

# 基于手眼立体视觉的弧焊机器人平面工件定位系统

李金泉<sup>1</sup>, 陈善本<sup>2</sup>, 吴 林<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

摘 要: 在工业生产中应用的焊接机器人都是示教再现式的机器人, 在批量生产时这种机器人要求每次工件定位必须一致, 否则需要重新示教; 带有离线编程系统的机器人同样存在工件定位问题, 如果工件定位不准, 焊接机器人无法按离线编程系统生成的路径完成焊接。作者针对平面工件开发了一套基于手眼立体视觉的弧焊机器人工件定位系统, 首先对摄像机的内外参数和机器人手眼关系进行标定; 然后控制机器人运动, 使安装在机器人末端的摄像机在两个不同的位置取景; 最后通过图像处理和立体视觉的方法来计算出平面工件在机器人基坐标系中的三维信息。试验表明该系统获取的工件定位信息精确。该系统为焊接机器人自主焊接奠定基础。

关键词: 图像处理; 立体视觉; 摄像机标定; 工件定位

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2003)04-09-05



李金泉

## 0 序 言

在焊接自动化中, 焊接机器人是实现焊接自动化的重要形式。焊接机器人是焊接自动化的革命性进步, 它突破了焊接刚性自动化传统方式, 开拓了一种柔性自动化的新方式。当前, 现在生产实践中应用的焊接机器人都是示教再现式机器人, 示教再现机器人在使用时需要进行轨迹示教, 当焊接对象改变时需要重新示教。在批量生产时, 每个工件的加工尺寸必须一致并且在夹具上定位也必须一致, 否则需要重新示教, 这就要求使用高精度的夹具, 造成生产成本的提高。带有离线编程系统的焊接机器人是通过离线编程系统事先规划好焊接轨迹, 然后将规划好的焊接路径下载到机器人控制器, 控制机器人进行焊接, 但这种焊接机器人同样要求工件尺寸和工件在夹具上的位置一致, 否则将造成焊接机器人无法沿原路径焊接或因位置信息误差较大而无法保证焊接的质量。因此在批量生产时, 无论是示教再现式机器人还是离线编程式机器人都存在工件定位问题, 如果工件装卡的不一致, 需要重新示教或重新离线编程, 这势必造成工作效率低下, 使弧焊机器人焊接无法适应批量生产。

为了解决弧焊机器人焊接中工件定位问题, 作者建立了一套基于手眼立体视觉的弧焊机器人工件定位系统, 在机器人手臂末端安装了视觉传感器

——CCD 摄像机, 通过摄像机来观察工件的安放位置, 并根据立体视觉计算出工件在机器人基坐标系中的位置, 从而实现工件的自主定位。

## 1 系统的组成

手眼定位系统组成如图 1 所示, 该系统是由一台 6 自由度的弧焊机器人 HRGH-4 和 3 自由度的变位机组成, 在机器人手臂末端安装有焊枪和 CCD 摄像机, 工件装卡在变位机上。摄像机获取的工件图像经图像卡输入到主机中, 适当地选择工件的特征点, 通过图像处理得到工件的特征点在像平面的图像坐标; 对摄像机和手眼关系进行标定, 从而建立像平面与机器人基坐标系的关系, 这样当机器人在两个不同的位置取景时, 通过立体视觉就可以计算出工件特征点在机器人基坐标系中的坐标, 选择其中的 3 点从而确定工件平面在机器人基坐标系的位置。

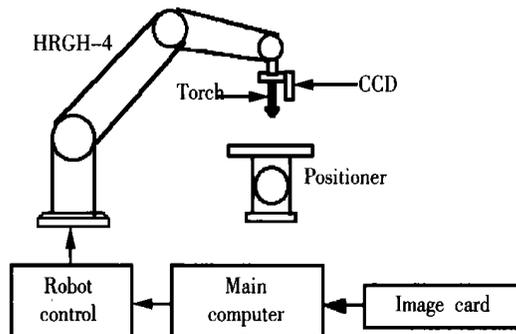


图 1 系统框图

Fig. 1 System block diagram

## 2 相关技术

### 2.1 图像处理

在基于手眼关系的弧焊机器人定位系统中, 工件的位置信息是通过处理摄像机获取图像得到的, 因此图像处理是视觉定位的基础, 为此建立了一套图像处理算法以适应视觉定位的需要。图像处理的算法流程如图 2 所示。

