

用于机器人离线编程的作业标定算法

宋月娥，吴林，田劲松，戴明

(哈尔滨工业大学现代焊接技术国家重点实验室，哈尔滨 150001)

摘要：随着机器人焊接离线编程技术的应用与发展，机器人标定作为离线编程实用化的关键技术之一，得到越来越多的研究人员的重视。从离线编程系统实用化的角度出发，针对机器人离线规划时实现实际作业对象与离线仿真环境中的模型对象的调整与匹配问题进行了研究。并根据作业对象模型特征，分别通过工件标定和路径标定两种途径实现。详细进行了这两类标定算法的研究，提出了正交平面工件标定、圆形基准四点工件标定和辅助特征点三点工件标定三种工件标定方法和采用最小二乘拟合算法的路径标定算法。从而可以针对工件特点，比较全面地解决机器人离线编程系统应用过程中作业标定问题。

关键词：机器人；工件标定；路径标定；离线编程

中图分类号：TP242 文献标识码：A 文章编号：0253—360X(2002)03—32—05

宋月娥



0 序 言

传统的机器人标定概念主要是指从误差源与机器人误差之间的固有函数规律出发，采用精密测试仪器测得机器人末端的多点位姿误差，进而应用最小二乘等方法，辨识出各误差源大小，最后通过采用附加控制算法或修改原控制算法来补偿机器人的误差^[1]，从而达到提高机器人精度目的。随着单台机器人向机器人柔性工作站和机器人柔性生产线的发展，机器人标定概念已经得到进一步的拓广^[2,3]，作者根据其功能进行了分类，将机器人标定分为机器人本体标定、变位机或其它辅助设备的标定和机器人工作单元标定。其中机器人工作单元标定包括机器人基坐标系标定和机器人作业标定。

1 机器人作业标定

从离线编程实用化的角度出发，将机器人离线规划时实现实际作业对象与离线仿真环境中的模型对象的调整与匹配问题称为机器人作业标定。根据作业对象模型特征，作业标定可以分别通过工件标定和路径标定两种途径实现。

1.1 工件标定

工件标定是针对可以进行准确的CAD图形建

模的工件，通过调整仿真单元中工件与实际环境中的工件实现位姿匹配的校正问题。图1所示为工件标定原理图。 O_b 为机器人基坐标系， O_r 为实际环境中工件坐标系， O_s 为仿真单元中工件坐标系。工件标定的实质就是通过确定仿真单元中工件坐标系到机器人基坐标系的转换矩阵 T_b^s 和实际工件坐标系到机器人基坐标系转换矩阵 T_b^r ，然后由 $T_b = T_b^s T_s^r$ 得到，即

$$T_s = (T_b^s)^{-1} T_b \quad (1)$$

式中： T_s 为仿真单元中工件坐标系到实际工件坐标系的转换矩阵。最后根据该转换矩阵实现工件调整。

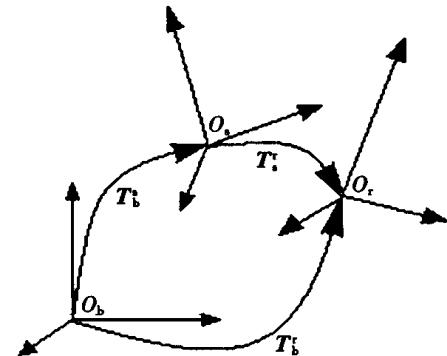


图 1 工件标定原理图

Fig. 1 Principle diagram of part calibration

基于这种思想，作者针对一般工件的特点，提出正交平面工件标定法，圆形基准工件四点标定法和辅助特征点三点工件标定法。

1.2 路径标定

收稿日期：2001-11-26

基金项目：国家自然科学基金资助项目(59635160)；高校博士点基金资助项目(98021311)

