

ハンドアイ用位置姿勢認識の高速化とロバスト化

斉藤英樹 笹木美樹男 金山幸礼 伊東正篤
日本電装基礎研究所

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、対象物から既知の位置に特定図形を設置するマーカ方式に焦点をあて、その高速化とロバスト化について報告する。まず、自律移動ロボットの動作環境について述べた後に、シンブルな幾何形状を用いたマーカ方式の原理とその性能を解説し、従来方式と比較する。次にマーカの大きさ、形状、カメラ位置、測定精度等の影響を仮想FAルームと呼ぶグラフィクス環境でシミュレーションした結果を示す。最後に実機による検証結果を示す。

A Fast and Robust Localization for a Hand-Eye System

Hideki SAITO Mikio SASAKI
Yukihiko KANAYAMA Seitoku ITO

Research Laboratories
NIPPONDENSO CO., LTD.

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

This paper focuses on the marker recognition method to estimate accurately the 3-D position and the 3-D attitude of the handling object for the autonomous mobile robot. Especially we will present a fast and robust localization for the hand-eye of the robot.

Firstly, the robot environment is explained. Secondly, we will describe the principle and the performance of the marker recognition methods in which simple 2-D geometrically shaped markers are used, and will compare those with the conventional methods. The computational effects of the size and the shapes of the markers, camera position and measurement accuracy are wholly simulated in the graphics environment "virtual FA room". Finally the experimented results using the VME based image processing hardware and the real manipulator are shown to verify the performance of the presented algorithm.

1 はじめに

近年、形状及び絶対座標位置が既知である対象物体に対してアプローチし、把持や解放などの能動的操作が行なえ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、画像処理対象からの特徴点抽出や形状パラメータ計算などに基づき、単眼視カメラ座標系からの画像処理対象の3次元相対位置と姿勢を算出することが最終目標となる。

このための比較的簡単な従来手法として、対象装置に固定された既知の特殊な幾何形状（マークと呼ぶ）の画像処理（重心算出等）によりカメラと対象物体の相対座標を計算する手法等[1,2]が提案されている。ただし、これらは大半がカメラの光軸がマーク面に対して垂直である場合を想定しており、任意の姿勢のカメラに対しては適用が困難である。また、これはロボットアームにカメラを取付ける際のカメラ位置やカメラの軌道の取り方に対して制約を加えることになる。その他、マークを一切用いない手法（無マーク手法）として透視n点問題による方法[3]や空間量子化法[4]があるが、実際の動作環境によっては、対象物の特徴量を抽出する際の前処理が複雑になる恐れがある。

そこで、本稿では、自律移動ロボットが対象物の位置姿勢を高精度に認識するための計算手法としてマーク方式に焦点をあて、その高速化とロバスト化について報告する。まず、視覚認識装置の位置づけを示し、次にシンプルな幾何形状を用いたマーク方式の原理とその性能を解説し従来方式と比較する。そして、それらを仮想FAルームと呼ぶグラフィックス環境でのシミュレーション実験と実機VMEシステムによる検証実験による認識精度評価結果を示す。

2 視覚認識装置を開発するに当たって

2.1 動作環境の限定

今回、我々がターゲットとした自律移動ロボットは、図1のように水平な床をある経路にそって移動するタイプであり、その停止位置において対象物位置の概略は動作計画等から既知であるとする。

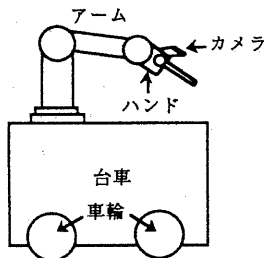


図1 自律移動ロボット

2.2 把持位置姿勢の計算

ロボットが対象物を把持する際には、図2に示すような座標変換計算を行い把持位置姿勢を決定する。

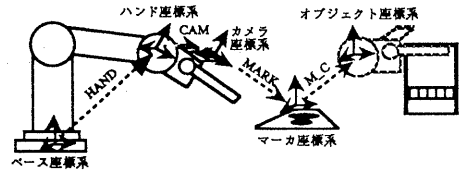


図2 把持位置姿勢計算

$$\text{OBJ} = \text{HAND} \cdot \text{CAM} \cdot \text{MARK} \cdot \text{M_C} \quad <1>$$

(OBJは求めるべき位置姿勢行列であり、HAND, CAM, MARK, M_Cはそれぞれ各座標系間の変換行列を示す。)

