

# パソコン画像処理装置のロボット用視覚センサへの応用 (円柱対象物の場合)

松井稜治\*・落合 積\*・山根彌生\*  
石松隆和\*\*

## An Application of Personal Image-processing System to a Visual Sensor for a Robot Arm Grasping a Cylindrical Object.

Ryoji MATSUI, Tsumoru OCHIAI, Yayoi YAMANE  
Takakazu ISHIMATSU

### Abstract

Using a image-processing system connected to personal computer, we show a sequence processing the pictures from 2 television-cameras attached to a robot arm. Basic image processing (sampling, copying, detecting edge, adding pictures, conversion to binary data and transforming to single-dot width) are done by the image processing system and later processes (line detect and calculation for position detect and cylinder size) are done on a personal computer using some softwares programmed by ourselves. For that purpose, we studied some properties of perspective transformation for cylindrical objects. We propose a method to detect the position and size of cylindrical objects using the process and show the results of experiments in this report.

### 1. まえがき

最近、パソコン用の画像処理装置やシステムが多く市販され、広い分野で手軽に利用されるようになった。そのような市販の画像処理装置を利用して、どの程度の精度で対象物の位置や大きさを検出できるかについて調べることは実用上重要であると考えわれわれは円柱対象物を把握する場合について位置、大きさ検出のための手法の開発および実験を試みることにした。

ここではパソコン用画像処理装置 (PIAS LA-500 白黒512×512ドット) を利用して、2台のテレビカメラからの画像データより垂直方向のエッジの検出を行い、三角測量の原理により垂直方向エッジのみによる直立円柱対象物の位置および対象物の大きさの検出精度を調べ、

さらに、その結果や水平方向エッジおよび透視変換を利用することにより円柱の高さの検出値の修正手法の開発を試みた。その実験結果について報告する。

### 2. システム構成および画像処理手順

2台のCCDテレビカメラ(オリンパスFCD-10, 固定焦点レンズ8.5mmf)をマイクロロボットアーム(三菱電機ムーブマスタII)の腰部の左右に対称に取り付け、ロボットアームとともに回転できる構造としておく(ロボットアームと2台のカメラの中心線は常に同一方向を向くことになる)。システム構成を図1に示す。

