

基于机器人视觉的银网焊点定位技术研究

陈一峤,胡国清,黄道权,李 锐,贾明峰

(华南理工大学机械与汽车工程学院,广州 510640)

[摘要] 铅锌电池制作工艺过程中的银网焊接工序不仅存在肉眼识别不准确、出错率高的问题,而且劳动强度大、效率低。针对此工艺,提出一种基于机器人视觉的自动化焊点定位方法。系统以机器人搭载自动化焊接设备对焊点精确定位并焊接,采用畸变校正和机器人手眼标定完成了图像坐标系到机器人坐标系之间位置的精确变换,并运用 Blob 分析粗定位和基于形状的模板匹配精定位相结合的算法,有效地解决了噪声干扰、非线性光照干扰及银网变形引起的识别定位障碍,达到焊点识别定位精度高、生产效率高的目标。

关键词: 机器人视觉;焊点定位;图像分割

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.09.050



陈一峤

华南理工大学机械工程专业硕士研究生,研究方向主要为机器视觉、工业机器人系统集成。

在航空制造领域中,焊接、喷涂、搬运、装配和检测是工业机器人的主要任务,而航空零件部往往结构复杂、性能精度指标要求高,因此对工业机器人的作业难度和精度提出了更高的要求。对于焊接这类高强度、低效率却要求高精度的传统工艺,实现高智能高精度的自动化改造已经成为一大趋势。近年来,机器视觉与工业机器人集成技术飞速发展,开始进入航空领域并推动了自动化焊接技术的发展,相应焊接工艺过程的视觉检测技术也不断有研究成果出现。

目前,针对集成机器视觉的自动化焊接这一领域已有不少研究成果。卢泉奇等^[1]基于 Halcon 软件处理平台,给出了一种实现工业机器人视觉系统定位的方法,实现了机器人对目标物体的定位抓取;周军等^[2]针对 PCB 焊接工艺中的关键技术——PCB 焊点定位,给出了亚像素焊点轮廓检测算法和运动台四轴联动的组合方法,提高了定位精度;许琳等^[3]

基于结构光技术,设计了小型集装箱专用焊接机器人系统,并准确地检测了初始焊点的位置。

针对银网焊点定位这道特殊工序,运用镜头畸变校正和标定板手眼标定实现图像坐标与机器人坐标的精确转换,并利用 Blob 分析消除图像形态缺陷,提取符合要求的 ROI,再采用基于形状的模板匹配与最大值提取算法精确获取中心圆环内均匀分布的 4 个焊点位置,可以有效克服光照因素、样品变形造成的定位困难,符合生产要求。

系统方案设计

本系统基于机器人视觉,在工业相机采集到传送带送来的银网样品图像后,针对银网焊接工艺要求,工控机采用精确可靠的图像处理识别定位焊点位置,并通过对相机内外参数的标定,返回给机器人世界坐标系下的位置,以实现机器人精确识别定位焊接的目的。图 1 和图 2 分别展