HAND, CAMは既知であり、M_Cはティーチング作業により予め教示してある。視覚認識により精度よくMARKを求める。

2.3 仮想FAルーム

視覚認識の性能は実際の動作環境における対象物の配置やカメラ取付け位置等に影響される。一方、カメラ取付け位置は視野や動作軌道の取り方、障害物の有無などに依存し、ハンドアイ（ハンドに取り付けたカメラ）においてはハンドそのものや把持している物体が視野に入らないように考慮せねばならない。視覚認識アルゴリズムの開発に当たりこれらの諸条件の影響を設計前段階で確認するため、我々は仮想FAルームと呼ぶグラフィックス環境を構築しシミュレーションを行なった。その例として、図3(a)にロボットハンドが対象物を把持する場面、図3(b)にその時のハンドアイの視野を、それぞれ示す。これにより、軌道の取り方、マークの設置位置と大きさ、マーク図形とアルゴリズム性能（高速性、認識精度、ロバスト性等）の関係、撮像予定位置等を実機実験以前にある程度評価することができた。

2.4 カメラ軌道の決定

カメラ軌道はマニピュレータの動作計画に依存するが、本稿では基本的にはロボットが動作環境の真正面に停止し、ハンドが可動範囲内で自由に位置姿勢をとることを前提としている。撮影距離は動作環境の制約から物理的に実現可能なマークの大きさに対応して、撮像範囲に十分大きく写り、かつロボット停止精度の範囲で撮像点が揺動してもマーク全体が画面内に収まる事を条件として200 [mm]に決定した。また、撮影角度は、最終的には後述の誤差評価実験の結果から決定される。

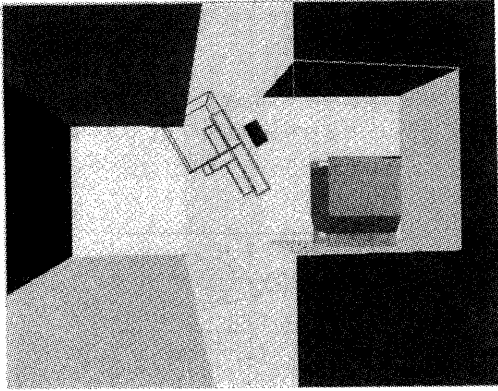


図3(a) 把持動作シミュレーション

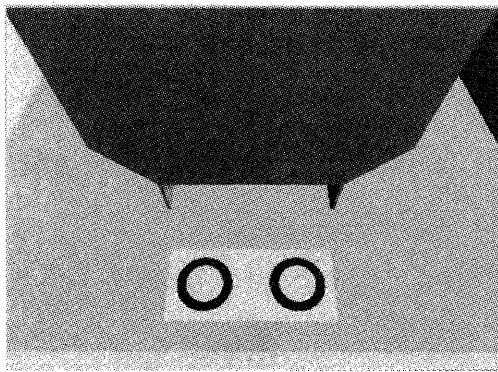


図3(b) ハンドアイの映像シミュレーション

2.5 計算量の制約

本研究では、後述するような市販のVME規格のMPUボードと画像処理ボード2枚を組み合わせたシステムを用いたが、その際に動作上の時間遅れを感じさせない程度（最大3秒）の演算量に収める事を目標としてアルゴリズム開発を行なった。

3 円図形マーカによる位置姿勢認識

ここでは、大小2個の円図形を横向きに配置したマーカ（図4）を用いる事により、斜方向からの撮像結果の簡単な2値画像処理によって、高速かつ高精度で観測誤差に対してロバストな位置姿勢認識を行なう方法（以下、疑似楕円法と呼ぶ。）を提案する。

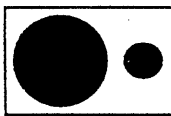


図4 円図形マーカ

3.1 概略

このマーカを斜め方向から撮影した画像に2値化処理を施すことにより大円部分の切り出しを行い、そのエッジ上の点を数点抽出する。取り出された点から大円部分を最小2乗法により楕円近似し[4]、更に小円部分の重心位置とから以下に示す様な位置姿勢計算を行い、マーカ位置姿勢を決定する。この時照明条件によってはマーカの材質に起因する光の反射が、二値化処理に悪影響を及ぼす。これは画像処理で解決する事も可能だが、演算量の制約があるため、今回はマーカの材質を反射しない物に変える事で解決した。

