

## 移動ロボットの位置確認システム

小野口 一則, 渡辺 睦, 麻田 治男

株式会社 東芝 総合研究所

ステレオ視を用いた移動ロボットの位置確認システムを開発した。本システムは、実走行前に移動環境内の複数地点に於て予め収集したステレオ画像を用いて、目標物を対話的に教示する環境教示システムと、この教示された位置決めデータを用いて実走行時に環境座標系に於ける自己の位置を測定する自己位置計測システムから成っている。本文では、各システムの機能及び処理の内容に関し、その詳細を述べ、実際の走行環境に近い画像から目標物の位置決めデータを作成し、目標物を抽出した結果を示す。

実験の結果、本システムの有効性が確認できた。今後は、各機能の向上を図ると共に、処理時間を短縮し、実用的なシステムとしていく。

### Self-Location Measurement System for Mobile Robots

Kazunori ONOGUCHI , Mutsumi WATANABE , Haruo ASADA

Research and Development Center , Toshiba Corporation.

1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, Kanagawa 210, Japan

We have been developing a self-location measurement system for an autonomous mobile robot. Our system consists of two components. One is an environment teaching system to construct data for the target localization in an environment where a mobile robot moves. The other is a self-location detection system to measure the three-dimensional position of the robot by using the constructed data. We collect stereoscopic images in the environment before the mobile robot moves autonomously and construct the localization data by using these images in the environment teaching system. In the self-location detection system, the robot input stereoscopic images and search targets in these images by using the localization data. Then it calculates the target positions and measures its location from them. This paper describes the details of these components and the experimental results, which show the usefulness of our system.

## 1. はじめに

近年、視覚を用いて周囲の環境を認識し、自律移動する知能ロボットの研究が盛んになっている。我々は、ロボット用の視覚として、能動センサを用いず3次元の位置が計測できるステレオ視が有効と考え、ステレオ視を用いた移動視覚システムの開発を行ってきた<sup>(1)</sup>。本システムは、環境内の自己位置を確認する位置確認システム<sup>(2)(3)</sup>と、移動方向に障害物があるか無いかを検出する障害物検出システム<sup>(4)(5)</sup>から構成されているが、今回は前者のシステムに関し、その詳細を述べる。

ロボットを目的地まで自律移動させるためには、環境内の自己位置を確認することが必要となるが、ジャイロ等の内界センサによる位置の同定は、蓄積誤差のため信頼性に欠ける。このため、曲がり角や段差の手前など、旋回軌道の生成や走行制御の上で特に高い精度の必要な場所では、視覚等の外界センサによる位置の補正が必要となる。

ロボットを目的地まで自律移動させるためには、環境内の自己位置を確認することが必要となるが、ジャイロ等の内界センサによる位置の同定は、蓄積誤差のため信頼性に欠ける。このため、曲がり角や段差の手前など、旋回軌道の生成や走行制御の上で特に高い精度の必要な場所では、視覚等の外界センサによる位置の補正が必要となる。

ステレオ視を用いて環境を認識する手法としては、移動しながらシーン間の対応付けを行い、床面の移動可能領域を求めるものがある<sup>(6)</sup>。この手法は、未知の環境においてロボットが手探りで移動する場合や環境のマップを構築する場合に有効であるが、工場や原子力発電所など既知の環境内を目的地まで移動する場合には効率が悪い。環境が既知の場合、環境の情報を積極的に利用することが、安定でかつ効率の良い移動を実現する上で有効と考える。

このため、走行環境において、自己位置検出のための位置決めデータを予め作成しておき、これを用いて環境内の自己位置を確認する手法を開発した。以下、本システムの内容及び実験結果について述べる。

## 2. システム概要

本位置確認システムは、実走行前に予め設定しておいた位置確認地点において収集したステレオ画像を用いて、位置確認に必要なデータ(位置決めデータ)を対話的に作成する環境教示システムと、このデータを用いて実走行時に、環境座標系における自己の位置を計測する自己位置計測システムから構成されている(図1)。走行環境としては原子力発電所の通路等の屋内環境を想定しており、目標地点までの走行経路において、曲がり角や階段の手前など、正確に自己位置の同定が必要な地点を位置確認地点として定め(図2)、走行経路に沿ってこの地点に移動ロボットを

