Article

2017年,第44卷,第9期

基于机器视觉的自动插件系统 设计与研究

尤 波^{1*}, 武 坤¹, 许家忠¹, 陈国杰¹, 梁 强¹, 田建德²

- 1哈尔滨理工大学自动化学院,哈尔滨 150080;
- 2衡橡科技股份有限公司,河北 衡水 053000



摘要:以 SCARA 机器人、机械夹爪、摄像机 CCD 为硬件基础,搭建了基于单目视觉的 SCARA 机器人自动识别和定位插件系统平台,并利用摄像机参数标定和建立的抓取系统参数化模型,将 CCD 摄像机获取的工件图像坐标信息转化为机器人坐标系下的抓取位置信息。本系统以 Visual studio 软件为开发平台,利用 OpenCV 视觉数据库函数进行颜色识别与定位算法开发,经测试,该视觉算法能够实现工件的颜色识别和获取工件的位置信息,并控制机器人夹爪进行目标工件的精确抓取,满足了一般工业生产中抓取工件实时性的要求。

关键词: SCARA 机器人; 单目视觉; 插件系统; 颜色识别; 定位; 精确抓取中图分类号: TP391.41 文献标志码: A

Design and research of automatic plug-in system based on machine vision

Bo You^{1*}, Kun Wu¹, Jiazhong Xu¹, Guojie Chen¹, Qiang Liang¹ and Jiande Tian²

¹School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; ²Sino Rubber Technology Co., Ltd, Hengshui 053000, China

Abstract: The system uses SCARA robot, mechanical jaw and camera CCD as the hardware foundation, building a SCARA robot automatic identification and positioning plug-in system platform based on monocular vision. The coordinate information of the workpiece image acquired by the CCD camera is transformed into the crawling position information in the robot coordinate system by using the parametric model of the crawler system calibration and establishment of the camera parameters. The system uses Visual Studio as the development platform, utilizing OpenCV visual database function for the secondary development of visual algorithms. The visual algorithm can realize the color recognition of the workpiece and obtain the position information of the workpiece, and control the robot jaws to grasp the target workpiece accurately, which meets the general industrial production in the grasp of real-time requirements of the workpiece.

收稿日期: 2017-07-29; 收到修改稿日期: 2017-08-19

*E-mail: youbo@hrbust.edu.cn

1 引 言

在汽车制造业中,汽车保险盒是汽车电子控制元件中的关键部件,其主要负责向车体传达各种驾驶信息,对工艺的要求比较严格。目前汽车电子配件生产厂家生产保险盒全部使用人工进行插接作业,工人长期进行机械式重复性工作,容易注意力不集中,造成插接保险片出错机率高,如果出现插接错误,将会造成极其严重的后果。随着电子工业的快速发展,电子设备向高可靠性、多功能、轻型化方向发展,从而对电子元器件封装、电子组装提出了更高的要求,从最原始的人工组装到自动插装,以至当前采用机器视觉实现机器人的全自动插装,完全达到了人工操作过程中无法完成的高精度装配和快速装配要求,并对自动插接装备领域的发展产生了巨大的推动作用[1-3]。

将机器视觉作为新型传感器引入到插件机器人系统中,通过机器视觉对环境视觉信息(目标工件的颜色、形状和姿态)的感知来实现空间坐标转换、快速抓取、精确定位等操作[4-6]。该插件机器人系统的关键技术在于目标工件如何快速地识别和如何转换目标工件相对于机器人的位姿,并快速将位置信息反馈到机器人控制系统中,机器人控制末端执行器对目标工件进行精确定位和抓取,然后根据事先规划的路径插接到指定目标位置[7.8]。这种插接方式使机器人具有人眼的功能,对于实现全自动化插接、减少插接错误率、提高插接工件效率具有重要的意义。

