

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

自動化組裝系統之機械臂視覺系統 Robot Vision System for An Assembly Automation System

計畫編號: 89N159 NSC89-2212-E009-032

執行期限: 88年08月01日至89年07月31日

主持人: 林錫寬教授 交通大學電機與控制系

1 摘要

本計畫為利用機械臂電腦視覺系統所擷取之二維影像資訊；來辨識零組件編號及其在空間中的正確位置，以便讓機械臂伺服系統可以到正確的位置進行抓取及組裝的後續工作。因此先針對本計畫所採用的解析幾何方法做一描述並說明影像處理方法，最後以一實際物件進行空間中位置之估測。

Abstract

In this report, a calibrated robot vision system is used to identify part no. and 3D position of the assembly model by using 2D image information. When position information is obtained, we send it to the assembly automation system for the following work. First, we briefly describe the method, analytic geometry, used by this project and explain the image processing method. At last, we estimate the 3D position of a real model.

2 簡介

本計畫之目的是利用視覺伺服系統進行零組件組裝工作，而基本概念是將零組件視為由方體與圓柱體所組成，這是因為實際上大多數的機械及工業零組件

的形狀皆為方體或圓柱體。而方體的判別方法並不難且相當成熟，因此本計畫之重心為圓柱體的空間辨識。

主要研究工作是利用二維影像資訊取得圓柱體三度空間中的位置。一般圓柱體與圓錐體的零組件形狀有一個共通點，就是在二維影像時由橢圓和直線所構成，因此；我們便將圓柱體分為兩個部分—圓平面及直線。針對圓平面部分；遭遇到問題是在一不與其圓平面垂直之攝影機座標中，所擷取到的影像為一橢圓；並不是原來的正圓，所以必須對此橢圓進行分析，以取得橢圓的各項參數。接下來則是利用分析所得的橢圓數據，進行3D物體位置重建，即估測圓柱體之圓平面的空間座標。取得圓平面之圓心位置及半徑之後，即可得到物件之空間位置。

進行三度空間座標估測時，必須利用物體上的特徵來輔助，所以擷取特徵的好壞及種類就決定估測的準確與否，常見擷取的特徵不外乎點、直線、二次曲線等。本計劃中所選的特徵是“圓”。圓為二次曲線中的一個特例，而選取圓為特徵的主要的理由如下：

- 1) 許多工業界的零組件或工件常有圓洞或圓的外型，如本計畫所探討的小型直流馬達及實驗的圓柱體。
- 2) 當攝影機Z軸不與空間中圓平面垂直時，圓在攝影機影像平面上的投影為一橢圓，而且由於它對稱圓心的特

性，所以可以只用3個參數來定義橢圓。

- 3) 不必知道圓上每一點詳細的座標也可以進行估測。

利用圓計算空間中座標，由文獻中可知已有各種方法，如近似法[1] [2]，但近似法卻有缺點：

- 1) 一連串的假設，雖然把問題簡化為二維，但有時太多的假設反而使問題更複雜或太理想化，不易進行實驗或實際應用。
- 2) 忽略了投影可能發生的誤差及擾動。

除了近似法外，尚有遞迴法[3]，線性運算[4]等，但以上的方法只著重在數學的運算卻都沒有提供幾何上的解釋。

因此，Reza Safaee-Rad發展出了以解析幾何為基礎的方法[5] [6]，此方法有以下優點：

- 1) 建立在簡單的數學上。
- 2) 不會產生Redundent solution。
- 3) 提供幾何的解釋。

所以我們利用Reza Safaee-Rad的方法來進行圓平面空間座標的估測，首先；將問題分成兩部分，第一部份是先計算圓平面在空間中的法向量，第二部分則是算出圓心空間中的座標及圓半徑。

3 Reza Safaee-Rad 估測法

- 1) 影像處理

本計畫中，影像處理的目的是要將圓柱體上的圓平面邊緣擷取出來。為了能有效的找出邊緣並紀錄下邊緣的點資訊，我們使用Canny Edge Detection [9]來作邊緣偵測，並利用一去雜訊之演算法將雜點濾掉並記錄影像點之點座標 (u_i, v_i) 。

$$\begin{cases} u_i - u_0 = f_x \frac{X_i}{Z_i} \\ v_i - v_0 = f_y \frac{Y_i}{Z_i} \end{cases} \quad (1)$$

- 2) 圓平面法向量

利用影像平面上的點資訊可求得橢圓方程式，

$$ax_i^2 + bx_iy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + 1 = 0 \quad (2)$$