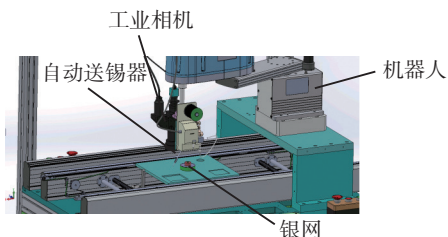


图1 系统组成

Fig.1 System composition

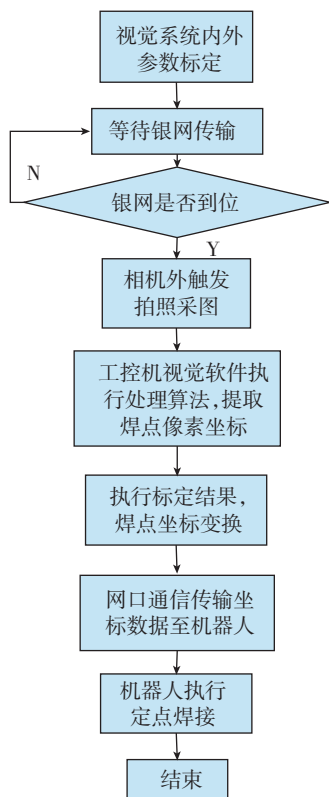


图2 系统工作流程

Fig.2 Working process of the system

示了系统组成和工作流程。

相机镜头畸变校正

对工业相机镜头的畸变进行校正,本质就是对相机进行内参数标定。畸变校正后的相机的内参数,主要包括焦距 f 、图像坐标系下像的放大系数 h 及图像坐标系在像素坐标系的位置坐标信息。畸变校正通常需要采用参数规范化的标定板,其外观如图3所示。

在视觉软件建立数据模型并载入标定板规格信息及相机初始内参数后,利用黑色圆点图像中心坐标 m_i 和通过投影计算得到的圆点中心坐

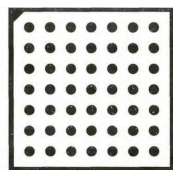


图3 标定板外观

Fig.3 Appearance of the calibration plate

标 $T_i(M_i, c)$ 之间距离的最小化,可确定出内参数的唯一校正解。联合求解式如下:

$$d(c) = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^r \|m_{i,j} - T_i(M_i, c)\|^2 \rightarrow (d(c))_{\min} \quad (1)$$

式中, l 为载入图像数目, r 为一幅图像中的黑色圆点数目。

机器人动态视觉手眼标定

1 标定思路

摄像机标定时,虽然也可以获得摄像机的外参数,但这只是标定用的靶标(标定板)坐标系相对于摄像机坐标系之间的关系^[4]。在本应用中,还需要进行机器人手眼(eye-in-hand)标定^[5],即求取的是相机坐标系相对于运动轴的关系,进一步得出图像像素坐标系与世界坐标系的转换关系,实现机器人视觉系统的精确定位,这也是实现银网焊点定位的关键步骤之一。

2 标定流程

如图4所示,机器人手眼视觉系统中,各坐标系之间有如下关系:

$${}^{\text{base}}H_{\text{tool}} = {}^{\text{base}}H_{\text{cal}} \times ({}^{\text{cam}}H_{\text{cal}})^{-1} \times {}^{\text{cam}}H_{\text{tool}} \quad (2)$$

其中,机器人基坐标系与末端运动轴位置关系矩阵 ${}^{\text{base}}H_{\text{tool}}$ 可由机器人内

部封装算法直接获取。标定所求取的坐标系关系矩阵即为 ${}^{\text{base}}H_{\text{tool}}$,即相机坐标系与运动轴 J_2 之间的位置关系。手眼标定流程如下:

(1) 准备标定板,放入相机视野内,将其固定。即标靶坐标系^[6] $O_g X_g Y_g Z_g$ 固定。

(2) 机器人示教法将靶标坐标系设置为机器人用户坐标系^[7],确定 ${}^{\text{cam}}H_{\text{cal}}$ 矩阵。

(3) 改变运动轴 J_2 位姿,采集多张标定板图像,如图5所示。通过机器人视觉软件内部封装好的标定算法提取出各黑色圆点像素坐标信息,由之前标定好的内参数模型可获取相机坐标系下位姿:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

机器人基坐标系与靶标坐标系均为固定坐标系,二者之间的转换矩阵 ${}^{\text{base}}H_{\text{cal}}$ 可由机器人示教确定。而由标定板数据模型可确定 $O_g X_g Y_g Z_g$ 坐标系下各黑色圆点坐标,与 $O_c X_c Y_c Z_c$ 坐标系下坐标联立,即得各拍照位姿下相机外参数 ${}^{\text{cam}}H_{\text{cal}}$:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix} = {}^{\text{cam}}H_{\text{cal}} \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4) 联立各外参数 ${}^{\text{cam}}H_{\text{cal}}$ 对应的机器人运动轴 J_2 位姿 ${}^{\text{base}}H_{\text{tool}}$,代入式(2),可得最终标定结果:

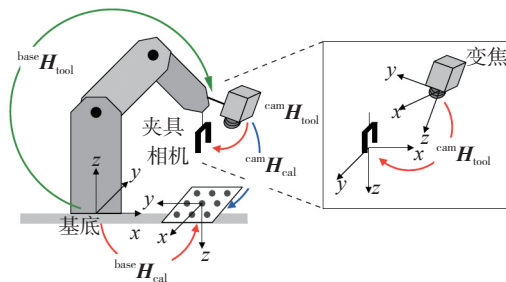


图4 机器人手眼视觉系统

Fig.4 Robot eye-in-hand vision system

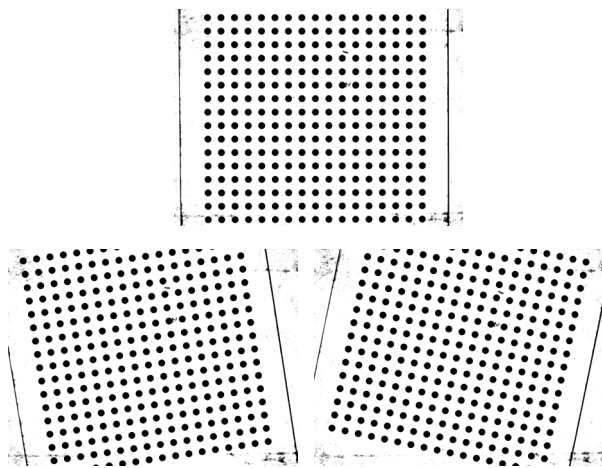


图5 不同拍照位姿下的标定板图像

Fig.5 Images of calibration plate in different camera pose

$${}^{\text{cam}}H_{\text{tool}} = {}^{\text{cam}}H_{\text{cal}} \times ({}^{\text{base}}H_{\text{cal}})^{-1} \times {}^{\text{base}}H_{\text{tool}} \quad (5)$$

像素坐标提取完成后,利用内外参数标定结果,机器人即可根据不同的采图位姿,动态地计算出从图像像素坐标系到机器人坐标的转换坐标。机器人读取坐标信息后,可精确定位到焊点位置。转换矩阵由下式求取:

$${}^{\text{base}}H_{\text{obj}} = {}^{\text{base}}H_{\text{tool}} \times ({}^{\text{cam}}H_{\text{tool}})^{-1} \times {}^{\text{cam}}H_{\text{obj}} \quad (6)$$

焊点定位算法设计与试验

针对实际工程中对焊接点位置的要求,利用焊点定位算法采用 Blob 分析^[8]粗定位与形状模板匹配^[9]精定位提取焊点坐标的方式,可以达到理想的提取结果。待处理银网随传送带输送至工位后,将触发光电传感器,并外触发相机拍照采图,样品如图 6 所示。之后进入算法处理阶段,其主要算法处理如下。

1 Blob分析粗定位

由于要求焊点分布于圆环中心附近的带状区域内,因此需要将定位范围限定在此区域内,减少外在环境因素对特征提取结果的影响。

(1)图像分割与形态学处理。

灰度阈值分割^[10]输出区域为低灰度区域,但是由于背景图像和光照因素影响,会出现孔洞、凹陷和毛刺,使得区域特征出现一定程度的偏差。对目标区域采用先闭运算后开运算操作,可滤去宽度小的银网区域,输