本系统搭建了基于单目视觉的 SCARA 机器人硬件平台,并使用圆形供料盘混合投放多种颜色的保险片,利用 CCD 摄像机获取保险片的图像信息,从图像中提取其轮廓形状及坐标信息,并利用摄像机参数标定,通过坐标变换得到保险片在机器人坐标系的空

间坐标,然后控制 SCARA 机器人夹爪对保险片工件进行精确定位和抓取。

2 插件系统设计和工作原理

本系统以四自由度的 SCARA 型机器人、CCD 摄像机和圆形供料盘为硬件基础,搭建了基于机器视觉的自动插件定位系统,该系统由机器人控制系统和机器视觉系统两个子系统组成,其中机器人控制系统主要用来控制机器人各个关节的运动;机器视觉系统主要对 CCD 摄像机采集的图像信息进行相应处理。整个系统的硬件连接如图 1 所示。

构建的插件系统定位抓取架构如图 2 所示,视觉系统获取保险片的图像信息和各个传感器采集的信号反馈到上位机,上位机通过对信息的处理并做出决策。其中对图像信息的处理包括灰度化、二值化、轮廓的提取和中心点生成,最终获得保险片的中心坐标,并通过摄像机参数标定,将中心坐标转换为机器人基坐标系下的空间坐标信息发送到机器人控制系统,控制系统经逆解算法求出各个关节的运动控制量,经伺服控制器的转换将关节运动控制量转换为各个伺服电机的电流脉冲大小,从而实现对机器人各个关节的运动控制,并使机械夹爪以特定的姿态到达目标工件的位置实现精确抓取。

3 抓取系统的参数化模型建立

要实现机器人对保险片工件的精确定位,需要将 CCD 摄像头获取的二维图像信息转化为三维图像信息,主要包括工件的颜色、形状、位置和姿态信息。 这些从三维空间点到摄像机成像平面中二维图像点之间的映射关系需进行摄像机标定和手眼坐标标定[9-12]。

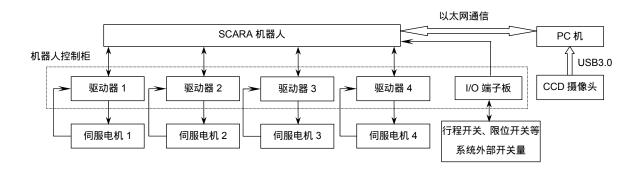


图 1 基于机器视觉的 SCARA 工业机器人硬件系统组成.

Fig. 1 SCARA industrial robot hardware system based on machine vision.

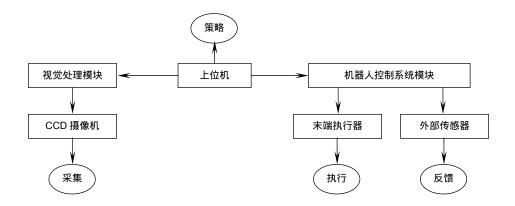


图 2 插件系统定位抓取原理.

Fig. 2 Plug-in system positioning crawling principle.

3.1 摄像机标定

在小孔成像模型中,经过投影中心且垂直于图像平面的直线为光轴,在摄像机的光轴中心建立坐标系, Z_c 轴沿光轴方向,在摄像机坐标系中任意点 $P(X_c,Y_c,Z_c)$ 在图像坐标平面的投影点为P(x,y), X_cOY_c 平面与图像坐标系的距离 OO_1 即为摄像机的焦距 f,如图 3 所示。

其中,摄像机坐标系与成像平面坐标系之间的关 系为

$$\begin{cases} x = \frac{fX_{c}}{Z_{c}} \\ y = \frac{fY_{c}}{Z_{c}} \end{cases}$$
 (1)

式中:(x,y) 为 P 点在成像平面坐标系下的坐标; (X_c,Y_c,Z_c) 为空间 P 点在摄像机坐标系下的坐标。用

齐次坐标与矩阵表示为

$$\mathbf{Z}_{c} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_{0} & 0 \\ 0 & f & v_{0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{c} \\ Y_{c} \\ Z_{c} \\ 1 \end{bmatrix}.$$
 (2)