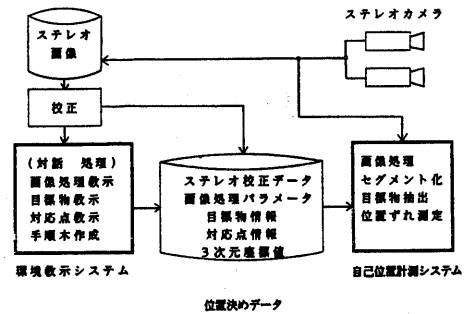


図1. システム構成

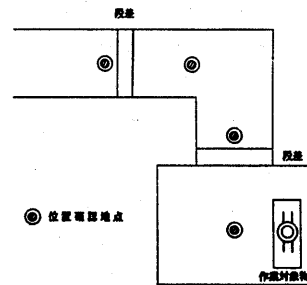


図2. 位置確認地点

置いた際のステレオ画像を予め収集しておく。この地点を以後、教示位置と呼ぶことにする。

環境教示システムでは、このステレオ画像から実走行時の位置確認に用いる目標物の選択を、目標物を構成する特徴(基本図形)の抽出を対話的に実行しながら行い、目標物の抽出手順を作成する。この際、シーンの中で紛れにくく、一意に決定できるものを目標物として選ぶ。また、設定した目標物の位置をステレオ計測し、教示位置における目標物の3次元座標値を求める。

自己位置計測システムでは、実際に自律走行した際、位置確認地点においてステレオ画像を入力し、教示された目標物を抽出手順に従って求める。そして、目標物の3次元座標値をステレオ計測し、教示位置における同一目標物の3次元座標値との間の座標変換式を解くことにより、教示位置からの位置ずれを算出する。

## 3. 自己位置計測システム

### 3. 1. 位置確認法

位置確認地点における自己位置が教示位置からどれだけ移動及び回転しているかを求めれば、現在の自己位置(以後走行位置と呼ぶ)を算出することができる。走行位置でのステ

レオカメラの座標系Cと教示位置でのステレオカメラの座標系Ctのx-y平面が床面と平行になるよう位置確認地点を設定すると、この移動量及び回転量は、座標系CとCtとの間の平行移動量(dx, dy, dz)、及びz軸回りの回転量 $\theta z$ に対応する(図3)。このため、教示位置で設定した目標物と同一の目標物を走行位置で抽出し、座標系Cでの3次元座標値(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>)を求めれば座標系Ctでの3次元座標値(x<sub>ti</sub>, y<sub>ti</sub>, z<sub>ti</sub>)との間には、

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta z & \sin \theta z & 0 \\ -\sin \theta z & \cos \theta z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{ti} \\ y_{ti} \\ z_{ti} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}$$

が成り立つため、2つ以上の目標物を設定するか目標物中の2つ以上の点を目標点として測定しておけば、dx, dy, dz,  $\theta z$ を求めることができ、移動ロボットの位置ずれ量が得られる。

### 3. 2. 目標物の記述法

位置確認に用いる目標物としては、マーク等を設置したりせず、走行環境に既に存在しているものを用いる。原子力発電所内の通路の場合、メータや配電盤などが多く存在するため、目標物としてこれらの単体または組合せを想定した。

メータや配電盤などの輪廓形状は、楕円(円を含む)、四角形、平行線、及びコーナ一点といった基本図形の組合せとして記述できる。例えば、図4(a)に示すメータは、図4(b)に示す円と平行線の組合せで記述できる。また、移動ロボットは、離れた位置からこれらの目標物を見るため、目標物を構成する基本図形は、ほぼ同一平面上に存在するとみなすことができ、視点の移動により基本図形間