ここでは、直立する円柱の位置あるいは大きさを求めるにあたってまず垂直方向のエッジを利用する。エッジ検出は以下の手順で行う<sup>3)</sup>。

- ①画像サンプリング (左右2画像)
- ②マスク処理を利用して左右両画像について垂直方向のエッジのみを検出

\*宇部工業高等専門学校制御情報工学科

\*\*長崎大学工学部

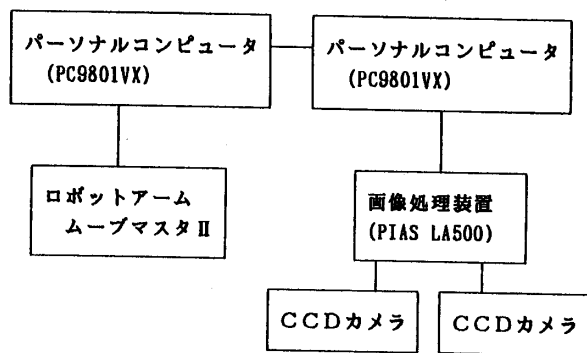


図1 システム構成図

画像サンプリング

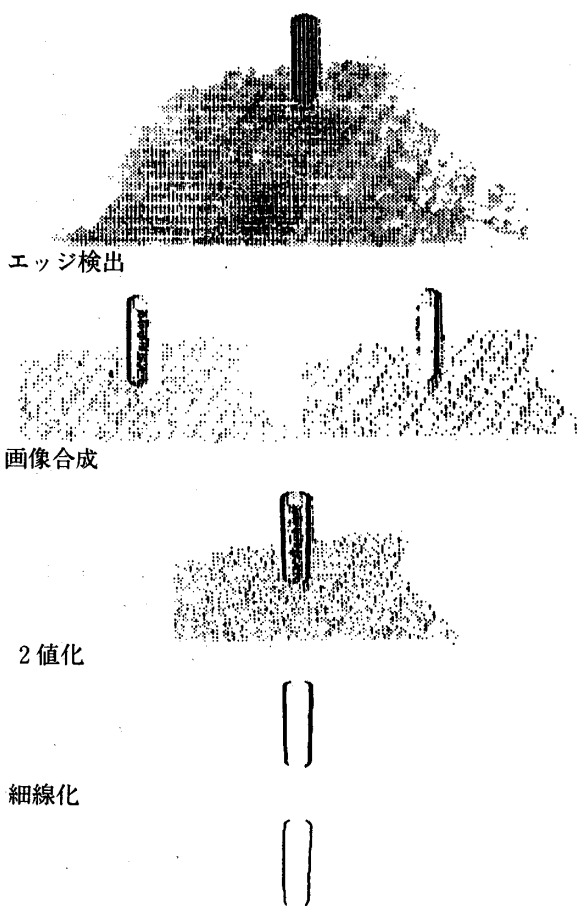


図2 画像処理例

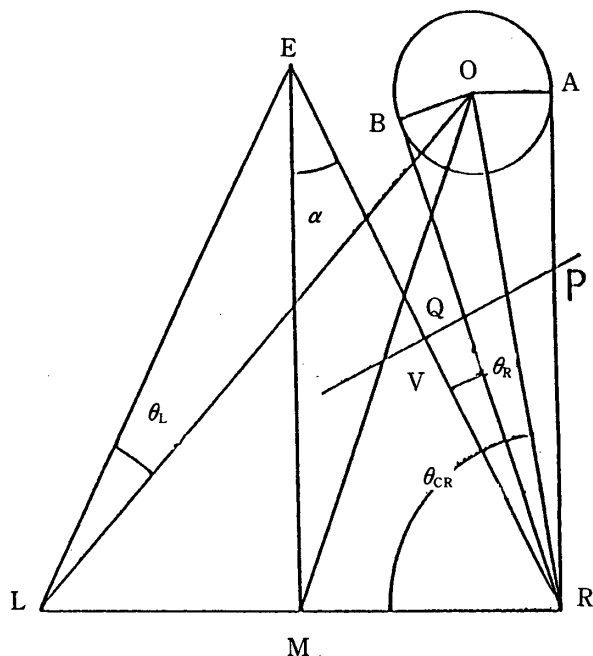


図3 位置検出原理図

③画像の2値化, 細線化

③までの処理は画像処理装置を利用する。③までの画像処理の一例を図2. に示す。

三角測量の原理を利用して対象物の位置を求めるにはエッジの画面内での位置を数量化して検出しなければならないので、

④ハフ変換を利用して1), エッジの画面内位置を求める。すなわち, 直線を表す式として

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \tag{2-1}$$

を用いれば, パラメータ  $\rho, \theta$  により直線は決定される。ここでは  $\theta$  を0.02キザミで変化させて, ある  $\rho$  (小数点以下を4捨5入することにより1キザミ),  $\theta$  にたいして, その上にある点の数をカウントして多いもの2つを円柱のエッジとした。もちろん2本のエッジはある程度離れているものと仮定して近傍のものは同一のエッジを重複してカウントしているものとしてある範囲の中でカウントの最大のものを採用し, 他のは排除している。

**3. 両眼立体視を利用した円柱対象物の位置 (距離, 方向), 大きさの決定法**

計算を簡単にするためカメラはロボット中心軸より左右対称な位置に取り付け, それぞれの視線はアーム長手方向中心線上で一致するように, まず垂直軸まわりに  $\alpha$  だけ中心に向かって回転し, 予め決められた高さの点(視線一致点)に向くように  $\beta$  だけ下向きに回転させるものとする. このとき視線一致点を座標原点として, それぞれのカメラの焦点位置座標を右カメラ( $e_x, e_y, e_z$ ), 左カメラ( $e_x, -e_y, e_z$ )とすると

$$\alpha = \tan^{-1}(e_y / e_x) \tag{3-1}$$

$$\beta = \tan^{-1}(e_z / \sqrt{e_x^2 + e_y^2}) \tag{3-2}$$

となる.

**3.1 両眼立体視の原理による円柱の位置検出**

左右画面の各2本のエッジは対応点とはならないため, それぞれのエッジの平面位置を直接求めることはできないが, 平面上の投影における関係を利用して円柱中心軸の平面位置を求めることは容易である. 中心位置が求められれば, それを利用して半径や高さを求めることも可能となる.

