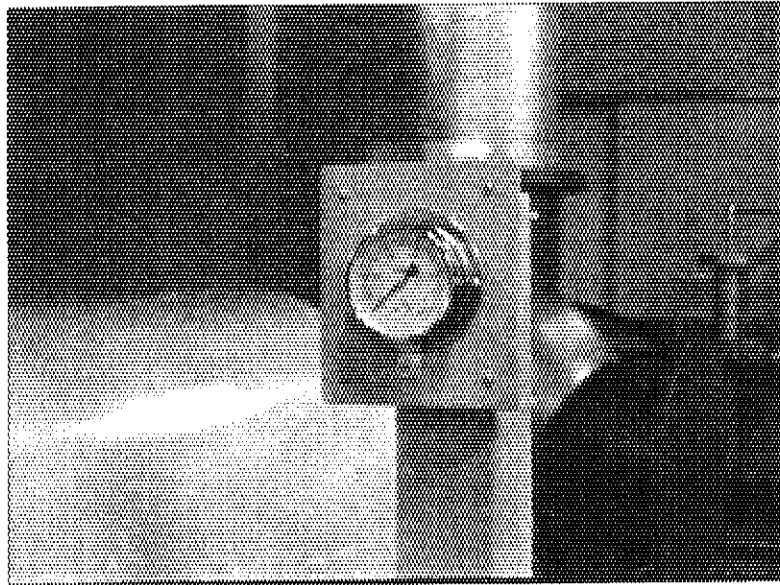


Fig. 2.1 The intensity image taken by the color CCD camera

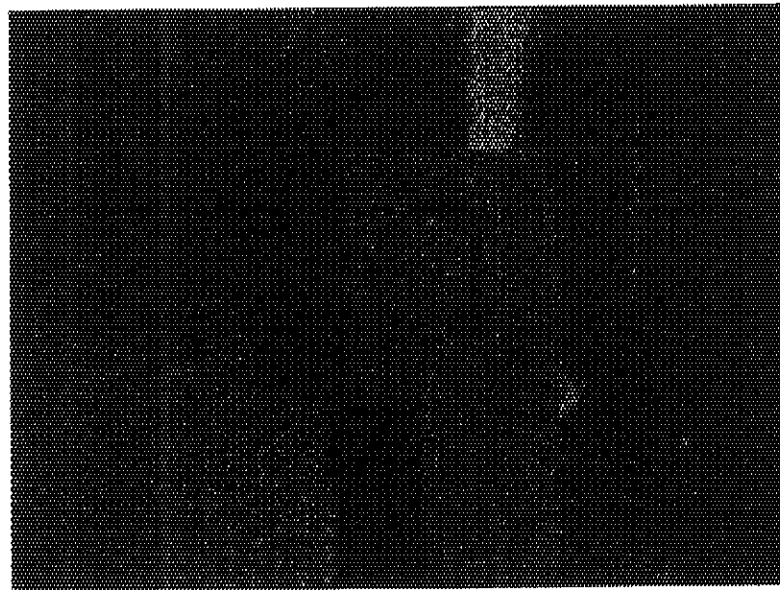


Fig. 2.2 The range image taken by the laser range-finder

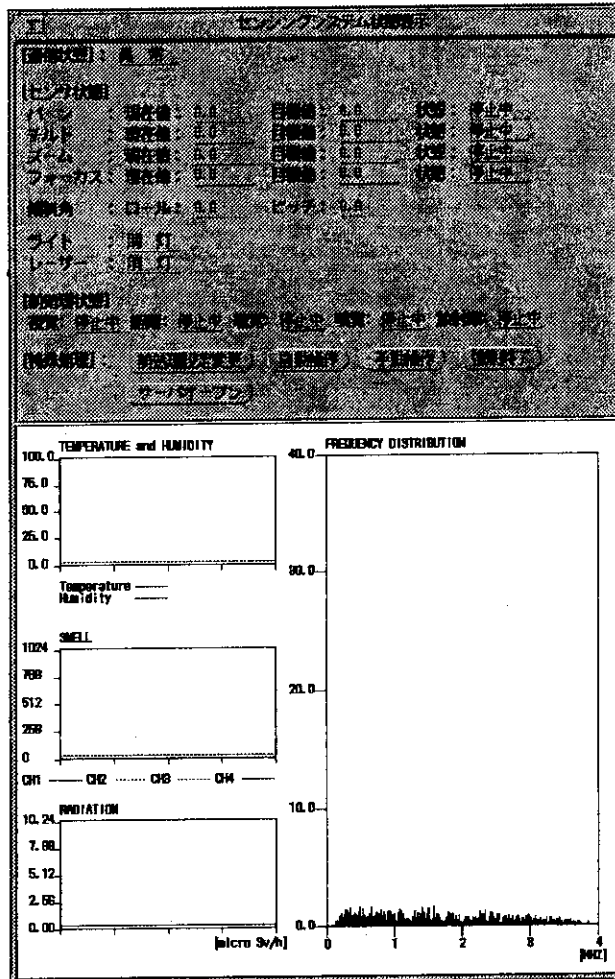


Fig. 2.3 GUI for controlling the sensing system

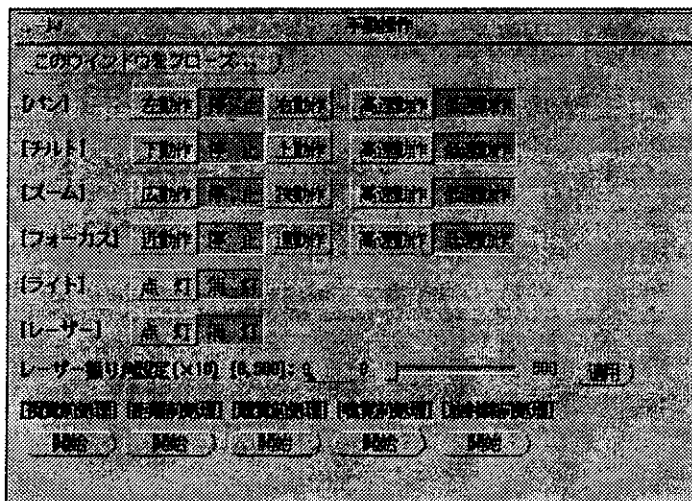


Fig. 2.4 The panel for manually controlling the sensing system

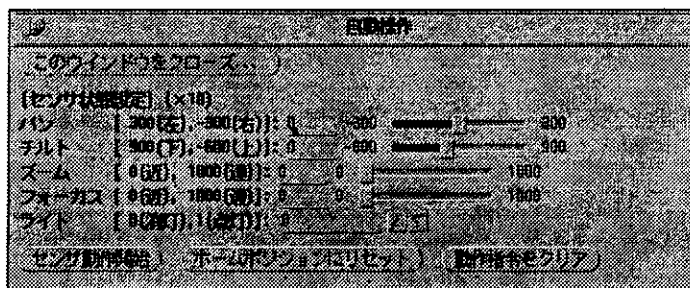


Fig. 2.5 The panel for automatically controlling the sensing system



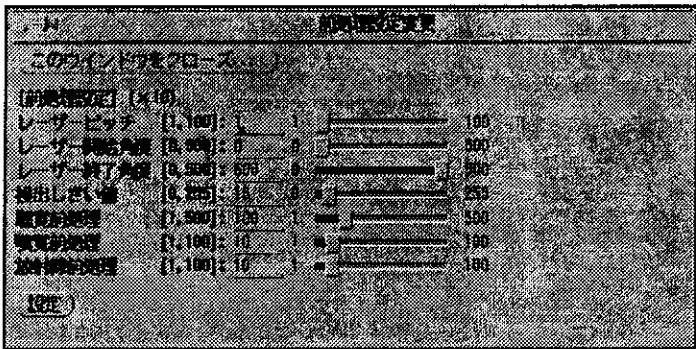


Fig. 2.6 The panel for changing some variables for sensing

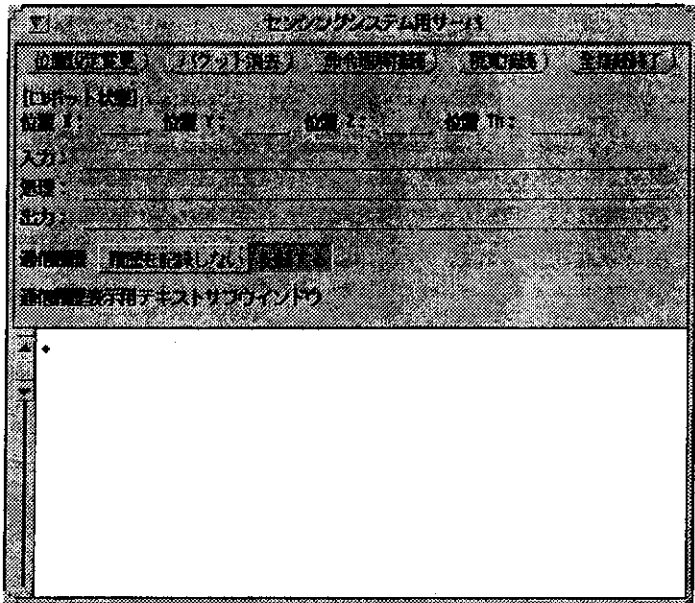


Fig. 2.7 The panel for connecting with other systems

### 3. 環境内物体の画像からの特徴点抽出プログラムの開発

本節において、ロボットが CCD カメラで撮った画像から、ロボット自身の現在位置及び向きによりよい値を算出する方法について記述する。

一般的に、環境内を移動するロボット(移動ロボット)は、エンコーダ等の測定器を用い、環境内における自分自身の現在位置と向きを測定しながら移動している。しかし、移動ロボットの移動方法が、車輪式であろうと、脚式であろうと、環境の床面との接触点における滑りのため、長時間移動することによって、検出誤差が累積され、その位置に関する値の信頼性は著しく減少する。そこで、本報告書において記述する移動ロボットの自己位置の同定は、移動ロボット自身に搭載されたエンコーダ等の測定装置によって測定された移動ロボットの位置と向きを、移動ロボットが持つカメラによって撮影された環境内の対象物の画像から抽出された特徴点と、あらかじめ持っている環境内におけるその特徴点の位置情報を用いて修正することである。つまり、実際に撮影された画像から抽出した特徴点の位置と、推定位置から撮影されるべき画像から抽出されるべき特徴点の位置との差から、移動ロボットの実際の停止位置と向きをよりよい精度で求めることである。

HASP における研究では、前述のように、すでに特殊なマークを用いた自己位置同定システムが開発されている。しかし、この方法では環境内に特殊なマークを多数設置する必要がある。つまり、ロボットの作業環境をロボットに適した環境に変えることとなる。作業環境を変えることは、ロボットの作業環境を制限することになるため、ロボットが作業を行なう範囲に対する汎用性を損なうこととなる。そのため、特殊なマークを使用して、現在の位置と向きを同定する方法は、将来、開発を目指している知能ロボットに適している方法とは言えない。そこで、より一般的な方法として、CCD カメラによって検出された、環境中に設置されている機器の画像から特徴点を抽出し、その情報から自己位置の修正を行なうことを考える。そのため、本報告書において、CCD カメラで検出された画像から環境中の機器の特徴点を抽出するためのソフトウェアの開発について記述する。

今回の研究では、自己位置を同定するための環境内の物体の特徴として、環境中の機器を設置している台座の稜線の方向及びその稜線が作る頂点を用いることとした。その理由として 1 つは、原子力施設内のほとんどの機器は、水漏れ等により床に水が溜まった場合を考慮し、台座上に設置されているため、その台座の稜線と頂点を使用することで移動ロボットは環境内のかなり任意の位置で自己位置の同定が可能となることである。また、台座の稜線及びそれらによって作られる頂点を撮影された画像から検出することが、比較的容易であることも 1 つの理由である。

この方法の概要は以下のとおりである。また実際の計算については付録に示す。

- (1) エンコーダ等の測定装置の測定結果から推定される移動ロボットの位置から撮影可能な最も近い台座の頂点を選び出し、その頂点がカメラの光軸上にのるようにカメラを向け、頂点の周囲の画像を抽出する。

