

画像処理利用による簡単な形状の対象物の位置の検出

松井稜治* 山根彌生* 落合積* 石松隆和**

On the Detect of Positions of some Simply Shaped Objects using a Personal Image-Processing System

Ryoji Matsui*, Yayoi Yamane*, Tsumoru Ochiai* and Takakazu Ishimatsu**

Abstract

An position and a size can be detected for an simple-shaped object by 2 TV-cameras are attached to an robot-arm. Some images from 2 TV-cameras are processed by an image-processing system (sampling, edge-detect, image adding, digitalise, thinning and so on). Hough-transform is performed for the image-processed data and the least square method is applied. In this case, the ρ in Hough-transform determines the direction of each vertical edge for the object from a camera. Using the above property, the positions of some objects can be calculated. We experimented on the accuracy of position-detect about some simply shaped objects (rectangular and circular pillars). We report the obtained results.

1. まえがき

われわれは従来より簡単な断面形状の柱状物体について、その位置や寸法について、画像処理を用いて検出してきた。ここではそれらの物体の垂直エッジの画面内位置をハフ変換により抽出することにより[1][7]、カメラに対する垂直エッジの水平面方向を検出し[3]、2台のカメラを利用する三角測量の原理により垂直エッジの位置や寸法を計算できることを示す[4]。またハフ変換に最小自乗法を併用することにより精度を増すことができることも示している[5]。

単独に置かれた簡単な形状の柱状物として円柱や角柱を取り上げているが、これは容易にエッジの対応関係が得られ、その形状も推測しやすいことによっている。また、TVカメラはロボットアーム肩部にとりつけ、ロボットアーム腰部と共に回転するように配置している。

以上のことに基づいて、円柱、角柱対象物をいくつかの位置に置いて実験を行い測定してみた。ここではその

実験結果について報告する。

2. システム構成

使用するロボットアームはムーブマスタII RM501(5自由度)でその肩部に2台のTVカメラを取り付け(カメラ間は512[mm])、距離センサーとして用いる。TVカメラよりの画像は汎用画像処理システム(PIAS-LA500 512×480ドット)に取り込み、簡単な画像処理(細線化まで)を行った後、パソコンに転送され、ハフ変換、対象物位置などの計算が行われる(Fig.1)。なお、汎用画像処理システムの代わりに画像処理ボードを利用することもでき、1台のパソコンでも画像処理から計算までを一括して処理できるがここでは詳細は省略する。

3. 画像処理の手順

2台のTVカメラから画像処理システムに送られた画像は次のような手順により[6][7]、ティーチングにより自動的に処理される(画像処理ボードの場合は手製のプログラムにより連続的に処理される)。

* 宇部工業高等専門学校制御情報工学科

** 長崎大学工学部

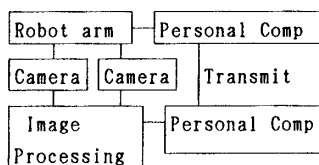


Fig.1 System Configuration

1. 背景処理
 2. 画面コピー
 3. フィルター処理の中のエッジ検出
 4. 画面間演算の中の加算
 5. 2値化, 反転 (対象白, 背景黒の場合)
 6. 細線化
 7. ファイル処理の中の2値画像圧縮処理
- 2値画像圧縮ファイルとして保存された後, ロボット操作や各種演算に使用されるパソコンに転送される (これはBATプログラムで自動的に処理される) .

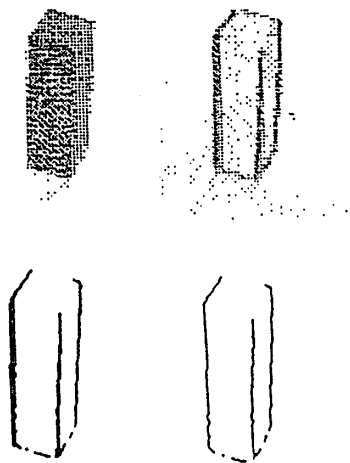


Fig.2 Examples of Pictures

4. ハフ変換への最小自乗法の併用

ハフ変換すなわちつぎの式(4.1)による直線の抽出を行う.

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (4.1)$$

手順としてはつぎのような各 θ について

$$\theta = \theta_0 + i \cdot \theta_{ST} \quad (i=0, 1, \dots) \quad (4.2)$$

画像の各点 (x, y) の ρ を求め, つぎのどの j に属するかを調べて

$$\rho = \rho_0 + j \cdot \rho_{ST} \quad (j=0, 1, \dots) \quad (4.3)$$

各 (i, j) についての頻度の大きい領域を求め直線を抽出する[1][7] (キザミ幅: θ_{ST}, ρ_{ST}).