在 xO_1y 坐标系中,原点 O_1 为摄像机光轴和图像 平面的交点, O_1 在图像坐标系下的坐标为 (u_0,v_0) , d_x , d_y 分别为一个像素在 x 轴与 y 轴方向上的物理尺寸,则两个坐标系的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & s' & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}.$$
 (3)

式中: s'表示成像平面坐标系中的坐标轴相互不能正 交的倾斜因子。

在世界坐标系下,摄像机坐标系和世界坐标系之

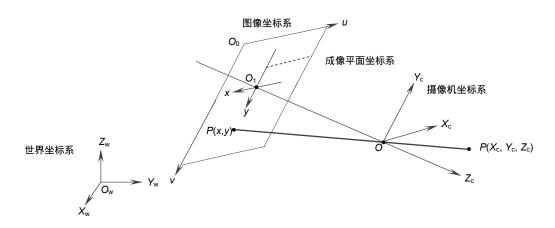


图 3 摄像机坐标系和世界坐标系.

Fig. 3 Camera coordinate system and world coordinate system.

OEE | Advances 2017年,第44卷,第9期

间的关系可用旋转矩阵 R 与平移向量 t 来描述。由此,空间上一点 P 在世界坐标系和摄像机坐标系下的齐次坐标分别为 $(X_{\rm w},Y_{\rm w},Z_{\rm w},1)^{\rm T}$ 与 $(X_{\rm c},Y_{\rm c},Z_{\rm c},1)^{\rm T}$,且存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_{c} \\ Y_{c} \\ Z_{c} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^{T} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{w} \\ Y_{w} \\ Z_{w} \\ 1 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

将式(1)和式(4)代入式(2),得到摄像机坐标系下的 图像坐标系和世界坐标系之间的关系,即:

$$\mathbf{Z}_{C}\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_{x} & s' & u_{0} \\ 0 & 1/d_{y} & v_{0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^{T} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{w} \\ Y_{w} \\ Z_{w} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{u} & s & u_{0} \\ 0 & \alpha_{v} & v_{0} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0^{T} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{w} \\ Y_{w} \\ Z_{w} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \end{bmatrix} \widetilde{\mathbf{X}} = \mathbf{P} \cdot \widetilde{\mathbf{X}}, \tag{5}$$

其中: $\alpha_u = \frac{f}{d_x}$; $\alpha_v = \frac{f}{d_y}$; $s = s' \cdot f$; \widetilde{X} 表示在矩阵 向量 X 的最后一个元素添加 1; $\begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix}$ 称为摄像机外部参数矩阵,由摄像机相对于世界坐标系的方位决定; K 为摄像机内参数矩阵;相应的参数 α_u , α_v , u_0 , v_0 ,s 称为摄像机内参数; P 称为投影矩阵,即从世界坐

3.2 手眼坐标标定

标系到图像坐标系的转换矩阵[13]。

本系统中,摄像机安装在供料器末端一侧,如图 4 所示,机器人安装位置与供料器在一条直线上,传统的 eye-to-hand 视觉标定方法不能标定出保险片工件与机器人之间的相对位姿,则在供料器上建立两个参考坐标系分别为 A 和 B,如图 5 所示,其中坐标系 A 建立在摄像机视野范围内,坐标系 B 建立在机器人的工作空间范围内。摄像机标定内外参数采用平面标靶标定法,采用其中一幅标定板图像建立参考坐标系 A ,可得到 A 与摄像机坐标系 C 之间的位姿关系为 C 化,由于直线供料器的影响只需考虑 C 方向,则参考坐标系 C 与 的一位姿为,采用类似标定工件坐标系的三点法 C ,即可标定出参考坐标系 C 与机器人基坐标系之间的位姿关系 C 。



图 4 插件机器人结构图.

Fig. 4 Plug-in robot physical map.

