

## 自律移動ロボット用位置姿勢認識について

金山幸礼 笹木美樹男 齊藤英樹 伊東正篤  
日本電装株式会社 基礎研究所

自律移動ロボットが停止時に対象物の位置姿勢を高精度に認識する手法として、単眼視による対象物画像の直接処理による方法を2つ提案する。まず透視 $n$ 点問題を最小2乗推定で解くことによる直接計算法を示し、その性能を評価する。次に、離散空間内の最適値探索問題に見え方モデルを導入して位置姿勢計算を定式化し、カメラ光軸補正が不要である空間量子化法を独自に提案する。シミュレーションにより直接計算法との比較を行い、空間量子化法が優れていることを示す。さらに、高速化手段として巡回パラメータ独立探索法を導入し、演算量の大幅な削減と高精度化を実現する。最後に、実機システムによる実験を行い、定常位置から外れた対象物も有効に把持できることを確認した。

## Position-and-Attitude Recognition for Autonomous Mobile Robot System

Yukihiro KANAYAMA Mikio SASAKI  
Hideki SAITO Seitoku ITO

Research Laboratories  
NIPPONDENSO CO., LTD.

500-1 Minamiyama, Komenoki, Nissin-cho  
Aichi-gun, Aichi-ken, 470-01 JAPAN

This paper presents two methods to recognize the position-and-attitude of an object by the direct processing of its image from a monocular vision, especially for an autonomous mobile robot system. First we offer the way of direct calculation method which is based on the solution of the Perspective  $n$ -Point problem with the least-squares estimation, and its performance is evaluated. Next, based on the formulation of the calculation in the discrete space, we propose the space quantization method which needs no mechanical correction of the optical axis. The simulated results demonstrate the superiority of the space quantization method to the direct calculation method. Moreover, we devise the iterative parameter independent search so as to reduce the computational costs significantly, and to realize the high accuracy and fast execution. Finally, the experimented results using the real manipulator are shown to verify the effective grasp, even if the target object is fairly deviated from the fixed position.

1はじめに

近年、立体形状が既知である対象物に対してアプローチし、把持や解放などの能動的操作を行うことができる自律移動ロボットの需要に伴い、視覚情報に基づく高精度かつ高速で低価格の位置姿勢を認識する装置の開発が望まれている。ここでは、特定対象物の特徴点抽出や形状パラメータ計算などに基づいてカメラの3次元の位置と姿勢を算出することが要求される。従来の両眼視ステレオ視計測では未知形状の対象物に対する視点の位置姿勢を決定できるが、実際にはカメラキャリブレーションや測定誤差、コスト、重量、計算量などの問題がある[1,2]。そこで本研究では単眼視による位置姿勢計算に着目する。

従来、単眼視による自律移動ロボットの位置姿勢認識として、対象物付近に固定された既知の特殊な幾何形状（マーカと呼ぶ）の位置姿勢を認識し、それに加え既知であるマーカと対象物との位置姿勢関係をもとに、対象物の位置姿勢を間接的に計算するマーカ方式が提案されている[3,5]。しかしながら、この方法ではマーカと対象物との位置姿勢関係が既知でなければならず、対象物が定常位置よりずれた場合（非定常状態）には、対象物の位置姿勢を認識できない。一方、対象物を直接認識して位置姿勢を求める無マーカ方式ではそれが認識可能となるため、汎用性が高く、利用範囲も広いと考えられる。

本論文では無マーカ方式として、最適値探索を用いる空間量子化法とその探索方法として巡回パラメータ独立探索法を提案し[4]、その空間量子化法と透視n点問題を最小2乗推定を用いて解く直接計算法についてシミュレーションを用いて比較検討を行い、前者の有効性を示す。また、実際に空間量子化法を用いた実機システムにおける対象物の把持実験結果も示す。

## 2 直接計算法

### 2.1 透視n点問題

図1に示すオブジェクト座標系の各特徴点 $p_i = (x_i, y_i, z_i, 1)$ は次式の透視変換により画像面座標の各点 $q_i = (u_i, v_i, 1)$ に投影される。

$$p_i M = h_i q_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$M = T M_1 M_2 M_3 \quad (2)$$