3.2 位置姿勢計算

本方法の位置姿勢計算はカメラ光軸が大円の中心に一致する事を前提とする。円を斜め方向から見た図形の重心が円の中心にほぼ等しいと仮定した上で大円部分の重心点がカメラ光軸から大きくずれた場合には後に示すような中心位置補正処理を施した後、位置姿勢計算を行うものとする。

まず、図5のように、画面中心と大円部の中心がほぼ一致するようにマーカが取り込まれたことを確認した後、上記の方法で楕円パラメータ a （楕円の長軸）、 b （楕円の短軸）、 α （楕円の傾き）を求める。さらに、小円部分の重心計算結果から角度 β を求める。ここで、 a がほぼ大円の直径に等しいと仮定し、直径の実寸とカメラの画角を既知として、大円の中心点からカメラまでの距離 d を次式から求める。

$$d = \frac{D \omega}{2 p \tan (A/2)} \quad <2>$$

ただし、 D ：マーカ大円部の直径、 p ： a のピクセル長、 ω ：取り込み画像の縦（横）ピクセル長、 A ：カメラの縦（横）画角である。

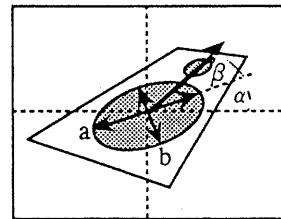


図5 撮影されたマーカ画像

図6の関係から、この a 、 b 、 d を用いカメラの視線方向とマーカ面のなす角 θ を式<3>から算出する。

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{2 d^2 - \sqrt{4 d^4 - 4 d^2 b^2 + a^2 b^2}}{a b} \right)$$

<3>

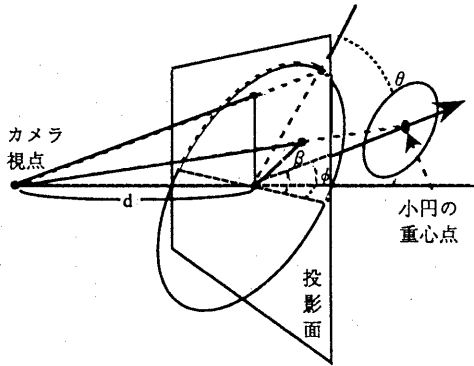


図6 視点、投影面、マーカーの位置関係

次に、 θ 、 β から長軸と小円の中心点の成す実角度 ϕ を次式から計算する。

$$\tan \phi = \tan \beta / \sin \theta \quad <4>$$

以上より求めた d 、 α 、 θ 、 ϕ から、カメラ座標系から見たマーカーの位置姿勢を表す齊次座標系表現の座標変換行列MARKは、

$$\text{MARK} = \text{TRS}(0, d, 0) \cdot \text{ROT}(y, \alpha) \cdot \text{ROT}(x, \theta) \cdot \text{ROT}(z, \phi) \quad <5>$$

で表せる。ここで、TRS、ROTは齊次座標系の座標変換行列であり、式<6~9>のように表現される。

$$\text{TRS}(0, d, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad <6>$$

$$\text{ROT}(y, \alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad <7>$$

$$\text{ROT}(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad <8>$$

$$\text{ROT}(z, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad <9>$$

3.4 中心位置補正

撮影画像が図8(a)のような場合、中心位置補正を

行い、大円部分の重心点が画像のほぼ中央に来るようにしなければならない。視点とマーカーの投影写像間の3次元的位置関係は図8(b)のようになる。このときの大円部分の中心点のピクセル座標を (px, py) とすると、補正角度 $D1$ 、 $D2$ は縦横の画角 $G1$ 、 $G2$ 、縦横のピクセル長 PV 、 PH から、式<10>、<11>によって求められる。