路径标定是针对那些尺寸比较大、形状复杂、作业路径较多且有较大偏差的工件,由于工件装配的准确建模存在困难,工件标定无法保证机器人作业路径的匹配精度。路径标定与工件标定的最大区别在于:标定实现所调整的对象不同。工件标定通过匹配仿真单元与实际单元工件坐标系,调整仿真单元中的工件参数;而路径标定,由于工件图形模型的误差,仅仅匹配工件坐标系不能保证机器人作业路径实现匹配,因此调整对象不是工件参数,而是通过调整依附于工件上的路径保证机器人作业正确执行。图2所示为路径标定原理图。 O_b 为机器人基坐标系, $f_s(x_s, y_s, z_s)$ 为仿真单元的模型路径描述, $f_r(x_r, y_r, z_r)$ 为实际环境中路径描述。路径标定的实质就是通过确定仿真单元中模型路径到实际环境中路径转换矩阵 X^r_s , 满足

$$X^r_s \times f_s(x_s, y_s, z_s) = f_r(x_r, y_r, z_r) \quad (2)$$

最后根据该转换矩阵实现路径调整。

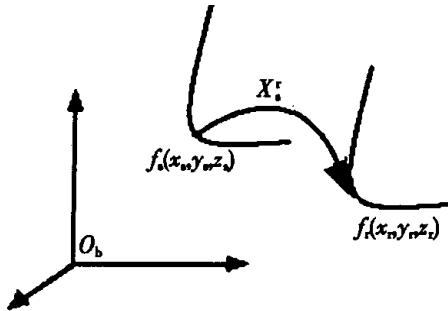


图2 路径标定原理图

Fig. 2 Principle diagram of path calibration

基于这种思想,作者针对路径特点,提出最小二乘路径标定法。

针对作业对象具体特点,采用工件标定与路径标定相结合,从而可以比较全面地解决机器人离线编程中的作业标定问题。

2 正交平面工件标定法

图3为正交平面工件标定的算法原理示意图。该方法基于测量三个正交平面上的6点实现工件调整。 $O_b-X_bY_bZ_b$ 为机器人基坐标系; $O_r-X_rY_rZ_r$ 为实际工作单元的6点确定的工件坐标系; $O_s-X_sY_sZ_s$ 为仿真工作单元的6点确定的工件坐标系。具体实现过程如下。

仿真单元得到的6点坐标可以通过机器人正运动学计算得到,假定分别为 $s_1(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$, $s_2(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$, $s_3(x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})$, $s_4(x_{s4}, y_{s4}, z_{s4})$, $s_5(x_{s5}, y_{s5}, z_{s5})$, $s_6(x_{s6}, y_{s6}, z_{s6})$, 且 s_1, s_2 和 s_3 位于第一个平面上, s_4 和 s_5 位于第二个平面上, s_6 位于第三个平面上。

面上。

则 s_1, s_2 和 s_3 确定的平面方程可表示为 $A_{s1}(x - x_{s1}) + B_{s1}(y - y_{s1}) + C_{s1}(z - z_{s1}) = 0$, 式中:

$$\begin{aligned} A_{s1} &= (z_{s3} - z_{s1})(y_{s2} - y_{s1}) - (z_{s2} - z_{s1})(y_{s3} - y_{s1}), \\ B_{s1} &= (z_{s2} - z_{s1})(x_{s3} - x_{s1}) - (z_{s3} - z_{s1})(x_{s2} - x_{s1}), \\ C_{s1} &= (x_{s2} - x_{s1})(y_{s3} - y_{s1}) - (x_{s3} - x_{s1})(y_{s2} - y_{s1}). \end{aligned}$$

定义该平面的法矢量为仿真单元中工件坐标系的 z_s 轴矢量,因此可以表示为

$$z_s = a_{sz}i + b_{sz}j + c_{sz}k \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_{sz} &= A_{s1} / \sqrt{A_{s1}^2 + B_{s1}^2 + C_{s1}^2}, \\ b_{sz} &= B_{s1} / \sqrt{A_{s1}^2 + B_{s1}^2 + C_{s1}^2}, \\ c_{sz} &= C_{s1} / \sqrt{A_{s1}^2 + B_{s1}^2 + C_{s1}^2}. \end{aligned}$$

根据右手法则,有

$$x_s = p_{4s \rightarrow 5s} \times z_s = a_{sx}i + b_{sx}j + c_{sx}k,$$

式中: $p_{4s \rightarrow 5s}$ 为 $\{x_{s5} - x_{s4}, y_{s5} - y_{s4}, z_{s5} - z_{s4}\}$ 的单位化矢量。