円柱中心とカメラ焦点を結ぶ直線 (RO) は両エッジとカメラ焦点とを結ぶ直線 (RA, RB) の中心線となるので, それぞれのカメラにたいする円柱中心の方向は容易に求められ, それらの交点が円柱の中心軸の平面位置であることから円柱の位置を求めることができる (図3). なお各エッジとカメラ視線との角度は各エッジが画面の水平中心軸と交わる点の座標 ( $P_x, Q_x$ ) とカメラ・画面間平面距離 (RV) を利用して求めることができる. すなわち,  $d_v$  をカメラ・画面間距離とすると,

$$RV \text{ の長さ} = d_v \cos \beta$$

となり, たとえば,  $\angle VRP$  は

$$\tan^{-1}(P_x / d_v \cos \beta)$$

となる. なお,  $d_v$  は20mm 間隔の格子状の直線の書かれた平板を3ヶ所の異なる位置においたときの画像データより校正している.

右カメラ・円柱中心間距離  $d_r$  (RO) は

$$d_r = \frac{2 e_y \cos (\alpha + \theta_L)}{\sin (2 \alpha + \theta_L - \theta_R)} \tag{3-3}$$

ここで,  $e_y : RM = LM$

両カメラ中点に対する円柱中心の投影面上での位置 (距離  $d_0$ , 方向  $\theta_0$ ) は

$$d_0 = \sqrt{(e_y^2 + d_r^2 - 2 e_y d_r \cos \theta_{CR})} \tag{3-4}$$

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{e_y - d_r \cos \theta_{CR}}{d_0} \tag{3-5}$$

ここで, 投影図上での角  $\angle ORA$  を  $\theta_w$  とすると, 円柱半径  $Rc$  は

$$Rc = d_r \sin \theta_w \tag{3-6}$$

なお, ロボット中心軸とカメラ中点とは  $r_x$  だけずれているとすれば

$$d_x = d_0 \cos \theta_0 + r_x - e_x \tag{3-7}$$

$$d_y = d_0 \sin \theta_0 \tag{3-8}$$

とすると, ロボット中心との距離  $d$ , 方向  $\theta$  は

$$d = \sqrt{(d_x^2 + d_y^2)} \tag{3-9}$$

$$\theta = \tan^{-1} (d_y / d_x) \tag{3-10}$$

となる.

**3.2 円柱の高さ算出法 (概略値)**

カメラ視線を含む垂直面への各エッジの投影の長さは各エッジの画面内における垂直方向高さに相当することを利用して, 各エッジを表す直線に含まれるドット数をエッジの高さと仮定し幾何学的関係より円柱の高さを近似的に求めることができる. ただし, ここでは  $\rho$  の値はデジタル化されており, エッジ上の全ての点が  $\rho$  の上にあるとは限らないため  $\rho \pm 1$  にたいするドット数も加えている. 細線化によって, 同じ高さにおいてその周辺には

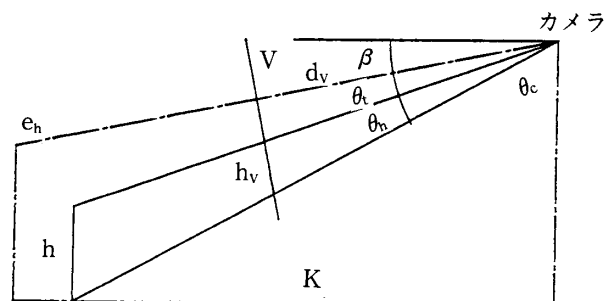


図4 高さ (概略) 検出原理

1点のみしかないと考えられるので、同じ高さにおいて重複して点がカウントされることはないをみなしてよい。したがってこの値は概略の値ではあるがほぼエッジの高さに相当しているものと仮定することができる。ここでは計算を簡略化するためにエッジの位置を円柱中心とし(各エッジの位置の概略の平均とみなす)、それぞれのエッジについて高さを求めそれらを平均したものを高さとしている。

図4はカメラ視線を含む垂直面への投影を示す。この図においてVは画面、hが対象となる垂直線の高さを示している。このとき、hは

$$h = \frac{K \sin(\theta_h)}{\cos(\theta_c) \cdot \cos(\beta + \theta_t)} \quad (3-11)$$