ここで、 $M$ は透視変換行列、 $h_i$ はスケールファクタ、 $n$ は特徴点数である。 $T$ は回転、平行移動、拡大、縮小 ( $4 \times 4$ )、 $M_1$ は射影空間内への透視変

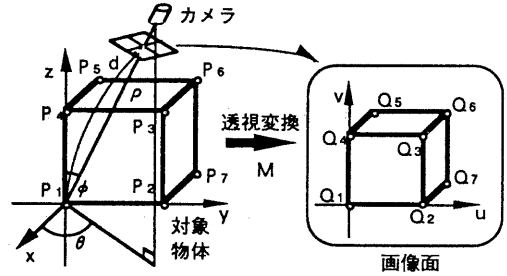


図1 透視n点問題（光軸ずれ無し）

換行列 ( $4 \times 4$ )、 $M_1$ は射影空間内の平面からの射影平面への透視変換行列 ( $4 \times 3$ )、 $M_2$ は射影平面から画像面を表わす射影平面への変換行列 ( $3 \times 3$ )である[1]。

式(1)において $M$ を求めるのが透視n点問題である。ここで $p_i$ はあらかじめ測定して既知であり、 $q_i$ がカメラで撮影された画像より与えられたとき、 $M$ の各行列要素を未知数として最小2乗推定を用いて未知数を求める。ここで求めた結果をカメラ行列 $C$ とする。カメラ行列 $C$ を最小2乗推定で求めるとき、 $C$ を正規化 ( $C_0=1$ ) している。

一方、カメラ光軸がオブジェクト座標系原点に一致する場合（図1の場合に相当する）は $T$ 、 $M_1$ は定数行列となり、これらが単位行列となるように焦点距離 $f = (\rho - d)$ を決めると、 $C$ は

$$C = \frac{1}{\rho} M_1 M_2 = \begin{bmatrix} \frac{(d-\rho)\sin\theta}{\rho} & \frac{(d-\rho)\cos\theta\cos\phi}{\rho} & -\frac{\sin\phi\cos\theta}{\rho} \\ -\frac{(d-\rho)\cos\theta}{\rho} & \frac{(d-\rho)\cos\theta\sin\phi}{\rho} & -\frac{\sin\phi\sin\theta}{\rho} \\ 0 & -\frac{(d-\rho)\sin\phi}{\rho} & -\frac{\cos\phi}{\rho} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

で与えられる。これより、最小2乗推定で求めた $C$ の各要素と式(3)の各要素よりカメラの位置姿勢パラメータ $\rho$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ が求められる。

### 2.2 誤差シミュレーション

特徴点抽出に誤差が無い場合、式(3)の理論式よりカメラの位置姿勢パラメータを正確に、また一意に求められる。しかし、特徴点抽出に誤差がある場合には最小2乗推定した $C$ の各要素が式(3)と一致しなく、これらから求めた位置姿勢パラメータに誤差が生ずる。また、式(3)の関係が $C$ の各要素間で成り立たなく、解が一意に定まらなくなる。未知数4に対して関係式が8つなので、解は1つ以上存在することになる。

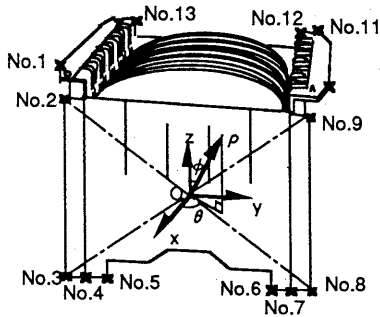


図2 対象物特徴点

図2の様な対象物に対するカメラの位置姿勢計算をシミュレーションで行い、誤差評価を行った。特徴点数は13点とし、原点をNo.2、3、8、9の交点とした。カメラ撮影条件は $\rho=420\text{mm}$ 、 $\theta=0^\circ$ 、 $\phi=65^\circ$ を中心に $\theta$ 、 $\phi$ を $\pm 5^\circ$ 変化させた。撮影条件として対象物が正面付近( $\theta \approx 0^\circ$ )に映るようにしているため、 $\sin \theta$ が分母にくるようなパラメータ導出式を用いると誤差が大きくなる。そのため、その条件を踏まえて各パラメータについて2種類の導出式を用いてシミュレーションを行った。

