

基于机器视觉的移动工件抓取和装配的研究

陆 艺¹, 夏文杰¹, 郭 斌¹, 赵 静²

(1. 中国计量学院 计量测试工程学院, 杭州 310018;

2. 杭州沃镭智能科技股份有限公司, 杭州 310018)

摘要: 针对工业生产线上某产品上下盖自动装配的问题, 运用运动控制理论与机器视觉相结合, 搭建了一套模拟工业生产线产品装配系统; 首先利用工业相机对进入视场的工件进行单帧图像采集, 获取图像数据; 然后利用 OpenCV 对数字图像进行处理, 包括中值滤波、阈值分割、孔洞填充、边缘提取来获取数字图像的特征; 之后通过质心法结合矩形拟合计算出工件的质心坐标和偏转角度; 最后引导六轴机械臂抓取产品的时候能根据图像处理结果进行纠偏和补偿; 该系统采用平面棋盘格标定板对工业相机进行了标定, 并且在线进行了验证, 实验结果表明, 工件抓取和装配成功率为 100%, 满足工业现场的装配精度要求。

关键词: 机器视觉; 数字图像处理; 摄像机标定

Research of Grasp and Assemblage of Moving Workpiece Based on Machine Vision

Lu Yi¹, Xia Wenjie¹, Guo Bin¹, Zhao Jing²

(1. Institute of Precision Measurement and Control, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Hangzhou Wolei Intelligent Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: An assembly system is built based on motion control theory and machine vision to solve the problem of automatic assembling of upper and lower lid in industrial production line. Firstly, the industrial camera takes a photo when the workpiece goes into the field of view, and the image data is acquired. Then OpenCV is used for digital image processing, including median filtering, thresholding, holes filled, edge extraction, which help gain the image feature. Secondly, by the method of the centroid and the rectangular fitting, the centroid coordinate and deflection angle can be got. Finally, the data is used to correct the coordinate values of robot arm when the 6-axis robot arm grabs workpiece by image processing. A flat checkerboard calibration plate to calibrate the industrial camera is used, and is verified online. Experimental results show that the probability of workpiece grabbing and assembly success is up to 100%, and it can meet the accuracy requirements of industrial site assembly.

Keywords: machine vision; image processing; camera calibration

0 引言

随着计算机技术、数字图像处理的迅速发展, 机器视觉在国民经济、科学研究及国防建设领域都有着广泛的应用。机器视觉作为工业机器人获得外界环境信息的主要手段, 它可以提高工业生产的柔性和自动化程度^[1-2], 其最大的优点是与被观测对象无接触, 对观测对象不会带来损伤, 另外机器人可以在恶劣环境下用于代替人工不知疲倦、始终如一的观测被测对象。

目前传统的工业机器人必须通过逐点示教才能完成生产线上的物料搬运、装配以及各工位之间的工件转移和上下料, 但是工业现场环境复杂, 工件位姿随机摆放, 实际目标工件的位姿与理想工件位姿极易存在偏差, 致使工业机器人无法顺利完成操作任务。因此设计了一种基于机器视觉的工件抓取和装配系统, 通过视觉系统捕获工件图像, 采用质心法和矩形拟合相

结合计算出工件的质心坐标和偏转角度, 并且通过 TCP/IP 通信实时发送给机械臂本体, 从而使机械臂响应图像处理结果抓取工件, 实验结果表明, 该系统结构简单, 算法稳定可靠, 对工作环境要求不高, 动态响应好, 具有广阔的应用前景。

1 机器视觉系统总体结构

为了满足工业现场自动化装配的要求, 将机器视觉与工业生产结合起来, 搭建了如图 1 所示系统, 主要包括台架 (含两条输送线)、机器视觉模块、控制执行机构 (六轴机械臂)、定位机构四部分。

整个机器视觉系统由千兆以太网工业数字相机、镜头、对射式光电开关、环形光源、视觉处理软件构成; 控制执行机构由六轴机械臂、控制柜、示教器组成; 定位机构主要由气爪、迷你气缸、双轴气缸等构成。

工业相机固定安装在输送带正上方, 当产品通过光电开关时, 会产生开关信号并传给计算机, 计算机控制视觉系统进行图像单帧采集, 并且进行图像处理, 分析上下盖的摆放姿态, 同时系统开始计时, 根据传送带的速度, 计算出机器人的最优抓取点, 在机器人抓取过程中, 根据图像处理后的结果进行纠偏和补偿, 上盖下盖合装完成即装配成功。