出圆度较大的圆形内孔结构区域。算法采用圆形结构元素,且半径关系满足:

$$l_n < R_{\text{close}} < R_{\text{open}} \quad (7)$$

其中, l_n 为银丝宽度, R 为结构元素半径。算法处理结果如图 7 所示。

(2)提取 ROI。

ROI 提取算法主要由圆特征提取拟合、图像分割两部分组成。以圆度和面积作为双重特征约束条件,可以提取出中心圆孔区域,为防止圆孔区域圆度易受干扰,可采用圆拟合算法获得圆度为 1 的标准圆,并可由此获得较精确的中心点像素坐标 (r_0, c_0) 。再以 (r_0, c_0) 为圆心划分圆环形 ROI,使得 ROI 大致位于银网的中心圆附近,且 ROI 的宽度 D 满足:

$$D > d_n + 0.5l_n \quad (8)$$

保证 ROI 在径向必能提取到匹配点。其中, d_n 为银网交点间距离, l_n 为模板长轴长度。提取 ROI 区域的算法处理结果如图 8 所示。

2 模板匹配精定位

精定位即以提取的 ROI 为基础,进一步精确提取满足生产要求的焊点坐标。精定位算法需消除光照、瑕疵等各类干扰对焊点位置识别的影响,主要算法设计与处理如下:

(1)模板创建。

采集的模板文件处于生产实际中最理想的条件下,满足光照正常、

无遮挡、形状尺寸标准等条件。本文选择中心位于银网交叉点中心的椭圆形 ROI 作为模板,如图 9 所示。

(2)模板匹配。

由于生产实际中的银网存在一定程度的变形、旋转、易反光等因素,影响识别定位的准确性和精度,因此精定位考虑采用基于形状的可变形、可旋转的模板匹配定位算法实现。算法的相似度度量 s 基于模板范围内所有像素的梯度向量,令一一对应的梯度向量之积最小,由此确定最佳匹配坐标点。设模板图像为点集 $p=(r_i, c_i)^T$,经过 sobel 滤波算子^[11]处理后,可得模板的梯度向量集为 $d_i=(t_i, u_i)^T$,其中 $i=1, \dots, n$ 。同理,对应的待匹配图像点 $q=(r, c)$ 的梯度向量为 $e=(v_{rc}, w_{rc})^T$,归一化算法公式如下:

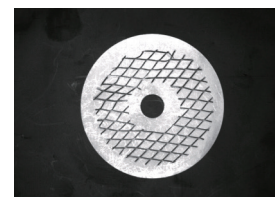
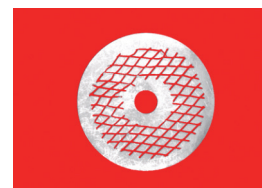
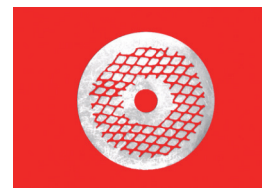


图6 银网样品

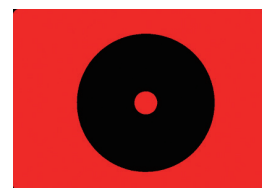
Fig.6 Sample of silver net



(a) 阈值分割



(b) 闭运算



(c) 开运算

图7 闭、开运算

Fig.7 Close-open operation

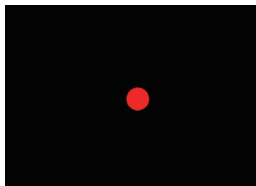
$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i^T \times e_{q+p}}{\|d_i^T\| \times \|e_{q+p}\|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i \times v_{r+r_i, c+c_i} + u_i w_{r+r_i, c+c_i}}{\sqrt{t_i^2 + u_i^2} \times \sqrt{v_{r+r_i, c+c_i}^2 + w_{r+r_i, c+c_i}^2}} \quad (9)$$

当 $s=1$ 时, 图像与模板点集一一对应, 而当匹配图像被遮挡一半时, s 将不大于 0.5。建立模板时将银网交叉点作为模板中心点, 匹配完成后, 算法输出的像素坐标点即为银网所求点坐标。基于形状的模板匹配可适用于旋转、一定程度的变形、非线性光照影响及部分遮挡的情况, 适当选择最低匹配分数、最大变形等参数, 即可匹配到银网所有交叉点(红色标记点)。匹配结果如图 10 所示。