特徴点の抽出誤差に対する認識精度の評価尺度として各特徴点が1ピクセルずれたときの最大誤差を求めた。結果より、角度誤差については導出式を選べば誤差は $0.3^\circ$ 以内に入る。ロボットハンドによる対象物把時、解放を行うため、目標精度を位置 $\pm 0.5\text{mm}$ 、角度 $\pm 0.5^\circ$ に設定しているが、角度に対しては目標に入る。しかし、位置誤差に関してはかなりの誤差が生じた。図3に $\phi$ を変化させたときの位置の誤差を示す。図4に $\theta$ を変化させたときの位置の誤差を示す。このときの $\rho$ の導出式は

$$\rho(1) = \frac{C_{12}}{C_{21} C_{33}} \quad (4)$$

$$\rho(2) = -\frac{\sin \phi \cos \theta}{C_{13}} \quad (5)$$

の2種類を用いた。 $\theta$ を変化させても位置誤差はほとんど変化がないが、 $\rho(1)$ を用いた場合の位置誤差は $\phi$ を小さくすることにより小さくできる。しかし、 $\phi$ を小さくしていても誤差最大約5mm程度は生じ、目標に対して大きい。

特徴点に誤差が含まれる場合は、最小2乗推定により無理に式(1)に合わせるため、カメラ行列Cが式(3)とは一致しなくなる。誤差を小さくするためには特徴点数を増やし、1点のずれによる影響を最小2乗推定により小さくすればよい。しかし、対象物が決まっている場合には特徴点数を増やすことは難しく、また正確に特徴点が抽出できなけれ

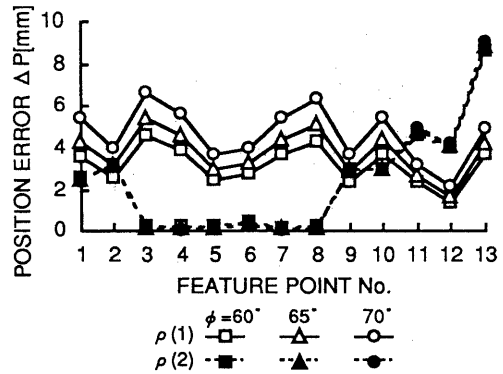


図3  $\phi$ を変化させたときの位置誤差

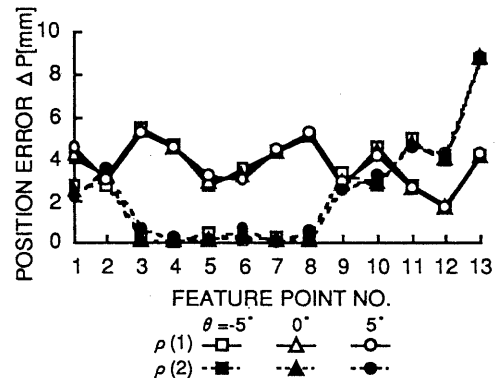


図4  $\theta$ を変化させたときの位置誤差

ば逆に誤差の増大につながる。また、図3、4からわかるように外周の点や孤立点の影響が大きいため、その点を正確に抽出すれば誤差は小さくなると考えられる。

結論として、直接計算法は特徴点誤差による影響が大きく、自律移動ロボットの位置姿勢認識には適さない。そこで、次節で説明する空間量子化法を用いた方法を用いる。

### 3 空間量子化法

#### 3.1 原理

図5の様に自律移動ロボットではロボットがある停止精度範囲内に停止し、視覚補正によりハンドの位置姿勢を修正して対象物の把時、解放を行う。このときロボットの予想停止位置におけるカメラの位置姿勢を中心に位置姿勢を表わすパラメータ空間を必要精度で量子化する。その有限個の量子化空間点においてカメラで対象物を見たとき見えるであろう画像を透視変換により推定し、その