以此方程式及攝影機位置（在影像平面之座標中），求出一圓錐方程式，

$$ax_c^2 + by_c^2 + cz_c^2 + 2fy_cz_c + 2gz_cx_c + 2hx_cy_c = 0 \quad (3)$$

為了簡化計算過程，必須將圓錐方程式(3)化簡成更簡單的形式，

$$\lambda_1 X^2 + \lambda_2 Y^2 + \lambda_3 Z^2 = \mu \quad (4)$$

化簡的方法是利用旋轉及平移矩陣來進行座標轉換。第一步，先經一旋轉矩陣 (T_1) ，旋轉的目的是為了將式(3)中的xy、yz、zx項消去，也就是令長短軸與新座標之 x' 、 y' 軸同向。第二步則是用一平移矩陣 T_2 ，將原式簡化為式(4)，而平移的目的則是要把圓錐中心軸移至新座標之 z' 軸，並將頂點移至新座標的原點，此即稱為中心模式。

$$E_{(xyz)} = T_1 T_2 E_{(XYZ)}$$

接下來所要求的為一與此圓錐相切之曲線為正圓的平面，也就是求此平面之法向量，因為此平面之法向量即為空間中圓平面之法向量。但問題是與圓錐相切之曲線為圓的平面不只有一個，所以必須要有兩張影像的資訊才能確定真正的圓平面法向量。作法為經一座標轉換 (T_3) 使得新的 z'' 軸與此平面垂直，如此一來；在 E'' 座標中，每一平面與圓錐相切之曲線皆為正圓，所需要考慮的變數只剩下 z'' ，當決定 z'' 值後，空間中圓平面必位於此平面上。

$$E_{(XYZ)} = T_3 E''$$

在新座標中令 $z''=p$ 而圓錐方程式與平面交集的曲線方程式經化簡後可表示為

$$Ax''^2+Bx''y''+Cy''^2+Dx''+Ey''+F=0 \quad (5)$$

若上式為一正圓方程式則 $A=C$ ， $B=0$ ，因此可得到下列係數關係式，而最後一組等式是因為所討論的法向量皆為單位向量，所以其平方相加必定為1。

$$\begin{cases} 2(\lambda_1 - \lambda_2) \frac{lmn}{l^2+m^2} = 0 \\ (\lambda_1 l^2 + \lambda_2 m^2) n^2 + \lambda_3 (l^2 + m^2)^2 \\ = \lambda_1 m^2 + \lambda_2 l^2 \\ l^2 + m^2 + n^2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

再利用 T_1 求出圓平面在攝影機座標中的方向（法向量 $V=(l, m, n)$ ）。

3) 圓心及半徑

計算圓心位置及半徑部分則是利用一旋轉矩陣 T_4 將攝影機座標旋轉至一 z''' 軸與圓平面法向量相同的座標，如此一來；就可以得到一底為圓的圓錐，再利用由兩張影像所得到的參數及攝影機（攝影機座標中）移動的限制關係式下，即可計算估測出半徑及圓心座標。

$$E_c = T_4 E'''$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & 0 \\ l_2 & m_2 & n_2 & 0 \\ l_3 & m_3 & n_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

用 T_4 和兩組圓錐方程式係數 (a, b, c, f, g, h) ，可求出兩組的 A 、 B 、 C 、 D 、 A' 和 B' ，

$$A \equiv al_1^2 + bl_2^2 + cl_3^2 + 2fl_2l_3 + 2gl_1l_3 \quad (8)$$

$$B \equiv al_1n_1 + bl_2n_2 + cl_3n_3 + fl_2n_3 + fl_3n_2 + gl_3n_1 + gn_3l_1 + hl_1n_2 + hl_2n_1 \quad (9)$$

$$C \equiv am_1n_1 + bm_2n_2 + cm_3n_3$$

$$+fm_2n_3 + fm_3n_2 + gm_3n_1 + gn_3m_1 + hm_1n_2 + hm_2n_1 \quad (10)$$

$$D \equiv an_1^2 + bn_2^2 + cn_3^2 + 2fn_2n_3 + 2gn_1n_3 + 2hn_1n_2 \quad (11)$$

$$A' \equiv B^2 + C^2 - AD \quad (12)$$

$$B' \equiv -A^2 \quad (13)$$

圓心：

$$z'''_{o1} = \pm \sqrt{-B'_1/A'_1} r \quad (14)$$

$$x'''_{o1} = -(B'_1/A'_1) z'''_{o1} \quad (15)$$

$$y'''_{o1} = -(C'_1/A'_1) z'''_{o1} \quad (16)$$

半徑：

$$r = \frac{-h}{K[\pm \sqrt{-B'_1/A'_1} \pm \sqrt{-B'_2/A'_2}]} \quad (17)$$

其中 h 為攝影機沿 z_c 方向移動的距離，

$$K = \frac{k}{l_1m_2 - l_2m_1} \quad (18)$$

$$k = -l_3m_2n_1 + l_3m_1n_2 + l_2m_3n_1 - l_1m_3n_2 + l_1m_2n_3 - l_2m_1n_3 \quad (19)$$