- (2) (1) において得られた画像から自己位置の同定に必要な稜線に対応する直線と頂点に対応するそれらの直線の交点を抽出し、画像内における交点の座標及び交点を作る直線上の任意の1点の座標を算出する。
- (3) カメラの位置や向きに関係する適当な座標変換を用い、(2) で抽出した点の座標を、画像平面内の座標系 (画像座標系) を用いた表現から、環境内に設置された座標系 (絶対座標系) を用いた表現に変換する。
- (4) (3) で得られた絶対座標系で表現された、画像内の交点と任意の1点から、絶対座標系で表現された画像内の直線の方向を求め、交点の座標と頂点の座標、直線の方向と稜線の間隔とを、それぞれ比較し、その差から移動ロボットの現在位置と向きをより正確に算出する。

環境内の実際の物体を撮影した画像 (実画像) は、コンピュータグラフィックスを用いて生成した理想的な画像とは異なり、光の反射、物体の影、対象物の汚れ、撮影時のノイズ等を含むために、上記の過程において、実画像から自己位置の同定に必要な稜線及びそれらが作る頂点を選び出し、それらを高い精度で抽出することは困難なことである。そこで、本研究では、特に、線画の生成と画像領域の抽出の2段階の過程を経て、実画像から稜線に対応する線分を、できる限り高い精度で抽出するプログラムの開発を試みた。線画生成部分では、極力、画像内のノイズを除去し、また、輝度値の違いによるエッジのみでなく色の違いによるエッジの検出も行なった。また、領域抽出部分では、検出されたエッジの中から必要なエッジのみの抽出を行なった。この領域抽出を行なうことによって、稜線に対応するエッジに当てはめる直線の数が少なくなり、画像内での直線の探索が容易になる。なお、プログラムの開発においては、原研研究炉 JRR-3 の地下一階一次区画を模擬して製作した模擬環境内 [2] の機器の台座を、三板カラー CCD カメラを用いて撮影した画像を処理対象の画像 (Fig. 3.1) として用いた。この画像は、8 bits の輝度値レベル幅を持つ、大きさ  $514 \times 384$  の画像である。

### 3.1 細線化画像の生成

一般的に、カラー画像から細線化画像を生成する過程は、Fig. 3.2 (a) に示す方法が用いられている。

しかし、この方法では、初めにカラー画像を白黒画像に変換してしまうため、有用な色情報を用いていないこと、二値化を全画像において行なうため、他のエッジより相対的に輝度値が低いエッジが消えてしまうことなど、いくつかの点で鮮明な線画を得ることができない。また、さらに後の処理において望まれる鮮明な細線化画像を得るためには、ノイズ等によって生じてしまう不必要なエッジや線分を抽出しないようにすることも重要である。そこで、これらのことを考慮し、一般的な細線化画像の生成方法をいくつか改良した。

#### (1) 直接、カラー画像からエッジ抽出を行う

カラー画像において、エッジとして検出したい境界線が生じるために、次の二通りの理由が

考えられる。一方は、境界線を作る二つの面が同色であるが、表面の明るさの違いによって境界線を作っている場合であり、他方は、それらの面が違う色を持つ場合である。カラー画像を濃淡画像に変換した場合、前者の境界線は輝度値の差として現れ、濃淡画像においても明瞭な境界線として見ることができ、よって、濃淡画像からもその境界線をエッジとして検出することができる。しかし、後者の場合、表面の明るさも違っていれば、前者と同様に、濃淡画像でも境界線が輝度値の差として現れるが、明るさが同程度の時は、濃淡画像に変換することによって、色の違いによる境界線が、明瞭な境界線として見ることができず、カラー画像において、明らかな境界線であった部分をエッジとして検出できなくなってしまうことがある。

そこで、R, G, B の各成分の画像、それぞれに直接 エッジ検出オペレータである Sobel オペレータ [3, 4] を作用させることとした。ここで用いた Sobel オペレータは、一般的な  $3 \times 3$  のテンプレートである。テンプレートのオペレータを画像に作用させるとは、テンプレートを画像に重ね、各マスに重なる画素の輝度値とそのマスの値を掛け合わせ、さらにすべてを足し合わせることによって、中心画素のエッジ強度を求めることである。よって、この操作を R, G, B, それぞれの成分の画像に対して行なうため、1つの画素に対して、3つのエッジ強度を得ることとなる。そこで、それらの強度を足し合わせることによって、得ようとするエッジ画像のエッジ強度とし、このときエッジ強度が 255 より大きくなった場合、その画素のエッジ強度を 255 とし、エッジ画像を得た。

Fig. 3.3, 3.4 に、濃淡画像からエッジ抽出を行なった場合のエッジ画像と、カラー画像から直接、エッジ抽出を行なった場合のエッジ画像を示す。濃淡画像からのエッジ画像は、明るさの違いによる境界線に対応するエッジを鮮明に抽出しているが、カラー画像において黄色の面と緑色の面が作る境界線に対するエッジが、他のエッジに較べて低い輝度で得られている。また、明るさが同程度の同色の面が作る部分の境界線も、他のエッジに較べて低い輝度のエッジとして得られている。これに対して、カラー画像からのエッジ画像は、前者と比較して画像にノイズが多く含まれるが、前者のエッジ画像において、低い輝度となっていたエッジが、他のエッジと同程度の輝度で得られていることが分かる。よって、カラー三成分の画像それぞれに、Sobel オペレータを作用させることにより、明るさが同程度である同色の面が作る境界線や、明るさが同程度であり、色が違う面によって作られる境界線についても安定して、エッジとして抽出することが可能となった。

## (2) 画像を格子に区切り、各格子内において二値化を行なう

画像全体の輝度値に基づいて二値化を行なった場合、画像全体において、相対的に輝度値が大きい画素が 1 となり、そうでない画素は 0 となってしまうことがある。そのため、エッジ画像内のエッジとして抽出された境界線のうち、画像全体を通じて、輝度値が大きいエッジのみが残り、その他のエッジは消えてしまうことになる。この現象を見るために、従来の方法でエッジを検出した画像全体に対して、二値化処理を行なった画像を Fig. 3.5 に示す。この図から分かるように、低い輝度のエッジは二値化において消えてしまっている。しかし、この現象は、エッジを抽出する時に、出来るだけエッジを強調し、またどの部分のエッジも同程度の輝度値を持つようにすることによって、ある程度減らすことが可能である。実際、カラー画像

から直接エッジを抽出した画像全体に対して二値化処理を行なった場合 ( Fig. 3.6), 上記の現象を見ることはできない。しかし, エッジ検出時の工夫だけで, この現象を完全になくすることがはできないため, 本報告書における線画生成方法が, できる限り多くの画像に対して適応可能である汎用的なものとするために, 以下に記述する処理を行なうこととした。

上記の現象は, 画像全体の画素の輝度値を比較しているために生じている。つまり, 輝度値が低いエッジは, そのエッジ付近の領域内ではエッジとして見るができるが, 画像全体では輝度値が比較的小さいものとみなされ, 二値化処理によって消されてしまう。よって, 二値化処理の対象領域を小さくすることによって, この現象を抑えることができると考えられる。そこで, 画像をある大きさの矩形 (今回の場合は,  $64 \times 64$  の正方形) に区切り, 各々の矩形内において, 二値化処理を行なうこととした。このとき用いた二値化のアルゴリズムは, 各矩形内における輝度値ヒストグラムを二分するしきい値を, 大津の判別分析法 [5, 10] を用いて求め, そのしきい値に基づいて二値化するものである。

Fig. 3.7, 3.8 に, 従来の方でエッジ抽出を行なった画像と, カラー画像から直接エッジ抽出を行なった画像, それぞれに対して, 格子に切った二値化処理を適応した結果の画像を示す。Fig. 3.7を見ると, Fig. 3.5 において消えてしまっていたエッジが鮮明に得られていることが確認できる。しかし, Fig. 3.8 から分かるように, この方法を用いると, Fig. 3.4 に現われた輝度値が低いノイズのみを含む正方形において二値化処理を行った場合, その正方形内においてノイズのみを強調してしまう結果となり, 後の処理においてその影響が現われてしまう。そこで, これを回避するために次節で述べる方法を用いた。

### (3) 直接, エッジ画像の細線化を行なう

従来, 細線化処理は, 二値化した後に行われていた。しかし, そのような処理方法では, Fig. 3.7, 3.6 に見られるような, 二値化の段階で強調されてしまったノイズに対しても細線化を行なってしまい, その結果が後の線画にも残ってしまう。そこで, このようなノイズが後の処理に対して影響を与えないように, 以下の処理を行なうこととした。

まず, まだ濃淡画像 (輝度値レベルが,  $0 \sim 255$  の範囲にある画像) である, カラー画像から抽出したエッジ画像に, 直接, 細線化処理を行なうことによって, 撮影時のノイズや対象物の汚れのために, エッジ抽出処理で抽出され, 前節で述べた二値化処理により強調されてしまうような孤立した濃淡エッジを点に収束させる。そして, 点に収束したノイズを適当なノイズ除去方法によって除去する。この処理において, 濃淡ノイズを点に収束させることによって, 画像全体からノイズを識別することが容易になり, それらを除去することが容易となる。Fig. 3.9 に, エッジを示す濃淡画像に細線化 [6, 10] を行なった画像を, Fig. 3.10 に, ノイズを点に収束させた画像を示す。さらに, この画像に上述の二値化処理を行ない, 点に収束させたノイズを除去した画像を Fig. 3.11 に示す。

以上いくつかの処理を加えて改良した線画生成の過程を Fig. 3.2 (b) に示す。また, この線画生成処理の過程に沿って生成される各々の画像と最終的の生成された線画を Fig. 3.12 に示す。

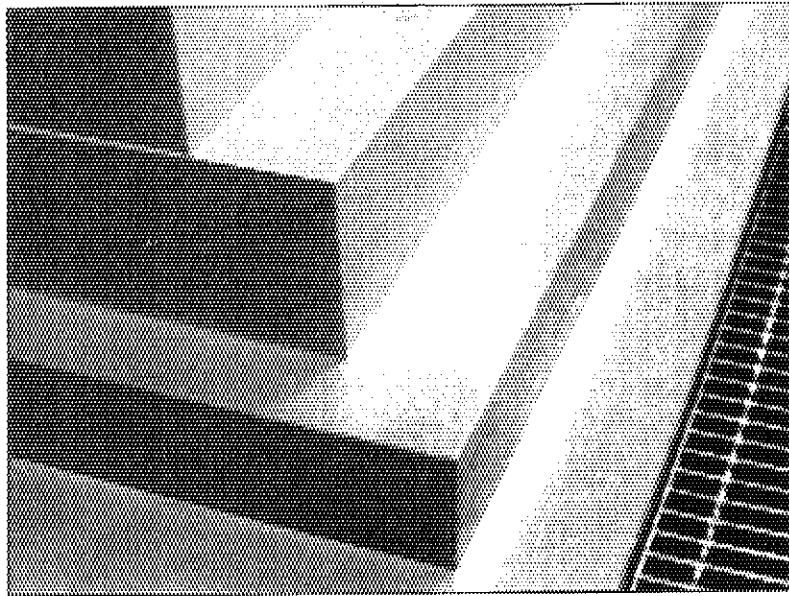


Fig. 3.1 The input image

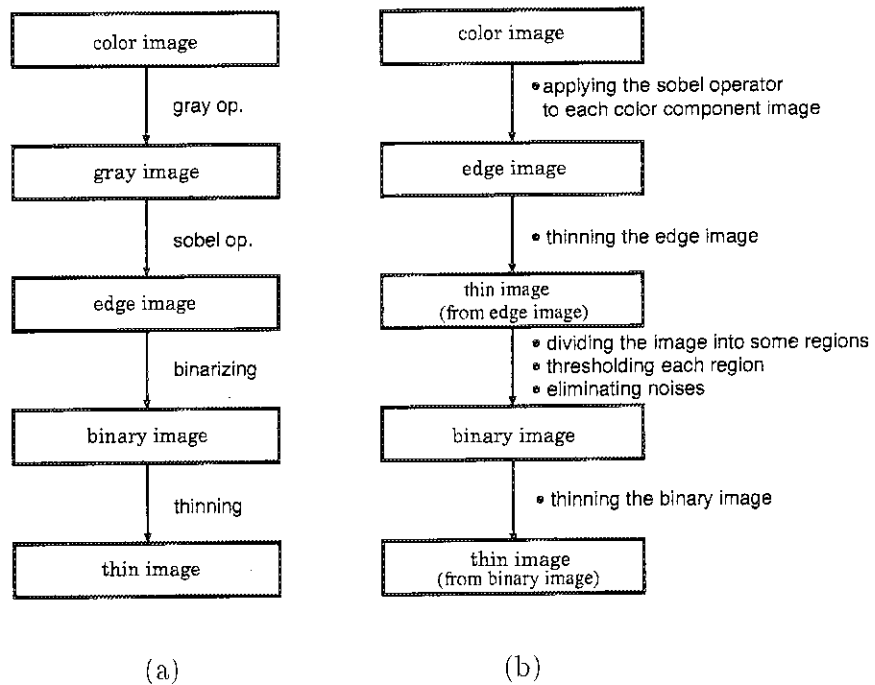


Fig. 3.2 The previous method (a) and the improved method (b) to obtain the thinned-edge image