收稿日期: 2015-02-02; 修回日期: 2015-03-24。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51405463); 浙江省公益性技术应用研究计划 (2014C31105)。

作者简介: 陆 艺 (1979-), 男, 江苏扬州人, 副教授, 主要从事精密测试技术、汽车零部件检测方向的研究。

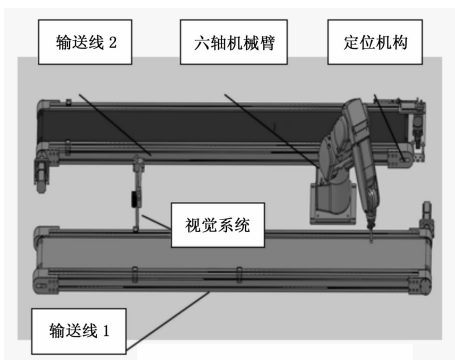


图 1 机器视觉系统机械图

2 工件的图像处理与定位

2.1 图像预处理

由于噪声、光照等环境因素的影响，导致原始图像质量偏低，需要进行预处理之后才能进行后续操作^[3]。图像预处理一方面可以改善图像的视觉效果，另一方面可以增强图像、突出特征，便于计算机更有效的对图像进行识别和分析。

平滑滤波处理是将原图中一个像素的灰度值和它周围邻近 8 个像素的灰度值相加，然后求平均值（除以 9）作为新图像中该像素的灰度值^[3]。设 $f(i, j)$ 为待处理的含有噪声干扰的原始图像，经过邻域平均操作后的新图像为 $g(i, j)$ ，则：

$$g(i, j) = \frac{\sum f(i, j)}{N}, (i, j) \in M \quad (1)$$

其中： M 是所取邻域中各邻域像素的坐标， N 是邻域中

包含的邻近像素个数。邻域平均模板为： $\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ ，在实

际应用中可以根据场合需要选择不同的模板尺寸，如 3×3 、 5×5 、 7×7 等。均值滤波处理结果如图 2，该方法以图像模糊为代价来减少噪声。

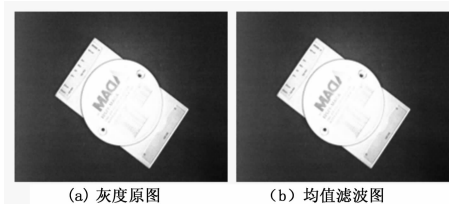


图 2 均值滤波效果图

2.2 图像分割

图像预处理以后需要进行阈值分割来分离图像中的背景和背景。分割后的二值图像不仅数据量大幅度减少，而且简化了其后续的分析处理步骤。图像一般不具有固定的最佳阈值，本系统采用最大类间方差法分割图像。该方法认为确定的最佳阈值应当使目标类与背景类产生最佳的分离性能，这种性能用类别方差来表征，并且引入类内方差 σ_w^2 、类间方差 σ_B^2 、总体方差 σ_T^2 ，引入了关于 t 的等价判决准则：

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \sigma_B^2 / \sigma_w^2 \\ \eta(t) &= \sigma_B^2 / \sigma_T^2 \\ \kappa(t) &= \sigma_T^2 / \sigma_w^2 \end{aligned} \quad (2)$$

这 3 个准则彼此等效，我们把最佳分离的 t 值作为最佳阈值，由于 σ_w^2 是基于二阶统计特性，而 σ_B^2 基于一阶统计特性， σ_T^2 与 t 无关^[4]，因此在实际使用中使用（3）式所示简化计算公式：

$$\sigma^2(T) = W_a(\mu_a - \mu)^2 + W_b(\mu_b - \mu)^2 \quad (3)$$

其中： σ^2 为两类间最大方差， W_a 为 A 类概率， μ_a 为 A 类平均灰度， W_b 为 B 类概率， μ_b 为 B 类平均灰度， μ 为图像总体平均灰度。图像分割结果如图 3。

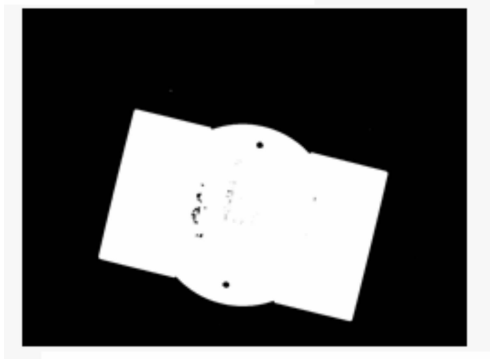


图 3 图像分割结果

2.3 矩形拟合

二值图像中目标物的特征包括物体的大小、位置、方向等，通常用质心坐标表示目标对象在图像中的精确位置。零件定位的目的是为了得到零件的位置和方向，零件二值图的质心即实际零件的质心。对 $M \times N$ 数字图像 $f(x, y)$ ，其质心 (x, y) 定义为：