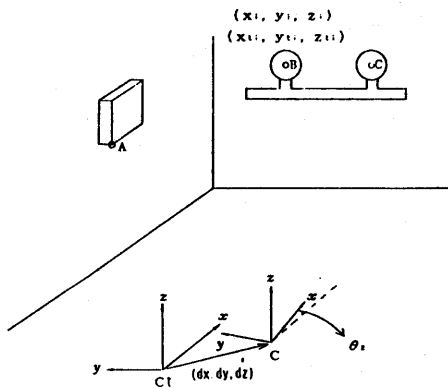


図3. 位置確認法

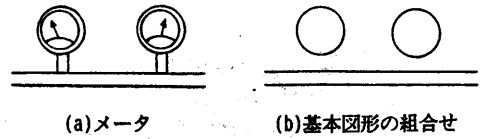


図4. 目標物の記述

の位置は大きく変化しない。このため、目標物を基本図形の組合せとして記述し、個々の基本図形を個別に検出することによりステレオ画像中から目標物を抽出する手法を開発した。

画像から目標物を探索する手法としては、従来、画像全体のエッジセグメントの関係を記述した後、目標物を抽出するものがあるが<sup>(7)(8)</sup>、走行環境においてどのような目標物があるか予めわかっており、目標物を構成する基本図形のうちでシーンから安定に検出できるもの(例えば、楕円や四角形)に着目できる場合には、画像全体を同一の手法で記述し処理するのは効率が悪い。また、予め用意しておいた目標物のテンプレートとマッチングをとることも考えられるが、オクルージョンや画像処理の失敗により目標物の一部が欠落すると対応付けが難しくなる。

本手法は、教示時に目標物を構成する基本図形の検出手順を作成し、まず、最も安定して検出できる基本図形を画像から見つけ出す。次いで、その周囲に探索領域を設定して、残りの基本図形を順次検出し、検証を行う。このため、画像全体を同一の手法で記述し、処理するより効率が良い。

### 3. 3. 位置決めデータ

環境教示システムにより作成される位置決めデータは、各位置確認地点ごとに次の5つのデータから構築されている。

#### (a)ステレオ校正データ

位置確認地点において用いるステレオのキャリブレーションパラメータを登録しておく。

#### (b)画像処理パラメータ

ステレオ画像に対して、空間フィルタリングを施し、2値化、細線化、ノイズ除去によりエッジ抽出を行うが、その際に用いるパラメータを登録しておく。

#### (c)目標物情報

目標物を構成する基本図形の検出順位、及び基本図形の形状パラメータを登録しておく。

基本図形の形状パラメータは、  
楕円～長軸長、短軸長、傾き、中心座標値。

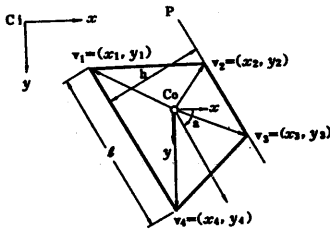


図5. 台形のパラメータ

四角形～四角形は台形に近似している。  
 台形のパラメータは図5に示すように、傾き $a$ 、長さ $l$ 、高さ $h$ 、平行線 $P$ の中心から4頂点までのベクトル $v_1, v_2, v_3, v_4$ 、 $P$ の中心座標値を用いる。

平行線～幅、長さ、傾き、中心座標値。  
 コーナー点～コーナーを形成する2直線の成す角、2直線の成す角の2等分線方向、及び2直線の交点と端点間の距離、2直線の交点座標値。  
 である。教示時において、教示画像に対し楕円検出、四角形検出、平行線検出、及びコーナー検出を施し、最適なパラメータを求めて登録する。

(d) 対応点情報

楕円の中心や四角形の角点、及びコーナー点など目標物に設定した対応点の種類を登録しておく。

(e) 目標物の3次元座標値

教示位置での目標物の3次元座標値を登録しておく。

3. 4. 目標物抽出法

位置決めデータを用いて目標物を抽出し、走行位置での目標物の3次元座標値を求める手順を図6に示す。まず、入力したステレオ画像に対し、位置決めデータに登録されているパラメータを用いてエッジ抽出を行う。次いで、エッジに対し線分追跡を行いセグメントデータを作成する。このセグメントデータは、属性情報として、端点座標値、セグメント長、セグメントの端点間距離、セグメント上をサンプリングした折れ点座標列、チェーンコード、隣接リスト等を保持しており、これらを用いて画像から楕円や四角形等の基本図形を検出する。