根据正交关系, y_s 轴矢量为

$$y_s = z_s \times x_s = a_{sy}i + b_{sy}j + c_{sy}k.$$

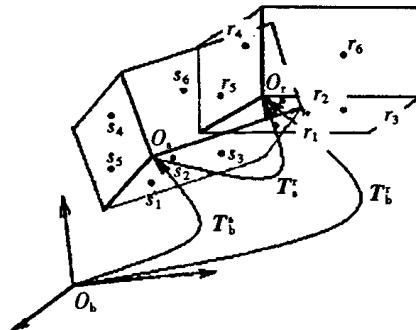


图3 正交平面工件标定的算法示意图

Fig. 3 Diagram of orthogonal plane part calibration

那么已知三个正交平面的法矢量和三个平面上的三个点,则可以得到三个平面方程,即

$$\begin{cases} a_{s1}(x - x_{s1}) + b_{s1}(y - y_{s1}) + c_{s1}(z - z_{s1}) = 0, \\ a_{s2}(x - x_{s2}) + b_{s2}(y - y_{s2}) + c_{s2}(z - z_{s2}) = 0, \\ a_{s3}(x - x_{s3}) + b_{s3}(y - y_{s3}) + c_{s3}(z - z_{s3}) = 0. \end{cases}$$

联立求解,得到仿真单元中工件坐标系原点 O_s (x_s, y_s, z_s)。

$$x_s = [s_3(b_{s1}c_{s2} - b_{s2}c_{s1}) + s_2(b_{s3}c_{s1} - b_{s1}c_{s3}) + s_1(b_{s2}c_{s3} - b_{s3}c_{s2})] / D,$$

$$y_s = [s_3(c_{s1}a_{s2} - c_{s2}a_{s1}) + s_2(c_{s3}a_{s1} - c_{s1}a_{s3}) + s_1(c_{s2}a_{s3} - c_{s3}a_{s2})] / D,$$

$$z_s = [s_3(a_{s1}b_{s2} - a_{s2}b_{s1}) + s_2(a_{s3}b_{s1} - a_{s1}b_{s3}) + s_1(a_{s2}b_{s3} - a_{s3}b_{s2})] / D,$$

式中:

$$s_3 = [x_{s6} \ y_{s6} \ z_{s6}] \cdot \begin{bmatrix} a_{sz} \\ b_{sz} \\ c_{sz} \end{bmatrix},$$

$$s_2 = [x_{s4} \ y_{s4} \ z_{s4}] \cdot \begin{bmatrix} a_{sy} \\ b_{sy} \\ c_{sy} \end{bmatrix},$$

$$s_1 = [x_{s1} \ y_{s1} \ z_{s1}] \cdot \begin{bmatrix} a_{sx} \\ b_{sx} \\ c_{sx} \end{bmatrix}.$$

$$D = c_{sx}(a_{sy}b_{sz} - a_{sz}b_{sy}) + c_{sy}(a_{sz}b_{sx} - a_{sx}b_{sz}) + c_{sz}(a_{sx}b_{sy} - a_{sy}b_{sx}).$$

从而得到基坐标系到工件坐标系的位姿转换矩阵 T_b^s , 即

$$T_b^s = \begin{bmatrix} a_{sx} & a_{sy} & a_{sz} & x_s \\ b_{sx} & b_{sy} & b_{sz} & y_s \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{sz} & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

实际单元示教得到的 6 点坐标也可以通过机器人正运动学计算得到。相似地, 也可以计算得到实际单元中机器人基坐标系到工件坐标系的转换矩阵 T_b^r 。

确定了 T_b^s 和 T_b^r 之后, 根据式(1), 便可以得到工件调整矩阵, 从而实现工件标定。这种工件标定法适用于有正交加工表面的工件。其优点是对平面上实际点的位置没有对应要求。

3 圆形基准工件四点标定法

对于具有圆形定位基准的工件, 原则上, 工件的调整只需要满足基准圆重合, 另外再根据工件上的某特征点对应, 绕基准圆过圆心的法向轴线旋转适当角度即可。因此该方法采用四点法, 其中三点为基准圆上的任意三点, 另外一点为工件上任一明显特征点(例如加工路径的起点或终点等)。