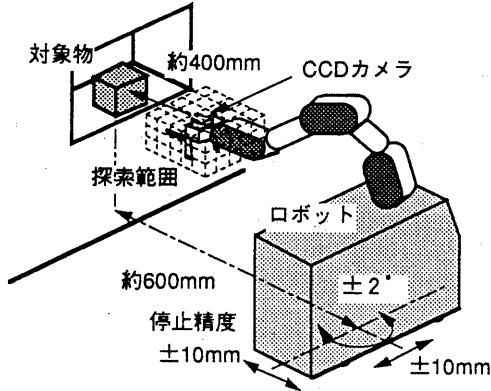


図5 自律移動ロボット

推定画像と実画像との比較を行う。推定画像と実画像がマッチングするまでカメラの位置姿勢を探索し、マッチングした点が求めるカメラの位置姿勢である(図6参照)。これを空間量子化法と呼ぶ[4]。

比較の対象として直接計算法で述べた特徴点同士を比較し、距離差を評価関数とすると計算が簡略化される。また、比較手段として他に面積比較、線分比較、線分・点比較等が挙げられ、演算量の制約さえなければ、比較対象が多いほうがロボタ化への寄与も大きい。

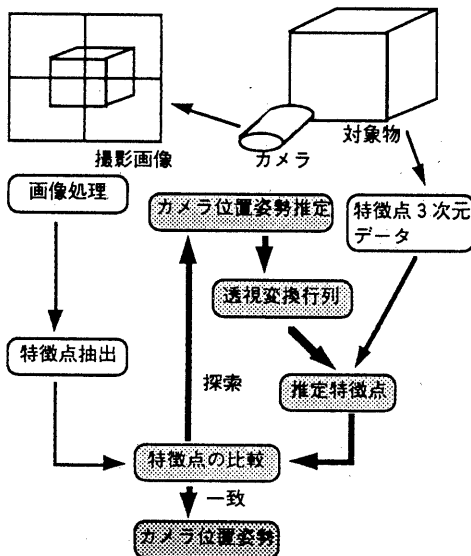


図6 空間量子化法における探索

### 3.2 巡回パラメータ独立探索法

空間量子化法では量子化したパラメータ空間内の効率的な探索が計算速度に大きく影響する。位置姿勢のパラメータ空間は6次元なので、大まかな量子化でも膨大な量子化点の探索となってしまう。

そこで、図7の様に初期探索点から各パラメータに関して順次1次元探索を行い、これを繰り返し行う。この繰り返しのとき初めは荒い探索幅を徐々に狭めていき、最終的に必要な精度内の最終値が得られる。これを巡回パラメータ独立探索法と呼ぶ。この探索法により少ない探索回数で必要な精度を得ることができる。

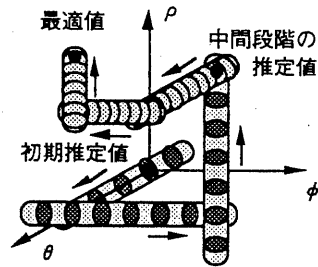


図7 巡回パラメータ独立探索法 (パラメータ3つの場合)

### 3.3 実際の位置姿勢探索

一般的に、カメラの光軸とオブジェクト座標系原点とは一致せずずれる(光軸ずれ)。そこで、図8の様にオブジェクト座標系とカメラ座標系を定義すると透視変換行列Mは

$$M = T M_0 \quad (6)$$

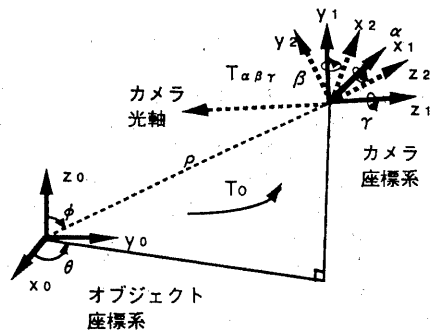


図8 光軸ずれ対応

で与えられる。ここでTは光軸ずれ変換行列、 $M_0$ はカメラ座標系における透視変換行列である。 $\rho$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ はオブジェクト座標系から見たカメラ座標系原点の位置、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ はそれぞれカメラ座標系におけるx、y、z軸の回転である。