目標物抽出に先立ち、位置決めデータ中の目標物情報から、検出順位に従い基本図形の検出順序を定めた手順木を作成しておく。例えば、目標物が3個の基本図形 $P_1, P_2,$

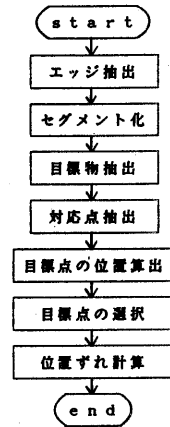


図6. 自己位置確認手順

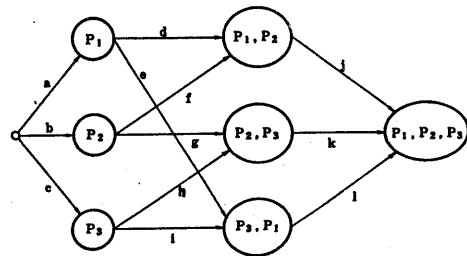


図7. 手順木

$P_3$ で記述され、 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ の順位付けが成されている場合、図7に示す手順木を作成する。手順木の枝には個々の基本図形の検出順位に従い、 $a > b > c, d > e, f > g, h > i$ といった重みが付加されており、大きな重みを持つ枝を辿ることにより検出順位の高い基本図形を中心とした探索を実現している。図7の例では、まず、画像全体から $P_1$ を検出する。検出された $P_1$ の候補 $P_{1i}$  ( $i = 1 \sim n$ )のそれぞれに対し、目標物情報に記された $P_1, P_2$ の中心座標値及び傾きを用いて $P_2$ の探索領域を設定し、 $P_2$ を検出する。 $P_{1i}$ に対して検出された $P_2$ の候補を $P_{2j}$  ( $P_{1i}$ ) ( $j = 1 \sim m$ )とする。 $P_{1i}, P_{2j}$  ( $P_{1i}$ )の画像上の位置と、 $P_1, P_2$ と $P_3$ の目標物情報に記された中心座標値及び傾きの関係から、同様に $P_{1i}, P_{2j}$  ( $P_{1i}$ )に対する $P_3$ の探索領域を設定し、 $P_3$ の候補 $P_{3k}$  ( $P_{2j}$  ( $P_{1i}$ )) ( $k = 1 \sim l$ )を検出する。これにより、図8に示すような $P_1, P_2, P_3$ の候補の組合せが得られ、この組合せの中から目標物を構成する基本図形が多数検出され、基本図形の形状及び基本図形間の位置関係が目標物情報に登録されたものに近いもの为目标物を構成する基本図形の組として選択する。

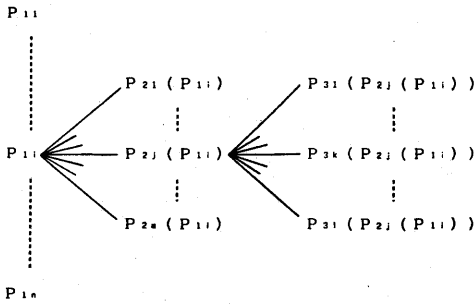


図8. 目標物候補

最も重みの大きい枝を辿る探索(図7の a→d→j)が失敗した場合には、重みの大きい順に第2、第3の経路(図7では a→e→l, b→f→j, ...)による探索を実行し、目標物を抽出する。

目標物抽出後、位置決めデータに登録されている対応点情報を用いて対応点のステレオ画像上の位置を求め、対応点の走行位置における3次元座標値を算出する。これにより得られた目標物の各目標点間の距離は、位置決めデータに登録されている目標点の3次元座標値から得た距離と等しくなるためこの距離が著しく異なる目標点を位置確認に用いる目標点から除外した後、残った目標点に対し3.1章で述べた手法を適用して走行位置と教示位置との間の位置ずれ量を求める。