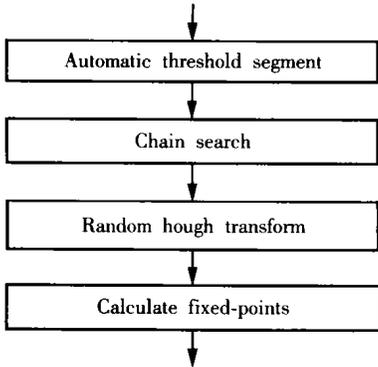


图 2 图像处理流程图

Fig. 2 Flowchart of image processing

(1) 对于一幅原图像首先进行自动阈值分割, 因为工件是装卡在变位机的卡具上, 工件图像和背景之间对比度较明显, 通过自动阈值分割可以把工件和背景分开。

(2) 由于光照条件的不同, 分割后的图像上存在一些噪声区域, 但这些噪声区域都是面积较小的区域, 而工件区域的面积最大, 因此可以通过链码搜索每个区域的边缘, 并计算搜索到的区域面积, 只保留面积最大的区域, 即可得到工件。同时保存搜索到的边缘坐标  $(i_k, j_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为搜索到的工件边缘点的数目。链码搜索采用 8 邻域搜索即可。

(3) 利用 RHT (Random hough transform)<sup>[1]</sup> 对搜索到的边缘点集进行聚类分析, 从而确定出工件边缘所在的直线方程。

(4) 将(3)中获得直线方程联立计算工件的 4 个顶点, 从而获得工件 4 个顶点的图像坐标。

### 2.2 标定

当从摄像机获取的工件图像开始计算工件在机器人基坐标的三维坐标时, 工件上一点的三维坐标与其在图像中的对应点之间的相互关系是由摄像机成像几何模型和机器人手眼关系决定的, 求取摄像机成像几何模型和机器人手眼关系的过程分别称为摄像机标定和手眼标定。

弧焊机器人整体坐标变换关系如图 3 所示。图

中,  $(x_0y_0z_0)$  为机器人基坐标系;  $(x_6y_6z_6)$  为机器人末端坐标系;  $(x_cy_cz_c)$  为摄像机坐标系;  $(xy)$  为像平面坐标系。像平面上一点  $(xy)$  及其该点在摄像机坐标系中的坐标  $(x_cy_cz_c)$  之间的关系是由摄像机成像几何模型决定的, 通过标定得到的摄像机成像几何关系, 即可确定  $(xy)$  与  $(x_cy_cz_c)$  之间的关系。建立了带有一阶畸变的摄像机模型<sup>[2]</sup>。摄像机坐标系与机器人末端坐标系之间的关系称为手眼关系, 在一般情况下, 摄像机和手眼关系需要分别标定。在该系统中作者提出了一种同时标定摄像机和手眼关系的方法, 具体标定过程见文献 [3]。

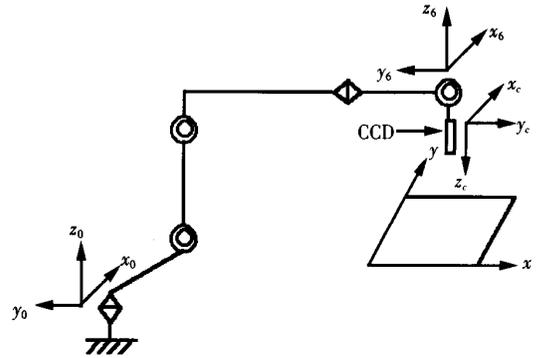


图 3 坐标变换关系图

Fig. 3 Transformation relation of coordinates

当摄像机标定好后可以得到图像上一点  $(xy)$  与其在摄像机坐标系中的坐标  $(x_cy_cz_c)$  之间的关系, 即

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & c_x \\ 0 & s_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + kR_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + kR_d^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