如图 4 所示, 假定 $P_{s1}(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ 、 $P_{s2}(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$ 、 $P_{s3}(x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})$ 三点为仿真环境中工件的基准圆上的任意三点, $P_{s4}(x_{s4}, y_{s4}, z_{s4})$ 为工件上任意一特征点。则由三点确定的圆平面的法矢量和圆心 $O_s(x_s, y_s, z_s)$ 可以确定。

点 P_{s1} 、 P_{s2} 、 P_{s3} 确定的圆平面方程可表示如下

$$A_{s1}(x - x_{s1}) + B_{s1}(y - y_{s1}) + C_{s1}(z - z_{s1}) = 0, \quad (5)$$

式中: A_{s1} 、 B_{s1} 、 C_{s1} 含义同前。

则平面的法矢量定义为仿真单元中工件坐标系的 z_s 轴矢量, 确定方法与式(3)相同。

$$z_s = a_{sz}\mathbf{i} + b_{sz}\mathbf{j} + c_{sz}\mathbf{k}.$$

圆心 $O_s(x_s, y_s, z_s)$, 则可以根据圆方程

$$(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2 = R^2$$

有:

$$(x_{s1} - x_s)^2 + (y_{s1} - y_s)^2 + (z_{s1} - z_s)^2 = R^2, \quad (6)$$

$$(x_{s2} - x_s)^2 + (y_{s2} - y_s)^2 + (z_{s2} - z_s)^2 = R^2, \quad (7)$$

$$(x_{s3} - x_s)^2 + (y_{s3} - y_s)^2 + (z_{s3} - z_s)^2 = R^2, \quad (8)$$

然后又因为圆心在圆平面上, 得方程

$$A_{s1}(x_s - x_{s1}) + B_{s1}(y_s - y_{s1}) + C_{s1}(z_s - z_{s1}) = 0. \quad (9)$$

联立式(6)、(7)、(8)、(9)解得圆心坐标。于是可以得到工件坐标系的 y_s 轴矢量

$$y_s = L_{O_{s4}} \times z_s = a_{sy}\mathbf{i} + b_{sy}\mathbf{j} + c_{sy}\mathbf{k},$$

式中: $L_{O_{s4}}$ 为 $\{x_{s4} - x_s, y_{s4} - y_s, z_{s4} - z_s\}$ 单位化矢量。

根据右手法则, x_s 轴矢量为

$$x_s = y_s \times z_s = a_{sz}\mathbf{i} + b_{sz}\mathbf{j} + c_{sz}\mathbf{k}.$$

因此, 可以得到仿真单元基坐标系到工件坐标系的位姿转换矩阵 T_b^s ,

$$T_b^s = \begin{bmatrix} a_{sx} & a_{sy} & a_{sz} & x_s \\ b_{sx} & b_{sy} & b_{sz} & y_s \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{sz} & z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

同理可以得到实际工作单元的基坐标系到工件坐标系的位姿转换矩阵 T_b^r 。最后根据式(1)得到仿真单元中的工件坐标系到实际单元的工件坐标系的转换矩阵 T_s^r 。

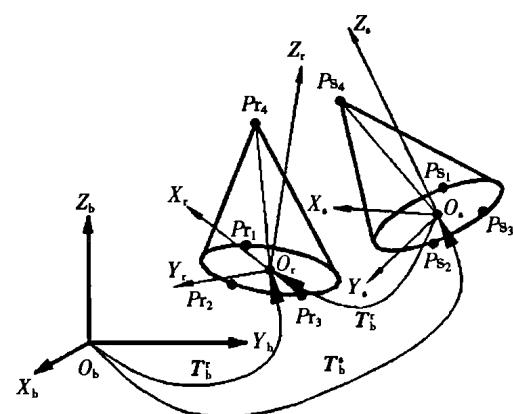


图 4 圆形基准工件四点标定算法

Fig. 4 Diagram of four points calibration of circular reference part

4 辅助特征点三点工件标定法

对于更一般的可以在工件上找到三个不共线的特征点的情况, 则可以采用更通用的辅助特征点三点工件标定法。该方法要求分别在实际环境中和仿真环境中得到两组对应的三个特征点, 通过特征点匹配, 实现工件调整。