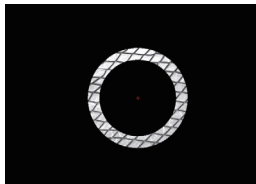
(3) 筛选提取定位。

Blob 分析后所得的中心圆环 ROI 与模板匹配点求交集, 即可获得分布于中心圆环内的一系列像素点集(Rows[k], Columns[k]), $k=1, \dots, n$, 其中 n 为圆环 ROI 内焊点数目。

提取像素点数组最值, 可得 4 个



(a) 圆特征提取与拟合



(b) 图像分割

图8 ROI提取

Fig.8 ROI extraction

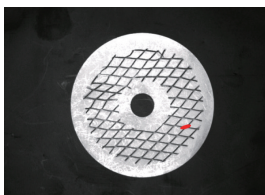
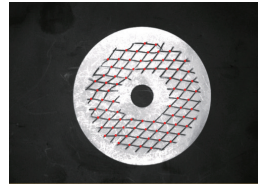


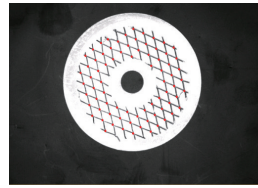
图9 模板创建

Fig.9 Creating template

对称焊点: $y_1=\min(\text{Rows}[k])=\text{Rows}[i]$, $x_1=\text{Columns}[i]$; $y_2=\max(\text{Rows}[k])=\text{Rows}[j]$, $x_2=\text{Columns}[j]$; $y_3=\text{Rows}[m]$, $x_3=\min(\text{Columns}[k])=\text{Columns}[m]$; $y_4=\text{Rows}[n]$, $x_4=\max(\text{Columns}[k])=\text{Columns}[n]$ 。焊点提取结果(红色标



(a) 变形银网匹配结果



(b) 非线性光照匹配结果

图10 变形、非线性光照变化下的匹配结果
Fig.10 Matching results of deformation and nonlinear illumination changes

记)如图 11 所示。

试验采用机器人固定标定针方式进行标定并定位坐标, 随机取 6 块银网, 对每块银网每个焊点中心坐标进行 5 次反复定位, 测量 5 次针尖与焊点中心的水平距离, 取平均值作为偏移误差, 其计算公式如下:

$$\Delta D_{nk} = \frac{\sum_{i=1}^5 d_i}{5} \quad (10)$$

式中, ΔD_{nk} 为第 n 块银网的第 k 个焊点的偏移误差, d_i 为第 i 次测量的

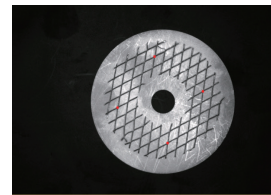


图11 焊点定位与提取

Fig.11 Welding spot location and extraction

表1 部分焊点定位提取结果

银网编号 n	焊点编号 k	焊点坐标		偏移误差 ΔD_{nk}
		y_k / 像素	x_k / 像素	
1	1	731	1779	0.18
	2	2088	2282	0.06
	3	1197	1307	0.07
	4	1478	2720	0.12
2	1	703	2195	0.10
	2	2141	2433	0.15
	3	1518	1433	0.05
	4	1450	2898	0.11
3	1	431	1984	0.08
	2	1925	1830	0.16
	3	1094	1145	0.05
	4	1007	2594	0.05
4	1	549	1922	0.36
	2	1810	1838	0.05
	3	1123	1240	0.23
	4	1257	2501	0.20
5	1	664	1809	0.10
	2	1923	1760	0.03
	3	1181	1202	0.09
	4	1136	2515	0.10
6	1	748	2078	0.12
	2	2001	2269	0.13
	3	1487	1539	0.04
	4	1251	2782	0.08

距离。

部分焊点定位试验结果整理如表 1 所示。

统计多组定位偏移误差数据结果,可由下式计算得出焊点定位精度 $\delta=0.11\text{mm}$ 。

$$\delta = \frac{\sum_{n=1}^6 \sum_{k=1}^4 \Delta D_{nk}}{n \times k} \quad (11)$$