さらに直線が適度に分離しているとき, 抽出された直線上およびその近傍の点を集めて最小自乗法を併用することにより, 直線をよりよい位置精度で求めることが出来る.

また最小自乗法を適用するにあたって, 画像内直線は垂直に近いので

$$y = a + b \cdot x \quad (4.4)$$

では b の計算でオーバーフローを起こし精度に影響するので

$$x = a + b \cdot y \quad (4.5)$$

を推定することにする (b は0に近い). このとき

$$b = \frac{\sum (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\sum (y_i - y_m)^2} \quad (4.6)$$

$$a = x_m - b \cdot y_m \quad (4.7)$$

であり, 式(4.1)との対応関係から

$$\theta = \tan^{-1}(b) \quad (4.8)$$

$$\rho = a / \cos(\theta) \quad (4.9)$$

である[5]. なお, x_m, y_m はそれぞれの平均を示す.

ハフ変換のみでは ρ, θ の値はキザミ幅の大きさにより精度には限界があるが, 最小自乗法を併用すると結果として ρ の値の精度は改善される.

5. 透視変換[2]

カメラ視線上の1点を3次元座標原点 $(0, 0, 0)$ とする. このときカメラ焦点を $E(E_x, E_y, E_z)$ とする.

$$\alpha = \tan^{-1}(E_y / E_x) \quad (5.1)$$

$$\beta = \tan^{-1}(E_z / \sqrt{E_x^2 + E_y^2}) \quad (5.2)$$

とすると(sqrt:平方根), α, β はレンズ取り付け位置から容易に分かる. カメラ焦点を原点, 視線を x 軸 (負方向) とする座標系は原座標系を

1) (E_x, E_y, E_z) 平行移動

2) z 軸回り α 回転

3) y 軸回り $-\beta$ 回転

したもののみなせる[2]. このとき, 画面とカメラ焦点との間の距離を D_v とすると, 画面内の点 $Q(Q_x, Q_y)$ は3次元空間の点 $P(P_x, P_y, P_z)$ にたいして

$$D_n = C\alpha C\beta (E_x - P_x) + S\alpha C\beta (E_y - P_y) + S\beta (E_z - P_z) \quad (5.3)$$

$$1 / \lambda = D_v / D_n \quad (5.4)$$

とすれば

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = 1/\lambda \begin{pmatrix} -S\alpha & C\alpha & 0 \\ -C\alpha S\beta & -S\alpha S\beta & C\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_x - E_x \\ P_y - E_y \\ P_z - E_z \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

(S: sin, C: cosの略)

となり、画面上の点 (Qx, Qy) が求められる。

カメラ取り付け位置すなわちレンズ取り付け位置が分かっている場合 α, β は既知であり, E_y, E_z はこれらの値を使えば, E_x で表せるので, D_v, E_x を知ることができればよい。

$x = 0, -50$ [mm] で格子について画像サンプリングしてキャリブレーションした結果, $E_x = 528, D_v = 650$ と $E_x = 524, D_v = 641$ とで, 20 [mm] 角の格子 ± 40 [mm] の各点に対し, これら相互の間ではせいぜい 0.2 ドット程度の違いでしかなく (Table 1.), そのためここでは, E_x をレンズ取り付け位置近傍に固定して, いくつかの点における D_v を求めて平均することにする。

Table 1 Camera Calibration

$x = 0$

Coordinate		Dv=643, Ex=524		Dv=650, Ex=528	
Qx	Qy	Qx	Qy	Qx	Qy
15.5	-5.5	15.3	-4.8	15.4	-4.8
-14.5	5.5	-15.1	4.7	-15.1	4.7
31.5	-9.5	30.9	-9.6	31.1	-9.7
-29.5	9.5	-29.9	9.3	-30.0	9.3
15.5	8.5	15.6	8.4	15.7	8.5
-15.5	18.5	-15.3	17.8	-15.4	17.9
15.5	-17.5	15.1	-17.5	15.2	-17.6
-14.5	-7.5	-14.8	-8.0	-14.9	-8.1