如图5所示, 假定三个特征点分别为 $P_{s1}(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$ 、 $P_{s2}(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$ 和 $P_{s3}(x_{s3}, y_{s3}, z_{s3})$ 。则这三点确定的平面方程可表示为

$$A_{s1}(x - x_{s1}) + B_{s1}(y - y_{s1}) + C_{s1}(z - z_{s1}) = 0, \quad (11)$$

式中: A_{s1} 、 B_{s1} 、 C_{s1} 含义同前。

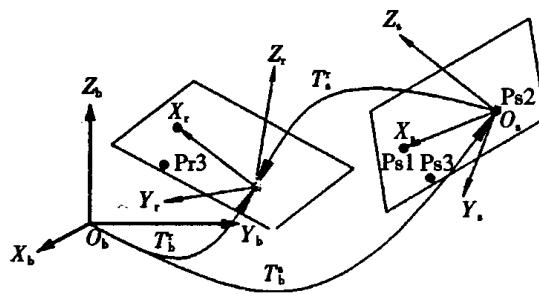


图5 辅助特征点三点工件标定算法

Fig. 5 Diagram of three points calibration of auxiliary feature points

同前面一样, 平面的法矢量定义为仿真单元中工件坐标系的 z_s 轴矢量, 可以表示为

$$z_s = a_{sz}i + b_{sz}j + c_{sz}k.$$

设定工件坐标系的原点为 $P_{s2}(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$, 工件坐标系的 x_s 轴矢量由 $P_{s1}P_{s2}$ 确定, 即

$$x_s = a_{sx}i + b_{sx}j + c_{sx}k,$$

式中:

$$a_{sx} = (x_{s1} - x_{s2}) / \sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2 + (z_{s1} - z_{s2})^2};$$

$$a_{sy} = (y_{s1} - y_{s2}) / \sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2 + (z_{s1} - z_{s2})^2};$$

$$X_s^r = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\cos\theta\sin\psi & \cos\phi\sin\theta & x \\ \sin\phi\cos\theta\cos\psi & -\sin\phi\cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta & y \\ -\sin\theta\cos\psi & \sin\theta\sin\psi & \cos\theta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

那么由式(2)有

$$X_s^r \cdot \begin{bmatrix} x_{si} \\ y_{si} \\ z_{si} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \\ z_{ri} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

式中, $\{x_{si}, y_{si}, z_{si}\}$ 为模型路径 f_s 上测量点的位置,

$$a_{sz} = (z_{s1} - z_{s2}) / \sqrt{(x_{s1} - x_{s2})^2 + (y_{s1} - y_{s2})^2 + (z_{s1} - z_{s2})^2}.$$

因此, 根据正交关系, y_s 轴矢量为

$$y_s = z_s \times x_s = a_{sy}i + b_{sy}j + c_{sy}k,$$

得到仿真单元基坐标系到工件坐标系的位姿转换矩阵 T_b^r ,

$$T_b^r = \begin{bmatrix} a_{sx} & a_{sy} & a_{sz} & x_{s2} \\ b_{sx} & b_{sy} & b_{sz} & y_{s2} \\ c_{sx} & c_{sy} & c_{sz} & z_{s2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

同样道理可以得到实际工作单元的基坐标系到工件坐标系的位姿转换矩阵 T_b^s 。仿真单元中的工件坐标系到实际单元的工件坐标系的转换矩阵 T_s^r 由式(1)得到, 最后根据该转换矩阵实现工件调整。

5 最小二乘路径标定法

对于那些路径比较复杂, 作者提出了最小二乘拟合的路径标定法。如图6所示, $P_{rl,i}$ ($i = 1, 2, \dots, s$) 为实际路径上 $f_r(x_r, y_r, z_r)$ 的测量点, $P_{sl,i}$ ($i = 1, 2, \dots, s$) 为仿真环境中模型路径上 $f_s(x_s, y_s, z_s)$ 对应的测量点。