となる。

### 3.3 高さの修正法

3.2の高さを求めるにあたっては、エッジの平面位置を概略値によったことやこのエッジには上面、底面の円周部も一部含まれることなどのため求められる結果にはかなりの誤差が見込まれる。作業目的によってはこれで十分の場合もあるが、より高精度の値が要求される場合には、高さの修正を行う必要がある。

ここでは、前記の方法によって求められた値を初期値として、水平方向エッジと透視変換<sup>2)</sup>を利用した繰り返しにより値の修正を行う手法を提案する。上面円周部のカメラよりみて最遠方は対象画像の最上部に相当し、底面円周部のカメラに最も近い部分は画像最下部に相当するはずである。3.1によって円柱の中心位置および半径はある程度の精度で求められているので、底面円周部の3次元位置座標は容易に計算できる。したがって、その3次元座標を透視変換することにより画像最下部の座標値も計算できる。このとき、その計算値は実際の画像における値と一致するはずであるから、計算値との間に誤差があればそれはカメラの取り付け誤差などによるものとして、最上部の点についてはこの値を用いて座標値の修正を行う。なお、最上部、最下部の点を求めるにあたっては、これらは連続する線上の点であるため孤立点とはならないものとして、孤立点は対象から省いている。これによりノイズをある程度除去することができる。

上記のような前処理を行って得られた最上部の点のY座標値(修正された値)を $Q_y$ とする。一方、3.2.により得られた高さ $h_0$ と3.1.で得られた位置の値から上面の最

### 高さ簡易修正法概略

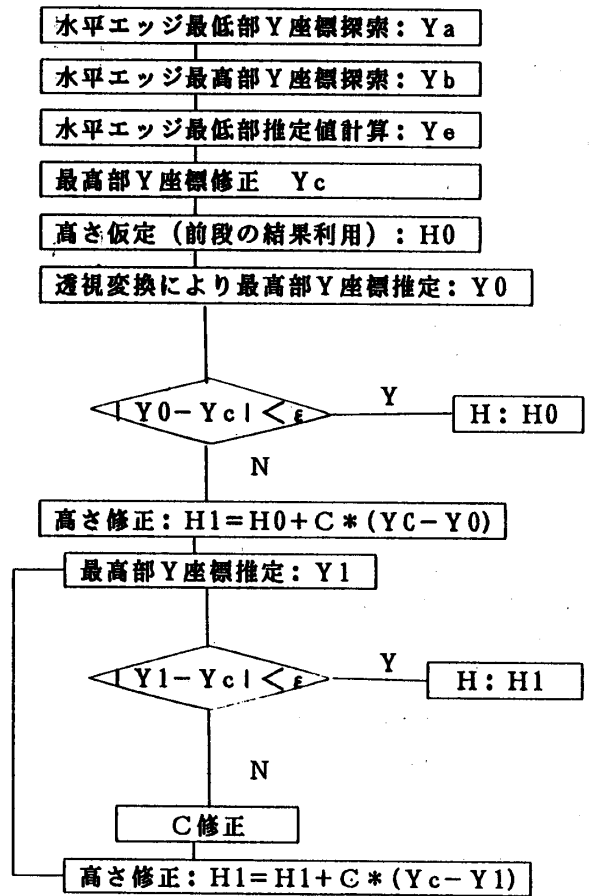


図5 高さ簡易修正法

表1 実験結果例

設定	方向	距離	半径	高さ	修正後
0°	0.2	557.1	15.9	159.7	148.4
5°	5.2	556.4	15.5	159.6	148.7
10°	10.2	559.6	15.7	160.5	148.0
15°	15.4	558.0	16.0	159.9	147.9
-5°	-4.9	559.9	15.6	161.8	149.0
-10°	-10.0	561.3	15.3	155.6	149.1
-15°	-15.0	559.9	15.7	158.7	148.7

対象物 高さ: 151mm 半径: 16.2mm  
中心位置 距離: 557mm

遠方部の3次元空間座標( $x_0, y_0, h_0$ )を仮定することができ、それを透視変換したときのY座標値を $Q_{y0}$ とする。このとき $Q_{y0}$ が $Q_y$ と一致していれば $h_0$ が求める高さとなり、そうでなければ、その差を利用して高さを修正する。その手順を以下に示す。