4 應用實例

1) 實驗目的

實驗所估測的目標為一圓柱體，目的則是要得到圓柱體上圓平面之圓心座標及半徑，經實際量測後得到圓柱體之半徑為 20 mm。

2) 影像處理

進行位置估測的第一步是利用影像處理將圓平面的邊緣擷取出來，圖 1(a) 是經由視覺系統所擷取之影像，圖 1(b) 則是經邊緣偵測及去雜訊演算法後所得之影像，而由此影像上得到之像素點為 198 點，圖 2 則是影像二之結果，所得之像素點為 256 點。

3) 圓平面法向量

取得邊緣影像資訊；可計算出影像平面上的橢圓方程式 (2)，其係數列於

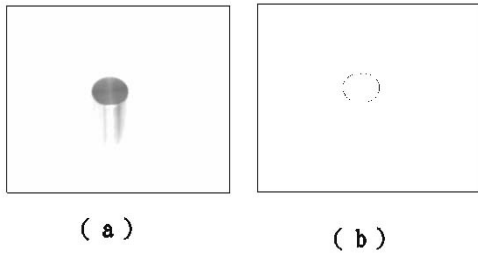


圖 1: 影像一

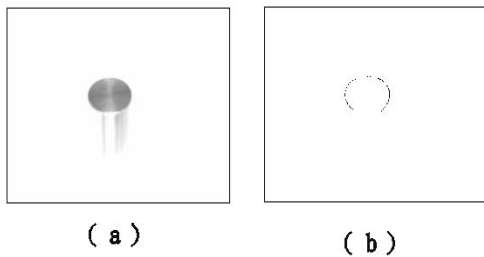


圖 2: 影像二

表 1。

係數	影像一	影像二
a	-1.096E-3	-4.020E-4
b	-2.837E-5	-1.079E-5
c	-2.155E-3	-7.639E-4
d	-5.067E-2	-1.944E-2
e	1.112E-1	3.553E-2

利用橢圓方程式之係數，可得空間中圓平面法向量 (0.01113, 0.691951, -0.721862)

4) 圓心及半徑

最後則是算出空間中圓平面之半徑及其圓心在世界座標中的位置，計算結果如下所示。

- 圓心 : (17.08348 , -1.598671 , 30.7581955)
- 半徑 : 19.365362 mm

5 結論

由實際應用例子的結果可知，本計畫所採用的解析幾何方法能夠準確地估測出圓柱體在空間中的位置，並將位置資訊傳送至伺服系統進行後續的組裝工作，而未來的研究方向則是將此估測演算法整合至組裝系統上，更進一步地發展功能更強大的影像處理方法，將目標物自複雜背景中把邊緣資訊擷取出來，並運用本計畫所討論之空間位置估測方法，重建空間中之位置。如此一來便能應用於工業界自動零組件組裝的工作。

參考文獻

- [1] M. J. Magee and J. K. Aggarwal, *Determining the position of a robot using a single calibration object*, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat, pp140-149, 1984
- [2] B. Hussain and M. R. Kabuka, *Real-time system for accurate three-dimensional position determination and verification*, IEEE Trans. Robotics Automat, Vol6, no1, pp31-43, 1990
- [3] P.G. Mulgaonkar, *Analysis of perspective line drawings using hybrid State Univ*, Ph. D. dissertation, Virginia Polytech. Inst. and State Univ., Blacksburg, VA, 1984.
- [4] H. S. Sawhney, J. Otiensis, and A. R. Hanson, *Description from image trajectories of rotational motion*, Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Comput. Vzsion (Osaka, Japan), Dec. 1990, pp.494-498
- [5] Reza Safaee-Rad, I. Tchoukanov, Kenneth Carless and Bensiyon Benhabib, *Three-Dimensional Location Estimation of Circular Features for Machine Vision*, IEEE Trans. Robotics Automat, Vol.8, no5, pp624-640, 1992.
- [6] R. Safaee-Rad, Y- C. Smith, B. Benhabib, and I. Tchoukanov, *An analytical method for the 3D-location estimation of circular features for an active-vision system*, Proc. IEEE Int. Conf Syst. Man Cyber (Los Angeles), Nov. 1990, pp215-220.
- [7] E. Mosnat, *Problemes of Geometry Analysis*, Vol.3, 3rd ed, Paris:Vuibert, 1921.
- [8] R.J.T.Bell, *An Elementary Treatise on Coordinated Geoametry of Three Dimensions*, 3rd ed, London:Macmillan, 1944.
- [9] John Canny, *A Computational Approach to Edge Detection*, IEEE trans. on PAMI Vol. PAMI-8, No.6 Nov 1986.