简写成

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 F \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $s_x$ 、 $s_y$  分别是摄像机  $x$ 、 $y$  方向的尺度因子;  $c_x$ 、 $c_y$  是光心的像素坐标;  $k$  是畸变因子;  $f$  是焦距;  $R_d$  是图像点径向距离, 这些参数通过标定得到;  $(xy)$  为图像上一点;  $(x_cy_cz_c)$  是该点在摄像机坐标系中的坐标。

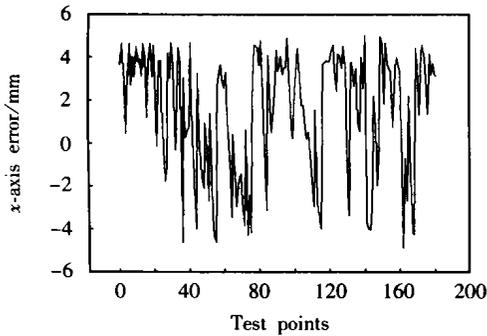
当手眼关系标定好后, 摄像机坐标系中的一点  $(x_cy_cz_c)$  与其对应的机器人基坐标系中的点  $(x_0y_0z_0)$  的关系为

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T_6 H \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

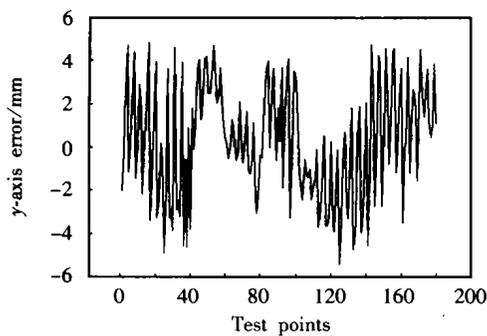
式中:  $(x_0 y_0 z_0)$  是对应点在机器人基坐标系中的坐标;  $T_6$  是机器人末端坐标系与机器人基坐标系之间的关系, 可以在机器人控制器上读出;  $H$  为手眼关系, 通过标定得到。将式(3)代入式(2)得

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 F T_6 H \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

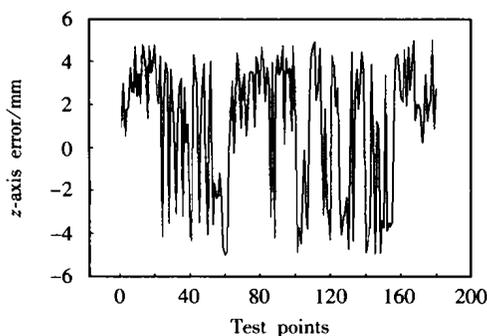
式中:  $M$  称为投影矩阵, 是  $3 \times 4$  的矩阵。从而通过标定得到了图像上一点与对应的机器人基坐标系中的点的关系。标定的误差在  $\pm 0.5 \text{ mm}$  以内, 误差曲线见图 4。



(a) Error curve of x-axis



(b) Error curve of y-axis



(c) Error curve of z-axis

图 4 误差曲线

Fig. 4 Error curves

### 2.3 立体视觉

立体视觉是三维重建的主要方法之一, 是指用两幅或多幅二维图像恢复物体三维几何形状的方法。由式(4)可知, 图像上一点通过投影矩阵与机器人基坐标系建立了联系, 但是一幅图像是无法恢复三维信息, 需要在两个或两个以上的位置取景, 分别用式(4)建立方程用最小二乘法求解三维信息, 如图 5 所示。

