

# 知識処理の移動ロボットへの応用

## Application of Knowledge Processing to Mobile Robots

ロボットに移動機能を付与することにより、その能力及び柔軟性を飛躍的に高めることができる。ただし、移動ロボットは絶えず変化する環境の中で行動することになるため、常時周囲の状況を観測し行動計画を自律的に更新する必要がある。本論文では移動に先立って与えられる知識を利用する移動ロボット制御技術について述べる。まず移動のための知識体系を、環境の記述方法及び観測データとの照合方法から構築し、次いで環境の複合的記述方法、未知物体の認識アルゴリズム及び環境変化の検知方式を開発した。実用規模の移動ロボットを用いた実験を行ない、これらの知識処理技術の有効性を確かめた。

亀島 敏二\* *Kôji Kamejima*  
船橋 誠寿\*\* *Motohisa Funabashi*  
市川 芳明\*\*\* *Yoshiaki Ichikawa*  
小川 優理子\* *Yuriko Ogawa*  
中野 善之\*\*\*\* *Yoshiyuki Nakano*

### 1 緒 言

原子力プラントの遠隔操作としてSFの世界から実用化への第一歩を踏み出したロボットは、1980年代に入って製造業の分野で市場を確立し、人々を単純な繰返し作業から解放することに成功した。この成功が引き金になり、新しい分野でのロボットに対する要求が高まっている<sup>1)</sup>。例えば、原子力の分野では点検や保守を人間に代わってロボットに行なわせることが試みられており<sup>2)</sup>、海中での探査や捜索を行なうロボットの開発も進められている<sup>3)</sup>。一方、非産業分野でもロボットの利用が検討されており、具体的には、レーザと組み合わせた医療ロボット<sup>4)</sup>あるいは実用的な家庭用ロボット<sup>5)</sup>のイメージも具体化されつつある。更に、社会の成熟とともに急速に増大が予想される社会資本のメンテナンスへのロボットの導入も求められている<sup>6)</sup>。

このような新しい分野のロボットは、人間の活動する領域で人間と協調あるいは人間の機能を代行して行動するため、移動能力を備える必要がある。移動に伴ってロボットと周囲環境との関係は絶えず変化することを考えると、移動ロボットの運用に当たっては、刻々と変化する周囲状況とロボットの相対的位置関係を常に認識し、これに基づいて行動計画をダイナミックかつ自律的に策定しなければならない。本論文では、プラント内の点検など各種産業分野への応用を目的に開発した移動ロボットのための知識処理技術の概要を述べる。

### 2 モデル利用形自律移動

人間は周囲の状況を理解するに当たって、直接その瞬間に入手される観測データに加えてさまざまなレベルの知識を用いるものとされている。このような巧妙な人間の環境認識能力を模擬するためには、従来の、センサの精度及び出力信号の処理能力を高めるといった受け身のアプローチに加えて、ロボットに外界を戦略的に観察させ、これに基づいて周囲の状況を理解させるという能動的なアプローチを導入することが必要となる。このような積極的なセンシングは、ロボット制御システムの内部に環境のモデルをもたせることにより初めて可能となる<sup>7),8)</sup>。