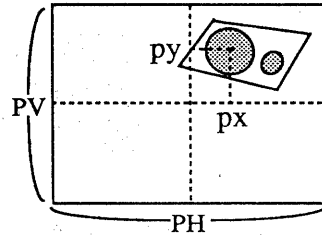


図8(a) 撮影結果

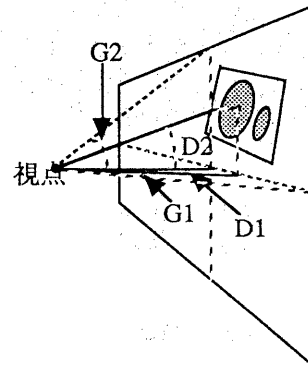


図8(b) 視点と写像の位置関係

$$\tan D1 = \frac{2 px \tan G1}{PH} \quad <10>$$

$$\tan D2 = \frac{2 py \tan G2}{PV} \quad <11>$$

この結果から、カメラ光軸を大円部中心に移動するための変換行列 $T_{o/p}$ は次式のようになる。

$$T_{o/p} = \begin{bmatrix} \frac{1 + \tan^2 D1}{AB} & \frac{\tan D1}{A} & 0 & 0 \\ -\frac{\tan D1}{AB} & \frac{1}{A} & -\frac{\tan D2}{B} & 0 \\ -\frac{\tan D1 \tan D2}{AB} & \frac{\tan D2}{A} & \frac{1}{B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ただし、 $A = \sqrt{1 + \tan^2 D1 + \tan^2 D2}$
 $B = \sqrt{1 + \tan^2 D2}$

式<12>

これをアーム制御部が受け取り、カメラの視点位置を変えないように姿勢を補正する(図9)ことにより、中心位置補正は完了する。しかしながら、このプロセスは全体の演算量や、通信及び機械制御におけるオーバーヘッドの増大から、処理時間が数秒増大するという欠点がある。

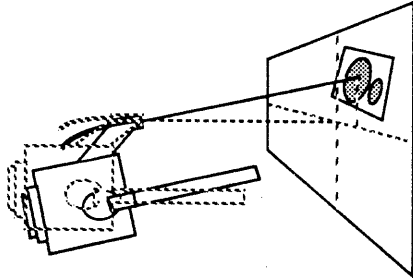


図9 中心位置補正

3.5 認識誤差の評価実験

図10に撮影距離を200[mm]に固定した場合の仮想FAルームによるシミュレーション画像と実画像における、撮影角度(カメラ光軸とマーカ面の成す角度)とその時の位置姿勢認識誤差の比較を示す。ここで、マーカ大円の直径は50[mm]であり、実画像に対してはアスペクト比のひずみ(水平1:垂直1.035)の補正を施した。(システム構成は図2.2)

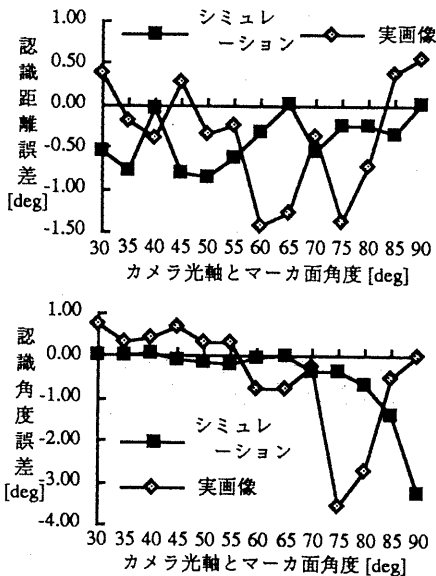


図10 認識角度誤差比較

撮影角度が大きくなるにつれ、認識角度誤差がシミュレーション、実画像ともに大きくなっている。これは式

$\langle 3 \rangle$ より、 b が a に近づく程その認識誤差が認識角度に於いて大きな誤差となって現われるからである。シミュレーション上での誤差の理由として、マーカ検出の際のデジタル化誤差、楕円近似による誤差が考えられる。実画像では更にマーカエッジ部のぼけやカメラ特性に起因する画像の非線形歪などによる誤差が加わっていると考えられる。

4 平行線図形を用いたマーカ

上述の機械的中心位置補正の時間的オーバーヘッドを除去するために、コンピュータビジョンでも従来より用いられている、平行線の消失点を利用したカメラキャリブレーション計算[7,8]を位置姿勢認識手法として導入し(以下、消失点法と呼ぶ)、高精度化とロバスト化のための改良を行なった。

4.1 平行線を表現するマーカ図形の設定

n 本の平行線をロバストに抽出できる二次元図形を描いたマーカを用い、このマーカを斜方向から単眼視カメラで撮像し、画像処理と図形認識計算から平行線の消失点を求める。これにより、単眼視カメラの光軸とマーカの座標原点との間に何ら制約を加えることなく、マーカの三次元位置・姿勢を計算する。本稿では、同一平面内で互いに直交する平行線群を高精度に表現し、かつマーカサイズを有効に利用した図形の一つとして図11を選んだ。