この場合, 軸の若干のずれが相殺されるので, 軸に対称な2点のデータを用いることにする。Py軸方向の2点のデータ (添字1, 2で示す) についての D_v を求めるには ($P_x, P_z: \text{const}$)

$$D_v \cdot C\alpha \cdot (P_{y1} - P_{y2}) = \{C\alpha \cdot C\beta + S\alpha^2 C\beta / C\alpha + S\beta^2 / (C\alpha \cdot C\beta)\} \cdot (Q_{x1} - Q_{x2}) \cdot E_x + (C\alpha \cdot C\beta (P_{x1} \cdot Q_{x1} - P_{x2} \cdot Q_{x2}) + S\alpha \cdot C\beta (P_{y1} \cdot Q_{x1} - P_{y2} \cdot Q_{x2}) + S\beta (P_{z1} \cdot Q_{x1} - P_{z2} \cdot Q_{x2})) \quad (5.7)$$

を用いた (C: cos, S: sin)。

6. 水平面に直立する直線の画像における ρ, θ の値

直線のハフ変換を式 (4.1) とすると, カメラ視線方向にたいして ($\alpha = 0$ とする), 水平面角度 θ_c の方向に

ある水平面に直立する直線の画面内における ρ の値はその直線の両端の3次元z座標を計算の簡単のために 0 と P_z として (P_x と P_y は同一), 透視変換計算を行うと P_z は消去されて, ハフ変換での ρ の値のみによって表すことができ [3]

$$\rho = C\beta \cdot D_v \cdot \tan \theta_c / \sqrt{\{(S\beta \cdot \tan \theta_c)^2 + 1\}} \quad (6.1)$$

となり, したがって

$$\tan \theta_c = \rho / \sqrt{\{(C\beta \cdot D_v)^2 - (S\beta \cdot \rho)^2\}} \quad (6.2)$$

となる。これはハフ変換された ρ の値とカメラ取り付け角 β により θ_c が決まり, カメラの視線軸まわりの回転 (θ の変化) には影響されないことを示している。

7. 円柱, 角柱の位置, 寸法の推定

まず, 円柱について検討する。両画面共2本づつある各エッジ (ただし左右両画面でエッジは異なる。Fig. 3) のカメラに対する水平面方向は式 (6.2) を用いて

$$\theta_{CRR} = \tan^{-1} [\rho_{RR} / \sqrt{\{(C\beta \cdot D_v)^2 - (S\beta \cdot \rho_{RR})^2\}}]$$

ρ_{RR} : 右カメラからの右エッジの ρ の値 (7.1)

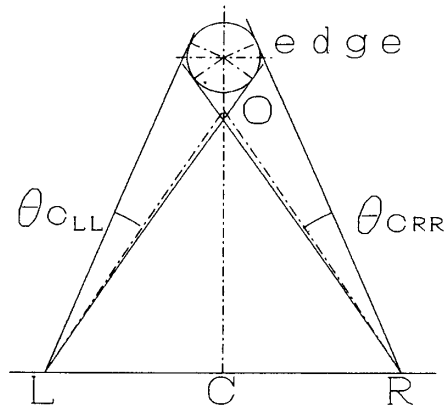


Fig. 3 Principle for Circular Pillar

となり, 同様に $\theta_{CRL}, \theta_{CLR}, \theta_{CLL}$ がそれぞれのエッジの ρ の値より求められ, 三角形の関係を使えばロボット中心から円柱中心までの距離の x, y 成分が容易に求められる。それを x_m, y_m とすると, ロボット中心からの距離: $\sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ (7.2)
方向: $\tan(y_m/x_m)$ (7.3) となる。

エッジが双方共3本の場合には角柱とわかり, 前面のエッジ位置は容易に計算できる (Fig. 4)。すなわちハフ変換の ρ の値により分かる θ_{CR} や θ_{CL} を用いると (添字

R, Lはカメラ位置を示す)

$$\theta_R = \pi/2 - (\alpha - \theta_{CR}) \quad (7.4)$$

$$\theta_L = \pi/2 - (\alpha + \theta_{CL}) \quad (7.5)$$

とすると、三角形の関係よりロボット中心からの前面両エッジの位置は計算できる。x, y共その平均をとれば前面中心の位置は容易に計算できる。また、前面幅は2つの前面エッジの距離、方向より求められ、奥行きは前面と側面とは直角であることと後方のエッジの画像とを利用する。