#### 4. 環境教示システム

3.2章で述べた位置決めデータの作成を支援する環境教示システムの枠組みを図9に示す。本システムは、画像処理教示部、目標物教示部、対応点指定部、及び手順木作成部から構成されている。

##### (a)画像処理教示部

2値化しきい値、細線化回数、及びノイズ除去の度をマウスによる指定で自在に変化させ、ステレオ画像のエッジ抽出を繰り返し実行することができる。

##### (b)目標物教示部

目標物が占める画像中の領域を設定する目標物領域設定部、楕円検出<sup>(9)</sup>や四角形検出などを実行して基本図形を検出する基本図形検出部、検出した基本図形の中から目標物を記述する上で用いるものを選択する基本図形選択部、及び基本図形の抽出順序を指定する抽出順位指定部から構成されており、エッジ画を表示した画像モニタ上のカーソルをマウスで制御することにより、モニタ上の領域や表示されている基本図形にアクセスする。

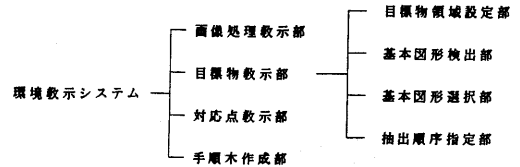


図9. 環境教示システムの構成

##### (c)対応点教示部

目標物を構成する基本図形を画像モニタ上に表示し、対応点を設定する基本図形や対応点の種類を指定する。また、設定した対応点に対し、ステレオによる3次元座標値の算出を行う。

##### (d)手順木作成部

抽出順位に従い、目標物探索に用いる手順木を作成する。

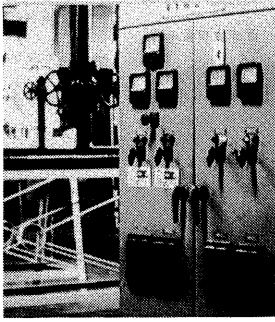
#### 5. 実験結果及び考察

ワークステーション(AS4000)に画像処理及び線分追跡のハードを付加したイメージプロセッサ<sup>(10)</sup>に、環境教示、位置確認システムを実装し目標物の抽出実験を行った。

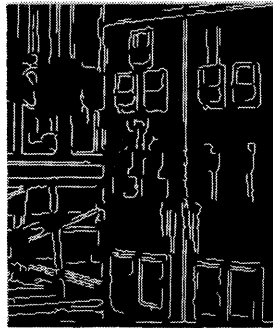
写真1(a)を教示位置のステレオ画像とし、写真3(b)を走行位置でのステレオ画像とした際の結果を以下に示す。教示位置でのセグメント抽出結果は写真1(b)であり、目標物として写真1(a)の4個のメータ列を4つの四角形の組として教示した。抽出順位は、共通視野に入る可能性の高い左の四角形ほど高く教示した。走行位置のセグメント(写真3(b))に対し、一番左端にあるメータの候補を画像全体で検出した結果を写真4に示す。検出した候補に対し、探索領域(写真5~7の大きな矩形)を設定し、他のメータを検出した結果を写真5~7に示す。写真8が目標物の抽出結果であり、教示した4つのメータを示す四角形が検出されている。

このシーンでは同一形状のメータが5個存在するため、1個のメータを目標物として教示しても、これが5個のメータのどれに対応するかを決定することができない。このため、4個のメータの列を1つの目標物とすることにより、目標物が一意に決定できるよう教示した。

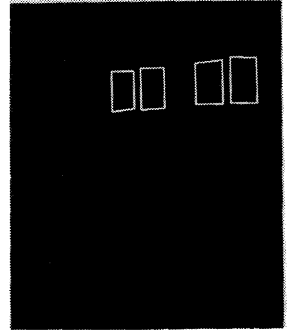
このシーンでは四角形形状が多く、画像全体を毎回探索すると処理時間が大きくなるが、探索領域を設定し、検出できる可能性の高い(抽出順位の高い)ものから探索していく方式を採ることにより処理時間の高速化が図れた。現在、このシーン(セグメント数1000本)の処理時間は30秒であるが、探索手法の改良により10秒以内を目指している。