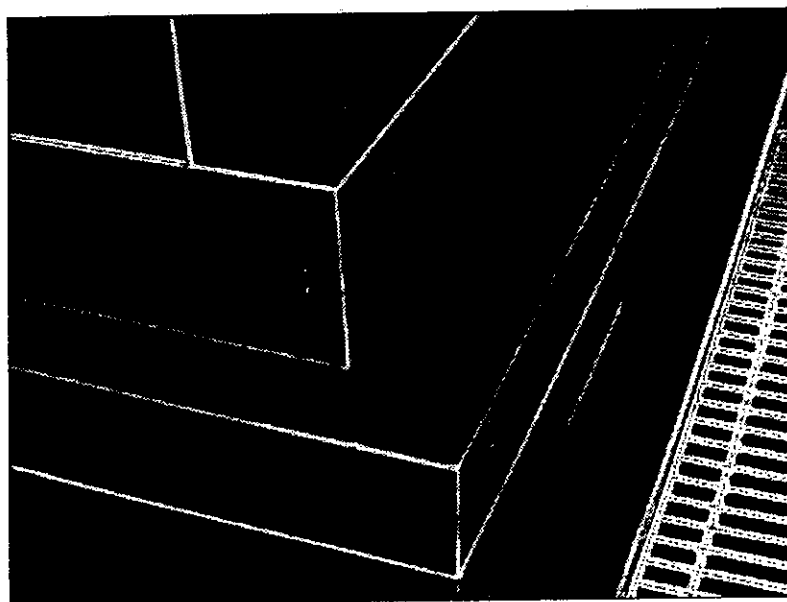


Fig. 3.3 The edge image extracted from the gray-level image

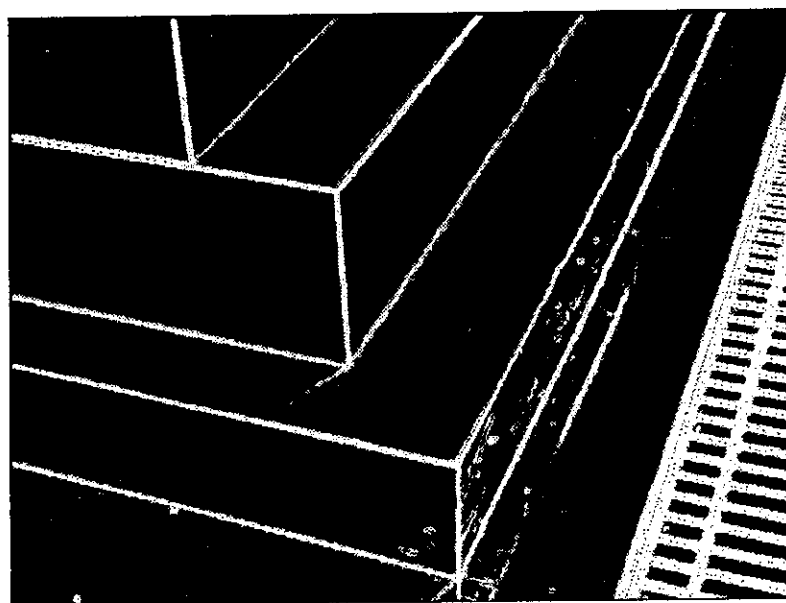


Fig. 3.4 The edge image extracted from the color image

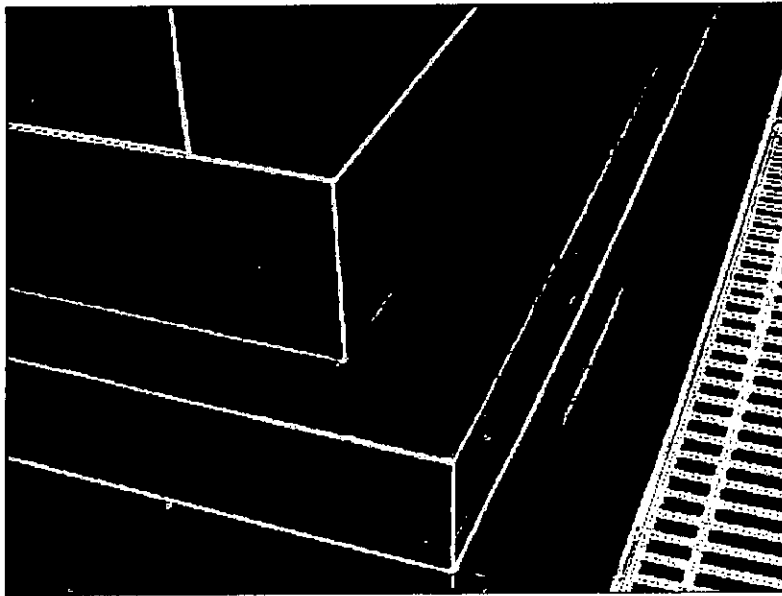


Fig. 3.5 The image obtained by thresholding the edge image extracted from the gray-level image using the previous method

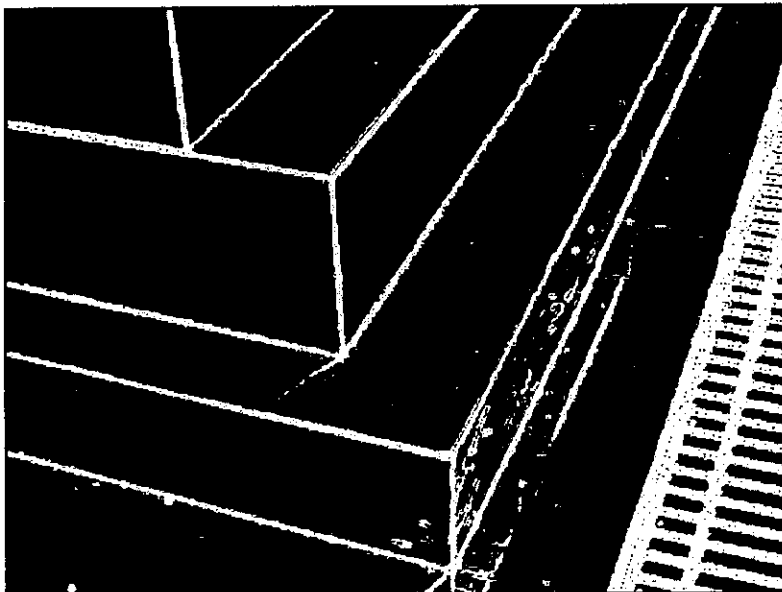


Fig. 3.6 The image obtained by thresholding the edge image extracted from the color image using the previous methods



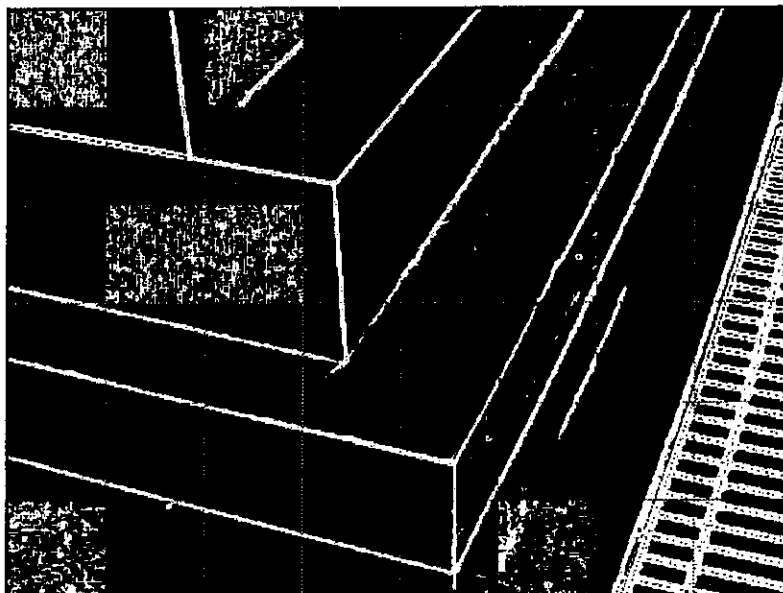


Fig. 3.7 The image obtained by thresholding the edge image extracted from the gray-level image using the improved methods

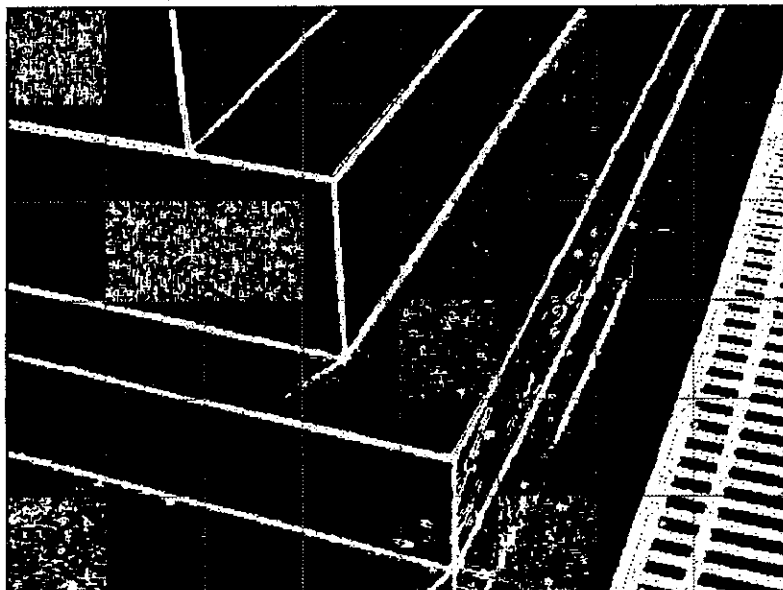


Fig. 3.8 The image obtained by thresholding the edge image extracted from the color image using the improved methods