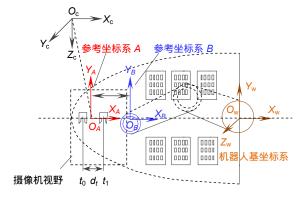


图 5 抓取系统参数化模型.

Fig. 5 Parametric model of grab system.

参考坐标系 A 和 B建立起的摄像机坐标系 C与机器人基坐标系 base 之间的关系:

$$^{\text{base}}\boldsymbol{H}_{C} = ^{\text{base}}\boldsymbol{H}_{B} \cdot {}^{B}\boldsymbol{H}_{A} \cdot ({}^{C}\boldsymbol{H}_{A})^{-1}, \tag{6}$$

通过 CCD 获取目标工件的中心位置得到 $^{C}H_{obj}$,于是得到目标工件在机器人基础坐标系中的位姿转换矩阵:

$${}^{\text{base}}\boldsymbol{H}_{\text{obj}} = {}^{\text{base}}\boldsymbol{H}_{C} \cdot {}^{C}\boldsymbol{H}_{\text{obj}}, \tag{7}$$

在此建立起了目标工件坐标与机器人基础坐标系中的关系。其坐标之间的变换关系如图 6 所示。

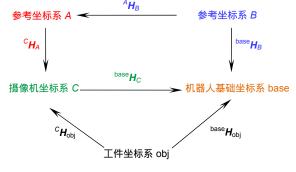


图 6 坐标转换关系.

Fig. 6 Coordinate transformation relationship.

4 视觉处理系统

本视觉系统以 Visual studio 为开发平台,利用 OpenCV 视觉数据库函数进行二次开发视觉算法。在 机器视觉系统中,对保险片图像依次进行预处理、图 像分割、颜色识别、角点检测和中心点提取,求得保 险片工件的中心点位置,最后通过计算尺寸比例来和 坐标的转换得到目标点位置坐标。

4.1 图像预处理

由于机器人插件平台的工作环境受光照变化影响,即使采用了适当的环形光源,原始图像也不适合直接进行特征处理操作,因此,本文通过对图像进行预处理得到易于特征提取的图像信息,主要采用的图像预处理算法包括了高斯滤波降噪、直方图均衡化和自适应阈值。系统根据实际光照环境因素对预处理算法参数进行适当调整,从而保证图像预处理的效果,提高图像特征提取的准确性[16]。

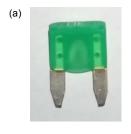
4.2 图像分割

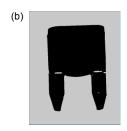
本视觉系统采用 Canny 算子对图像边缘信息进行 检测并提取出图像中物体的边缘特征,再通过腐蚀膨 胀处理精确地得到闭合轮廓。通过对图像轮廓信息与标准保险片轮廓的比较筛选出完整的保险片轮廓信息(筛选装置检测出缺损保险片将其丢弃),最后根据图像各个像素点到轮廓的距离将轮廓包含的图像信息从背景中分割下来,以此方式完成图像分割。以绿色保险片为例,图像分割过程如图 7 所示。

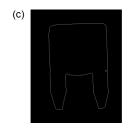
4.3 颜色识别

在图像分割之后,需要识别出从背景上分割下来的工件属于哪一类颜色工件。不同保险片之间具有明显的颜色特征差异,因此视觉系统以保险片颜色特征进行区分。其保险片颜色种类如图 8 所示。

为了识别保险片颜色,采用的方法:首先提前对不同颜色保险片工件建立一个直方图数据库,从 CCD 获得的图像中分割出保险片图像,并提取出保险片的直方图信息,然后将该直方图与建立的不同颜色保险片的直方图数据库依次进行相似度对比。经多次相似度对比后,以获得的相似度最高匹配值作为保险片的颜色类型,则通过此方式达到识别保险片颜色的目的。考虑到系统颜色识别的快速性和精确性,相似度对比采用直方图相关方式,以计算出的 $D(H_1,H_2)$ 作为相







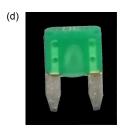


图 7 图像分割过程. (a) 原始图像. (b) 自适应阈值. (c) 轮廓图像. (d) 图像分割.