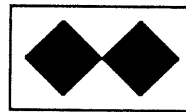


図11 平行線マーカ

4.2 直線の検出

図11のマーカに含まれる計6本の直線(図12)を検出する。本方法では、基本的には撮像結果の視野内にマーカ図形の全体が十分な大きさで入っていると仮定する。

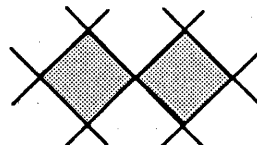


図12 平行線マーカ

以下、順を追って直線検出について説明する。

(1) 画像処理によるサンプル点の抽出

マーカを撮影した画像から、濃度変化あるいは色変化の検出により各エッジのサンプル点を図13のようにし

て取り出す。サンプル間隔は計算時間の許す範囲で小さく取る。また、マーカの大きさも所定の範囲の撮像位置にて全体が視野に十分入る範囲で大きくする。さらに、斜方向から撮影したときにカメラから遠方にあるエッジの解像度を補償する必要がある場合は、図14のような図形を用いる。



図13 サンプル点抽出



図14 変形マーカ

(2) サンプル点の振り分け

抽出したサンプル点がどの直線の点であるかを決定し、振り分ける。

(3) 直線あてはめ

投影面における直線の一般式を次式のヘッセの標準形で表現する[7,8]。

$$x \cos \theta_i + y \sin \theta_i = h_i \quad (i=1, \dots, NL) \quad <12>$$

ここで、NLは検出する直線の数であり、図12の場合NL=6である。この方程式に(1)で抽出したNs(i)個のサンプル点の2次元座標を適用し、最小二乗推定により直線パラメータ(θ_i, h_i)を決定する[7]。ここで、カメラのフォーカスがマーカに対して微妙にずれた時を想定して、図15のようにマーカ上で1つの直線に対して2つ以上の直線を検出した場合、それから中線を取るなどの平均化処理を施し、一意的に直線パラメータを決定する。

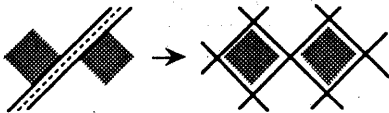


図15 フォーカスはけへの対処

4.3 位置姿勢計算

(1) 消失点の計算[7,8]

異なる同一平面上の平行線群を斜方向から撮像すると投影面上の一点(消失点)で交わり、カメラ視点から投影面上の消失点へ向かうベクトルはその直線の3次元方向を示すという幾何学的性質を利用して位置姿勢を決定する。式<12>で表わした直線と視点を含む平面の単位法線ベクトルn_iは次式で表わされる。

$$n_i = \pm N \begin{pmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \\ -h_i / f \end{pmatrix} \quad <13>$$

(fはカメラの焦点距離)
(N[a] = a/|a| はベクトルの正規化)

3本の直線の交点は、次に示すモーメント行列Mの最小固有値に対する単位固有ベクトルとして計算する。[7,8]。

$$M = \sum_{i=1}^3 n_i n_i^T \quad <14>$$

この様にして求められる消失点ベクトルはこの場合2つ存在し、それぞれをm₁、m₂とする。図16に示すようにマーカ座標系をとった時、m₁、m₂はx軸、y軸の方向ベクトルとなる。z軸の方向ベクトルm₃はその外積となる。

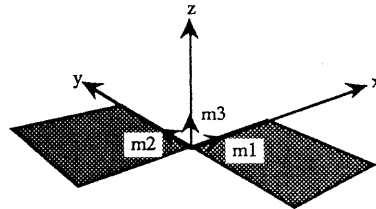


図16 マーカ座標系

焦点距離fはカメラの公称値であり、m₁とm₂の内積が0でない場合には、式<15>より0になるように焦点距離を求め直す。

$$F = f \sqrt{\frac{m_{1x} m_{2x} + m_{1y} m_{2y}}{m_{1z} m_{2z}}} \quad <15>$$

ただし、 $m_1 = (m_{1x}, m_{1y}, m_{1z})$
 $m_2 = (m_{2x}, m_{2y}, m_{2z})$

得られた真の焦点距離Fからもう1度消失点ベクトルm₁、m₂とm₃を再計算する。

また、消失点を求めるもう1つの方法として、図17のように透視変換における複比不変の法則[3]を利用して、式<16>から算出する方法も試みた。シミュレーション実験では良い結果が得られたが、実画像ではクリアなエッジ検出が要求される。

