

# 通用型“手-眼”式多关节机器人视觉系统物像关系的研究

李 严 吴 林 范 伟

(哈尔滨工业大学九系)

**摘要** 本文着重研究了“手-眼”式通用型多关节机器人视觉系统中基体坐标系, 物体坐标系和图象坐标系之间的关系, 利用空间坐标系的投影变换和映射等方法, 推导了“手-眼”式机器人系统中摄像机图象点和空间点对应的数学关系式, 同时对固定式也进行了探讨, 本文以多关节机器人视觉系统的实际情况为基础, 在实际的机器人坐标系上导出了一个简便实用的算法, 可以通过对摄像机摄取的图象中的点的坐标运算, 求出其对应的空间点在机器人基体坐标中的坐标, 因而能迅速准确地引导机器人根据视觉图象正确地运行到所求的空间点的位置。

**关键词:** 机器人, 机器人视觉, 焊接。

## 1 引言

带有视觉的多关节机器人(这里主要指以摄像机为视觉信号输入的机器人)在智能机器人中占有特别重要的意义。

由于视觉机器人首先获得的信息是视觉图象, 因此在研制视觉机器人之前, 必须对空间点和图象点之间的关系及它们与机器人基体坐标系之间的关系进行深入的研究。

文献[1]、[2]介绍了若干视觉变换关系式, 但对我们的系统不适用或不完全适用, 文献[3]、[4]介绍了若干视觉变换的理论。

在多关节焊接机器人视觉系统的研究中, 由于焊缝大多是平面曲线和空间曲线的形式, 上述关系就显得特别重要。

多关节机器人视觉系统根据摄像机安放形式可分为二种(如图 1, 图 2), 一种是固定式, 另一种是“手-眼”式(EYE-IN-HAND)。

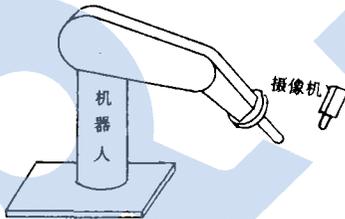


图 1 摄像机固定式

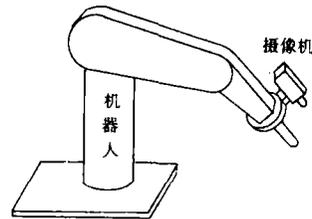


图 2 手-眼一体式

本文所提到的机器人视觉系统, 一般由如下部分组成: ①机器人本体; ②摄像机; ③图象处理器; ④计算机系统。

## 2 “手-眼”式视觉机器人的物像关系式

### 2.1 三维空间的逆投影变换

图象上的每个点 $(x', z')$ 在三维空间中可能是许多点的投影, 根据透视原理, 所有具有投影 $(x', z')$ 的点都必定在一条以 $(x', z')$ 点消失并通过镜头的线段上。

按照图 3, 镜头位于 $(x_p, y_p, z_p)$ 点,  $f$ 是镜头离  $X'-Z'$ 平面的距离。旋转变换后的坐标系 $\bar{X}-\bar{Y}-\bar{Z}$ 的原点镜头, 图象上的点 $(x', z')$ 在此三维空间上的坐标为 $(x', f, z')$ 。(可以求出

$f = (\mu + 1)F$ , 其中  $\mu$  为放大倍数,  $F$  为焦距。)各坐标系关系见图 4.