Fig. 7 Image segmentation process. (a) Original image. (b) Adaptive threshold. (c) Contour image. (d) Image segmentation.



图 8 保险片颜色种类.

Fig. 8 The color types of insurance pieces.

似度匹配值[17], 计算式如(8)所示:

$$D(H_1, H_2) = \frac{\sum_{i} (H'_1(i) \cdot H'_2(i))}{\sqrt{\sum_{i} (H'_1^2(i) \cdot H'_2^2(i))}},$$
 (8)

式中:

$$H'_{k}(i) = H_{k}(i) - \frac{1}{N} \sum_{j} H_{k}(j)$$
, (9)

且 N等于直方图中 BIN 的个数。对于直方图相关方式, $D(H_1,H_2)$ 数值越大则越匹配,当两个直方图被采用 归一化后,完全匹配的数值为 1,完全不匹配是-1,值为 0 则表示无关联(随机组合)。

在计算机中一幅数字图像 [0,G] 范围内总共有 / 个灰度级, 其直方图定义为下列离散函数:

$$h(r_k) = n_k \,, \tag{10}$$

式中: r_k 是区间 [0,G] 内的 k 级灰度, n_k 为图像中出现 r_k 这种灰度级的像素数。为了得到归一化直方图,采用式(11)求得:

$$p(r_k) = \frac{h(r_k)}{n} = \frac{n_k}{n}, \qquad (11)$$

式中:对于整数图像 k = 0,1,2,...,l-1。

经归一化处理后,其黄、绿、红、蓝的直方图特

征如图 9 所示。

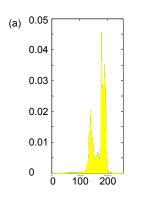
4.4 中心点提取

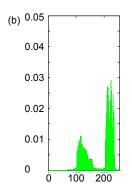
在二维图像中角点是其重要的局部特征,决定了图像中关键区域的形状。本系统采用 Harris 角点检测算法进行角点提取[18],在实际应用中,保险片经过直线供料器到达筛选装置的固定槽位置,在该固定槽位置处,其 CCD 只能采集到保险片上部的图像特征。其现场图像如图 10(a)所示,所以对于保险片而言,属于形状规则的目标工件,则可利用工件的规则形状特征提取中心点坐标,即各个角点的*u* , *v* 坐标值的平均值,其公式为

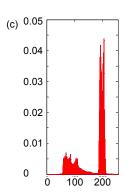
$$\begin{cases} C_{u} = \frac{\sum_{k=1}^{m} u_{k}}{m} \\ C_{v} = \frac{\sum_{k=1}^{m} v_{k}}{m} \end{cases}$$
(12)

式中 $k=1,2,3,...,m_0$

在 Visual studio 平台上进行测试,其角点检测和中心点提取效果如图 10(b)和 10(c)所示,最后得到角点与中心点的坐标如表 1 所示,通过与其平均值进行







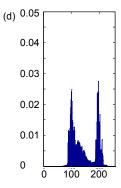


图 9 不同颜色保险片的直方图特征.

Fig. 9 Histogram features of different color inserts.





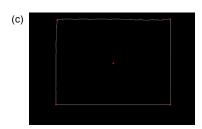


图 10 中心点提取过程. (a) 原始图像. (b) 角点检测. (c) 中心点提取.

Fig. 10 Center point extraction process. (a) Original image. (b) Corner detection. (c) Center point extraction.

表 1 测试坐标点结果表.

Table 1 Test coordinate point results table.