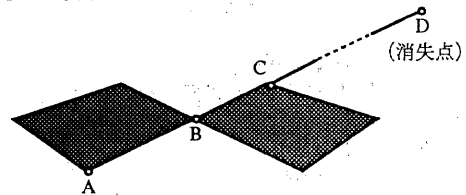


図17 マーカ節点と消失点

$$AD = \frac{AB}{1 - (2 BC / AC)} \quad \text{式}<16>$$

(2) マーカの原点位置の計算

マーカの6直線には9つの交点がある。視点からこれらの各点P_i(i=0,1,2,...,8)への単位ベクトルmp_i(i=0はマーカ原点)は、

$$mp_i = N[n_a \times n_b] \quad \text{式<17>}$$

(a, b は P_i を作る 2 直線)

で求められ、視点とマーカー原点間の距離 r_0 は次式で表わされる。

$$r_0 = \frac{(mp_i, m3) \overline{P_0 P_i}}{|(mp_0, m3) mp_i - (mp_i, m3) mp_0|} \quad \text{式<18>}$$

($i = 1, 2, \dots, 8$)

今回は i を 1~8 までについて全て求め、それらを平均して r_0 を決定した。結局、原点位置は $r_0 mp_0$ として算出される。

4.4 認識誤差の評価実験

(1) シミュレーションによる認識精度評価

シミュレーション上で図 18 に示すような撮影位置からの認識精度評価実験を行った。

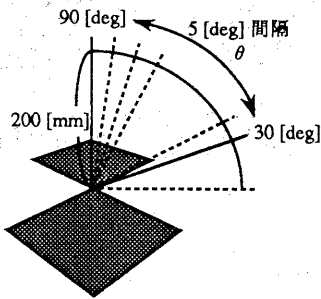


図 18 シミュレーション実験撮影位置

認識精度評価は、視点からマーカー原点までの距離 (200 [mm]) 及びマーカー姿勢の真値との誤差で評価した。(図 19) このときマーカーの 1 辺は 40 [mm]、マーカーエッジ検出の際の走査間隔は 3 pixel でサンプル点数 N は 90~170 である (システム構成は図 21)。

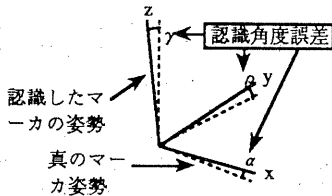


図 19 認識角度誤差の定義

図 20 に評価結果を示す。

(2) 撮影位置の決定

シミュレーション認識精度評価実験結果から、最も認識精度が良好な 70 [deg] に撮影位置を決定した。

(3) 実画像による認識精度評価

シミュレーション実験により決定した撮影位置において、マーカー中心点を画像の中心点から図 21 に示すように平行移動させた場合の認識精度評価を行った。これはロボットの停止位置がその精度範囲内でずれたことを想定した実験である。

この結果、位置認識誤差が最大 1.5 [mm]、姿勢認識誤差が最大 1.0 [degree] となり、シミュレーション結果よりも大きく劣っていることがわかった。これはマーカーを画像の端に捕えた際に、撮影画像の歪が認識精度に悪影響を与えているためと思われる [9]。