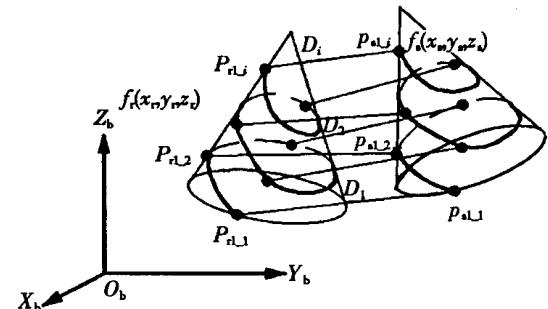


图6 最小二乘拟合路径标定法

Fig. 6 Diagram of least square fitting path calibration

因此, 作者假定从模型路径到实际路径的变换矩阵为 X_s^r , 即

$\{x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}\}$ 为实际路径 f_r 上的对应测量点的位置。 $\{\phi, \theta, \psi, x, y, z\}$ 为待求参数。

令 D_i ($i = 1, 2, \dots, s$) 为路径上对应测量点之间的距离, 即

$$D_i = \sqrt{(X_i - x_{ri})^2 + (Y_i - y_{ri})^2 + (Z_i - z_{ri})^2},$$

式中: $X_i = (\cos \phi \cos \theta \cos \psi - \sin \phi \sin \psi) x_{si} + (-\cos \phi \cos \theta \sin \psi - \sin \phi \sin \psi) y_{si} + \cos \phi \sin \theta z_{si} + x,$

$$Y_i = (\sin \phi \cos \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi) x_{si} + (-\sin \phi \cos \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi) y_{si} + \sin \phi \sin \theta z_{si} + y,$$

$$Z_i = -\sin \theta \cos \psi x_{si} + \sin \theta \sin \psi y_{si} + \cos \theta z_{si} + z,$$

令: $\bar{D} = 1/s \sum_{i=1}^s D_i.$

最后导出相对应点的位置误差的均方差表达式为

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s (D_i - \bar{D})^2}{s-1}}. \quad (15)$$

在此基础上, 以位置误差的均方差为目标函数, 进行最小二乘拟合求解得到 $\{\phi, \theta, \psi, x, y, z\}$, 从而由式(13)得到仿真单元中的模型路径到实际环境中对应路径的转换矩阵 X_s^r 。最后根据式(2)实现路径调整。

6 试验验证

本文以圆形基准工件为例进行了算法验证。图 7 为离线编程系统仿真单元中上载的四个示教点的信息, 其中三个点为圆基准上任意点, 一个点为起弧点。

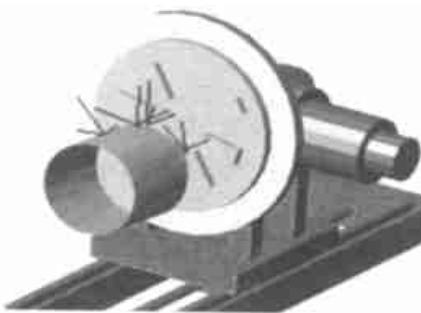


图 7 圆基准工件标定例图

Fig. 7 Calibration of circular reference part

然后利用相应的工件标定算法来校正工件的装卡位置, 并在离线编程系统中生成焊缝程序。图 8 所示为工件离线编程的仿真画面。图 9 为工件的实焊结果。

7 结论

随着机器人自动化、智能化的发展, 机器人离线



图 8 工件离线编程的仿真画面
Fig. 8 Off-line programming simulation images of the part



图 9 工件的实焊结果
Fig. 9 Actual welding results of the part

编程技术的研究与应用得到了越来越多机器人研究者的关注。通过详细地研究了机器人离线编程技术实用化过程中的工件标定问题, 并详细地进行了作业标定算法的研究, 提出了正交平面标定、圆形基准工件四点标定和辅助特征点三点标定三种工件标定方法和最小二乘拟合路径标定法, 从而可以根据作业对象特点, 比较全面地解决机器人离线编程系统中工件校正问题。

参考文献:

- [1] 杨建中, 黄真. 机器人误差补偿研究的发展[J]. 机器人技术与应用, 1996, (4): 205~210.
- [2] 赵东波, 熊有伦. 机器人离线编程系统的研究[J]. 机器人, 1997, 19(4): 314~320.
- [3] Deneb Robotics Inc. IGRIP online documentation-ultra arc calibration manual[M]. Troy, Michigan, USA, 1999.

作者简介: 宋月娥, 女, 1973 年出生, 博士研究生。研究领域: 机器人学、机器人离线编程技术等。

Email: songyuee73@yahoo.com.cn