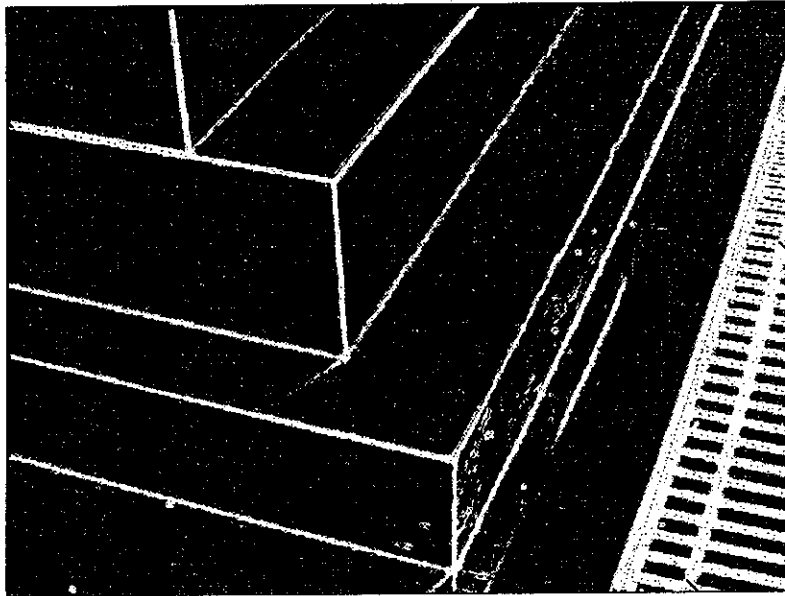


Fig. 3.9 The image obtained by shrinking the noise by thinning the edge image

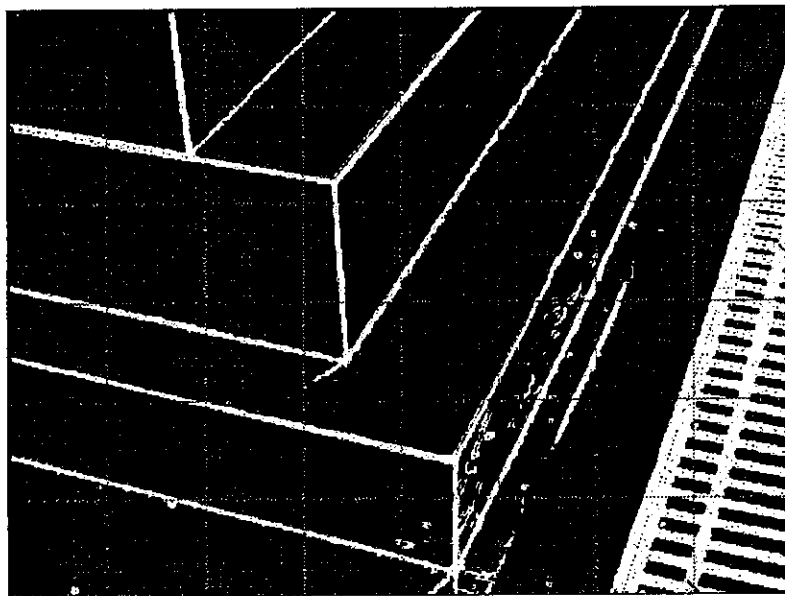


Fig. 3.10 The image obtained by thinning Fig.3.9 using the improved method

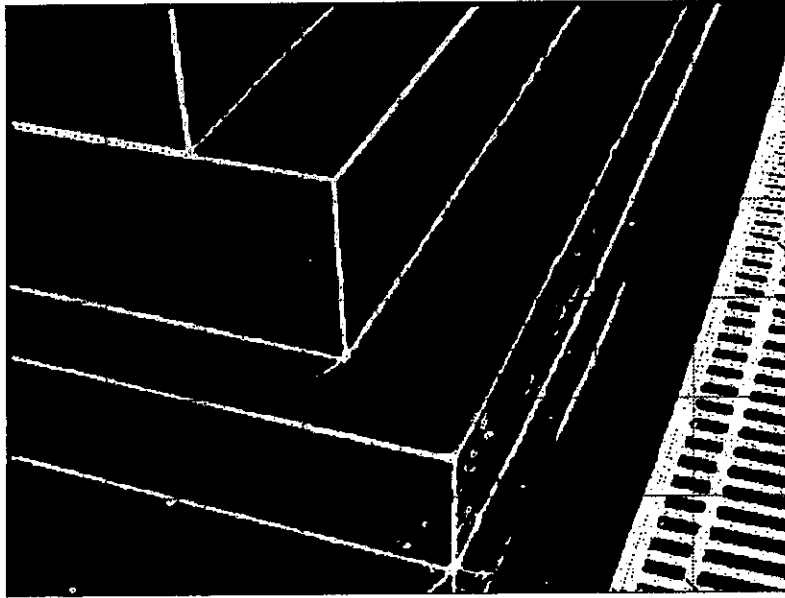


Fig. 3.11 The image obtained by eliminating the point noises

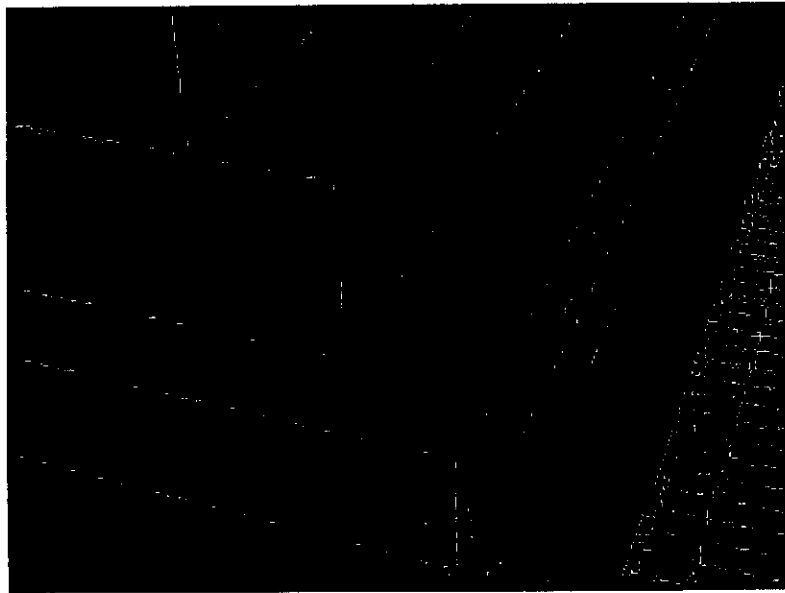


Fig. 3.12 The thinned-edge image obtained using the improved method

### 3.2 領域抽出

前節において、いくつかの処理を加えることによって、必要であるが除去されてしまうような線分を残し、また、ノイズなどで生じる不要な線分を除去した線画を生成することができた。しかし、必要な稜線に対応する線分と頂点に対応する線分の交点を抽出することを目的とした場合、Fig. 3.12 から、まだ、画像内の線分数が多すぎるのが分かる。そこで、色情報を用い、必要な稜線や頂点に対応する線分や交点を含む領域を抽出することを考える。

まず、ここで色について簡単に述べる [7]。厳密に言う、色は、“色感覚による色”と“色知覚による色”に区別される。色感覚による色は、心理量としての色とそれを感じさせる物理量としての光の分光特性との対応関係を測定することによって、心理物理量として定量的に規定するものである。また、色知覚による色は、心理量として人間の知覚した色を記号、色表等を用いて定性的に規定するものである。さらに、それぞれに対して色を表示するための表色系と呼ばれる体系があり、前者を表示する体系として混色系が、後者を表示する体系として顕色系がある。混色系の代表的なものは、CIE(国際照明委員会)表色系であり、この中に RGB 表色系が含まれる。また、顕色系の代表的なものは、色の色相、明度、彩度を扱うマンセル表色系である。混色系は、色を定量的、数学的に扱うために便利であるが、表示された色が感覚的にどのように見えるかを評価するには、顕色系が便利である。

通常、色の違いにより画像から特定の領域を抽出する場合、その抽出方法は、人間の感覚的な色の見え方に依存するはずである。そこで、本研究では、人間の感覚的な色の見え方、つまり表色系として顕色系のマンセル表色系を用いて領域抽出を行うことを試みた。マンセル表色系は、色の心理量を色相 (hue)、彩度 (saturation)、明度 (intensity) の 3 属性で定義している。特に色相は、色の違いを区別するための属性であることから、色相を用い、色の感覚的な見え方の違いによる領域抽出が可能となると考えられる。色相は、Fig. 3.13 のような、色相環と呼ばれる 1 つの円の円周上に配置されている。色相の配置方法は、まず、R(赤)、Y(黄)、G(緑)、B(青)、P(紫)の色を基本色相とし、それらが円を 5 等分するように配列され、次にその 5 つの基本色相の中間に、YR、GY、BG、PB、RP となる色が配置される。さらに、隣合った色相の間を 10 等分し、全体が 100 色相で構成されている。そこで、色の違いを用いた画像領域の抽出は、まず、画像の各画素の R、G、B 三色の輝度値をマンセル表色系の色相 (hue)、彩度 (saturation)、明度 (intensity) に変換し、そのあと、色相が、色相環のある範囲に含まれる画像領域を抽出することによって行った (RGB 表色系からマンセル表色系 (HSI 表色系) への変換方法は [7] を参照)。

特に本研究で用いた、Fig. 3.1 に示す模擬環境の機器の台座付近の画像において、抽出したい台座の色は、感覚的に黄色に見えることから、色相環において YELLOW を含む範囲に含まれる色相値を持つ画素を抽出することにより、台座部分の画像領域が抽出可能となると考えられる。但し、画像には、感覚的に緑色に見える部分も含まれているので、YELLOW を含む領域から GREEN を含む領域は除外することが望ましいと思われる。このことを調査するために、色相環を 20 等分し、各々の領域に含まれる色相値を持つ画素のみを表示した画像を Fig. 3.14 に示す。これらの画像から、色相環の 5YR ~ 5Y の範囲内の色相値を持つ画素のみ

を含む領域を抽出することによって、望む黄色の台座部分の領域を画像から抽出できることが分かる。この方法によって抽出された領域の画像を Fig. 3.15 に示す。この結果により、前章で得られた線画から台座部分を構成する線を抽出することができる。その結果の画像を Fig. 3.16 に示す。また、細線化画像から抽出された線分が、原画像の稜線に合っていることを見るために、Fig. 3.16 を Fig. 3.1 に重ね合わせた Fig. 3.17 を示す。

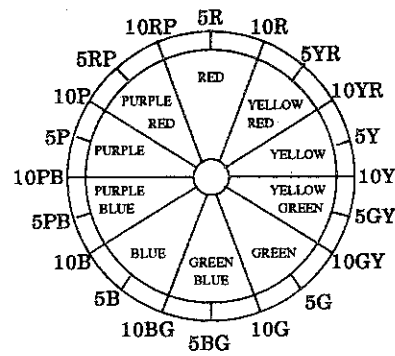


Fig. 3.13 The hue circle

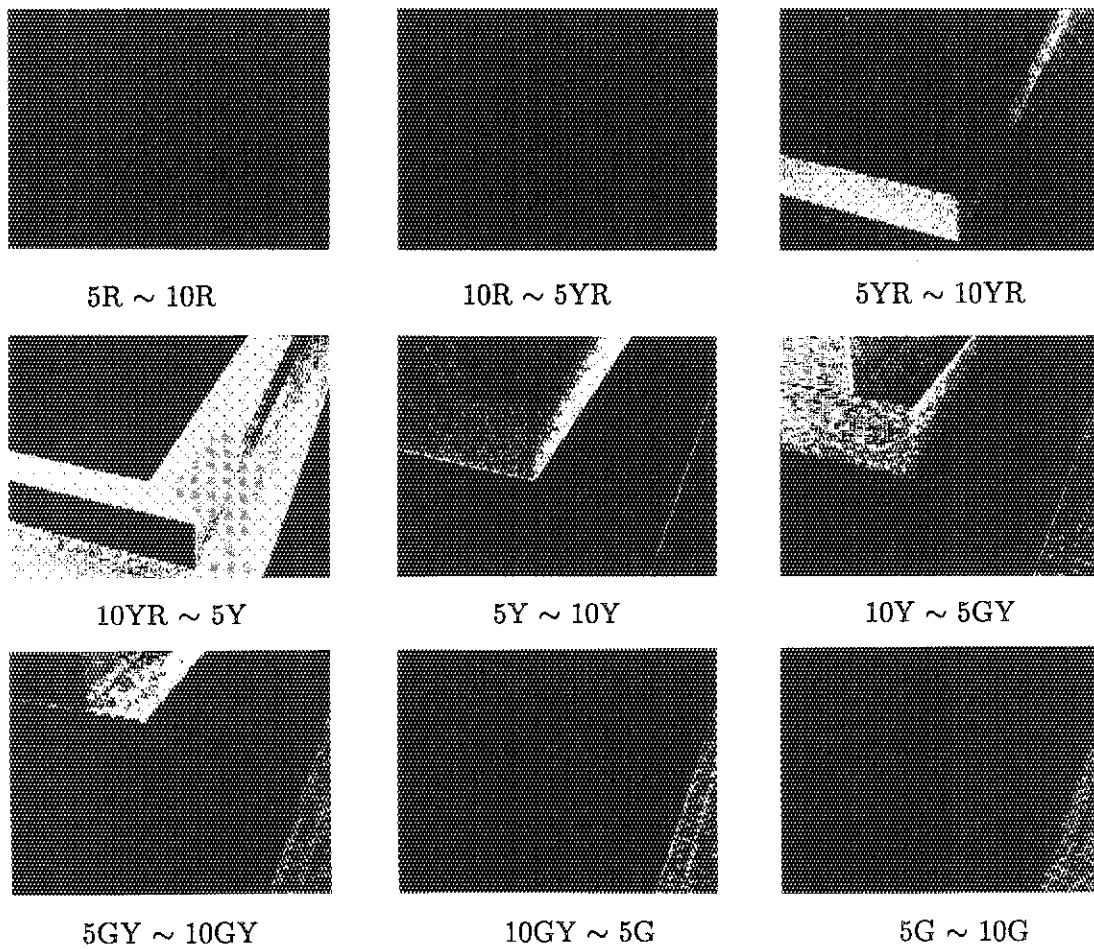


Fig. 3.14 Images obtained by extracting the region based on the hue value of pixels