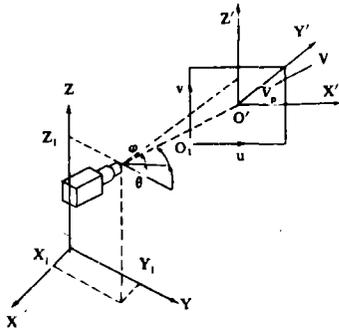


图3 坐标关系

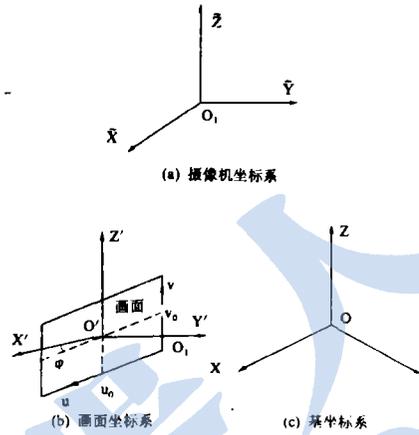


图4 各坐标系关系

由图 4 可见, 在  $X'-Y'-Z'$  坐标系中投影点坐标为  $(x', z')$ ; 在  $\tilde{X}\tilde{Y}\tilde{Z}$  坐标系中投影点为  $(x', f, z')$ ; 所求的是  $(x', z')$ , 在基座坐标系  $X-Y-Z$  中所反映的空间点坐标.

为在基座坐标系中表示  $(x', f, z')$ , 我们按如下步骤, 先平移  $O_1$  到原点  $O$ , 其次旋转  $\tilde{X}-\tilde{Z}$  平面  $-\psi$ , 转  $\tilde{Y}-\tilde{Z}$  平面  $-\varphi$ , 最后转  $\tilde{X}-\tilde{Y}$  平面  $-\theta$ .

对于更一般的情况, 将图象中的原点  $O'$  移至  $O_1$ , 在  $U-V$  坐标系中  $(x', z')$  的坐标为

$$u = u_0 + K_u x'; \quad v = v_0 + K_v z'$$

$K$  是测量单位和投影单位的比例系数.

$$x' = \frac{u - u_0}{K_u}; \quad z' = \frac{v - v_0}{K_v}$$

取齐次坐标

令

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{u_0}{K_u} \\ \frac{1}{K_u} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{K_v} & -\frac{v_0}{K_v} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

再令

$$T_1 = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\varphi & -s\varphi & 0 \\ 0 & s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} c\psi & 0 & -s\psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s\psi & 0 & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

分别为转动矩阵。式中  $s = \sin$ ,  $c = \cos$ , 下同。

又令

$$\mu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_l \\ 0 & 1 & 0 & y_l \\ 0 & 0 & 1 & z_l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{为平移矩阵。有:} \quad \begin{bmatrix} x' \\ f \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} u \\ f \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

而  $(x^0, y^0, z^0)$  为  $(u, f, v)$  对应的空间点, 则

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mu \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot D \cdot \begin{bmatrix} u \\ f \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_u}(c\theta c\psi + s\theta s\varphi s\psi) & -s\theta c\varphi \\ \frac{1}{k_u}s\theta c\psi - c\theta s\varphi s\psi & c\theta c\varphi \\ \frac{1}{k_u}c\varphi s\psi & s\varphi \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ f \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{1}{K_v}(-c\theta s\psi + s\theta s\varphi c\psi) - \frac{u_0}{k_u}(c\theta c\varphi + s\theta s\varphi s\psi) - \frac{v_0}{K_v}(s\theta s\varphi c\psi - c\theta s\psi) + x_l \\ & \frac{1}{K_v}(-s\theta s\psi - c\theta s\varphi c\psi) - \frac{u_0}{K_u}(s\theta c\psi - c\theta s\varphi s\psi) - \frac{v_0}{K_v}(-s\theta s\psi - c\theta s\varphi c\psi) + y_l \\ & \frac{1}{K_v}c\varphi c\psi - \frac{u_0}{K_u}c\varphi s\psi - \frac{v_0}{K_v}c\varphi c\psi + z_l \\ & 0 \quad 1 \end{aligned} \right\} \begin{bmatrix} u \\ f \\ v \\ 1 \end{bmatrix}$$

为简化分析并不失一般性, 令角  $\psi = 0$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} X^0 \\ Y^0 \\ Z^0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{K_u} c\theta & -s\theta c\varphi & \frac{1}{K_v} s\theta s\varphi & -\frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1 \\ \frac{1}{K_u} s\theta & c\theta c\varphi & \frac{1}{K_v} (-c\theta s\varphi) & -\frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1 \\ 0 & s\varphi & \frac{1}{K_v} c\varphi & -\frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ f \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

一条投影在 $(U, V)$ 的线是由许多点组成的,可由下式表示:

$$\left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} / \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \end{bmatrix} \quad \lambda = \text{常量} \right\}$$

$$= \lambda \begin{bmatrix} \frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1 \\ \frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1 \\ f\theta s\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