自律移動のための知識処理技術の概要を図1に示す。ロボットの周囲状況に関する知識は、物体の配置及びそれぞれの物体の形状が書き込まれた「地図」として表現されている。

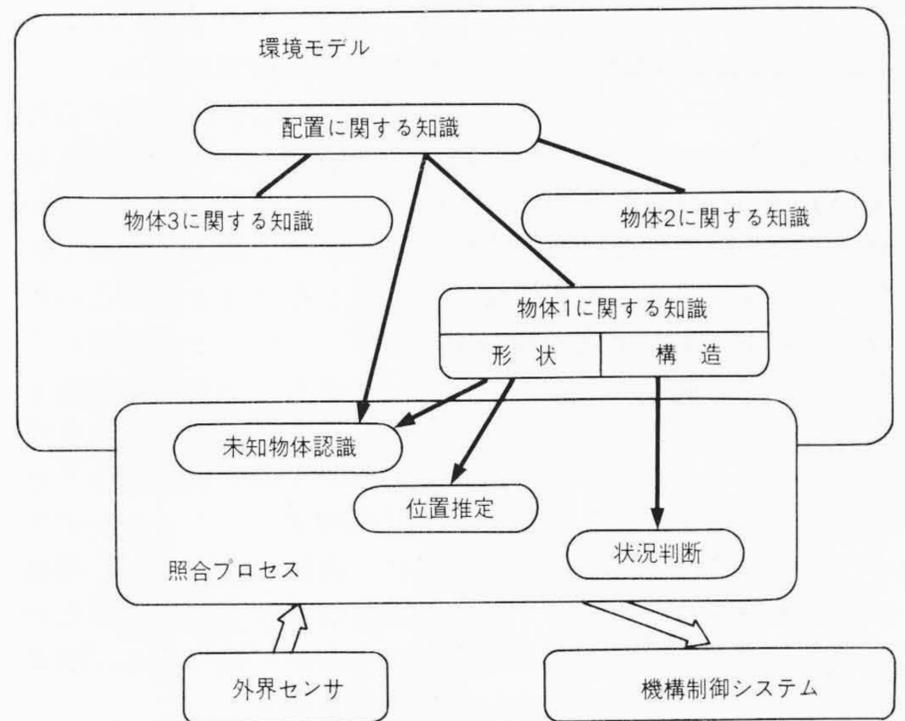


図1 自律移動のための知識処理 ロボットは環境モデルを手がかりに自律的に移動する。環境モデルには周囲の状況に関するさまざまなレベルの知識が格納されている。これらの知識と外界センサの出力を照合することにより、ロボットの現在位置を推定したり環境の変化を察知したりする。

ロボットは、テレビジョンカメラや超音波レーダの出力をモデルと照合することにより、周囲の状況を理解し自律的に行動する。

このように、自律移動に必要な知識は、図1に示すように具体的かつ明確に構成される。したがって、移動ロボットの知識処理システムを設計する上で知識工学の果たす役割は大きい。ただし、ロボットがもつべき知識の大部分は人間が先天的に受け継いだ、あるいは無意識のうちに習得したものである。したがって、同図に示した知識体系を実際に構築するに当たって、「専門家が後天的に意識的な学習を通じて獲得した知識を収集する」といったエキスパートシステムのアプローチは有効ではない。そこで本研究では、さまざまな局面を模擬できるモデル環境を種々設定し、実際にロボット<sup>9),10)</sup>を用いた走行実験を試みることにより、移動に必要な知識の抽出を行なった。以下の各章では、このようなアプローチを経て現在までに開発した主要な要素技術を紹介する。

\* 日立製作所機械研究所 \*\* 日立製作所システム開発研究所 \*\*\* 日立製作所エネルギー研究所 \*\*\*\* 日立製作所機械研究所 工学博士

### 3 移動のための環境記述

ロボットに自律移動を行なわせるためには、各地点間の接続関係、物体の幾何学的及び構造的形状を複眼的に記述した環境モデルに基づいて外界センサ信号を処理することが必要である。本研究では、以下に述べるノードマップ、幾何学モデル、画像構造リストにより環境モデルを構築した。

#### 3.1 ルート決定のための環境記述-ノードマップ

ノードマップは直進、旋回、階段昇降など運動モードを組み合わせてロボットの行動計画を立案するためのものである。ここでは環境を、運動のモードの変更地点(ノード)のつながりによって図2のように記述する。実際の建屋内などでは、目標地点に達するには幾つかのルートがあり、この選択が必要である。これに対しては、グラフの枝に標準移動時間あるいは標準エネルギー消費を書き込んでおき、これを最少とするような数理計画的問題を解くことによりルートを決する。グラフ的表現は、ロボットに対して人間が指令を与えるうえでも、分かりやすいインタフェースとなっている。

#### 3.2 位置推定のための環境記述-多視点幾何学モデル

ロボットが、移動領域内のどの地点にいるかを判断するためには、ロボットに移動環境の3次元形状をCAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)で使われているような幾何学的モデルで覚え込ませておき、3次元モデルと撮影画像の照合を行なえばよい。この照合は、ロボットが予定の径路上に位置しているとの仮定のもとで、結像プロセスのシミュレーションを行なって予測画像を生成し、これと撮影画像とのマッチングをとることにより実行できる。この際、予測画像をリアルタイムで生成することが必要となるが、図2に示すように幾何学的モデルを上位のノードマップに対応づけると同時に、運動の方向性とも関連づけて記憶させるようにすれば、隠面除去が不要になるためロボットの動作に同期した速度での生成が可能である。図3には、このようにして生成した情景例を示す。