ここでTは

$$T = T_0 T_{\alpha\beta\gamma} = \begin{pmatrix} A(\theta, \phi) & 0 \\ P & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R(\alpha, \beta, \gamma) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$P = (0, 0, -\rho)$$

$$A(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} -\sin \theta & -\cos \phi \cos \theta & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \theta & -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi \sin \theta \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

で与えられる。また、 $M_0$ は

$$M_0 = \begin{bmatrix} \rho-d & 0 & 0 \\ 0 & \rho-d & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

となる。ここで $\alpha$ 、 $\beta$ は画像面原点からの画像面上に映るオブジェクト座標系原点のずれ量より求めることができる。図9のようにx軸のずれ量を $N_x$ 、y軸のずれ量を $N_y$ とすると $\alpha$ 、 $\beta$ は

$$\alpha = \tan^{-1} \left( -\frac{N_x}{f} \right) \quad (9)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{N_y \cos \alpha}{f} \quad (10)$$

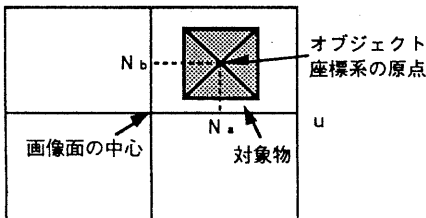


図9  $\alpha$ 、 $\beta$ の計算

で与えられる。これにより、6つのパラメータを4つに減らすことができ、探索回数を減らすことができる。

次にパラメータの最適な探索順序を決定する。これは対象物形状と見え方および予定撮影位置に依存して決まり、探索回数や精度に影響を及ぼす。シミュレーション実験の結果（予定撮影位置は直接計算法と同様）、最適な探索順序は図10のように $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\phi$ 、 $\rho$ の順序であり、この時が探索回数が少なく、精度の高いことがわかった。特に、 $\rho$ は他のパラメータのずれの影響が大きく、最後に探索する方が良い。また、ある程度繰り返しを行い、他のパラメータが真値に近づいた時点で、 $\alpha$ 、 $\beta$ の探索も併用するようになった。これは撮影画像から抽出したオブジェクト座標系原点の画像面座標に誤差が含まれる場合、それより求める $\alpha$ 、 $\beta$ にも誤差が混入するためである。このような探索後半段階における $\alpha$ 、 $\beta$ 探索の併用は探索精度の向上とロバスト化に寄与している。

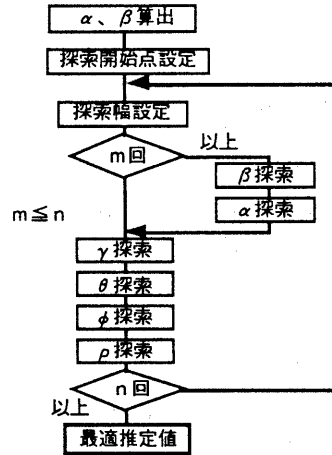


図10 実際の探索方法

### 3.4 誤差シミュレーション

空間量子化法、巡回パラメータ独立探索法を用いて、対象物の位置姿勢認識のシミュレーションを行った。対象物は直接計算法と同様に図2とし、対象物原点は特徴点No.2とした（4点の交点として求める場合、実画像では4点すべてを正確に抽出するのが難しいため、原点を1点より求めている）。シミュレーション条件はロボットの停止精度を位置 $\pm 10\text{mm}$ 、角度 $\pm 2^\circ$ とし（図5参照）、図11のように $\pm 10\text{mm}$ ずれてさらに $\pm 2^\circ$ 回転したNo.1～8の状態と定位置No.9の9つの場合について行った。特徴点の抽出誤差に対する認識精