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N xf(x, y) \\ \bar{Y} &= \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N yf(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

零件的方向通常选择其最小惯量轴在二维平面上的等效轴来表示。最小惯量轴定义为在目标上找一条直线，使得目标物上的所有点到这条直线的垂直距离的平方和最小^[5]，它就可以表示目标物的方向。因此引入矩的概念来明确其物理和数学意义，目标对象的零阶矩反应了目标的面积，一阶矩反应了目标的质心位置，目标的二阶矩又称为惯性矩，与上述最小惯量轴对应，因此可以表征目标的方向。

对于 $M \times N$ 数字图像 $f(i, j)$ ，其 $(p+q)$ 阶矩可以表示为：

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N i^p j^q f(i, j) \quad (5)$$

对于一个分割后的二值图像，若其目标区域 R 是二值图像中为“1”的区域则式子改写为：

$$m_{pq} = \sum_{(i, j) \in R} i^p j^q \quad (6)$$

因此， m_{00} 表示目标物的面积， $\bar{i} = m_{10} / m_{00}$ 、 $\bar{j} = m_{01} / m_{00}$ 即为目标物的质心。所以离散的图像中心距为：

$$\mu_{pq} = \sum_{(i, j) \in R} (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q \quad (7)$$

现在再将中心距进行大小归一化，定义归一化中心距为 $\eta_{pq} = \mu_{pq} / \mu_{00}^r$ ，式中 $r = (p+q) / 2 + 1$ 。

矩形拟合涉及两个过程: 一是图像边缘点的检测, 二是对边缘点进行矩形拟合, 以确定目标的质心和方向, 矩形拟合如图 4。坐标轴定义左上角为坐标原点, 偏转方向定义长轴在第一象限角度为正, 长轴在第四象限角度为负, 由于产品上下盖外观为轴对称图形, 因此设定角度范围 ($-90^\circ \sim 90^\circ$) 即可。其长轴偏转角 φ 可利用低阶矩求得:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (8)$$

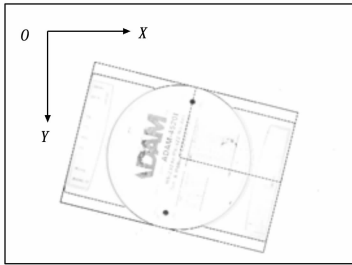


图 4 矩形拟合

3 相机标定

3.1 相机内外参数标定

摄像机标定指建立图像像素位置和场景点位置之间的关系, 通过成像透镜将三维场景投影到二维像平面上。针孔成像模型称为线性摄像机模型^[6], 空间任意一点 P 在图像中的成像位置可以用针孔成像模型近似表示, 即任何点 P 在图像中的投影位置 p , 为光心 O 与 P 点的连线 OP 与图像平面的交点。其比例关系如 (9) 所示:

$$\begin{cases} X = \frac{fx}{z} \\ Y = \frac{fy}{z} \end{cases} \quad (9)$$

其中: (X, Y) 为 p 点的图像坐标; (x, y, z) 为空间点 P 的摄像机坐标系下的坐标, f 为 xy 平面与图像平面的距离, 即为摄像机的焦距。用齐次坐标和矩阵表示上述透视投影关系^[7]:

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: s 为一比例因子, P 为透视投影矩阵, 得到以世界坐标系表示的 P 点的坐标与其投影点 p 的坐标 (u, v) 的关系:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dX} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dY} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ O^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 X_w = M X_w \quad (11)$$

其中: $f_x = f/dX$ 为 u 轴上归一化焦距, $f_y = f/dY$ 为 v 轴上归一化焦距, M 为 3×3 投影矩阵; 由式 (11) 得出 M_1 完全由 f_x, f_y, u_0, v_0 决定, 称这些参数为摄像机内部参数; M_2 由摄像机相对于世界坐标系的方位决定, 称为摄像机外部参数。

为了提高相机标定的精度, 标定过程通过 9 张不同角度的棋盘格目标图像, 根据图像中各个角点的关系得到内参数矩阵和畸变系数矩阵, 相机标定界面如图 5。标定结果为内参数矩阵 $f_x = 3\,500.864\,2, f_y = 3\,500.371\,0, u_0 = 573.111\,0, v_0 = 487.239\,8$; 相机畸变系数矩阵 $k_1 = -0.219\,885, k_2 = 0.337\,375, p_1 = 1.099\,888, p_2 = -1.097\,730$ 。