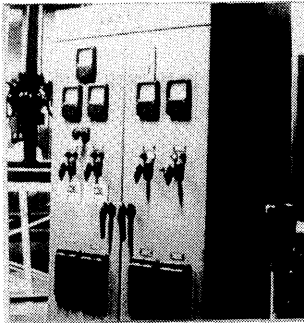
(左画像)



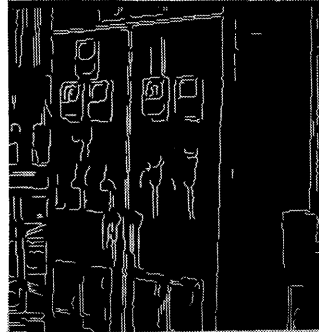
(左画像)



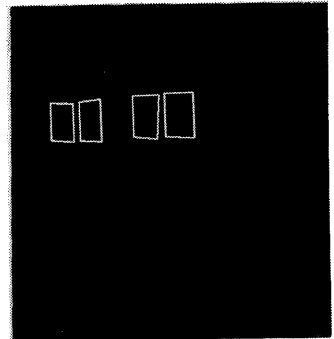
(左画像)



(右画像)



(右画像)



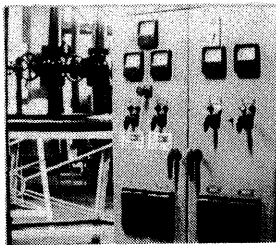
(右画像)

(a) 教示画像

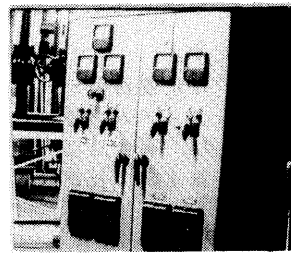
(b) 教示画像のセグメント

写真1. 教示シーン

写真2. 教示目標物

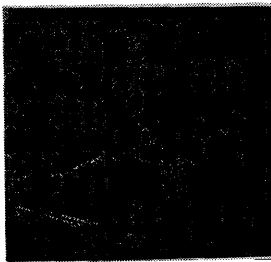


(左画像)



(右画像)

(a) 移動時の画像



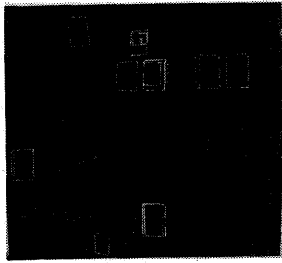
(左画像)



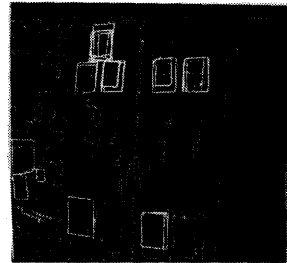
(右画像)

(b) 移動時の画像のセグメント

写真3. 移動時のシーン

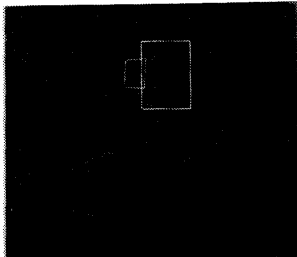


(左画像)

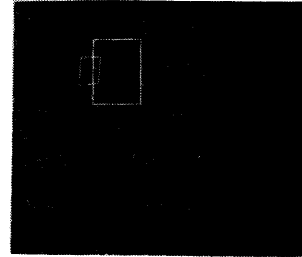


(右画像)

写真4. 左端のメータの候補

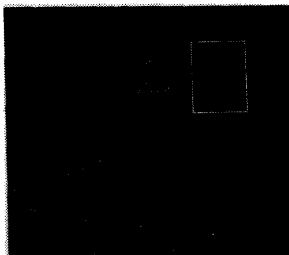


(左画像)