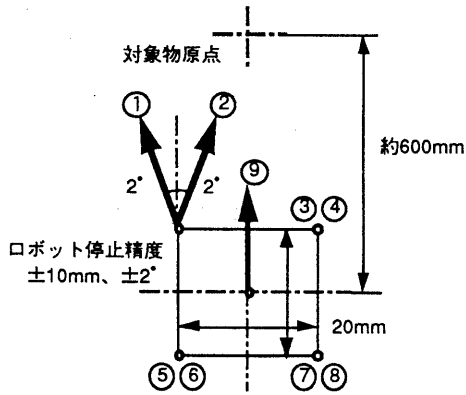


図11 シミュレーション条件

度の評価尺度として各特徴点が1ピクセルずれたときの最大誤差を求めた。図12に直接計算法との比較を示す(直接計算法は光軸ずれ補正を施したと想定した場合の結果である)。直接計算法に比べ、位置誤差がかなり小さい値に抑えられており、空間量子化法によりロバストな位置姿勢計算が可能であることがわかる。図13に評価関数の値(距離ずれの2乗和)と探索回数を示す。探索はすべて250回以内で終了している。図14に各特徴点ずれによる影響を示す(No.0は原点)。これにより、原点および外周の孤立点No.13の影響が大きいがわかる。従って、誤差を少なくするためにはこれらの点を正確な抽出が必要となる。

図15に特徴点の数の影響を調べた。特徴点ずれの影響が大きいNo.13を除いた12点と今までの13点について比較した。特徴点が1点でも少なくなると誤差が倍以上になる状態があることがわかる。ロバスト化のためには特徴点数を増やさなければならぬことがわかる。