## 2.2 逆投影变换的应用

逆投影变换的一个重要作用就是使用点 $(x, y, z)$ 的投影点坐标 $(u, v)$ , 在第三个坐标已知情况下确定另外两个坐标。

要确定空间点的三个坐标 $(x, y, z)$ , 仅靠图象点坐标 $(u, v)$ 是不够的, 必须有附加条件。而在实际的多关节视觉机器人使用中, 尤其是在焊接条件下, 往往可以预先通过某些方法来确定一个坐标(例如高度坐标 $z$ )。

设一个投影坐标为 $(u, v)$ 的点的 $z$ 坐标已知, 且 $z \neq 0$ , 则可以根据 $(u, v)$ 确定三维空间的另两个坐标 $(x, y)$ 。

$$\text{设 } z = \lambda \left( f\theta s\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1 \right)$$

解之

$$\lambda = z \left( f\theta s\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1 \right)^{-1}$$

代回到(2-2)式, 有:

$$x = z \cdot \frac{\frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1}{f\theta s\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1} \quad (2-3)$$

$$y = z \cdot \frac{\frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1}{f\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1} \quad (2-4)$$

$z=0$  时, 有:

$$x = \frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1$$

$$y = \frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1$$

同理可知  $y \neq 0$  时

$$x = y \cdot \frac{\frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1}{\frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1} \quad (2-5)$$

$$z = y \cdot \frac{f\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1}{\frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1} \quad (2-6)$$

$y=0$  时有:

$$x = \frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1$$

$$z = f\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1$$

在  $x$  已知且  $x \neq 0$  时, 有:

$$y = x \cdot \frac{\frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1}{\frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1} \quad (2-7)$$

$$z = x \cdot \frac{f\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1}{\frac{u}{K_u} c\theta - f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} s\theta s\varphi - \frac{u_0}{K_u} c\theta - \frac{v_0}{K_v} s\theta s\varphi + x_1} \quad (2-8)$$

$x=0$  时, 有:

$$y = \frac{u}{K_u} s\theta + f\theta c\varphi + \frac{v}{K_v} (-c\theta s\varphi) - \frac{u_0}{K_u} s\theta - \frac{v_0}{K_v} (-c\theta s\varphi) + y_1$$

$$z = f\varphi + \frac{v}{K_v} c\varphi - \frac{v_0}{K_v} c\varphi + z_1$$

### 3 摄象机固定式物像关系式

在这种方式中摄象机与物体的空间位置关系一定, 不随机器人的运动而变化, 因此可以采用简单的方法建立物像关系。

### 3.1 摄像机配准

此种方式是首先要确定摄像机图象坐标与空间点的关系方程式。

配准方法如下。取齐坐标，实际上这是二维空间与三维空间的映射

$$\begin{aligned} tx' &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14} \\ ty' &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24} \\ t &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34} \end{aligned} \quad (3-1)$$

将  $t$  用等式代替有:

$$\begin{aligned} a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14} - a_{31}xx' - a_{32}yy' - a_{33}zz' - a_{34}x' &= 0 \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24} - a_{31}xy' - a_{32}yy' - a_{33}zy' - a_{34}y' &= 0 \end{aligned}$$

给定至少六个已知空间点和它们相应的图象点，投影变换系数矩阵即可确定。

### 3.2 测量空间点的坐标

仅有空间点在一幅图象上的投影点还不能够确定出空间点的三个坐标。为此可采用如下方法。

给出两张摄影图象，其几何参数已知，但两图象的取景位置不同，故对同一个空间点  $(x, y, z)$ ，其投影变换系数矩阵不同。

令第一幅图象的投影矩阵参数为  $a_{ij}$  有:

$$\begin{aligned} tx' &= a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z + a_{14} \\ ty' &= a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z + a_{24} \\ t &= a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z + a_{34} \end{aligned}$$