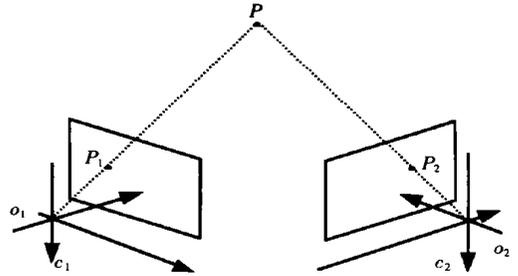


图 5 立体匹配原理图

Fig. 5 Principle of stereo matching

对于点  $P$ , 当摄像机在  $o_1$  时方程为

$$z_c \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

当摄像机在  $o_2$  时方程为

$$z_c \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = M_2 \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $(x_1 y_1)$ 、 $(x_2 y_2)$  分别是  $P$  点在两幅图像上的图像点;  $(x_p y_p z_p)$  是  $P$  点在机器人基坐标系中的坐标;  $M_1$ 、 $M_2$  分别为摄像机在  $o_1$ 、 $o_2$  时的投影矩阵, 相当于式(4)中的  $M$ 。因为  $M_1$ 、 $M_2$  是  $3 \times 4$  的矩阵, 因此式(5)、(6)联立得 4 个方程, 用最小二乘法可解得  $P$  点的三维坐标。

### 3 试 验

试验用的机器人和变位机本体, 如图 6 所示。

工件装卡在变位机上, 分别控制机器人在两个位置取景, 所取得原始图像和按 2.1 中所述方法处理的结果如图 7 所示。取工件 4 个顶点为特征点。图 7a、b 是左右两幅立体匹配图像对, 图 7c、d、e 分别是对图 7a 进行自动阈值分割、链码搜索及 RTH 的结果, 对图 7b 进行同样的处理, 这样可以得到工件 4 个定点在左图像上的像素坐标和在右图像上的



图 6 弧焊机器人和变位机

Fig. 6 Arc welding robot and positioner

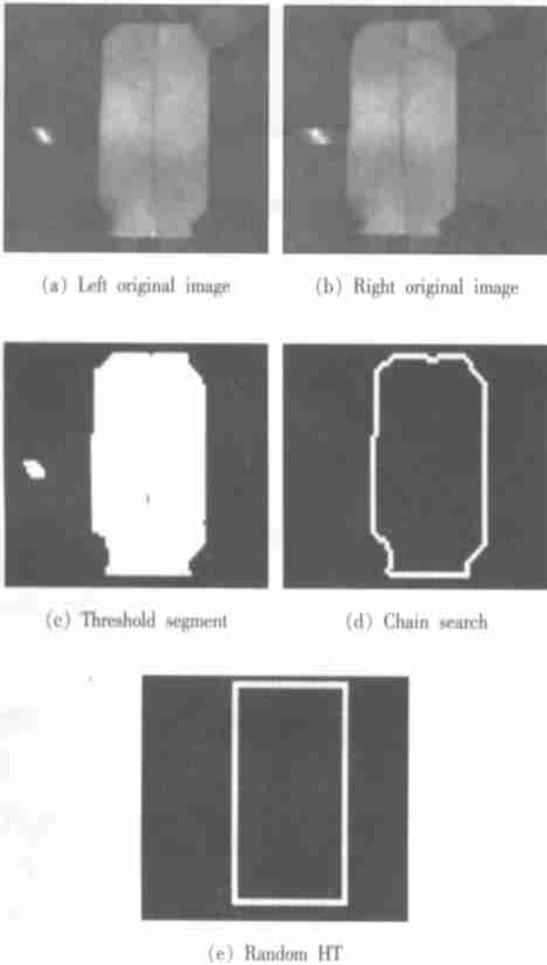
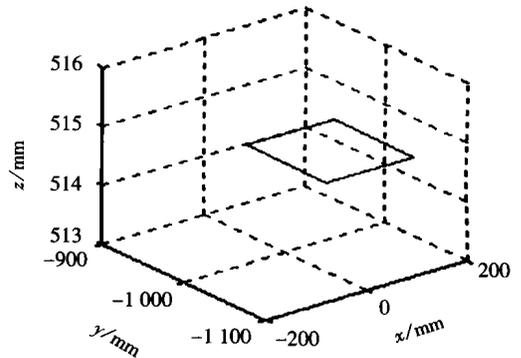