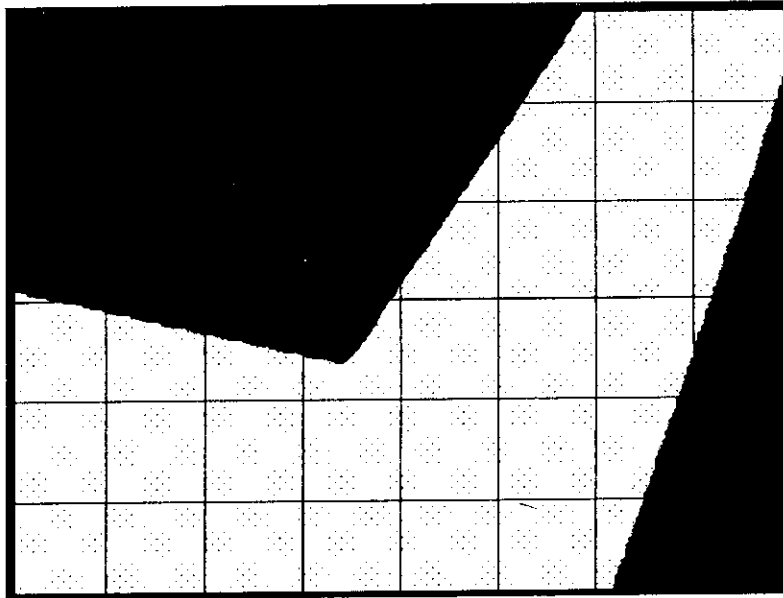


Fig. 3.15 The image obtained by extracting the yellow region

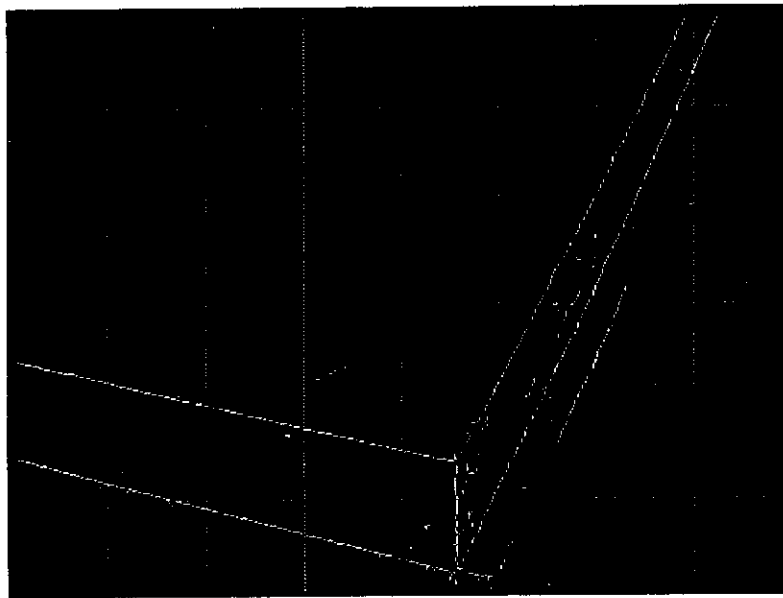


Fig. 3.16 The image obtained by extracting some necessary thinned-edges

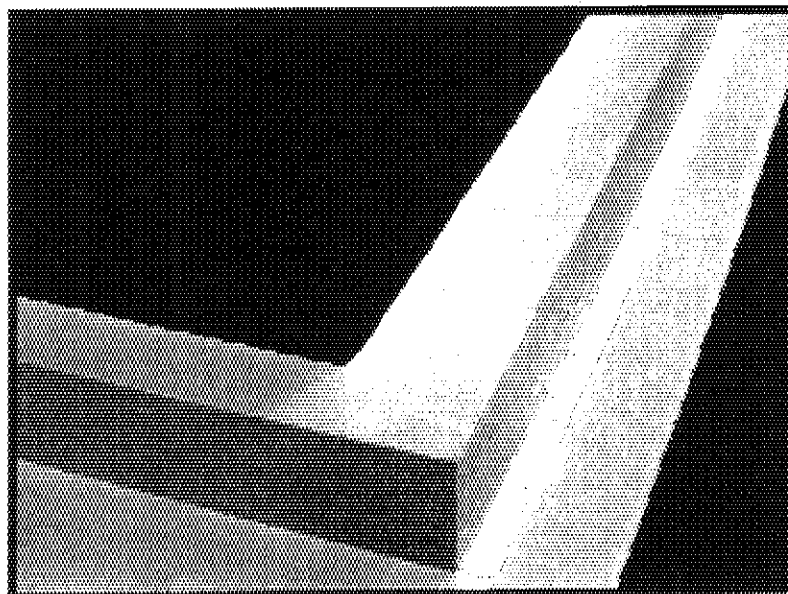


Fig. 3.17 The image obtained by superimposing the thinned-edge image on the yellow region image



### 3.3 直線と交点の抽出

画像内の特徴点を数値的に得るためには、前章の領域抽出の結果を用いて、線画から必要な部分を抽出した後、さらに、それらの線分に直線を当てはめ、画像座標系において、それらの直線の方程式とそれらの直線が作る交点の座標を求める必要がある。このとき直線の当てはめの方法として、一般的に用いられている Hough 変換 [4, 10] を用い、直線の方程式を求める。しかし、線画には、まだ、必要な頂点に対応する交点を得るためには不要な線分が含まれているので、Hough 変換によって、何本もの直線が得られる。さらに、それらの直線は、互いにいくつかの交点を作っている。そのため、その中から必要な直線及び交点のみを選択するためのアルゴリズムが必要となる。そのアルゴリズムとして、以下の方法を用いた。

- (1) 画像中の最も長い直線 (Hough 変換の結果、画像座標系の原点からの距離とその距離を測る方向を表わす角度に対するヒストグラムにおける度数が最大である直線) を抽出する。(L とする)
  - (2) 画像内で鉛直な直線、つまり画像座標系において y 軸と平行な直線を探す。(P とする)
  - (3) L と平行な直線を探す。(H とする)
- ((2), (3) において“探す”とは、ある直線の傾きの範囲内を探索し、その中で度数が、最大の直線が、1本あれば、そのような直線があるとした。)

#### (A) P と H が存在する場合

- L と P との交点 1 と L と H との交点 2 を求める。
- 両者の y 座標を比較することによって、床に接している頂点か、その上の頂点か、を判断し、床に接している頂点の座標を出力する。(Fig. 3.16 の必要領域が抽出された細線化画像から、台座の頂点として、床に接している頂点とその真上の頂点が存在することが分かる。)

#### (B) P が存在し、H が存在しない場合

- L と P との交点を求める。
- 細線化処理をおこなった直後の画像を用いて、この交点が、床に接する頂点であるか、その真上の頂点であるかを、細線化画像を使って調べ決定する。

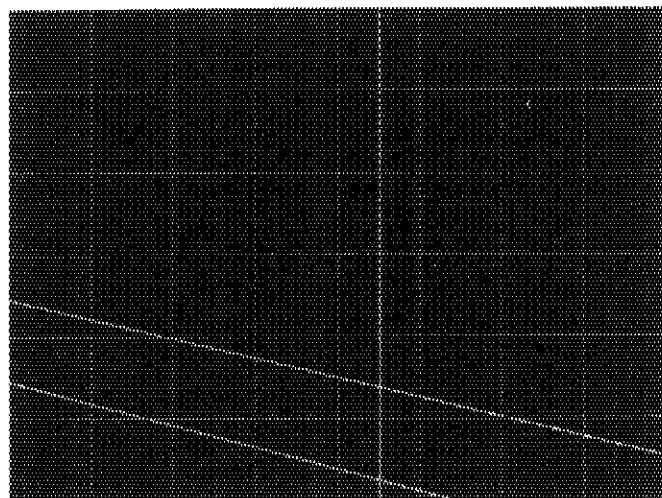
#### (C) H が存在し、P が存在しない場合

- L の傾きとの差が、ある範囲内にある新たな直線を探す。(O とする)  
(この直線が検出できない場合、頂点抽出は失敗する。)
- L と O との交点 1 と H と O との交点 2 を求める。
- 細線化画像を用いて、どちらの交点が頂点に対応する交点か、また、対応する頂点が、上下どちらの頂点かを決定する。

#### (D) H と S が共に存在しない場合

- $L$  の傾きとの差が、ある範囲内にある新たな直線を探す。 $(O$  とする)  
(この直線が検出できない場合、頂点抽出は失敗する。)
- $O$  に平行な直線を探す。 $(OH$  とする。)
- $L$  と  $O$  との交点 1 と  $L$  と  $OH$  との交点 2 を求める。
- 細線化を行なった直後の画像を用いて、どちらの交点が頂点に対応する交点か、また、対応する頂点が、上下どちらの頂点かを決定する。
- $OH$  がない場合は、 $L$  と  $O$  との交点を求め、上と同様に、その交点がどの頂点に対応するかを決定する。

このアルゴリズムでは、床に接した頂点に対応する交点の座標のみを決定している。そこで、さらにその交点を作る直線のうち 1 本を決定し、その直線上の交点以外の点の座標を求める。このアルゴリズムのよって抽出された直線を表示した画像と、出力された結果を Fig. 3.18 (a) 及び (b) に示す。Fig. 3.18 (a) における十字マークは、計算された点を表わす。プログラムの出力結果から、本報告書で例として用いた画像に対して、上記の (A) の過程を通り、画素画像座標系で表現された、台座の頂点に対応する、直線の交点の座標とその他の任意の一点の座標及び、出力した頂点の位置 (Position)、任意の 1 点に乗っている直線の頂点から見た方向 (Direction) が出力されているのが分かる。また、抽出された点と直線が、CCD カメラによって得られたカラー画像の台座の稜線や頂点に対応していることを見るために、Fig. 3.18 (a) を Fig. 3.1 に重ねた画像を Fig. 3.19 に示す。



(a)

Path of (A)

Longest line

a=-0.2698224 b=-167.7935

Parallel line

a=-0.2437749 b=-96.75272

Perpendicular line

a=infinite X=32.00000

Intersection : (291,369)

Another point : (227,352)

Direction : left

Position : low

(b)

Fig. 3.18 (a) The image of lines which extracted using above algorithm, (b) The output result data

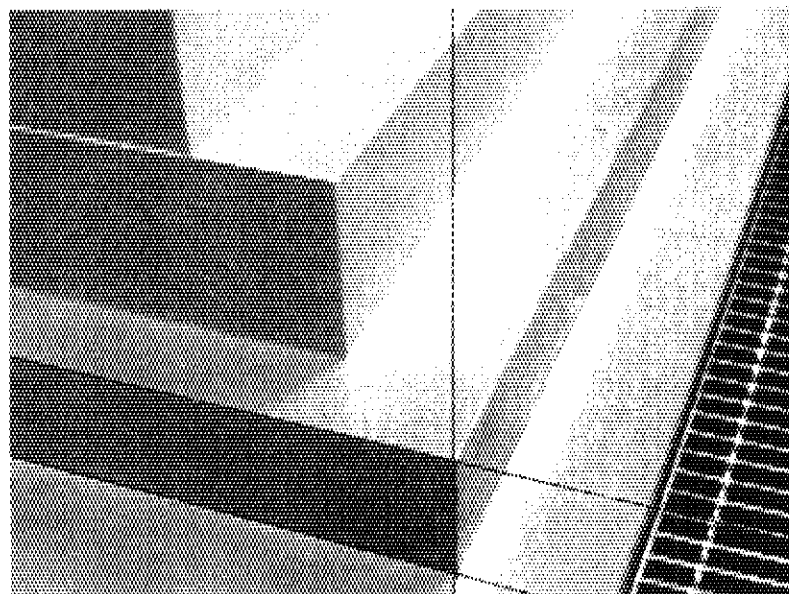


Fig. 3.19 The image obtained by superimposing the Fig.3.18 (a) on the original image