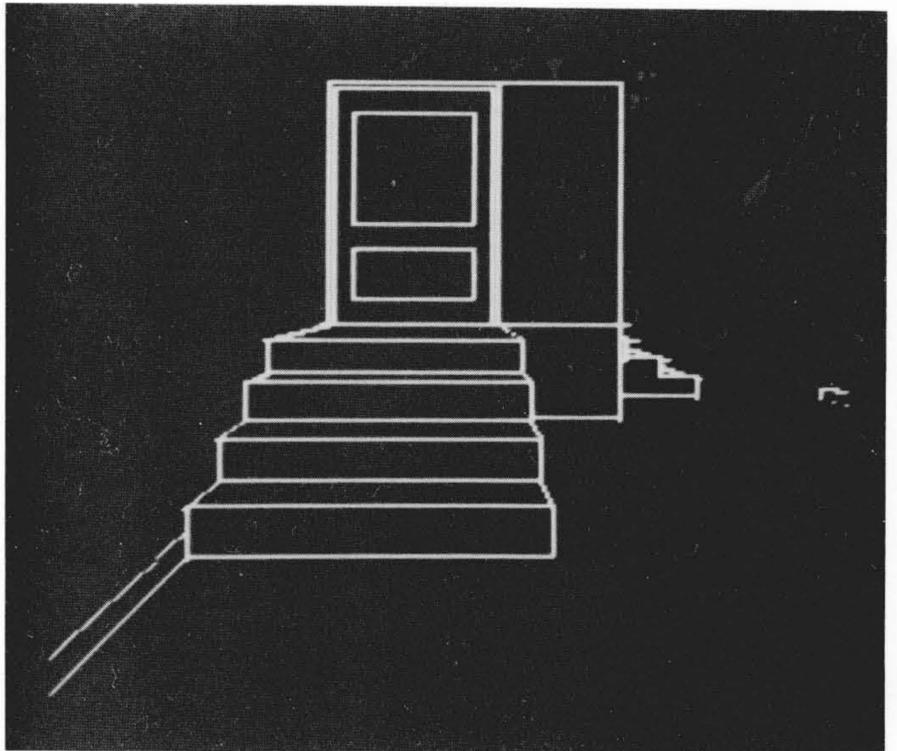


図3 多視点幾何学的モデルを用いて生成した予測情景 図2に示した多視点幾何学的モデルを用いると、ロボットが径路上で見るであろう予測情景を生成することができる。この予測情景と実際の撮影画像が一致するようにロボットを駆動することにより、位置の誤差なくロボットを誘導することができる。

ここで、撮影位置の変動に応じて物体像には特有の変形が生じることに着目して、予測画像とロボットに搭載したテレビジョンカメラから得られる撮影画像のずれをパターンポテンシャル法<sup>11)</sup>に従って位置誤差に変換することにより、移動ロボットを時速2 km程度の速度で誘導することができる。

#### 3.3 状況理解のための環境記述-画像構造リスト

ドアの開閉状況の判断や移動の際の目標物体の探索などの場合には、物体の正確な寸法よりもむしろ物体形状の特徴を知ることができる。このような目的には、画像中に現われる物体の輪郭線を、図形としてではなく、線分の組合せとして把握するほうが望ましい。よく知られているように、平面上の直線は傾き及び切片の二つのパラメータで表わすことができる。これを一般化して、画面内に見いだされる線群の分布状況、すなわち構造を、パラメータの並び、すなわちリストで表現する<sup>12)</sup>。このような表現を用いることにより、わずかにずれた位置にある物体あるいはすこし斜めに置かれた物体の画像としての「ゆがみ」をパラメータの誤差として定量的に把握することができる。このことは、パラメータリストを用いて図形を書き表わすことにより、「およその位置」に置かれた、「およその大きさ」が分かっている物体を、「代表値」及び「ばらつき」だけを用いて環境モデルに書き込めることを意味する。

### 4 未知物体の認識

外界センサの出力には、「地図」に登録されている物体に対応する信号以外にもさまざまな信号が含まれる。したがって、このセンサ信号を知識に基づいて解析することにより未知の物体の形状を認識することができる。

#### 4.1 立体視を用いた形状認識

2台のテレビジョンカメラで撮影した左右の像から同一物体に対応する点を抽出し、三角測量の原理を適用することにより物体までの距離が得られる。しかし、画像間の対応点を捜し出すためには膨大な計算が必要となる。ここで、「ひとつの物体に対する距離の変化は滑らかである」という知識を利