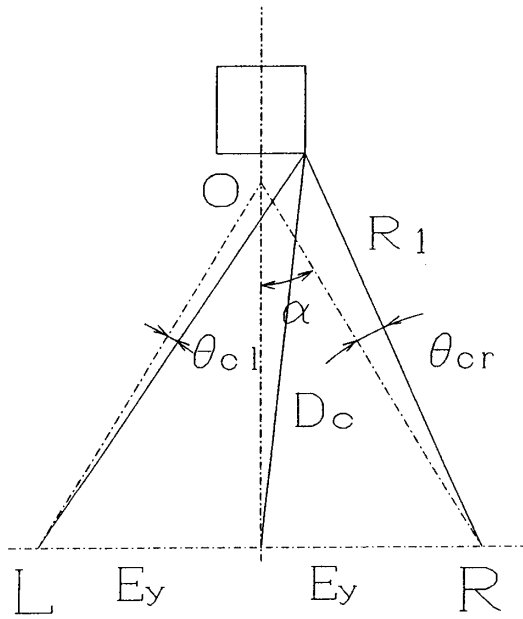


Fig. 4 Principle for Rectangular

また、画像の垂直エッジが3本、2本の場合、角柱と推定できる。この場合足りないエッジ情報は極値計算により補う[4](Fig. 5)。すなわち図中の前面角度 θ と奥行き d とを仮定して得られる後面画像エッジとの間の誤差が最小になるよう最適化を行う。 θ, d を仮定したとき、各エッジの各カメラよりの水平角度は(添字のR, Lはカメラ, 数字iはエッジ番号)

$$\theta_{R1} = \alpha - \theta_{CR1} \quad (7.6)$$

$$\theta_{L1} = \alpha + \theta_{CL1} \quad (7.7)$$

であり、前面右エッジ画像が欠けているものとするれば、左エッジは両カメラ画像により位置の決定が可能である。すなわちエッジ1の座標 (x_1, y_1) は三角形の関係より容易に求められる。右エッジ位置は前面方向 θ を仮定すればエッジ1を通る直線(前面)と左カメラ画像により示される右端エッジの方向を示す直線との交点として求めることができる。すなわちエッジ0の座標 (x_0, y_0)

は

$$x_0 = \{ \cos \theta_{L0} \cdot (x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta) + \sin \theta \cdot (Ex \cdot \sin \theta_{L0} - Ey \cdot \cos \theta_{L0}) \} / (\cos \theta \cos \theta_{L0} + \sin \theta \sin \theta_{L0}) \quad (7.8)$$

$$y_0 = \{ \cos \theta (Ex \cdot \sin \theta_{L0} - Ey \cdot \cos \theta_{L0}) - \sin \theta_{L0} (x_1 \cdot \cos \theta - y_1 \cdot \sin \theta) \} / \cos(\theta - \theta_{L0}) \quad (7.9)$$

となる。奥行き d を仮定し後面の各エッジ座標を $(x_2, y_2), (x_3, y_3)$ とすると、側面を表す2直線とそれぞれカメラ焦点とエッジとを結ぶ直線(画像より)との交点は

$$d_2 = \{ (Ex - x_1) \sin \theta_{L2} - (Ey + y_1) \cos \theta_{L2} \} / \sin(\theta - \theta_{L2}) \quad (7.10)$$

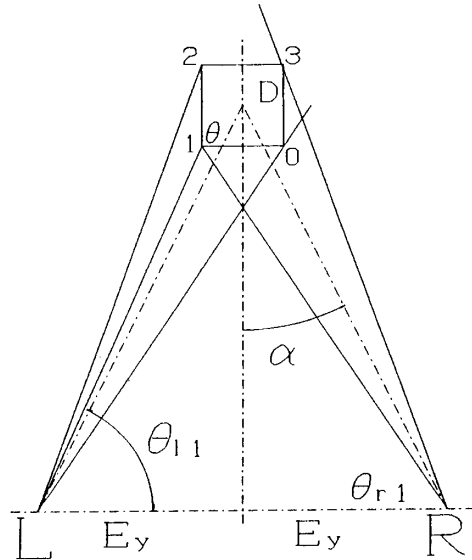


Fig. 5 Principle for Rectangular (Incomplete Data)

$$d_3 = \{ (x_0 - Ex) \sin \theta_{R3} + (Ey - y_0) \cos \theta_{R3} \} / \sin(\theta + \theta_{R3}) \quad (7.11)$$

