

ロボットアーム制御への画像処理の応用

山根 彌生 松井 稜治 落合 積

An application of image-processing for a Robot-arm control

Yayoi YAMANE Ryouji MATSUI Tsumoru OCHIAI

abstract: We can obtain the distant information of an object to a robot using only one image by CCD camera. In the process, the vertical line of the object is used with its Hough transformation and the coordinate of a end point of the image. The results of some experiments are shown.

Keyword: image processing, vertical edge, Hough transformation

1. はじめに

通常対象物までのロボットよりの距離は2台のカメラを用いて両眼立体視の原理を使って求める。しかし、簡単な形状の対象物の場合は1画像のみでも距離情報を得ることができる。ここでは3次元空間の垂直線の画像のハフ変換¹⁾とその直線の水平面との交点の座標値を用いて距離情報や大きさを検出することができることを実験により確かめその精度を調べたので、その結果について報告する。

2. 手法

CCDカメラをロボット肩部に取り付け、円柱対象物の画像よりロボットから対象物までの距離や大きさの検出を行う。ロボット、カメラおよび円柱対象物の平面位置関係は Fig.1 に示される。

ここで、

R: ロボットアーム中心

C: カメラ

O: 3次元座標原点

P: 円柱中心

E: 円柱直立エッジ

である。

今、垂直エッジ(Fig.1のE)がカメラ画像を処理して Fig.2の直線ABのように得られたとき、ハフ変換を行うと、画像座標原点からこの直線までの距離 ρ と角度 θ によりこの直線は表される。このとき、Fig.1の \angle OCE²⁾は

*制御情報工学科

$$\theta_c = \tan^{-1}(\rho / \sqrt{(c_\beta D_v)^2 - (s_\beta \rho)^2}) \quad (1)$$

とエッジのハフ変換の ρ の値のみで計算できる。

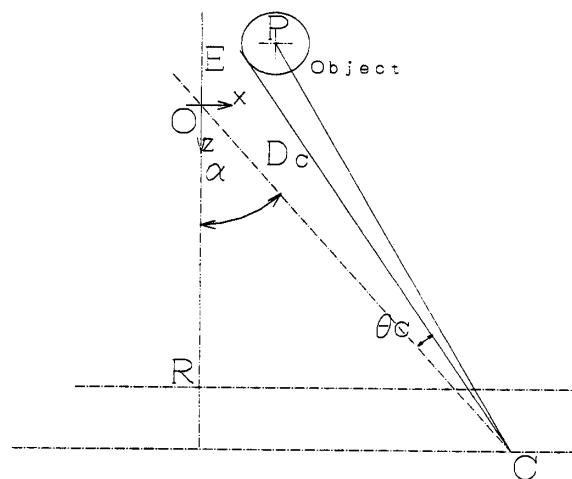


Fig.1 Geometric Relation

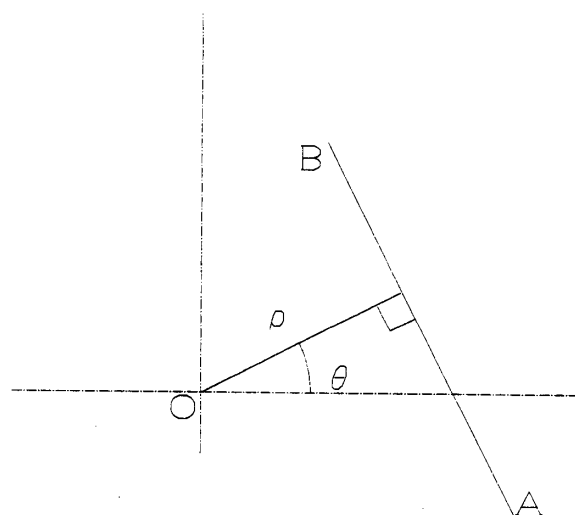


Fig.2 Hough Transformation

従って、垂直エッジのカメラに対する平面方向が分かることになる。エッジの位置を知るためには距離により変化するもう1つの変数が必要となる。そこで、カメラから垂直エッジまでの距離 D_c の変化の影響が表れる変数として画像内エッジ直線の下端部の座標値を採用する。これはエッジの水平面との交わりであることを考慮すれば画面内で容易に識別可能である。すなわち垂直エッジの平面位置がその画像のハフ変換の ρ とエッジ画像下端の縦方向座標値 Q の2個の値からエッジの位置を推定することが可能である。

垂直エッジ下端点の3次元座標 (x, y, z) は透視変換³⁾の関係から画面縦方向座標値は

$$Q = D_v \{s_\alpha s_\beta (E_x - x) - c_\beta (E_y - y) + c_\alpha c_\beta (E_z - z)\} / D_n$$

$$D_n = s_\alpha c_\beta (E_x - x) + s_\beta (E_y - y) + c_\alpha c_\beta (E_z - z)$$
(2)