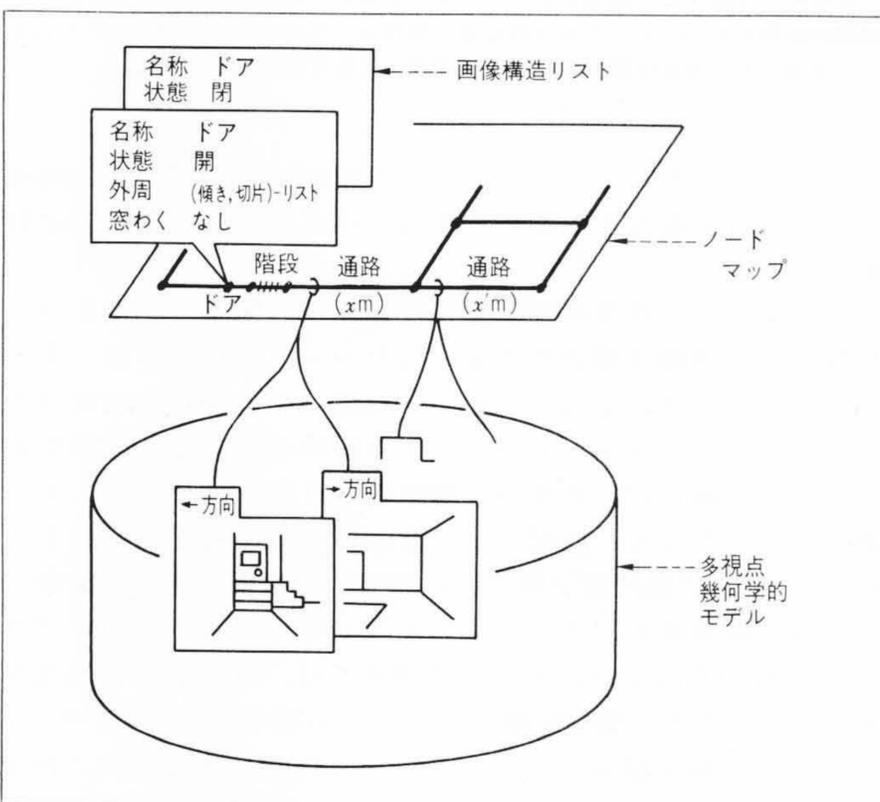


図2 ロボットがもつ「地図」 自律移動のために、ロボットはさまざまな見地から環境を記述した「地図」をもつ。ノードマップには径路の性質とその接続関係を、多視点幾何学的モデルには径路の方向に対応して構成したワイヤフレームモデルを記憶する。また画像構造リストには、環境の変化を特定するために必要なパラメータを格納する。