となるが、とりあえず d_2, d_3 の小さい方を d の初期値とする。ここで θ は既知とすると、エッジ・カメラ間直線と仮定した d により求められる2点との距離を求めるとそれぞれ

$$\Delta_2 = | x_2 \cdot \sin \theta_{L2} + y_2 \cdot \cos \theta_{L2} - (Ex \cdot \sin \theta - Ey \cdot \cos \theta) | \quad (7.12)$$

$$\Delta_3 = | -x_3 \cdot \sin \theta_{R3} + y_3 \cdot \cos \theta_{R3} - (-Ex \cdot \sin \theta + Ey \cdot \cos \theta) | \quad (7.13)$$

となるので、評価関数を

$$P = \max(\Delta_2, \Delta_3) \quad (7.14)$$

として、 P が最小となるような θ と d を極値計算により求める。

8. 実験結果

以上のような計算法に基づいて円柱、角柱についていくつかの場所に置いて実験を行い測定精度を調べた例が下記のTable 2., 3., 4. である。同一画像データについて上側（奇数番）にハフ変換のみを用いた例を示し、下側（偶数番）に最小自乗法を併用した例を示している。円柱の場合をTable 2., 角柱の場合をTable 3., Table 4. に示す。

円柱3, 4の場合（Table 2）, 誤差が最小自乗法併用によりハフ変換のみの場合に比し若干改良されている。円柱では角柱ほどエッジが明確でなく、画像処理の誤差が大きくなりがちであり計算だけでの誤差の改良にも限度があるが、同一画像について最小自乗法併用によって1.4[mm]程度誤差が改良されている。すなわち、計算による誤差が改善されているわけである。この時、 ρ の値の理論値を計算すると右(19.2, -7.5)であり、画像処理による誤差の大きさが大体わかる。また、1, 2の場合も同様の傾向を示している。しかし、場合によってはハフ変換による計算誤差が画像処理による誤差を打ち消して結果的によくなることもあった。これは偶然による結果であって、一般的には画像処理による誤差に更に計算誤差が加わると考えた方が無難である。

Table 2 Experiment for Circular Pillar
(under:with LSQ)

R= 16.2 mm

	real val.		detected val.			
	Dist.	θ	Dist.	θ	R	ρ
1	557.2	0	559.2	0.1	15.6	(36, 12) (-10, -34)
2			559.1	0.2	15.9	(36.3, 12.0) (-9.2, -33.9)
3	507.2	0	503.4	0.1	15.0	(16, -8) (8, -18)
			504.8	0.1	15.7	(18.3, -7.9) (8.6, -17.6)

角柱ではエッジが円柱に比べて明確であり画像処理による誤差は小さくなる。例1, 2（Table 3）では、最小自乗法併用では0.7[mm]改良されている。この例において更に数値的な検討を加えると、 ρ の理論値(Dv=650, Ex=528)の場合には右画像は(36.9, 25.1, -3.5), 左画像は符号逆であり、両画像とも実験値を同一方向に-3程度変えると方向はほぼ正面になるが、距離はほとんど変わら

ない。この場合は両カメラ共同のように方向が変化した即ち取り付けられているロボットに何らかの理由で方向誤差が生じたとみるべきであろう。従ってカメラ・対象間相対的位置関係は測定値の通りとみなせる。また3, 4の例でも最小自乗法併用では誤差は改善されている。この場合のハフ変換では理論値は右(42.5, 31.4, 3.4)であり、 ρ のキザミ幅が2となっているのでハフ変換のみの場合はこの程度の誤差は計算により生じうるものと考えておかなければならない。そのようなハフ変換において誤差の大きくなるような場合こそ最小自乗法を併用することにより計算誤差を減らすことができることになる。

また ρ の値の違いがどの程度距離検出に影響するかを調べると、一方の ρ が理論値から1データだけ異なる場合約1[mm]程度の距離検出誤差が生じ、一方の画像の ρ が同方向に全て1ほど異なると約2[mm]程度の誤差が生じ、左右の画像の ρ が逆方向に1異なると約3[mm]程度の距離検出誤差が生じる。しかし、画像処理の際に ρ の値がキザミ幅の関係で2近くずれることはありうるので相応の誤差はあるものとして配慮しておかねばならない。

また、3本のエッジの内中間のエッジが照明条件によっては欠けることもあり、その場合は極値探索法を利用するが、背景処理をすることにより人工照明が利用できるため、実際にはこのようなケースはあまり起きない（Table 4）。角柱であるため画像処理により生ずる誤差は比較的少なく、逆に一般的には計算誤差は場合によっては増加することもあるので何ともいえないが総合的誤差はそれほど大きくなっていない。