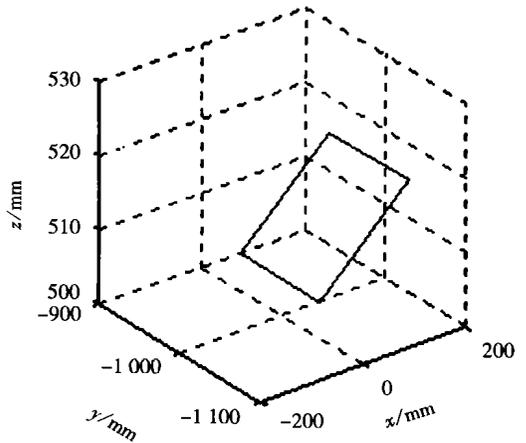
图 7 图像处理结果

Fig. 7 Results of image processing

对应点的像素坐标。按 2.3 中立体视觉的方法进行工件定位, 结果如图 8a 所示。将变位机任意翻转一角度, 用同样方法再次定位, 定位的结果如图 8b 所示。



(a) Position of workpiece placed horizontally in basal coordinate of robot



(b) Position of workpiece overturned by an angle in basal coordinate of robot

图 8 工件在机器人基坐标系中的位置

Fig. 8 Position of workpiece in basal coordinate of robot

作者用下述方法验证精度, 用焊枪尖端对准工件的 4 个顶点, 记下关节角, 通过机器人逆运动学计算出 4 个顶点在机器人基坐标系中的三维坐标作为真实值, 该方法得到的三维坐标作为测量值, 两者相减并取绝对值, 取其中一点, 两种情况下 3 个轴的误差见表 1。误差在 1.5 mm, 这主要是由于标定误差带

表 1 x, y, z 坐标误差

Table 1 Errors of x-axis, y-axis, z-axis (Unit: mm)

|        | Horizontal |                |         | Overturn   |                |         |
|--------|------------|----------------|---------|------------|----------------|---------|
|        | True value | Measured value | Error   | True value | Measured value | Error   |
| x-axis | 125.960 9  | 127.149 4      | 1.188 5 | 119.756 1  | 120.360 4      | 0.604 3 |
| y-axis | -981.603 7 | -982.480 4     | 0.876 7 | -983.276 3 | -982.480 4     | 0.785 9 |
| z-axis | 515.744 0  | 514.830 8      | 0.913 2 | 503.152 4  | 502.530 9      | 0.621 5 |

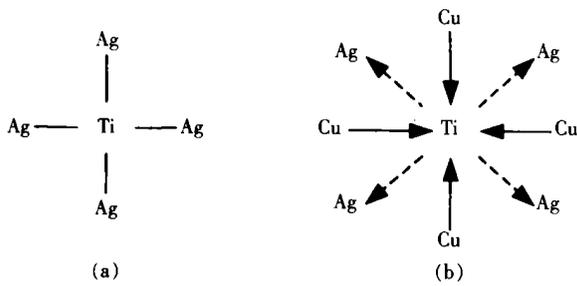


图 4 Ag-Ti 和 Ag-Cu-Ti 溶液的原子分布示意图

Fig. 4 Atomic distribution in (a) Ag-Ti and (b) Ag-Cu-Ti solutions

种元素  $M$ , 并且  $\text{Cu}-M$  的键能比  $\text{Cu}-\text{Ti}$  和  $M-\text{Ti}$  的键能大, 则  $\text{Ti}$  周围的  $\text{Cu}$  原子将趋向于  $M$  周围, 从而使  $\text{Ti}$  周围的  $\text{Cu}$  原子数减少。这样, 在  $\text{Ti}$  含量不变的情况下, 溶液的  $\text{Ti}$  活度就会增大。当然,  $M$  与  $\text{Ti}$  的键能应尽可能小, 且与溶液中的任何组元都不应形成高熔点化合物或脆性相。