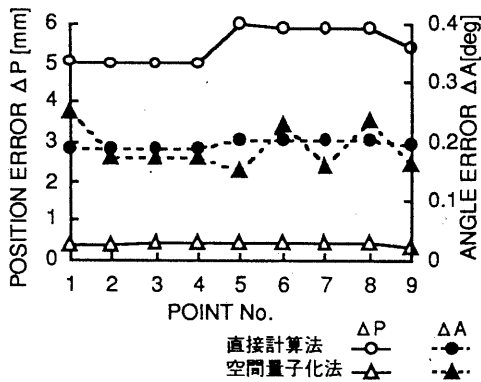


図12 空間量子化法と直接計算法の比較

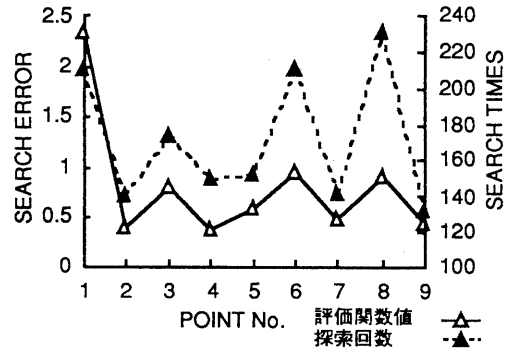


図13 評価関数値と探索回数

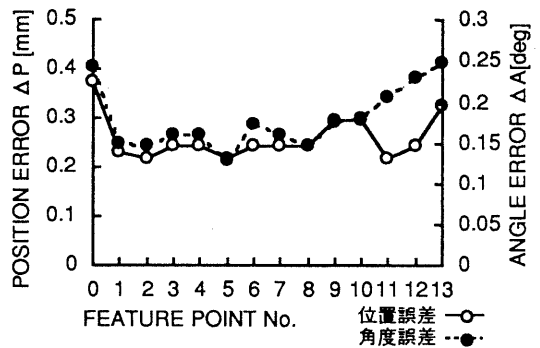


図14 各特徴点ずれの影響

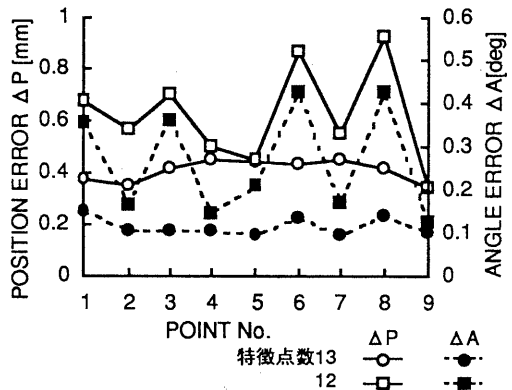


図15 特徴点数と誤差の関係

#### 4 実機システムによる実験

##### 4.1 ハードウェア構成

今回、対象物把持実験に用いた位置姿勢認識部

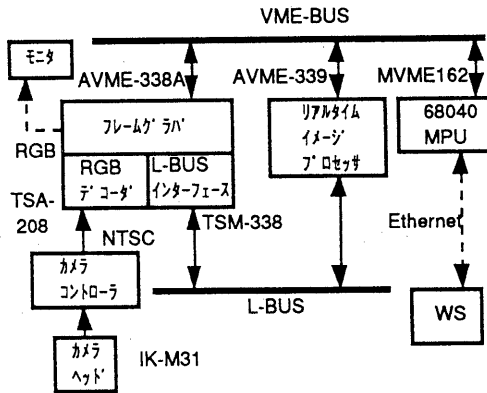


図16 ハードウェア構成

のハードウェア構成を図16に示す。システムはVMEボードで構成されており、CPUはモトローラ社のMVME162、OSはVx-Worksである。画像フレームグラバ、高速画像処理プロセッサはアパールデータ社のAVME-338A、339を用いている。カメラは東芝社の小型カラーCCDカメラIK-M31を用いている。

#### 4.2 特徴点抽出

図17に特徴点抽出のための画像処理アルゴリズムを示す。まず、対象物の色認識を行い、ラフ認識のしきい値を決定する。縮小画像のラフ認識により対象物のラフな位置と傾きを検出する。それをもとに等倍画像により対象物を抽出する。このとき、対象物の光のあたり具合により対象物を領域分割し（ラフ認識結果より分割する領域も変化させている）、各領域のしきい値を変化させている。

対象物認識後は輪郭追跡を行い、角度変化により特徴点を抽出している。ここで、対象物の見え方はロボットの停止精度より、図18のように限定でき、特徴点の抽出および抽出特徴点と3次元特徴点の対応が容易に行うことできる。

#### 4.3 対象物把持実験

図19に実際に処理した画像処理、特徴点抽出、位置姿勢探索結果を示す。また、図20にそのときの対象物把持の様子を示す。これは、定常位置から対象物がずれている状態であり、この場合でも正確に対象物の位置姿勢を認識し、対象物の把持が可能である。