となる。

また、エッジ下端の y の値は、ロボット基礎平面とすれば既知であり、 x, z はFig.1の関係より D_c, α や θ_c の値から計算可能である。すなわち

$$E_x - x = D_c \sin(\alpha - \theta_c)$$

$$E_z - z = D_c \cos(\alpha - \theta_c)$$

ここで、 E_x, E_y, E_z は3次元空間座標原点にたいするカメラ焦点位置の座標であり、 D_v は画像の倍率を示す。画像より、ハフ変換の ρ の値と Q の値は分かっているので、Equ. (2)を変形して

$$C_n = c_\beta D_v + s_\beta Q$$

$$C_{dd} = s_\alpha s_\beta \sin(\alpha - \theta_c) + c_\alpha s_\beta \cos(\alpha - \theta_c)$$

$$C_{dq} = s_\alpha c_\beta \sin(\alpha - \theta_c) + c_\alpha c_\beta \cos(\alpha - \theta_c)$$

とすると、

$$D_c = C_n (E_y - y) / (C_{dd} D_v - C_{dq} Q) \quad (3)$$

となり、Equ. (1)より ρ の値によって θ_c の値は計算されるので、 D_c の値をEqu. (3)より求めることができる。すなわち、エッジのハフ変換より計算される ρ の値とエッジ下端部の座標値 Q の2個の値から D_c の値は計

算できるということを示している。

また、ハフ変換は画像内直線の抽出に用いるが、 θ や ρ のきざみ幅の整数倍でしか値は求められない。そこでいったん抽出した直線の近傍を含めた点について最小2乗法⁴⁾を適用して、 ρ や θ についてさらに詳細な値を求める。この場合直線を構成する点の個数が多い程直線の検出精度は良好となる。この場合も直線上の点として判断するとき ρ について±きざみ幅の範囲内に入っていればその直線上の点とみなすので、エッジ下端の座標値を検出する時に下端の円柱円周部画像の点も直線上の点と誤って判断することがあるので誤差の要因となる。そのためもう一度さらに範囲を狭めた近傍に入っている点を直線上の点とみなして、エッジ下端の座標値の検出の精度を高めた。すなわち、この場合のハフ変換では

- 1) ρ, θ ともあるきざみ幅で直線の抽出(通常のハフ変換を利用)
 - 2) 最小2乗法を適用することにより、 ρ, θ についてさらに詳細な値を求める。
 - 3) 上で求めた詳細な直線情報(ρ, θ)を基にその直線近傍点のうち最下端部座標値を求める。
- のように3段階の処理を行った。

3. 実験結果および考察

ロボットアーム中心と円柱対象の中心との距離 d_{OR} 、方向 θ_{OR} は前節のカメラ-対象物エッジ間距離 D_c と方向 θ_c すなわち ρ の値より容易に計算できる。ここではロボットアームの中心から円柱対象物の中心までロボットアームの届く範囲に対象物を置いて実験を行い、この方法による検出精度を調べた。CCDカメラはロボットアーム肩部に取り付けた。

実験システム構成をFig.3に示す。

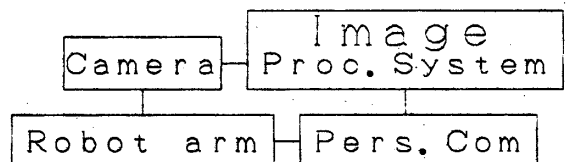


Fig.3 System Configuration of Experiment

ここで

ロボットアーム RM501 (ムーブマスタ II)
 汎用画像処理システム PIAS LA500 (512×480)
 CCDカメラ オリンパス FCD-10(512×512)
 カメラ取り付け角度： $\alpha=25.9^\circ$ ， $\beta=39.9^\circ$

β はカメラ取り付けの俯角であり，対象物のロボットからの平面距離を知るためには，距離変化の影響がエッジ下端の座標変化として顕著に表れるように β の値はある程度の大きさのあることが望ましい。

画像例を Fig.4 に示す。下端部に底面円周部が表れていることがわかる。



Fig.4 An example of the pictures

実験結果を Tab.1 に示す。ここで高さはエッジの上端と下端の座標値より透視変換を適用して求めた。実際の円柱高さは 150mm であった。この実験ではすべてエッジ下端部の明るさに合わせて2値化しきい値を選んだため，エッジ上端の直線部がしきい値以下であったために一部消失したようである。そのため高さの検出値が総じて小さくなった。すなわち，下部と同程度の照明条件であればもう少し精度は向上したと思われる。

Tab.1 Results of Experiment

Real Val. Height : 150 mm Rad. : 16.2 mm

	Set Val.		Measured Val.			
	Dist.	Dir.	Dist.	Dir.	Rad.	H
1	532.2	-2.5	531.0	-2.20	16.6	145
2	482.2	0.0	483.7	0.07	16.5	146
3	482.2	5.0	483.3	5.34	16.7	145
4	532.2	2.5	531.7	2.78	16.3	146
5	482.2	10.0	484.1	10.40	16.7	145
6	532.2	7.5	533.0	7.76	16.7	147