结论

本文针对银网焊接工艺设计了一套基于机器人视觉的激光焊接系统,并针对其中的焊点识别定位技术进行了深入的研究。通过试验证明,运用镜头畸变校正和标定板手眼标定,结合采用 Blob 粗定位和模板匹配精定位算法,可以达到理想的焊点识别与定位效果,有效克服光照因素、样品变形造成的定位障碍,定位精度可达 $\delta=0.11\text{mm}$,符合生产要求。

参考文献

[1] 卢泉奇, 苗同升, 汪地, 等. 基于 HALCON 的机械手视觉抓取应用研究[J]. 光学仪器, 2014,36(6):493-498.
LU Quanqi, MIAO Tongsheng, WANG Di,

et al. Application research of vision crawling robot based on HALCON software[J]. Optical Instruments, 2014,36(6):493-498.

[2] 周军, 许烁, 屠大维. PCB 焊点的机器视觉精密定位系统[J]. 机械制造与自动化, 2016,45(3):172-175.

ZHOU Jun, XU Shuo, TU Dawei. Machine vision system based on precise positioning for PCB solder joints[J]. Machine Building & Automation, 2016,45(3):172-175.

[3] 许琳. 基于结构光技术的焊接机器人焊点定位系统研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2008.

XU Lin. The robot welding position locating system based on structured-light[D]. Ji'nan: Shandong University of Science and Technology, 2008.

[4] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

XU De, TAN Min, LI Yuan. Visual measurement and control for robots[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[5] 吴林, 陈善本. 智能化焊接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000:192-247.

WU Lin, CHEN Shanben. Intelligent technologies for welding[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000:192-247.

[6] 冯华山, 秦现生, 王润孝. 航空航天制造领域工业机器人发展趋势[J]. 航空制造技术, 2013(19):32-37.

FENG Huashan, QIN Xiansheng, WANG Runxiao. Developing trend of industrial

robot in aerospace manufacturing industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(19):32-37.

[7] SONG W, WANG G, XIAO J. Research on multi-robot open architecture of an intelligent CNC system based on parameter-driven technology[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012,28(3):326-333.

[8] 张杨, 高明辉, 周万勇, 等. 自动钻铆系统中工业机器人协同控制技术研究[J]. 航空制造技术, 2013(20):87-90.

ZHANG Yang, GAO Minghui, ZHOU Wanyong, et al. Research on industrial robot cooperative control technology for automatic drilling and riveting system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(20):87-90.

[9] HAGER G D. A modular system for robust positioning using feedback from stereo vision[J]. IEEE Transactions on Robot and Automation, 1997,13(4):582-585.

[10] SHIRAI Y, INOUE H. Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks[J]. Pattern Recognition, 1973,1(5):99-108.

[11] YOSHIMI B H, ALLEN P K. Alignment using an uncalibrated camera system[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995,11(4):516-521.

通讯作者: 胡国清, 教授、博士生导师, 研究方向为智能机器、图像处理, E-mail: gqhu@scut.edu.cn.

Research on Positioning Technology of Welding Spot on the Silver Net Based on Robot Vision

CHEN Yiqiao, HU Guoqing, HUANG Daoquan, LI Rui, JIA Mingfeng

(College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

[ABSTRACT] The welding process of silver net in the production of lead-zinc storage battery has not only problems like inaccurate identification with naked eyes and high error rate, but also a high labor intensity and low efficiency. An automatic welding spot identification solution based on robot vision was brought up within this process. The system uses a robot carrying an automatic welding device to weld the spots after identifying them accurately, adopts the distortion correction technology and robot hand-in-eye calibration to complete the accurate positional shift from the image coordinate system to the robot coordinate system, applies Blob method to analyze the algorithm of the coarse positioning combined with the accurate positioning using shape-based template matching technique, removes the barricades to accurate identification and positioning caused by noise jamming, nonlinear light interference and deformation of the silver net, finally achieves the goal of highly accurate identification and positioning and high efficiency.

Keywords: Robot vision; Positioning welding dot; Image segmentation

(责编 李丹)