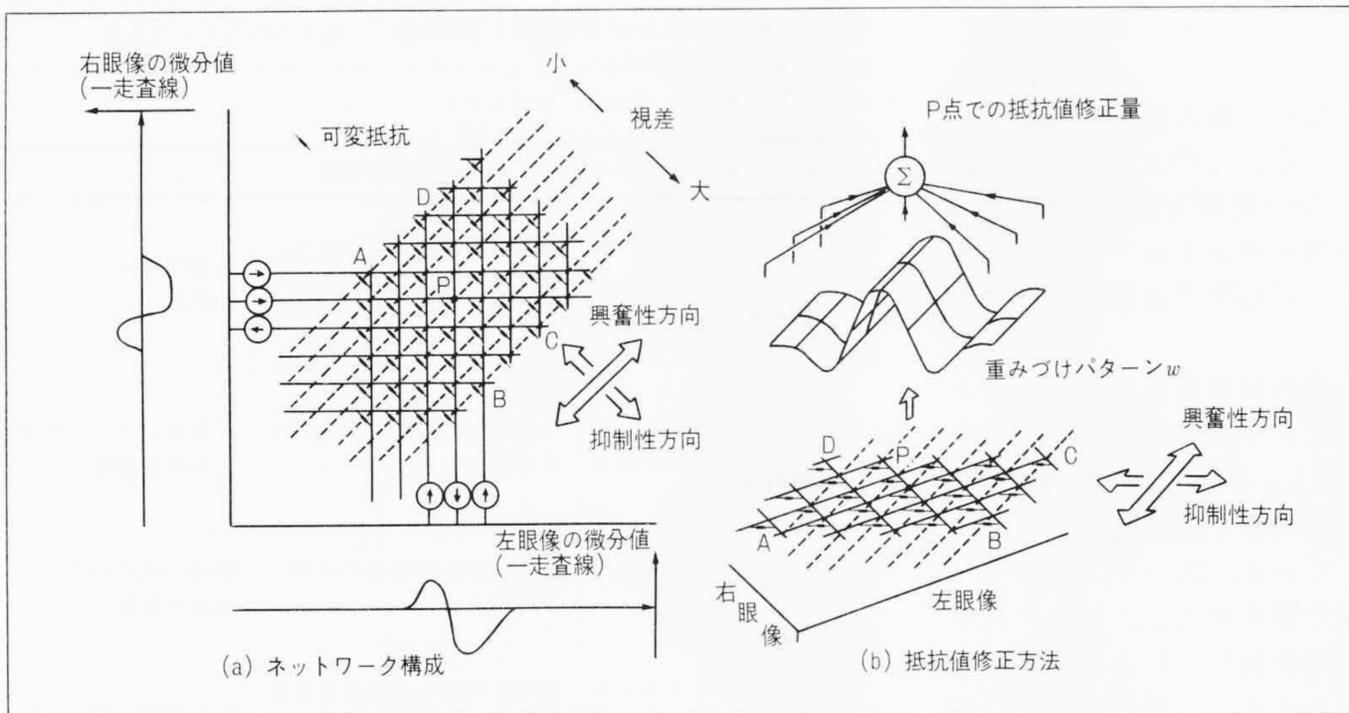


図4 立体視のための対応点探索の原理 2枚の画像の対応点をネットワークアナロジーに基づいて求める。すなわち、右眼像から左眼像へと画像の微分値に相当する電流を流すネットワークを考える。このネットワークに対し、側抑制理論に基づいて定められる重みづけパターン $w$ にしたがって可変抵抗の値を更新し、求めた電流分布から対応点を決定する。

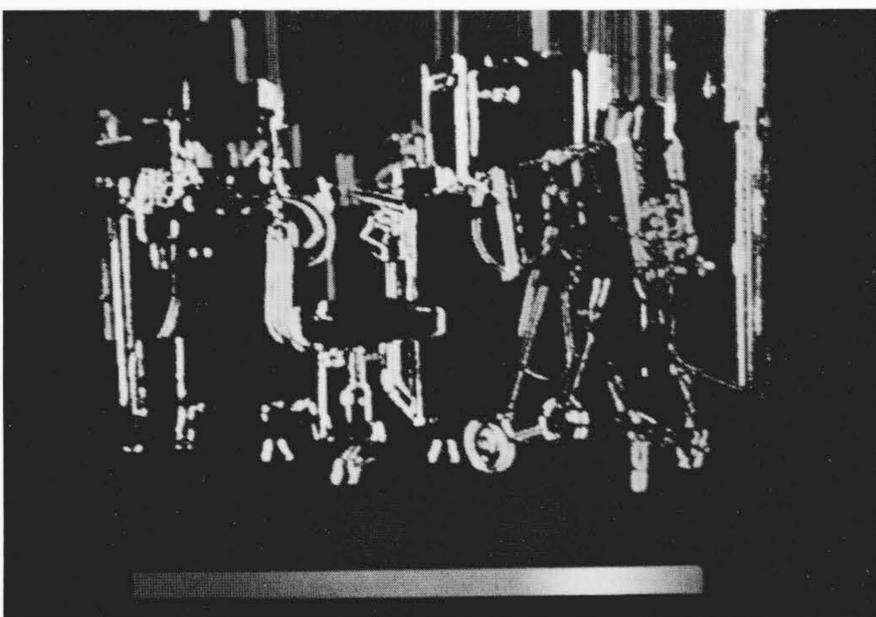


図5 奥行き距離の計算結果 右眼像のエッジに対する奥行き距離の計算結果を、黒いエッジほど手前に、淡いエッジほど遠方にある物体として表示している。

用すると、図4に示す原理に従うネットワーク算法と呼ばれる能率のよい対応点探索法が得られる。この方法によると、左右の画像の対応点はネットワーク上の電流のピーク点として検出される。この方法を実際の画像に適用した結果を図5に示す。同図は奥行き距離を明暗で表わしており、黒い場所ほど手前にあり、淡い場所ほど遠方にある物体であることを示している。