Dist., Rad., H : mm

Dir. : ° (deg)

この実験例ではロボット-対象物間距離約 500 mm にたいし高々 2.0 mm 程度の誤差で相対誤差は 1/250 程度であり，かなりの精度であるといえるが，場合によっては 3.5 mm 程度の誤差が生ずることもあった。特に，エッジ下端の座標値は画像の2値化の過程でしきい値レベルによって大きいときは2ピクセル程度の誤差を生じ，その影響により1ピクセルで2mm 近くの距離誤差を生ずることもあった。すなわち，エッジ下端の座標値は照明条件やしきい値レベルにより若干の影響を受けることを配慮しなければならない。

また，画像倍率を表す D_v の値は画面の中央部の格子画像を用いてキャリブレーション⁵⁾を行い，その値を用いて画面全体で一様として計算を行ったが，画面中央部と周辺部では大きさに若干の違いがある。したがって，画像のひずみを修正することによってより精度の向上が図れるものと思われる。この実験例でも実験 5. はカメラの近くであるが画像は周辺部になり，逆に 6. はカメラからは遠方であるが画像は画面中央部になる。比較すると 6. の方が精度は高くなっている。画面周辺部に画像のある場合はひずみの影響により誤差が増大することを示している。

また，画面中央部に3次元座標の原点を合わせるようにカメラを取り付けるのであるが，1-2ピクセル程度のずれを生ずることはありうる。この場合は画像全体に一様に誤差を生ずることになる。またキャリブレーションの精度を上げることによりこの影響を減少させることができるが，キャリブレーションの精度向上にも格子点画像のサンプルでのデジタル化誤差などにより限りがある。

以上，誤差の生ずる原因として，照明条件，2値化しきい値レベル，画像ひずみやカメラ取り付け誤差などが考えられる。したがって，これらのことに注意を払って検出実験を行えば，より精度の向上を図ることができることになる。

この実験の結果例では誤差は 2.0 mm 程度であるが最大でも 3.5 mm 程度すなわち相対誤差 1/150 程度，多くの場合は 1/200 程度で位置の検出が可能であることがわかった。これは直線の検出にハフ変換を使用しており，一般に直線は多くの点から構成され，検出されるハフ変換パラメータは多くの点情報を平滑

化した結果とみなすことができ、これを利用することによって高精度化できると思われる。すなわちハフ変換の ρ の値を使用することにより精度は向上するものと思われる。両眼立体視（2画像）の場合は ρ のみで位置の推定が可能であり、カメラ2台になるための取り付け精度の影響は増大するものの位置検出精度は多数のデータを利用することになるので1画像のみの場合よりも結果は良好⁴⁾であるようである。

この1画像のみを利用する方法では垂直エッジ下部の座標値という1点の情報をもう1つの情報として使わざるを得ないため直接種々の誤差の影響を受けやすいものと思われる。

しかしながら、簡単な形状の対象物（垂直エッジを持ち、対応点の識別が容易であるもの）であれば1画像のみでも、ある程度の精度でその位置の検出は可能であることが実験により判明し、ロボットアームによる対象物の把握にも利用できると思われる。この方法では垂直エッジの情報を用いるので、角柱などの形状の場合にも容易に位置や寸法の検出が可能であると思われる。

なお、ここでは汎用画像処理システムを用いて画像処理を行ったが、パソコンに画像処理ボードを取り付けることによっても同様のことが可能となり、画像処理手順は固定化されるが（プログラミングが必要であるため）より自動的に処理ができ、処理速度も早くなることが期待される。ハフ変換の処理時間についてもクロック周波数20MHzのPC9801DAで処理時間が約5秒であったので、最近の高速のCPUを使ったものであればこの10倍以上の速さが期待されるのでハフ変換の処理時間は問題にする必要はないと思われる。

以上、解析的方法により1画像の円柱対象物のエッジ情報のみからその円柱の位置や大きさをエッジのハフ変換を利用して検出できることを示した。この場合エッジ下部部の画像の座標値を利用するので各誤差の影響を受けやすいが、この程度のシステムで水平距離において $1/150$ よりは良い精度（多くの場合、 $1/200$ 程度）で距離の検出ができることがわかった。

さらに誤差の生ずる場合の要因について考察した。

参考文献

- 1) R. C. Duda et al: Use of Hough Transformation To Detect Lines and Curves in Pictures, Comm. ACM., Vol. 15, No. 1, pp11/15 (1972)
- 2) 松井ほか：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, 第10回計測自動制御学会九州支部講演会予稿集, pp285/286(1991)
- 3) 広瀬 茂男：ロボット工学, 裳華房(1987)
- 4) 松井ほか：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, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp1121/1122(1994)
- 5) 松井ほか：巨大構造物の幅の検出, 第4回計測自動制御学会中国支部講演会論文集 pp284/285(1995)

(平成9年9月24日受理)