- 1)  $E_0 = Q_{y0} - Q_y$   
推定誤差とみなせる。
- 2) つぎに  
 $h_1 = h_0 - C \cdot E_0$  ( $C = 1$ としておく)
- 3) ( $x_0, y_0, h_0$ )の透視変換のY座標値を $Q_{y1}$ とし、  
 $E_1 = Q_{y1} - Q_y$   
とするとき、 $|E_1| < \epsilon$ ならば $h_1$ を推定値として終了、そうでなければ4)へ
- 4)  $C = (h_1 - h_0) / (E_0 - E_1)$   
 $h_2 = h_1 - C \cdot E_1$
- 5) 高さを $h_2$ として透視変換し、Y座標を $Q_{y2}$ とする。  
 $E_2 = Q_{y2} - Q_y$   
 $|E_2| < \epsilon$ なら $h_2$ を推定値、そうでなければ $h_0 \leftarrow h_1, h_1 \leftarrow h_2$ として4)へもどる。

高さ修正の流れ図を図5に示す。なお、5)のあとで $h_0, h_1, h_2$ を2次式近似して修正することもできる。  
なお、透視変換は文献2)の方法による。

#### 4. 実験結果および考察

画素数 $512 \times 480$ の画像処理装置、焦点距離8.5mmの固定焦点レンズ( $e_x, e_y, e_z : 528.6, 256.5, 491.6$ ),  $e_h = 175$  mm,  $r_x = 38, d_v = 650$ として、半径16.2mm、高さ151mmの円柱を距離557mmの点において実験を行ったところ、表1.のような結果が得られた。

方向検出誤差は最大0.4°、距離誤差は557mmにたいして最大4mm程度におさまった。また半径の検出誤差も1mm以内となったが高さの検出においては最大11mmの誤差がみられた。これは円周部の一部も直線部とみなしてしまうことや $\rho \pm 1$ と領域を広くとったことに起因するが、この程度の誤差でも円柱の中程を把握するのであれば把握可能である。なお、高さについては3.3.の円周部の3次元位置を利用する方法により最大誤差を3mm程度におさえることができた。把握の目的にたいしてはこの程度の精度であれば十分といえよう。これらの誤差は

- 1) カメラの取り付けや校正などカメラに起因するもの。

- 2) エッジ検出、2値化や細線化など画像処理に起因するもの。

- 3) 直線の検出、位置検出や大きさ検出における計算法に関するもの。

などに分けられる。まず、1)について考察してみよう。ここでは高さの検出に例をとってみる。いま、対象物が正面に表1.のようにおかれている場合、左右両カメラとも画像の最上部、最下部のY座標値は透視変換により

最上部 23.6 最下部 -75.8

と求められた。ところが実験においては

右カメラ 26 -71

左カメラ 28 -70

となった。いまここでカメラの視線が視線一致点で7mm下がったとすると

28.2 -71.2

6mm下がったとすると

27.5 -71.9

となり、それぞれ左カメラ、右カメラの場合と1、2ピクセルの違いはあるがほぼ一致する。すなわち、カメラの取り付け誤差の影響が表れているものと考えられることができるわけである。ただし、この場合、最上部、最下部とも同程度ずれており、したがって3.3.において前処理として最下部の実験値と計算値(透視変換)との違いだけ最上部のデータを修正しているので高さについては前処理の過程でカメラの取り付け誤差の影響はほとんど解消されている。ただし、この場合最上部、最下部の差についてはは理論値、実験値のあいだに厳密には1、2ピクセルの違いがありこれが高さの検出誤差となっている。ちなみに、1ピクセルの違いで約1.5mmの誤差に相当する。これらの誤差は2)の画像処理あるいは3)の計算過程における誤差と考えられる。

また、対象が正面にある( $0^\circ$ )場合 $\rho, \theta$ の値は

右カメラ画像 (34.7, 0.045), (9.7, 0.013)

左カメラ画像 (-34.7, -0.045), (-9.7, -0.013)

一方、表中の対応する実験では、それぞれ

右 (36, 0.04), (11, 0.00)

左 (-33, -0.02), (-9, -0.00)

となった。そこで表にあるように方向を0.2とすると理論値は

右 (36.1, 0.046), (11.1, 0.014)