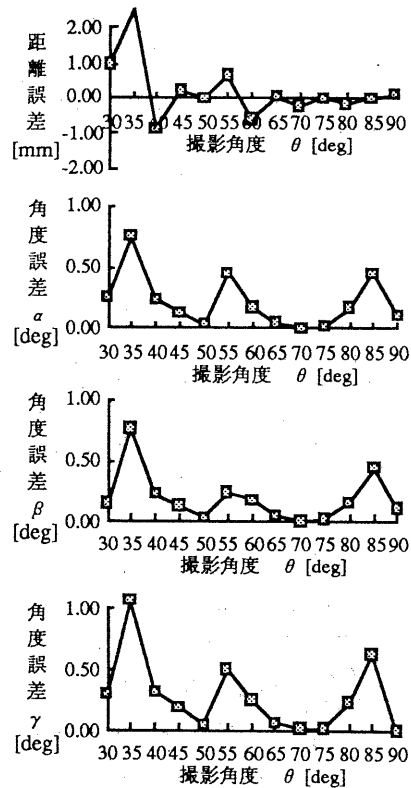


図 20 シミュレーションによる認識誤差評価

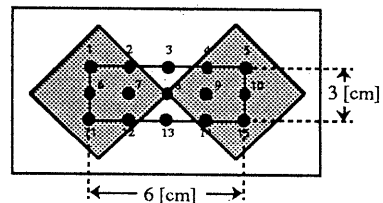


図 21 中心位置ずれ実験

5 考察

位置姿勢認識処理時間は、疑似楕円法で6秒、消失点法で4秒であった。この時間差の最大原因は前者の中心位置補正にある。また、認識信頼性に於いては、画像歪補正を高精度に行う事が消失点法の最大の課題である。

6 終わりに

本論文では、自律移動ロボット用視覚認識方式としてマーカー方式を取り上げ、2つのアプローチを比較検討した。マーカー形状の融通性、画像処理及び計算の単純さからすれば疑似楕円法が有利であるが、認識処理時間やロボットアームの絶対位置精度問題などを考慮すれば、中心位置補正を施さない消失点法がより実用性に富んでいる。消失点法の最大の問題である画像歪に関しては現在その対策法を検討中である。

付録1 実機VMEシステムの構成

図22に本実験で用いたVMEボードによる視覚認識装置の構成を示す。MC68030(25MHz)をMPUモジュールとして、AVAL DATA社のフレームグラバ(AVME-338)及び高速画像処理プロセッサ(AVME-339)の合計3枚を一組として構成した。

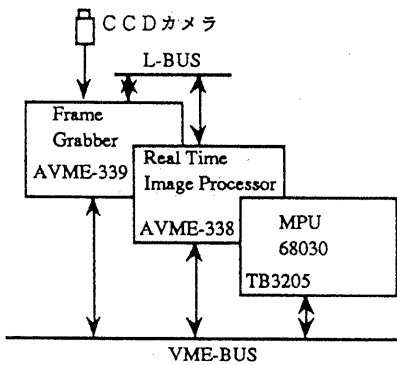


図22 システム構成図

付録2 実機VMEによる実画像実験

上記の構成で、実画像に対する疑似楕円法及び消失点法に於ける画像処理結果の1例を図23及び図24に示す。

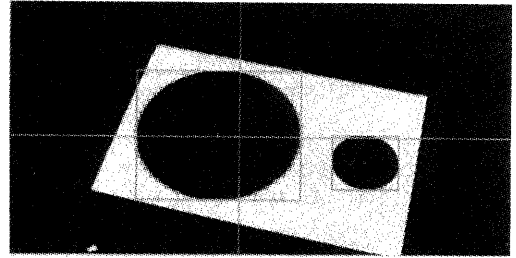


図23 疑似楕円法

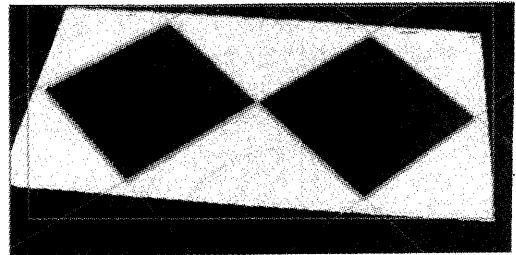


図24 消失点法

参考文献

- [1] 田畑秀光：ワーク位置検出方法、公開特許公報(A)平3-166072
- [2] 田畑秀光：ワーク位置検出方法、公開特許公報(A)平3-166073
- [3] 出口光一郎：画像と空間-コンピュータビジョンの幾何学-、昭晃堂出版、1991
- [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PCSJ93、1993-10(予定)
- [5] 滝山、小野：デジタル点群の2次曲線による近似について、電子情報通信学会技術研究報告(画像工学) IE88-108 p.9~16
- [6] 渡辺孝志、高橋渉：最小2乗法による重なり合う円状パターンの分離計測、電子情報通信学会論文誌 Vol. J70-D, No. 6 (1987-06)
- [7] 小野寺康浩、金谷健一：計算射影幾何学によるカメラキャリブレーション、情報処理学会研究報告 68-CV-1 (1990-09)
- [8] 金谷健一：「画像理解/3次元認識の数理」森北出版、1990
- [9] 高橋裕信、富田文明：ロボットビジョンのためのカメラキャリブレーション、日本ロボット学会誌 Vol. 10, No. 2, 1992