Table 3 Experiment for Rectangular
(under:with LSQ)

Rectangular Width= 38.8 mm

	real val.		detected val.			
	Dist.	θ	Dist.	θ	Wid.	ρ
1	521	0	518.7	0.4	36.5	(40, 26, -2) (6, -22, -36)
2			519.4	0.5	38.3	(40.6, 27.4, -0.9) (6.8, -21.5, -34.5)
3	541	0	539.9	0.0	37.6	(42, 30, 4) (-4, -32, -44)
4			541.2	0.1	39.7	(42.8, 32.0, 3.9) (-2.4, -31.5, -42.7)

水平距離 540[mm]に対して悪い条件が重なる場合には画像処理による誤差とハフ変換のみによるキザミ幅によ

る誤差とを合わせて約 5[mm]以上の誤差を配慮しなければならないのに対し、最小自乗法を併用すれば誤差のほとんどは画像処理のみに起因し1~3[mm]程度で済む。結局相対誤差は1/500~1/200程度になるわけである。これらの誤差をさらに小さくしたいときには、画像処理による誤差や画像の離散化による誤差を減ずることを考えなければならない。すなわち、画像処理システムの解像度を増すことやアナログ的処理などが必要となるが、把握などの作業にはこの程度の精度でも十分に利用可能と思われる。

Table 4 Experiment for Rectangular
(under:with LSQ)

Rectangular Width=38.8 mm (incomplete)

real val.		detected val.				
	Dist	θ	Dist.	θ	Wid.	ρ
1	541	0	539.9	0.2	38.9	(42.4) (-2, -30, -42)
2			540.8	0.3	40.3	(43.9, 5.1) (-0.5, -29.5, -40.6)
3	491	0	490.5	0.0	36.7	(30, -14) (14, -14, -28)
			491.7	0.2	39.4	(30.2, -13.0) (16.0, -13.9, -27.7)

以上のことをまとめると

1. ハフ変換を使用することによって、 ρ のみで対象物垂直エッジのカメラ視線軸に対する水平方向を検出することができ、また ρ のみの検出であるからカメラ視線軸まわりの回転の影響(θ の変化)を考慮しなくてもよい。
2. ハフ変換のみではキザミ幅により精度は影響を受けるが、最小自乗法を併用することにより一般的には誤差を減らすことができる。把握という用途にたいしてはこの方法で十分な距離測定精度が得られる。

といえる。ただし、欠点としては

1. 画像処理時間がかかること

が挙げられる。しかし最近パソコンも高速になったので、最新のものを使用すればある程度パソコンでも実時間処理も可能ではないかと思われる。ちなみに、PC9801VXでは画像処理時間(DSPつき)が1画面約30秒であるが画像処理ボードを利用したPC9821Apでは1/10程度に減少する。ただしこの場合は汎用とはならず専用システムとなる。計算時間(ハフ変換以後)はPC9801DAでは約3秒であり、PC9821Apでは1秒程度であった。

今後の課題として、ここでは直立線検出の容易な円柱や角柱についての結果を示したが対応関係などの明瞭などを考えると、この方法でさらに複雑な形状のものを扱うのは相当の煩雑さが予想されるので、そのような場合にも対応できるような手法を開発しなければならない。

参考文献

- 1) R.O.Duda et al.: Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures, Comm. of ACM, Vol. 15, No. 1, pp11/15, 1972
- 2) 広瀬: ロボット工学, pp28/37, 裳華房, 1987
- 3) 松井, 落合, 山根, 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(ロボット動作の利用), 第10回計測自動制御学会九州支部講演会予稿集, pp285/286, 1991
- 4) 松井, 落合, 山根, 石松: 垂直エッジを利用した角柱の位置, 寸法の検出(エッジ情報の不十分な場合), 宇部高専研究報告, 第40号, pp17/20, 1994
- 5) 松井, 落合, 山根, 石松: 垂直エッジを利用した簡単な形状の対象物の位置, 寸法の検出(ハフ変換と最小自乗法の利用), 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp1121/1122, 1994
- 6) 谷内田: メカトロ技術者のためのセンサ技術⑧, センサ技術, Vol. 5, No. 12, pp73/75, 技術調査会, 1985.
- 7) 谷内田: メカトロ技術者のためのセンサ技術⑨, センサ技術, Vol. 6, No. 1, pp81/85, 技術調査会, 1986.

(平成7年9月25日受理)