#### 4.2 超音波エコーを用いた形状認識

ロボットに超音波レーダを搭載し、反射波を解析することにより物体の輪郭を知ることができる。ロボットが利用できるデータは、物体表面から反射されたエコーの位置と方向である。ただし、このとき超音波の反射の性質によって物体表面から連続的にエコーを採取することは困難であるため、まばらな配置のエコーから輪郭を復元する必要がある。そこで、「エコーは必ず物体の外側に反射する」という知識を用いて、図6(a)に示す方法で互いに隣接するエコーを見だし接続することにより物体形状を認識する<sup>13)</sup>。ただし、このとき同図(b)のような点は輪郭に属さない孤立点と判断する。図6に示す接続操作をさまざまなスパン $S$ に対して行ない、最も孤立点の少ないスパンに対応する接続結果を物体の輪郭と判断する。図7には、以上述べた方法で実際に観測したエコーから凹部のある物体の形状を認識した結果を示す。

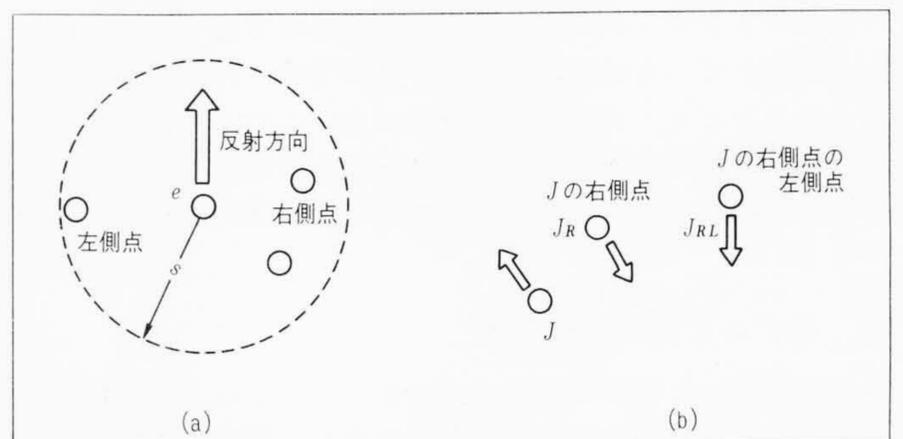


図6 隣接点接続法 (a) エコー $e$ の反射方向を利用して、スパン $S$ 以内の距離にある他のエコーの内から左右の隣接するエコーを見だし、それぞれ右側点、左側点とする。(b) エコー $J$ を基準に $J$ の右側点 $J_R$ を定め、次いで $J_R$ を基準に $J_R$ の左側点、すなわち $J$ の右側点の左側点、 $J_{RL}$ を定める。このとき、 $J_{RL}$ が $J$ に一致しないから $J$ は孤立点である。