#### 4. センシングシステムから得られる画像に対するプログラムの適用

今までサンプルの画像として使用してきた画像は、三板の CCD カメラによって検出された画像である。つまり、CCD 素子を RGB 各成分に対して、1 枚ずつ持つカメラである。よって、検出時や転送時のノイズを、ほとんど含まない画像である。しかし、センシングシステムに搭載されている CCD カメラは、単板の CCD カメラであり、また検出された画像は、アナログデータに変換された後に転送されるため、多くのノイズを含む (Fig. 2.1 を参照)。そこで、このような画像に対する、本報告書のプログラムの適用可能性を調査した。使用した画像は、三板 CCD カメラで撮影した画像と同様の頂点を、同様の視点・視方向で撮影した画像である。しかし、画像を捕えるビデオボードの仕様上、画像のサイズは、 $640 \times 480$  となっている。

このような画像を上記のプログラムへ入力した場合の結果を Fig. 4.1 に示す。この結果から分かるように、検出された直線は、グレーチング部分と床を分ける直線であり、望んでいる稜線に対応する直線ではない。この原因は、色相値を使って必要領域を抽出する時に指定したマンセル色相環における色相値の範囲が、センシングシステムによって得られた画像に対して適当でないことである。つまり、三板 CCD カメラによって撮影された画像に対しては、マンセル色相環における  $5YR \sim 5Y$  の範囲内に含まれる色相値を持つピクセルを抽出していたが、その範囲をセンシングシステムの画像に適用した場合、必要な部分以外の部分が抽出されてしまう (Fig. 4.2)。そこで、三板 CCD カメラによって撮影された画像の場合における Fig. 3.14 と同様に、色相環の各範囲の色相値を持つピクセルを抽出した画像 (Fig. 4.3) を調べ、センシングシステムによって得られた画像に適した色相値の範囲を決定することとする。これらの画像から、センシングシステムの CCD カメラによって検出された画像に対して、台座部分の領域を画像から抽出するための色相値の範囲は、 $10R \sim 5YR$  であることが分かる。しかし、 $10R \sim 5YR$  の範囲の色相値を持つピクセルを含む領域を抽出しても、必要な領域以外の部分からも不必要な点が抽出されているため、そのような点を除去することを考える必要がある。このとき、点を除去する方法として、エッジ画像を直接細線化した後、二値化によってノイズを点に収束させた画像から、点を除去した方法と同様の方法を使う。この方法によって得られた画像を Fig. 4.4 (a) に示す。しかし、これだけでは完全にノイズを除去することができず、また抽出された領域が、グレーチング部分と床部分との境界線を含んでいるため、この画像を用いて細線化画像から必要な線分のみを含む領域を抽出すると、Fig. 4.4 (b) のように、その境界線部分も抽出されてしまう。よって、必要領域を抽出した画像に対して、8 連結近傍における膨張操作を数回行なった後、8 連結近傍における収縮操作を行なうこと [4, 10] によって、必要な領域を抽出した画像を得た (Fig. 4.5 (a))。この画像を使って抽出した線分の画像を Fig. 4.5 (b) に示す。この画像から不必要なグレーチング部分と床部分の境界線が、ほとんど除去されていることが分かる。この画像から、Hough 変換と上述の直線選択アルゴリズムを用いて得られた直線の画像と出力された情報を Fig. 4.6 (a) 及び (b) に示す。また、得られた直線及び交点の座標の精度を見るために、Fig. 4.6 (a) を Fig. 4.1 (a) に重ねた Fig.

4.7 (b) を示す。

さらに、このプログラムを他のいくつかの画像に対して適用した場合の結果を Fig. 4.8, 4.9 に示す。この図の中で、上段の画像は細線化画像、中段の画像は抽出された直線の画像、下段の画像は、中段の画像を原画像に重ねた画像である。この図から、これらの画像に対する処理は、(A), (B), (C), (D) それぞれの処理過程を通り、それぞれ、望む直線、頂点に対応する交点の座標、任意の点の座標を抽出していることが分かる。

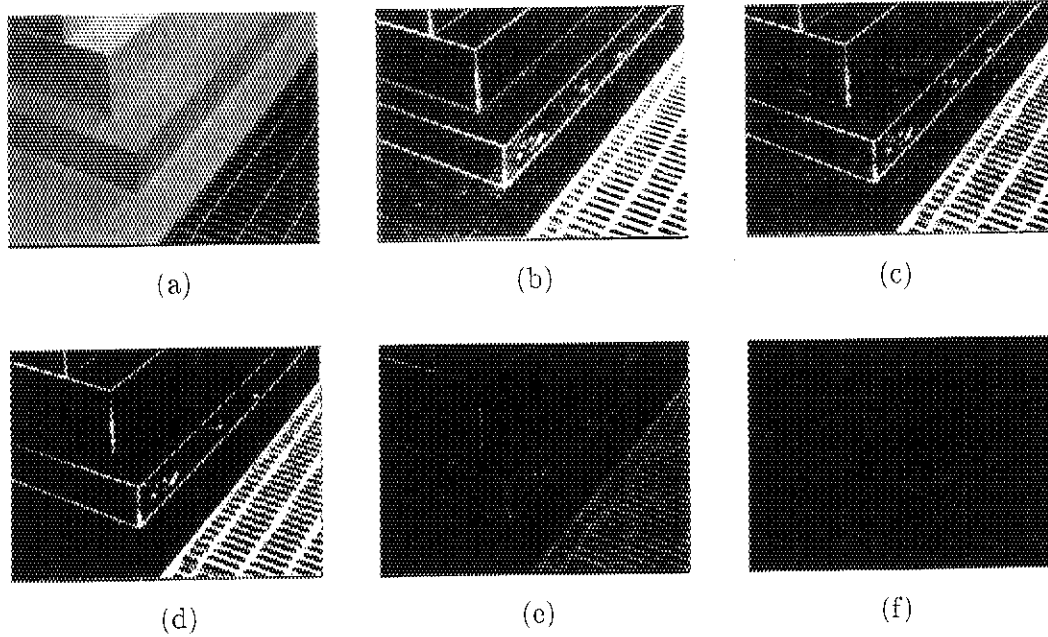


Fig. 4.1 (a) The ordinal image, (b) The edge image, (c) The binary image obtained by shrinking the edge image. (d) The binary image. (e) The thinned image, (f) The image of necessary lines

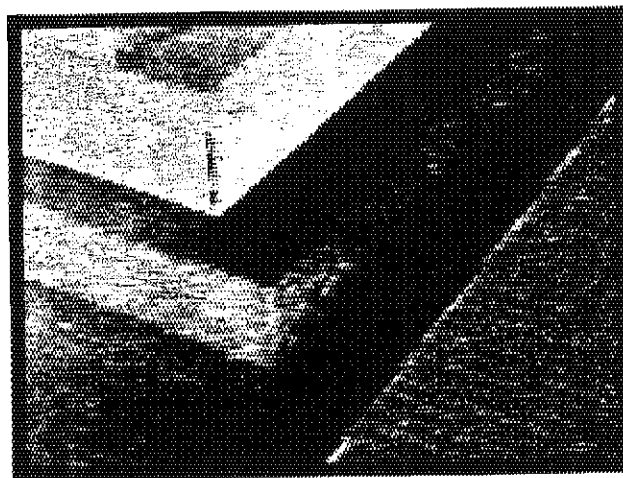


Fig. 4.2 The image obtained by extracting the yellow region from Fig.4.1 (a)

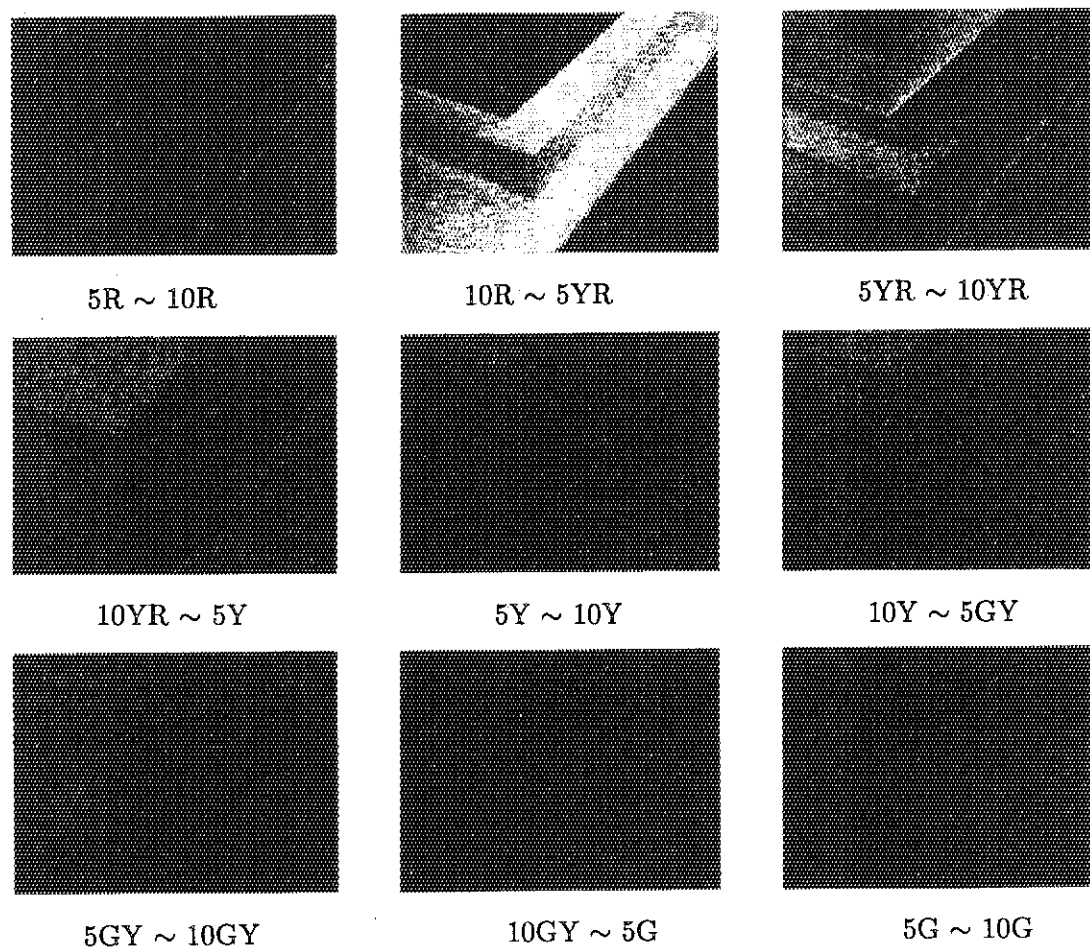


Fig. 4.3 Images obtained by extracting the region from Fig.4.1 (a) based on the hue value of pixels

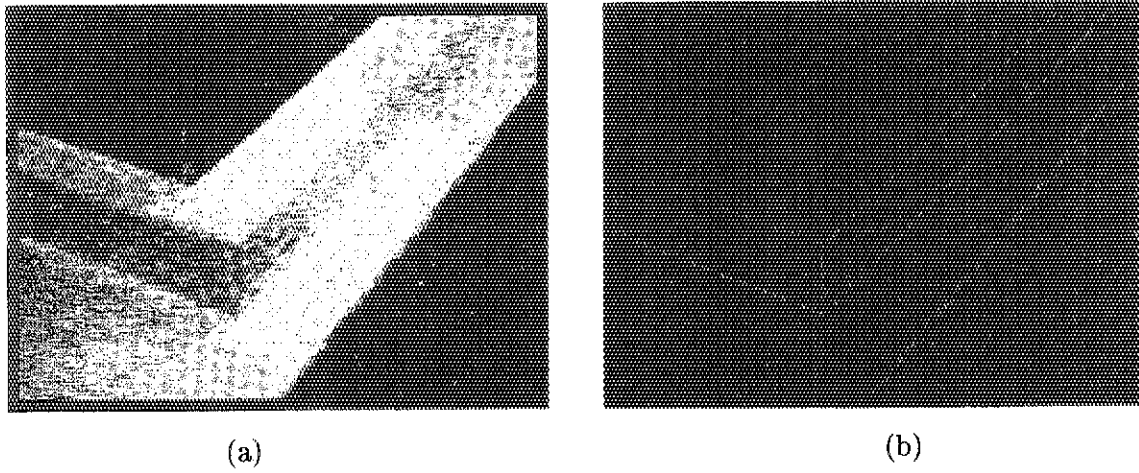


Fig. 4.4 (a) The image obtained by eliminating noises in the extracted region image, (b) The image obtained by extracting some thinned edges using the left region image