左 (-33.3, -0.043), (-8.4, -0.011)

となった。すなわち、右カメラ画像ではこの値と一致し、左カメラ画像では、 $\rho$ の差が1程度小さくなっている。

これは直径に相当し1ピクセルの違いは実空間では1.5mm程度に相当し、半径ではその1/2、さらに左右画像の平均をとることから、結局1/4すなわち0.3~0.4mmの違いとなる。これは表1.の結果すなわち半径15.9mmとなっていることと合致している。すなわち、画像処理あるいは計算の過程でエッジのいずれかが1ドットずれると0.3mm程度の誤差をひきおこすことになる。

ちなみに、実験値において左カメラ画像の $\rho$ の値-9を-8に替えてみると半径の値は16.2mmと真値と一致する。ただし、距離が556.3mmとなり距離検出において誤差が大き(0.7mm)なる。これは $\rho$ の値を整数化したことにより発生したものと考えられる。したがって、すべてのエッジが1ドットづつずれると半径に1mm以上の誤差が生ずることになる。ところが画像処理の過程ではデジタル化の際に1/2ドット、エッジ検出や細線化においても誤差の生ずる可能性があり、また直線位置検出の計算においても $\rho$ の値は1キザミ(小数点以下4捨5入)であることなどを総合すると、半径の値に1mm程度の誤差が含まれることもありうる。この精度を向上させるには、より焦点距離の大きいレンズを使用するかあるいはより対象に接近することにより画像を大きくすればよいことになるが、その場合は視野が小さくなり探索範囲が狭められてしまう。

距離についても上の例にみられるように $\rho$ の値が1変わることで0.8mm変化している。したがって、 $\rho$ の値がすべてのエッジで1づつ変化したとすれば、3mm程度はずれることになる。

いずれにしても、使用レンズや探索範囲をこの程度にすれば距離については3mm程度、半径については1mm程度の誤差はありうるものとして取り扱わなければならないことになる。

また、カメラの校正にあたっては画面中心部のデータによっているため、画像が周辺部に位置する角度の大きい場合についてはひずみの影響も加わっているものと考えなければならない。

なお、処理時間は画像処理について約1分(DSP付き、高さ修正をする場合はさらに1分)、計算時間が30秒(PC9801VXクロック10MHz、C言語、数値演算プロセッサ付き、高さ修正にはさらに30秒)程度であった。すなわち、高さ修正を行えば高さ検出誤差は1/3以下に減少するが、画像処理も含めて処理時間が倍増することに

なる。

## 5. 結 論

ロボットアームに2台のテレビカメラを取り付け、市販の画像処理装置により画像処理した結果を、パーソナルコンピュータにより演算処理して、円柱対象物の位置および大きさ(半径、高さ)を求める手法の一例を示した。その精度は距離に関しては4mm程度以内の誤差、半径に関しては1mm程度以内の誤差、高さに関しては垂直方向エッジのみを利用した場合10mm程度、水平方向エッジも利用する場合は3mm程度以内の誤差で検出することができた。

これらの誤差はカメラの取り付け精度を上げることにより一部減少させることができるが、カメラの解像度、画像処理の内蔵する誤差、データあるいは計算のデジタル化による誤差などのためこれ以上の精度を期待することは困難である。より精度を上げるには、

- 1) ここで得られた位置情報を利用して、第2ステップとして対象物への接近を図るかあるいは焦点距離の大きいレンズに交換することにより対象画像を大きくする
- 2) より解像度の高いカメラや画像処理装置を利用するなどの方法が必要となろう。

おわりに、本実験を行うにあたって、平成2年度卒業研究の諸君より多大の協力をいただきましたことに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) R. O. Duda & P. E. Hart: Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures, Comm. of ACM, Vol.15, No.1, pp11/15(1972)
- 2) 広瀬茂男: ロボット工学, pp28/37, 掌華房(1987)
- 3) 松井, 落合, 石松: パソコン画像処理装置のロボット用視覚センサへの応用, SICE89前刷 671/672, 1989
- 4) 松井, 落合, 石松: パソコン画像処理装置のロボット用視覚センサへの応用(円柱対象物の場合), SICE 90前刷 523/524, 1990

(平成3年9月24日受理)