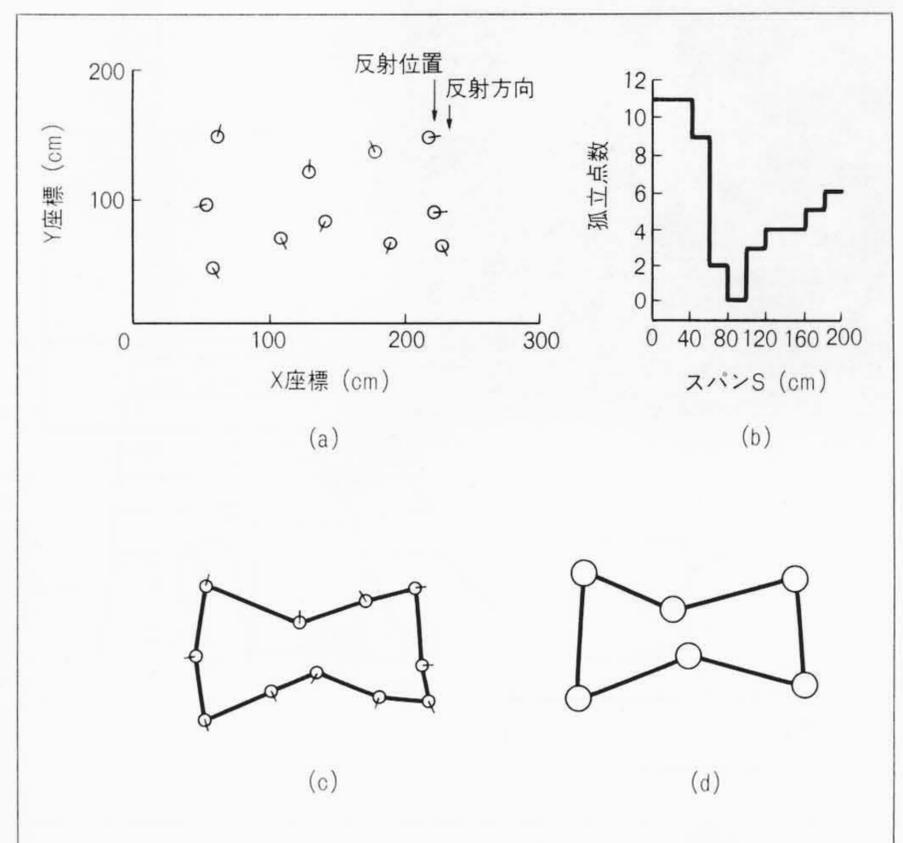


図7 超音波エコーに基づく物体形状認識の一例 ロボットは未知物体の周囲を移動してエコーを検出した(a)。これらをさまざまなスパンで接続したところ $S=80\text{cm}$ が最適な接続となる [(b), (c)]。更に線分化処理をして輪郭を得る。実物形状との誤差は $10\text{cm}$ 以内である(d)。

### 5 環境変化の検知

実際の環境には、開閉するドアなど、幾何学的形状が多様に変化する物体が数多く含まれている。このように、事前に「地図」にすべての状況を書き尽せない実環境を移動するロボットでは、その時点での環境の状況を特定するアプローチが実際的である。以下、この問題をドアの開閉状況の判断を例に考えてみる<sup>14)</sup>。

モデルを用いるとドアのおおよその位置を見当づけることができる。この例では、階段の奥にドアがあるという知識を用いてまず地表に接する階段を検出し、次いで、「地図」を用いて得られる階段とドアの相対位置関係を利用して、ドアの存在する領域を画像から切り出している。次いで、直線当てはめの手法を適用して画像中の線分群を検出し、リスト化する。このように、画像から得られた検出リストとモデルから得られた参照リストを照合することにより、ドアの開閉を判断することができる(図8)。

このリストマッチングを用いる環境認識方法では、ロボットが遭遇している状況が、あらかじめ予想されたものなのか否かをコンピュータに判定させている。このように、ロボット自体が認識すべき範囲を人間が明確に指定できるということは、知能ロボットの行動の確からしさを保証する上で重要である。

### 6 モデルと実環境の照合

3章で述べた複眼的環境モデルをベースとして、物体認識及び環境変化検知手法を組み合わせると、表1に示すような環境モデルと実環境の照合が可能となる。このとき、各照合プロセスは環境モデルを介して互いに結合され、協調的に動作するため、相乗効果が生じ、効率のよい照合を行なうことができる。