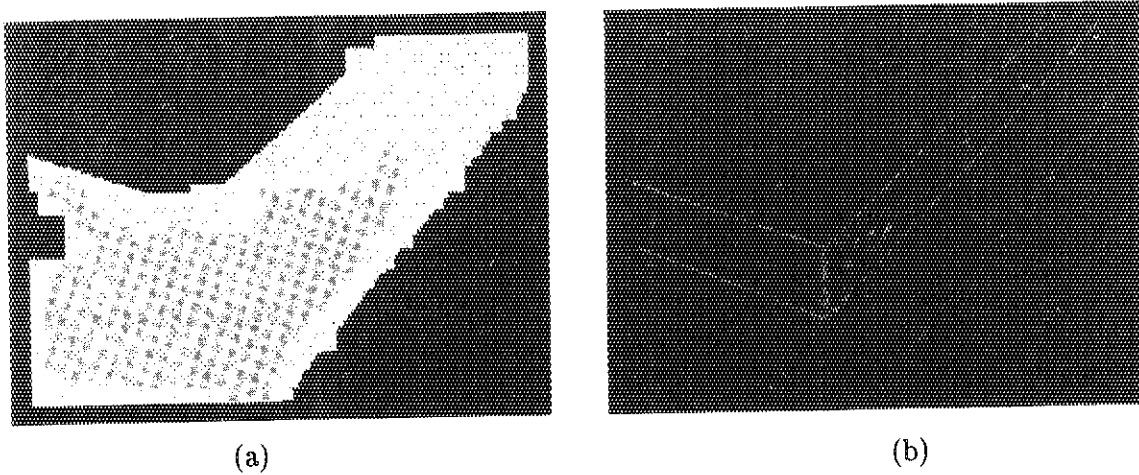
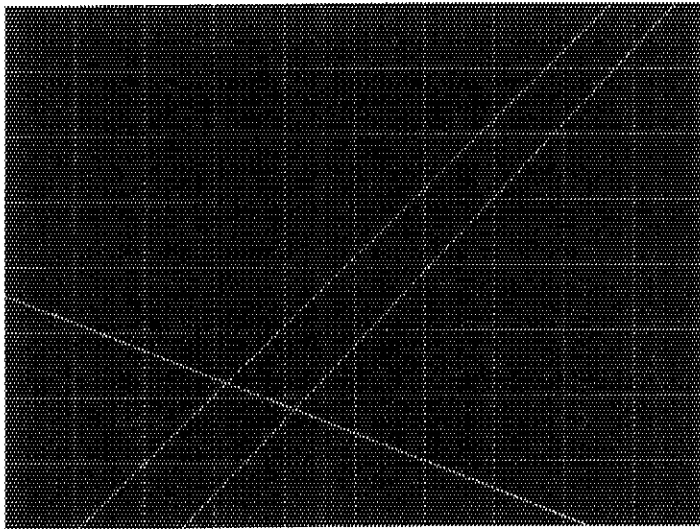


Fig. 4.5 (a) The image obtained by expanding and shrinking Fig.4.4 (a), (b) The image obtained by extracting some thinned edges using the left region image





(a)

Path of (C)

Longest line

$a=1.061170$   $b=-72.90546$

Parallel line

$a=0.9826933$   $b=8.412172$

Another line

$a=-0.3979498$   $b=-152.8308$

Intersection : (265,371)

Another point : (329,303)

Direction : right

Position : low

(b)

Fig. 4.6 (a) The image of lines which extracted using above algorithm from Fig.4.1 (a),  
(b) The output result data for the image taken by sensing system

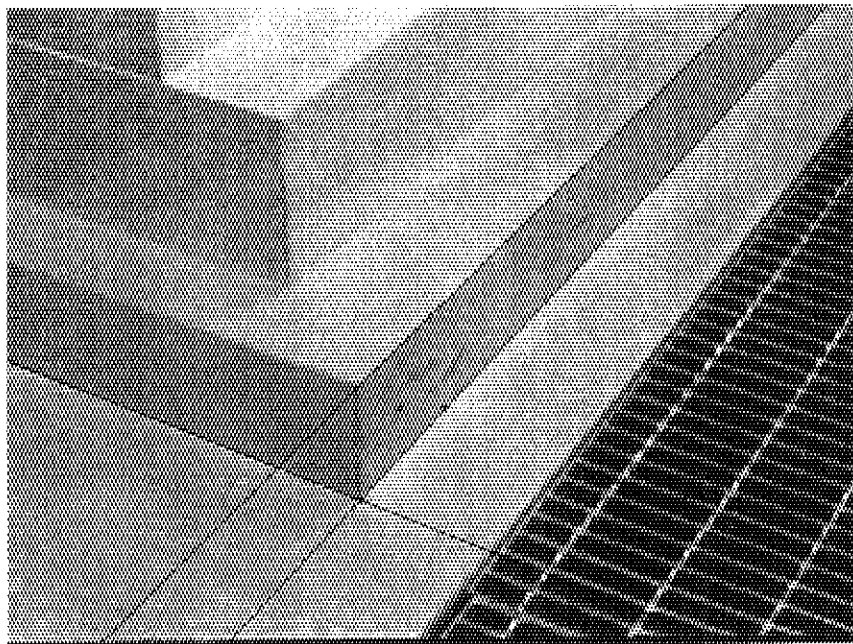
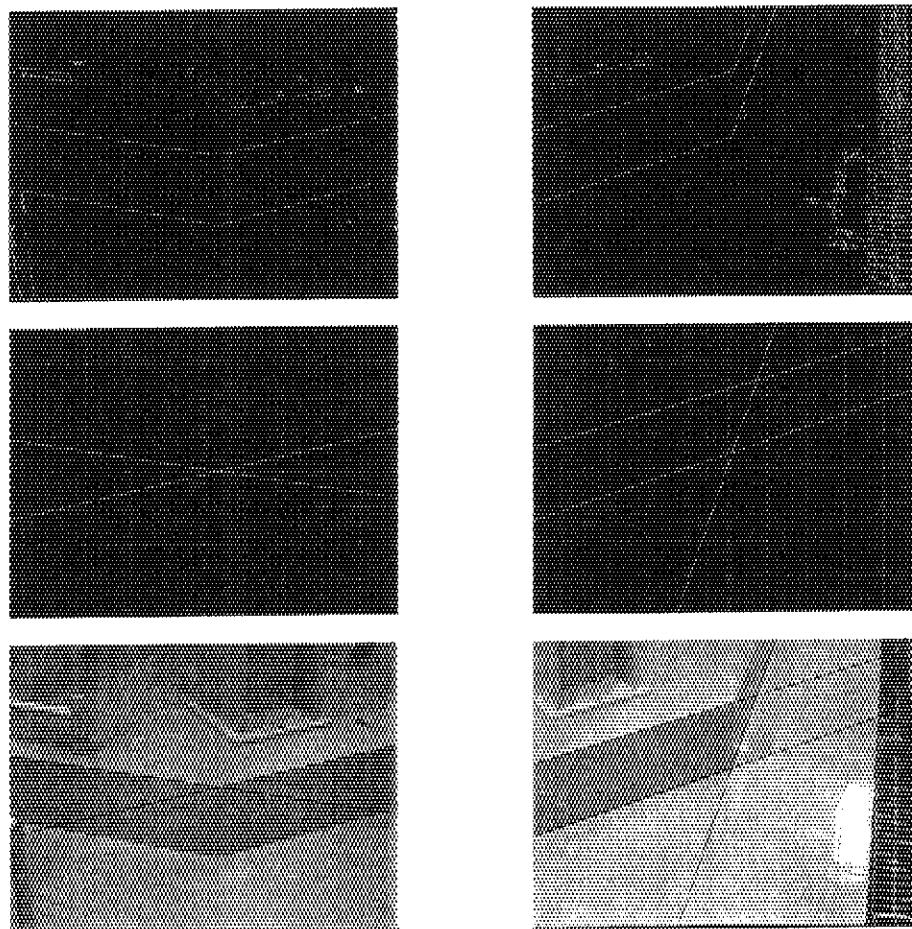


Fig. 4.7 The image obtained by superimposing the Fig.4.6 (a) on Fig.4.1 (a)



Path of (D)

Longest line

$a=0.2271929$   $b=-5.127418$

Another line

$a=-0.1673444$   $b=3.041716$

Intersection : (341,240)

Another point : (405,226)

Direction : right

Position : upper

Path of (C)

Longest line

$a=0.2943146$   $b=129.2590$

Parallel line

$a=0.3345935$   $b=22.14432$

Another line

$a=2.954353$   $b=3.119007$

Intersection : (327,215)

Another point : (263,237)

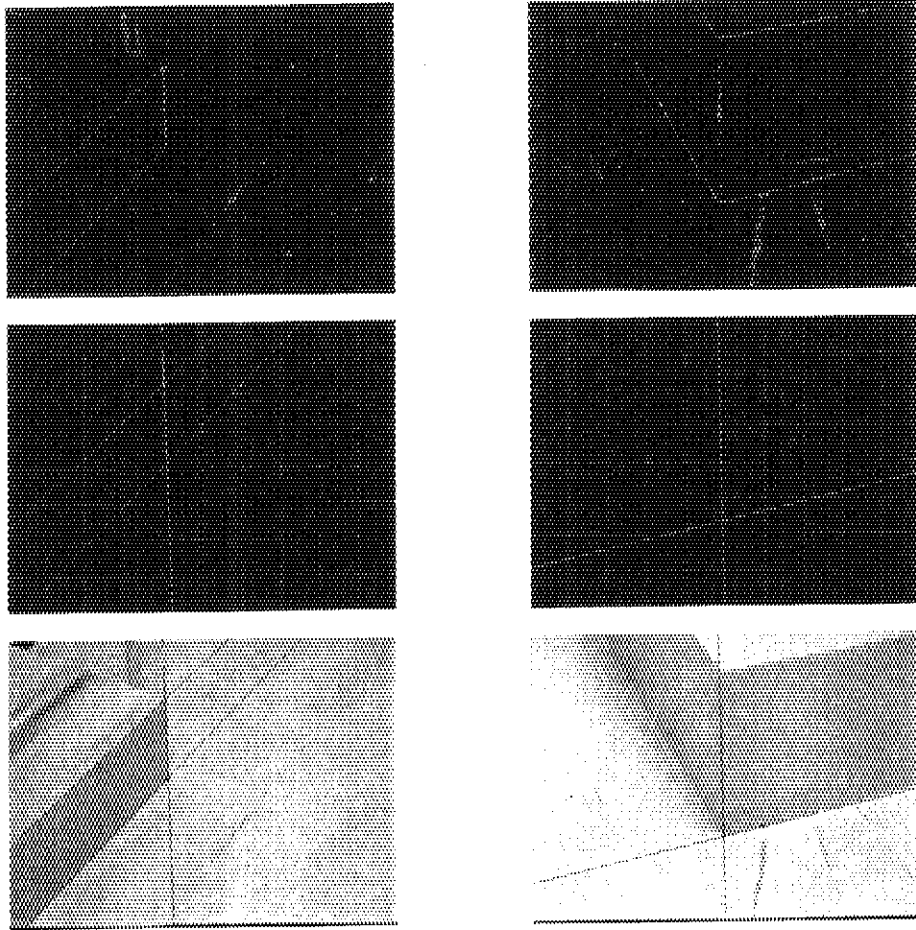
Direction : left

Position : low

Sample (1)

Sample (2)

Fig. 4.8 The result of the experiment using other images (1)



Path of (A)

Longest line

$a=0.9357807$   $b=195.8465$

Parallel line

$a=1.035525$   $b=67.65901$

Perpendicular line

$a=-30.14464$   $b=-1719.190$

Intersection : (263,232)

Another point : (199,298)

Direction : left

Position : low

Path of (B)

Longest line

$a=0.2456220$   $b=-95.76427$

Perpendicular line

$a=-47.73953$   $b=-334.2500$

Intersection : (315,337)

another point : (379,321)

Direction : right

Position : low

Sample (3)

Sample (4)

Fig. 4.9 The result of the experiment using other images (2)