消去  $t$ ，得:

$$\begin{aligned} (a_{11} - a_{31}x')x + (a_{12} - a_{32}x')y + (a_{13} - a_{33}x')z &= (a_{34}x' - a_{14}) \\ (a_{21} - a_{31}y')x + (a_{22} - a_{32}y')y + (a_{23} - a_{33}y')z &= (a_{34}y' - a_{24}) \end{aligned}$$

由上式可见，若三个空间坐标中有一个已知，即可根据图象坐标直接求出另外一个坐标。

同理，第二幅图象定义的等式为

$$\begin{aligned} (b_{11} - b_{31}x'')x + (b_{12} - b_{32}x'')y + (b_{13} - b_{33}x'')z &= (b_{34}x'' - b_{14}) \\ (b_{21} - b_{31}y'')x + (b_{22} - b_{32}y'')y + (b_{23} - b_{33}y'')z &= (b_{34}y'' - b_{24}) \end{aligned}$$

$b_{ij}$  为第二幅图象变换矩阵的参数，并且上二式中  $x, y, z$  是空间点坐标， $x', y'$  和  $x'', y''$  分别是空间点  $x, y, z$  在二幅图象上的坐标。则有矩阵等式:

$$\begin{bmatrix} a_{12} - a_{31}x' & a_{12} - a_{32}x' & a_{13} - a_{33}x' \\ a_{21} - a_{31}y' & a_{22} - a_{32}y' & a_{23} - a_{33}y' \\ b_{11} - b_{31}x'' & b_{12} - b_{32}x'' & b_{13} - b_{33}x'' \\ b_{21} - b_{31}y'' & b_{22} - b_{32}y'' & b_{23} - b_{33}y'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{34}x' - a_{14} \\ a_{34}y' - a_{24} \\ b_{34}x'' - b_{14} \\ b_{34}y'' - b_{24} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

或

$$PV = F$$

一般  $P$  可逆，则

$$V = P^{-1}F$$

上述矩阵等式有四个线性独立等式而只有三个未知数, 有解。

#### 4 结论

本文对于解决通过摄象机图象求取视觉机器人坐标系中空间点的位置提出了一套简单的运算关系式, 运用这些方程式可以迅速求出“摄象机固定式和“手-眼”式视觉机器人视场中空间点的实际位置, 对于机器人配置视觉系统的研究和应用提供了实用的方法。

文中研究的算法已在自行开发的“金字-I”型机器人视觉系统上应用, 证明实用、可靠。

#### 参 考 文 献

- 1 Sundaram Ganapathy. Decomposition of transformation matrices for robot vision. Int Conf on Rob IEEE, 1984: 130-139
- 2 钱瑞明等. 机器人视觉变换矩阵的研究. 首届全国机器人学术讨论会论文集, 1987: 697-706
- 3 Arthur C Sanderson. Adaptive visual servo control of robots. In: Alan Pugh, ed. Robot Vision, London, 1983: 107-116
- 4 Brian Carlisle and Scot Roth. The Puma / VS-100 robot vision system. In: Alan Push, ed Robot Vision, London, 1983: 313-323

## SOME STUDIES OF THE RELATIONS BETWEEN OBJECT AND IMAGE IN THE VISION SYSTEM OF A GENERAL MULTI-JOINT“HAND-EYE” ROBOT

*LI Yan WU Lin FAN Wei*

(Dpt.9, Harbin Institute of Technology)

#### Abstract

This paper studies in particular the relationships between the following three CS(coordinates systems) in a vision system of a general multi-joint“hand-eye”robot: (1) CS of the base; (2) CS of the object; (3) CS of the image. By utilizing the projection transformation and mapping etc. as mediums, we derived out some mathematical relations between the camera image point and corresponding space point in a “hand-eye” robot system. Meanwhile about fixed type some explorations have also been made.

A simple and practical algorithm has been derived out for accurately and quickly leading the robot to proper point in space.

**Keywords:** robot, robot vision, weld.

#### 告第二届全国机器人学术会议优秀论文的作者

按第二届全国机器人学术会议程序委员会的要求, 获该届会议的优秀论文将由我刊安排发表。请这些论文的作者们将您的优秀论文按我刊要求的项目(如中英文摘要, 中英文关键词等)和格式(如参考文献表的格式等)书写清楚寄来。

《机器人》编辑部

1990年4月