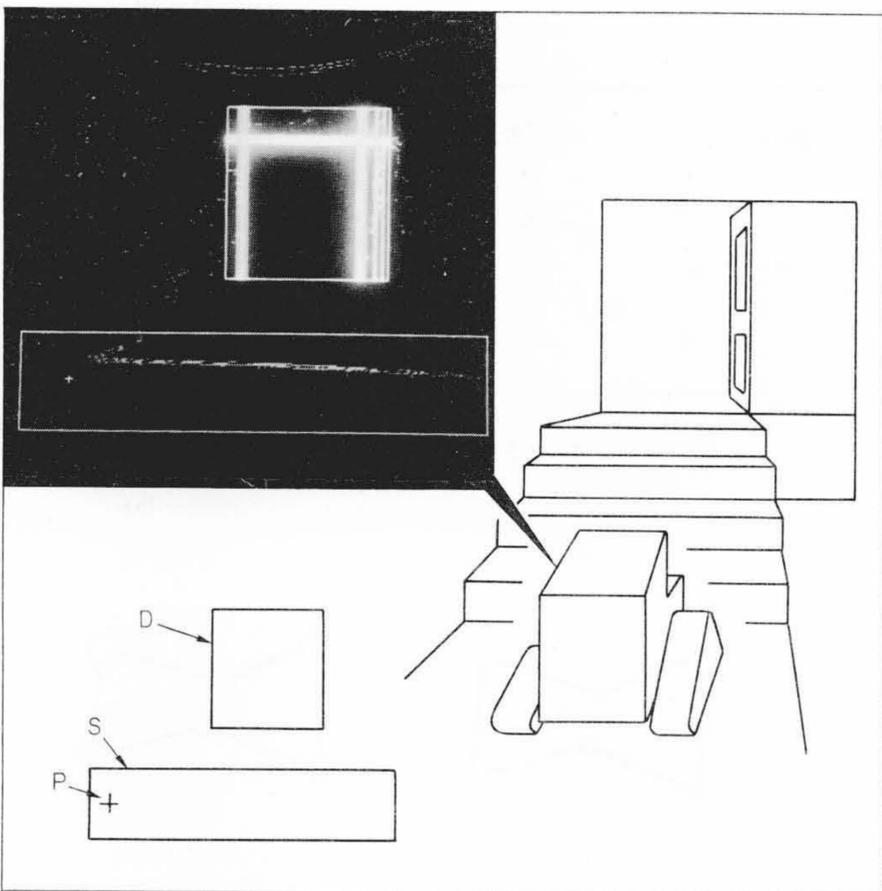


図8 画像構造の検出によるドア開閉判定 階段の手前で撮影した画像の構造を検出している。まず足もとに注目して領域Sから階段の特徴点Pを認識し、「地図」を用いてドアの存在が予想される領域Dを切り出した後、D内の水平・垂直線分群を検出している。検出線分の組合せを「地図」中の画像構造リストと照合し、「ドアは開いている」と判定している。

表1 環境モデルと実環境との照合 種々の外界センサを用いて、環境モデルと実環境を照合することができる。照合の結果に基づいてロボットの行動計画を更新し、「地図」を修正する。

外界センサ	照合手法	照合のための知識	効果
テレビジョンカメラ (一眼移動)	パターンポテンシャル法	撮影位置の変動に応じて、物体像には特有の変形が生ずる。	誘導信号を16msごとに計算
テレビジョンカメラ (二眼静止)	ネットワーク算法	一つの物体に対する距離の変化は、滑らかである。	1画素以下の分解能で物体を認識
超音波センサ	隣接点接続法	エコーは必ず物体の外側に反射する。	物体の輪郭を10cmの精度で認識
テレビジョンカメラ (一眼静止)	リストマッチング法	画像中の線分の組合せは物体の種類及び状態だけで定まる。	状況変化に対応可能な「地図」の作成

### 7 結 言

環境モデル及びそのセンシングデータとの照合方法を知識として利用する自律移動の新しい概念を提案し、主要な知識処理技術を開発した。具体的には、環境の記述方法、未知物体の認識アルゴリズム、環境変化の検知方式を開発し、実用規模の移動ロボットを用いた実験を通してその有効性を確かめた。これらの知識処理技術は、高度な自律性及び操作性を兼ね備えた自動保守点検作業用ロボットをはじめとする各種の知能移動ロボットの実現に貢献するであろう。

#### 参考文献

- 1) 小林：極限作業ロボットの研究開発計画，計測と制御，23巻，2号，229～232(1984-2)
- 2) M. A. Fischetti：Robots Do the Dirty Work, IEEE Spectrum, 22, 65～72(Apr., 1985)
- 3) J. A. Adam：Probing Beneath the Sea, IEEE Spectrum, 22, 55～64(Apr., 1985)
- 4) G. J. Jako：Lasers Cut a Swath in Surgical and Medical Applications, IEEE Spectrum, 22, 82～87(Mar., 1985)
- 5) T. E. Bell：Robots in the Home：Promises, Promises IEEE Spectrum, 22, 51～55(May, 1985)
- 6) 吉川：保全技術の必要性と可能性，精密機械，49巻，1号，78～83(1983-1)
- 7) S. Tsuji：Monitoring of a Building Environment by a Mobile Robot, Proc. ISRR(1984-8)
- 8) 森，外：環境を認識し室内を移動するロボット，情報処理学会第28回全国大会予稿集，979～980(1984-3)
- 9) 藤江，外：知覚誘導クローラ型移動ロボット，日立評論，66，10，755～758(1984-10)
- 10) 市川，外：知能型床面移動ロボット，日立評論，66，10，759～763(昭59-10)
- 11) K. Kamejima：Perception-Control Architecture in Image Processing for Mobile Robot Navigation System, IEEE-SICE IECON '84, 52～57(Oct., 1984)
- 12) K. Kamejima, et al.：Environment Description for Mobile Robot Navigation, 31th IPSJ, 3P-5(Sept., 1985)
- 13) 市川，外：超音波センサを利用した移動ロボットの障害物輪郭抽出，第24回SICE学術講演会予稿集，337～338(1985-7)
- 14) Y. C. Ogawa, et al.：Syntactic Environment Recognition for Mobile Robot Navigation, 31th IPSJ, 3P-6(Sept., 1985)