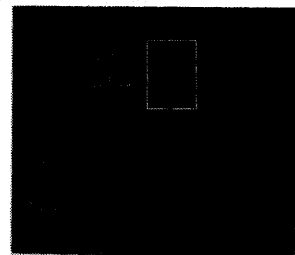


(右画像)

写真5. 目標物抽出処理の流れ-1

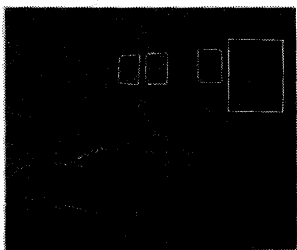


(左画像)

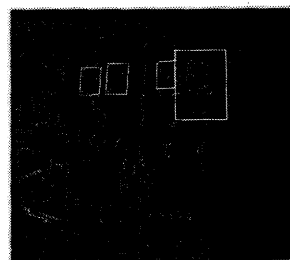


(右画像)

写真6. 目標物抽出処理の流れ-2

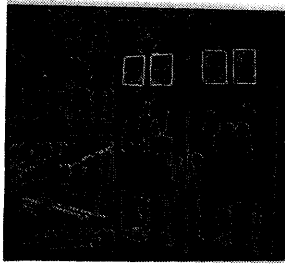


(左画像)

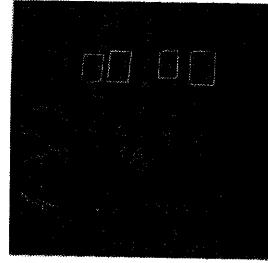


(右画像)

写真7. 目標物抽出処理の流れ-3



(左画像)



(右画像)

写真8. 目標物抽出結果

### 6. まとめ

移動ロボットの位置確認システムとして、移動環境の位置決めデータを予め作成しておく、このデータを用いて自己の位置の変化量を算出する手法を提案し、その実験結果を示した。本手法は、走行環境の中で、離散的な位置確認地点のみのデータを保持しているためデータ量が少なく済み、環境教示システムを用いて対話的に目標物を設定するため、

目標物抽出における確実性が高い。また、基本図形の組合せで目標物を記述するため、目標物の一部が欠けても抽出可能であり、探索領域の設定により高速に目標物が抽出できる。

今後、位置検出精度を検討し、基本図形検出の改良による検出精度の向上、及び目標物探索法の改良による高速化を図っていく予定である。

本研究は、通産省工業技術院大型プロジェクト「極限作業ロボット」の研究の一貫として行われたものである。

### (参考文献)

- (1)渡辺,小野口,星野:「ステレオ視を用いた移動視覚システム」,コンピュータビジョン研究会資料,42-2,1985.
- (2)小野口,渡辺,星野:「基本図形検出を用いた移動ロボット教示システムの試作--目標物抽出法の検討」,情報処理学会第34回全国大会予稿集,pp1571-1572,1986.
- (3)小野口,渡辺:「基本図形検出を用いた移動ロボット教示システム--位置確認法の検討」,情報処理学会第35回全国大会予稿集,pp2069-2070,1987.
- (4)M.Watanabe,「Obstacle Detection Method for Mobile Robots with Stereo Vision」,Proceedings of the 5th SCIA, pp.325-334,1987.
- (5)渡辺,小野口:「視差予測法による障害物検出」,情報処理学会第35回全国大会予稿集,pp2067-2068,1987.
- (6)鄭,辻:「空間的な対応に基づいた移動ロボットの環境認識」,電子情報通信学会論文誌 vol. J71-D No.9 September, pp1682-1692, 1988.
- (7)富田:「ステレオ画像の輪郭線による対応」,コンピュータビジョン研究会資料,38-1, 1985.
- (8)高橋,富田:「ステレオ画像のB-REP対応による3次元シーンの記述」,コンピュータビジョン研究会資料,46-8,1987.
- (9)沼上,久野:「仮説検証による楕円検出法」,情報処理学会第32回全国大会予稿集, 1435, 1986.
- (10)石川,星野:「ロボット視覚用イメージプロセッサ」,昭和63年電子情報通信学会春期全国大会予稿集,pp2-187,1988.