実機システムではロバスト性をさらに向上させるために、探索時の誤差評価関数において線分誤

差と特徴点間距離を併用している。探索回数はロボット停止精度範囲ではほぼ300回以内であり、処理時間は3秒以内である。

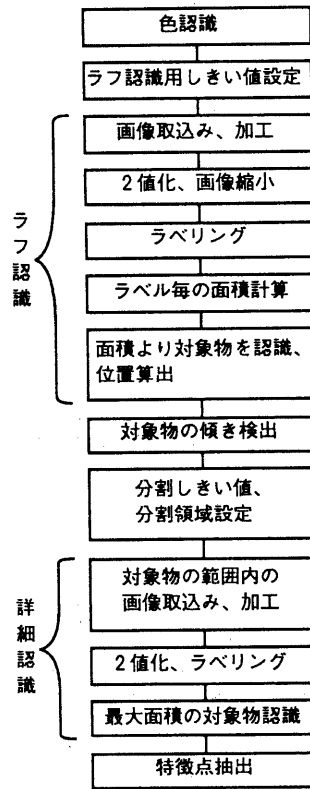


図17 特徴点抽出

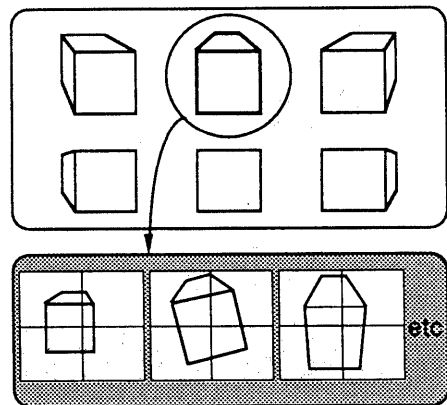


図18 対象物の見え方限定

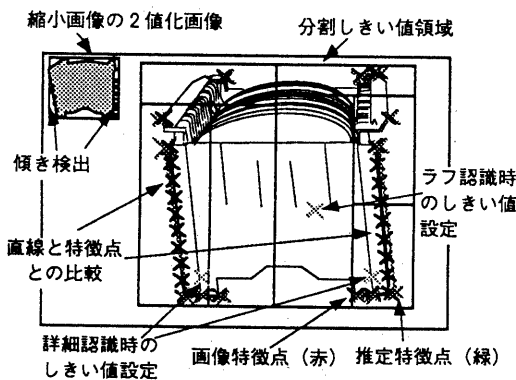
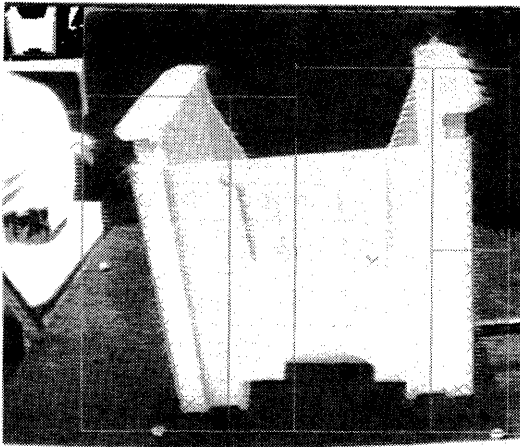


図19 画像処理例

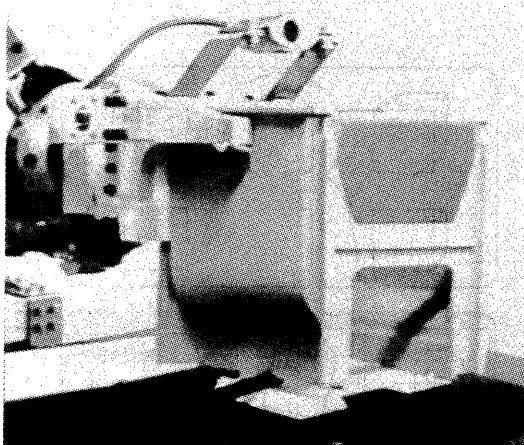


図20 対象物把持時実験例

## 5 考察、検討

直接計算法では特徴点ずれによる位置認識誤差が大きく自律移動ロボット用の視覚認識には適さない。一方、空間量子化法では位置認識に関してもロバストであり、また機械的な光軸ずれ補正を必要としないため自律移動ロボット用の視覚認識に有効である。

直接計算法、空間量子化法ともに対象物を直接認識する無マーカ方法では、対象物の正確な特徴点抽出が重要課題となる。位置姿勢認識精度を向上させるためには特徴点を精度良く抽出し、またロバスト化のためには数多くとる必要がある。また、今回はロボット停止精度の条件を用いて対象物の見え方を限定したが、あらゆる非定常状態に対応するためには様々な見え方に対する特徴点の抽出と統合的な評価演算が必要となる。これらについては今後の重要課題として対処していく。

## 6 最後に

本論文では自律移動ロボット用の視覚認識法として、直接計算法と空間量子化法について比較検討した。その結果、直接計算法に比べ空間量子法では位置認識に関してロバストであることがわかった。また、空間量子化法の探索方法として巡回パラメータ独立探索法を取り入れることにより、実用的な処理時間内に位置姿勢を探索できた。最後に、実機システムによる対象物把持を行い、本手法の有効性を示した。

## 参考文献

- [1] 出口：「画像と空間—コンピュータジョンの幾何学—」、昭晃堂出版、1991
- [2] 金谷：「画像理解 / 3次元認識の数理」森北出版、1990
- [3] 斉藤、笹木、金山、伊東：「ハンドアイ用位置姿勢認識の高速化とロバスト化」、情処研報、CV-85-5、1993-9
- [4] 笹木、金山、斉藤、伊東：「単眼視による視点の位置と姿勢の算出」、画像符号化シンポジウム、PCSJ 93、1993-10
- [5] 田畑：「ワーク位置検出方法」公開特許広報(A)平3-166072