角点/pixel	1	2	3	4	平均值	中心点
и	115	116	443	433	276.75	277.26
V	103	356	355	92	226.5	225.42

对比,误差小于一个像素,因此可采用式(12)进行保险片的中心点提取。

5 实验结果

在搭建的硬件平台基础上,启动系统运行,夹取保险片过程如图 11 所示。测试系统能够识别工件的颜色,准确夹取保险片工件,并插接到指定位置。通过上位机软件实时测得 5 组视觉定位数据,如表 2 所示。

由实验结果分析可知,在系统要求颜色识别不超过 30 ms 和视觉定位时间不超过 150 ms 情况下,视觉

定位坐标与机器人末端实际抓取坐标误差在 1.5 mm 范围内,并且颜色识别和视觉定位时间都有相对充足的裕量,因此本系统具有较高的定位精度、较快的颜色识别速度和视觉定位速度,能够满足一般工业生产的需要。

6 结 论

本文将机器视觉应用在插接汽车保险片的机器人中,系统以 Visual studio 软件为开发平台,利用OpenCV 视觉数据库函数进行颜色识别与定位算法的









图 11 夹取工件过程. (a) 原点. (b) 夹起保险片. (c) 插接完毕. (d) 回到原点.

Fig. 11 Gripping the workpiece process. (a) Origin. (b) Clip Insurance pieces. (c) Plugged in. (d) Back to the origin.

表 2 视觉定位实验分析.

Table 2 Experimental analysis of visual positioning.

序号	视觉定位位置/mm	末端实际位置/mm	颜色识别时间/ms	定位时间/ms
1	(41.39, 260.30, 100.06)	(40.55, 259.43, 100.87)	20.3	133.7
2	(40.86, 258.23, 101.53)	(41.02, 259.20, 100.96)	19.8	131.2
3	(41.53, 259.46, 100.56)	(41.36, 260.12, 100.66)	19.4	132.6
4	(41.53, 259.46, 100.56)	(41.59, 260.51, 100.42)	19.9	133.3.
5	(40.93, 260.13, 100.67)	(41.06, 260.73, 100.68)	20.1	134.2

开发,该视觉算法对 CCD 摄像机获取的保险片工件 图像依次进行了预处理、图像分割、颜色识别、角点 检测和中心点提取,实现了目标工件的中心点特征信 息的提取。利用摄像机参数标定和建立的抓取系统参 数化模型完成了将中心点坐标转化到机器人坐标系下 的抓取位置信息。经现场调试,该视觉算法能够识别 工件的颜色和最终得到工件的抓取坐标信息,并控制 机器人夹爪进行快速目标定位和精确抓取。结果证明, 该系统定位精度高,速度快,稳定性好,能够满足机 器人作业下自动插接保险片的高精度、高可靠性要求。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(61370033)。

参考文献

- Jin Guigen, Mu Jianjun. Material handling application of intellectual robot with vision system[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(11): 103–105.
 - 金桂根, 穆建军. 视觉识别机器人在物流作业中的智能应用[J]. 制造业自动化, 2013, 35(11): 103-105.
- Ni Hepeng, Liu Ya'nan, Zhang Chengrui, et al. Sorting system algorithms based on machine vision for Delta robot[J]. Robot, 2016, 38(1): 49–55.
 - 倪鹤鹏, 刘亚男, 张承瑞, 等. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016, **38**(1): 49-55.
- Wang Yongqiang, Meng Ran, Yu Demin, et al. A classification and recognition system research about the glass bulb products on-line by machine vision[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8 Suppl 1): 636–637, 645.
 - 王永强, 孟然, 于德敏, 等. 机器视觉玻壳产品在线分类识别系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(8 增刊): 636-637, 645.
- 4 Yuan Yulei, Jiang Lixing, Liu Lingjie. Applications of Lodrigues matrix in coordinates transformation[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(2): 178–179, 119.
 - 原玉磊,蒋理兴,刘灵杰. 罗德里格矩阵在坐标系转换中的应用[J]. 测绘科学, 2010, **35**(2): 178-179, 119.
- Fan Liangyu, Pan Feng. Detection system design for the pin's position of connectors using machine vision[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2015, 14(6): 762, 769.
 - 凡良玉,潘丰.基于视觉的接插件 pin 针正位度检测系统设计[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2015, 14(6): 762-768.
- 6 Jin Sun, Hong Haitao. The application of the inspection technology based on machine vision in the electronic connectors mannfacturing industry[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2000(2): 13–16.
 - 金隼, 洪海涛. 机器视觉检测在电子接插件制造工业中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2000(2): 13-16.
- 7 Sun Guodong, Zhang Yang, Li Ping, et al. Design of visual inspection system for electronic connectors and error analysis[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(8): 104–106, 110. 孙国栋, 张杨, 李萍, 等. 电子接插件视觉检测系统设计与误差分