寻找  $M$  元素的工作极有意义, 不仅能使活性组元  $\text{Ti}$  具有较低的含量和较高的活度, 而且有可能在提高  $\text{Cu}$  含量的同时大大降低贵金属  $\text{Ag}$  的含量。

## 4 结 论

(1)  $\text{Ag}-\text{Cu}-\text{Ti}$  合金溶液的  $\text{Ti}$  活度随着  $\text{Cu}$  含量的增加而减少, 随着  $\text{Ti}$  含量的增加而增大。  $\text{Cu}$  与  $\text{Ti}$ 、 $\text{Ag}$  与  $\text{Ti}$  之间的相互作用能是影响  $\text{Ti}$  活度

的主要因素。

(2)  $\text{Ag}-\text{Cu}-\text{Ti}$  合金溶液中,  $\text{Ag}$  与  $\text{Ti}$  之间存在较大的排斥作用,  $\text{Cu}$  与  $\text{Ti}$  之间存在强烈的吸引作用。  $\text{Ag}$  与  $\text{Cu}$ 、 $\text{Ag}$  与  $\text{Ti}$  以及  $\text{Cu}$  与  $\text{Ti}$  之间的相互作用参数分别为  $15.80 \text{ kJ/mol}$ 、 $32.83 \text{ kJ/mol}$  和  $-16.14 \text{ kJ/mol}$ 。

## 参考文献:

- [1] Nakamura M, Shigematsu I. Joining of carbon fiber-reinforced silicon nitride composites with  $72\text{Ag}-26\text{Cu}-2-\text{Ti}$  filler metal [J]. *J. Mater. Sci.*, 1996, 31: 4629~4634.
- [2] Hao H Q, Wang Y L, Jin Z H, *et al.* Joining of zirconia ceramic to stainless steel and to itself using  $\text{Ag}57\text{Cu}38\text{Ti}5$  filler metal [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, 78(8): 2157~2160.
- [3] 曲仕尧. 氧化铝基复合陶瓷-金属连接界面研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.
- [4] 石霖. 合金热力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [5] 傅崇说. 冶金溶液热力学原理与计算[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1989.
- [6] Paulasto M, Kivilahti J. Metallurgical reactions controlling the brazing of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with  $\text{Ag}-\text{Cu}-\text{Ti}$  Filler Alloys [J]. *J. Mater. Res.*, 1998, 13(2): 343~352.

作者简介: 曲仕尧, 男, 1963年1月出生, 工学博士, 副教授, 山东大学进站博士后。主要从事焊接冶金、新材料连接研究。获山东省科技进步奖2项, 发表论文20余篇。

Email: shiyaoqu@163.com

[上接第12页]

来的, 因此提高标定的精度是提高定位精度的关键。

## 4 结 论

利用摄像机成像几何关系和弧焊机器人手眼关系建立了一个工件定位系统, 解决了弧焊机器人焊接工件时工件定位问题, 用该方法获得的工件位置信息可以直接下装给机器人控制器, 从而控制弧焊机器人运动, 同时也可以将工件的位置信息传给离线编程系统, 使得离线编程系统在工件定位不准的情况下不需要对工件重新进行离线编程, 为焊接机器人自主焊接奠定了基础。但应指出这种方法是针对平面工件的, 对于空间工件定位问题, 其关键在于工件特征点的提取, 是下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] Xu L, Oja E, Kultance P. A new curve detection method: randomized Hough transform [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331~338.
- [2] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE Journal of R & A*, 1987, 3(4): 323~343.
- [3] 李金泉, 陈善本, 吴林. 一种同时标定摄像机和手眼关系的简便算法 [J]. *上海交通大学学报 (Sup)*, 2002, 36(12): 114~117.

作者简介: 李金泉, 男, 1971年出生, 博士研究生。主要从事弧焊机器人焊缝视觉规划和图像处理方面的研究, 发表论文7篇。E-mail: iamjqh@163.com