## 5. まとめ

以上、知能ロボットに搭載可能なセンシングシステムの仕様、搭載されている CCD カメラの特性及び、環境内の物体の画像を用いた、移動ロボットの自己位置同定を目指した画像処理プログラムについて記述した。

この画像処理プログラムによって、模擬環境内の機器の台座の稜線及び、頂点を抽出することが可能となった。そこで、Fig.4.8, 4.9 の結果で得られた頂点の座標値と位置、方向の情報をを用いて、付録に示す計算を行なうことによって得られた自己位置の値を Table 5.1 に示す。この表から、X 方向について、約 -14 mm ~ 55 mm、Y 方向について、約 -108 mm ~ 32 mm、向きについて、約 0.9 deg ~ -1.8 deg の誤差を含んだ結果を得た。この誤差の原因として、まず、特徴点の抽出の精度が考えられる。つまり、カラー画像に写っている頂点の位置と抽出された交点の位置との間のずれによる誤差である。1 ピクセルの大きさが、約 0.008 mm、焦点距離が、12.507 mm であるので、大体の計算で画像内での 1 ピクセルのずれは、カメラの焦点から 2 m、3 m、4 m 先において、それぞれ、約 1.3 mm、1.9 mm、2.6 mm のずれとして計算結果に現われる。よって、100 mm の誤差を生じるためには、50 ~ 100 ピクセルのずれが生じる必要があるので、特徴抽出の精度は、ほとんど関係しないと思われる。他の原因として、画像撮影時のロボットや台座の頂点の位置の測定誤差、センシングシステムの向きを表わすパン角、チルト角、傾斜角の測定誤差が考えられる。これについては、撮影時のカメラの向きや位置をよく制御した上で、さらに多くのサンプル画像を取り、自己位置の計算をする必要がある。いずれにしても、誤差の生じる原因について、詳細に検討し、それを取り除くことが必要である。

また、この画像処理プログラムの処理時間は、処理過程の経路によって多少異なるが、画像出力の時間を除いて、JAERI モンテカルロ装置において、約 16 秒 (512 × 384)、約 21 秒 (640 × 480)、SPARC ワークステーション S-4/2 GX において、約 82 秒 (512 × 384)、約 130 秒 (640 × 480) であった。このプログラムを実際の移動ロボットに適用するためには、さらに高速に処理できるようにする必要がある。

しかし、このプログラムには、さらに検討すべき箇所がいくつかある。1 つは、色相値を用いた領域抽出において、模擬環境の機器の台座に限定し、色相値の範囲を決めていることである。また、この範囲は、画像を撮影するカメラによっても異なる。よって、色の情報は有用であるが、その使い方については、さらに検討する必要がある。また、センシングシステムのカメラによって得られた画像に対する領域抽出処理において用いた収縮、膨張処理は、抽出する領域が、単連結の場合に有効であり、領域が複数に分れていて、かつ、それらの領域が比較的接近している場合には、それぞれの領域が融合してしまう可能性がある。よって、この方法の使用についても、さらに検討が必要である。

また、今回、抽出する物体の特徴として、機器の台座の頂点と稜線を用いたが、頂点や稜線が画像内を占める範囲は狭く、色情報を除いて、他の範囲の情報はすべて処理過程で使用して

いないことになる。よって、画像内において広い範囲を占めている物体の部分、つまり、物体を取り巻いている表面は、利用できる可能性を持った情報である。また稜線及び頂点は、面の交差によって作られていることから、今後は、この物体表面の情報 [8, 9] を有効に使用した特徴抽出についても考えなくてはならないであろう。

Table 5.1 Calculated results of robot's location

Fig. 4.1 (a)	X	Y	Z	Th
True Value	6913.000000	4980.000000	0.000000	180.000000
Estimation	6926.521000	5013.406904	0.0	180.871689
Difference	-13.521000	-33.406904	0.0	-0.871689
Sample (1)	X	Y	Z	Th
True Value	2108.000000	4541.000000	0.000000	0.000000
Estimation	2091.142743	4648.320438	0.0	358.263034
Difference	16.857257	-107.320438	0.0	-1.736966
Sample (2)	X	Y	Z	Th
True Value	2108.000000	4541.000000	0.000000	0.000000
Estimation	2053.936505	4539.126342	0.0	359.910013
Difference	54.063495	1.873658	0.0	-0.089987
Sample (3)	X	Y	Z	Th
True Value	2108.000000	4541.000000	0.000000	0.000000
Estimation	2095.345894	4509.992115	0.0	0.948710
Difference	12.654106	31.007885	0.0	-0.948710
Sample (4)	X	Y	Z	Th
True Value	2362.000000	4727.500000	0.000000	90.000000
Estimation	2329.335148	4702.496659	0.0	89.173826
Difference	32.664852	25.003341	0.0	0.826174

## 謝 辞

この報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長 秋元 正幸氏に深く感謝します。センシングシステムの特性評価において、援助して下さいました久米 悦雄氏、大谷 孝之氏、画像処理プログラムの開発において、数々の教示を下さいました神林 奨氏、ならびに、模擬環境の製作に多大に尽力して下さいました樋口 健二氏に深く感謝します。さらに、多くの援助をして下さいました情報システムセンターの方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] 海老原 健一, “知能ロボットによる原子力施設内巡回点検用センシングシステムの概念設計”, JAERI-M 93-225(日本原子力研究所, 1993,11).
- [2] 秋元 正幸 他, “原子力知能化システム技術の研究(人間動作シミュレーションプログラム:HASP) — 平成4年度作業報告 —”, JAERI-M 94-051(日本原子力研究所, 1994,5).
- [3] 大谷 孝之, “デジタル画像処理とその人間動作シミュレーション技術の研究(HASP)への応用”, 私信(1990).
- [4] K. S. Fu, et al, “*ROBOTICS, Control, Sensing, Vision, and Intelligence*” (McGRAW-HILL, 1987).
- [5] 大津 展之, “判別及び最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法”, 信学論(D), Vol. J63-D, pp.349-356, (1980).
- [6] 横井, 鳥脇, 福村, “濃淡図形における特徴点の抽出と細線化の一方法”, 信学論(D), Vol. 58-D, No.10, pp. 601-608, (1975).
- [7] 高木 幹雄, 下田 陽久 監修, “画像解析ハンドブック”(東京大学出版会,1991).
- [8] P. J. Besl, R. C. Jain, “*Segmentation Through Variable-Order surface Fitting*”, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 10, No.2, pp.167-192 (Mar. 1988).
- [9] P. J. Besl, R. C. Jain, “*Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Images*”, Computer Vision, Graphics, Image Processing, Vol.33, pp.33-80 (1986).
- [10] 協同システム開発(株), “Spider User's Manual”(1982).

## 謝 辞

この報告書を書く機会を与えて頂きました情報システムセンター室長 秋元 正幸氏に深く感謝します。センシングシステムの特性評価において、援助して下さいました久米 悦雄氏、大谷 孝之氏、画像処理プログラムの開発において、数々の教示を下さいました神林 奨氏、ならびに、模擬環境の製作に多大に尽力して下さいました樋口 健二氏に深く感謝します。さらに、多くの援助をして下さいました情報システムセンターの方々に感謝します。

## 参考文献

- [1] 海老原 健一, “知能ロボットによる原子力施設内巡回点検用センシングシステムの概念設計”, JAERI-M 93-225(日本原子力研究所, 1993,11).
- [2] 秋元 正幸 他, “原子力知能化システム技術の研究(人間動作シミュレーション・プログラム:HASP) — 平成4年度作業報告 —”, JAERI-M 94-051(日本原子力研究所, 1994,5).
- [3] 大谷 孝之, “デジタル画像処理とその人間動作シミュレーション技術の研究(HASP)への応用”, 私信(1990).
- [4] K. S. Fu, et al, “*ROBOTICS, Control, Sensing, Vision, and Intelligence*” (McGRAW-HILL, 1987).
- [5] 大津 展之, “判別及び最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法”, 信学論(D), Vol. J63-D, pp.349-356, (1980).
- [6] 横井, 鳥脇, 福村, “濃淡図形における特徴点の抽出と細線化の一方法”, 信学論(D), Vol. 58-D, No.10, pp. 601-608, (1975).
- [7] 高木 幹雄, 下田 陽久 監修, “画像解析ハンドブック”(東京大学出版会,1991).
- [8] P. J. Besl, R. C. Jain, “*Segmentation Through Variable-Order surface Fitting*”, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. 10, No.2, pp.167-192 (Mar. 1988).
- [9] P. J. Besl, R. C. Jain, “*Invariant Surface Characteristics for 3D Object Recognition in Range Images*”, Computer Vision, Graphics, Image Processing, Vol.33, pp.33-80 (1986).
- [10] 協同システム開発(株), “Spider User's Manual”(1982).

## 付録 1 自己位置同定の計算方法

ここでは、画像座標系を用いて表現された直線の傾きと交点の座標を、適当な座標変換によって、絶対座標系を用いて表現し、その結果からロボットの自己位置を同定するための具体的な計算を示す。

まず、いくつかの座標系を定義する。

絶対座標系 $X, Y, Z$	環境内 (具体的には模擬環境) に張られた座標系
カメラ座標系 $C_x, C_y, C_z$	CCD カメラの光軸方向を $x$ 軸, 上方向を $y$ 軸とし, カメラの撮像素子から光軸に沿って後方へ焦点距離 $f$ だけ離れた位置を原点とした右手系
画素画像座標系 $ipx, ipy$	画像の左上の角を原点とし, 水平右向きを $x$ 軸の正方向, 垂直下向きを $y$ 軸の正方向とした 2 次元座標系。単位は, ピクセルを使う。
実画像座標系 $px, py$	原点を画像の中央にとし, 水平右向きを $x$ 軸正方向垂直上向きを $y$ 軸正方向とした 2 次元座標系。この座標系の単位は, 実際の CCD カメラの撮像素子の 1 ピクセルの縦と横の長さである。

絶対座標系におけるカメラの位置とカメラの向いている方向からカメラに設置されたカメラ座標系と絶対座標系との間の座標変換を以下のように定義する。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

さらに、画像座標系からカメラ座標系へ変換を以下のように表わす。

$$\begin{pmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{pmatrix} = \frac{C_x}{f} \begin{pmatrix} f \\ -px \\ py \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

今、本文中で述べた画像処理によって得られた交点の座標を、実際の物理的長さに変換した座標を  $P(p_x, p_y)$  また、その交点を作る、稜線に対応する直線を  $l$  とし、その方程式を  $y = ax + b$  とする。さらに、その直線上の交点  $P$  以外の点を  $Q(q_x, q_y)$  とする。

点  $P$  と点  $Q$  を上記の座標変換行列を用いて、以下の計算によって絶対座標系で表わす。このとき、それらの座標値を、それぞれ、 $AP(ap_x, ap_y, ap_z)$ ,  $AQ(aq_x, aq_y, aq_z)$  とする。ここでは、点  $P$  を例にとって説明する。



まず、式 (1), (2) を用いて、点 P の座標を変換すると、

$$ap_x = C_x(m_{11} - m_{12}\frac{p_x}{f} + m_{13}\frac{p_y}{f}) + m_{14} \quad (1.3)$$

$$ap_y = C_x(m_{21} - m_{22}\frac{p_x}{f} + m_{23}\frac{p_y}{f}) + m_{24} \quad (1.4)$$

$$ap_z = C_x(m_{31} - m_{32}\frac{p_x}{f} + m_{33}\frac{p_y}{f}) + m_{34} \quad (1.5)$$

ここで、 $ap_z$  は、撮影され頂点の床からの高さを表わしているので、地図からその頂点を選び、その高さ  $Z_h$  を  $ap_z$  に代入する。よって、 $ap_z$  に対する式から  $C_x$  を求め、他の2つの式に代入することによって、 $ap_x$ ,  $ap_y$  を求める。このように、画像から得られた情報のみではなく、頂点の絶対座標系での値を用いる理由は、撮影するとき、3次元のものを2次元平面に射影していることによって、情報が失われているからである。

以上の計算によって、点 P, 点 Q に対応する絶対座標系での点 AP, AQ を求めることができた。最後に、点 AP と点 AQ の座標値から、この2点を通る直線の方法ベクトルを求めた後、地図に含まれる頂点の座標と点 AP の座標を比較することによって、ロボットの位置を同定し、今、求めた方向ベクトルと地図に含まれる稜線の方法ベクトルを比較することによって、ロボットの向きを同定することができる。