- 析[J]. 仪表技术与传感器, 2015(8): 104-106, 110.
- B Zhao Dengbu. Research and development of rapid position control system of SCARA robot based on machine vision[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
 - 赵登步. 基于机器视觉的 SCARA 机器人快速定位控制系统的研究与开发[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- 9 Xu Liang, He Xiaomin, Li Xiuxi, et al. A machine-vision inspection system for conveying attitudes of columnar objects in packing processes[J]. Measurement, 2016, 87: 255–273.
- Huang Zhen, Gu Qimin. Research and application of high-precision plug-in system based on machine vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(10): 105–108.
 - 黄震, 顾启民. 高精度机器视觉插件系统的研究与应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(10): 105-108.
- 11 Gui Weihua, Yang Chunhua, Xu Degang, et al. Machine-vision-based online measuring and controlling technologies for mineral flotation——a review[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1879–1888.
 - 桂卫华, 阳春华, 徐德刚, 等. 基于机器视觉的矿物浮选过程监控技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1879-1888.
- 12 Zhai Jingmei, Dong Pengfei, Zhang Tie. Positioning and grasping system design of industrial robot based on visual guidance[J]. Machine Design & Research, 2014, 30(5): 45–49.
 - 瞿敬梅, 董鹏飞, 张铁. 基于视觉引导的工业机器人定位抓取系统设计[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(5): 45-49.
- Hu Xiaoping, Xie Ke, Peng Tao. A new 3D visual positioning method of eye-to-hand stereovision of robot[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 10–15.
 - 胡小平, 谢珂, 彭涛. 一种新的双目固定式机器人三维视觉定位方法[J]. 光电工程, 2014, **41**(8): 10-15.
- 14 Xie Zexiao, Chen Wenzhu, Chi Shukai, et al. Industrial robot positioning system based on the guidance of the structured-light vision[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1015001.
 - 解则晓, 陈文柱, 迟书凯, 等. 基于结构光视觉引导的工业机器人定位系统[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1015001.
- 15 Zhang Wenzeng, Chen Qiang, Sun Zhenguo, et al. Quick calibration method of part coordinates for arc welding robot[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(7): 1-4. 张文增,陈强,孙振国,等. 狐焊机器人工件坐标系快速标定方法[J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 1-4.
- 16 Li Ting, Liu Ning. Study on circle locating technology based on machine vision[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(9): 153–156.
 - 李婷, 柳宁. 基于机器视觉的圆定位技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, **48**(9): 153-156.
- 17 Wang Jianwen, Liu Jie. Automatic image annotation method based on color histogram pyramid[J]. Computer Engineering, 2016, 42(6): 235–240.
 - 王建文, 林劼. 基于颜色直方图金字塔的图像自动标注方法[J]. 计算机工程, 2016, 42(6): 235-240.
- 18 Huang Fengshan, Qin Yamin, Ren Yusong. The image recognition method on round bales robot labeling system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 168–174.
 - 黄风山,秦亚敏,任玉松.成捆圆钢机器人贴标系统图像识别方法 [J]. 光电工程,2016,43(12):168-174.