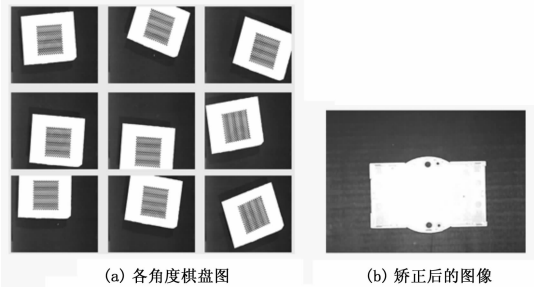


图 5 相机标定

由于摄像机不可避免的存在径向畸变和切向畸变, 所以需要对小孔成像模型进行修正。理想的图像点归一化坐标为 $p = (x, y)^T$, 有畸变的图像点的归一化坐标为 $P_d = (x_d, y_d)^T$, 综合考虑切向畸变和径向畸变的结果:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 x_d y_d + p_2 (r^2 + 2x_d^2) \\ p_1 (r^2 + 2y_d^2) + 2p_2 x_d y_d \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.2 亚像素尺寸当量的标定

要进行视觉测量还需要建立 CCD 感光面上的像元尺寸和工件实际尺寸的关系, 即图像像素和实际尺寸的对应关系。由于视觉系统成像平面和传送带上工件运动平面基本平行, 故采用直接摄取一副平行的棋盘格标定板图像, 对其进行处理, 由于棋盘格标定板标准件包含着精确的物理尺寸, 而图像处理结果得到的是亚像素单位的数值, 这样就可以利用公式得到系统的水平像素当量和垂直像素当量^[7]。

棋盘格标定板中的角点具有高曲率, 经常作为目标对象的几何特征来提取。角点提取过程如下: 首先利用 Harris 角点探测器把像素级别的角点提取出来, 然后在像素级角点探测的基础上, 对角点子域的像素灰度进行拟合内插, 常用 (13) 所示高斯曲面来拟合, 拟合出的 (x_0, y_0) 即为角点的内插位置。

$$f(x, y) = ce^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

利用检测到的亚像素级角点坐标, (检测到的所有角点坐标见表 1) 根据棋盘格标定板每个方格实际尺寸为 2 mm, 所有角点坐标利用欧几里得距离公式求得所有相邻角点像素距离, 最后加权平均得到图像像素和实际物理尺寸的关系为: 1pixel = 0.147 mm, 亚像素标定部分结果如图 6。

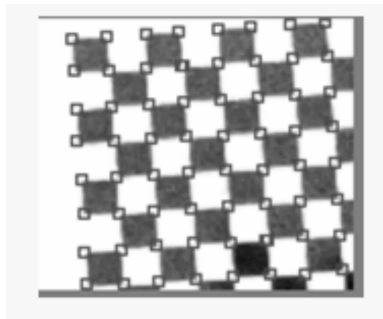


图 6 亚像素标定部分结果

表 1 检测到的所有角点坐标

<i>n</i>	X/pixel	Y/pixel
1	192.506	47.597
2	176.285	256.203
3	376.404	139.074
...
674	162.654	35.702
675	280.854	41.911
676	398.688	34.075

4 机械臂抓取装配实验及分析

机械臂示教过程采用任意一次图像处理结果的质心和偏转角度作为参考值，利用手持式示教器规划好机械臂抓取装配动作轨迹，对于后续每次图像处理结果只需要算出质心、角度与参考值的差值即可，根据质心、角度的差值机械臂调整到合适的位姿抓取工件并且还原到参考值状态装配工件。其灵活性在于虽然工业现场工件随机摆放，但是机械臂都能根据质心与偏转角度实际值做出相应调整，完成装配过程，不需要逐点示教。实验结果见表 2。

产品上下盖装配精度约为 0.1 mm，整个机器视觉系统合成不确定度 μ_c 由各个不确定度分量合成：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_{xi})^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \rho_{ij} u_{xi} u_{xj}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} u_{xi} u_{xj}} \quad (14)$$

若 x_i 、 x_j 的不确定度相互独立，即 $\rho_{ij} = 0$ ，则合成标准不确定度可表示为：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_{xi})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (15)$$

表 2 抓取装配实验结果

<i>n</i>	X/pixel	Y/pixel	angle/°
1	655.026	568.169	1.139
2	634.566	583.753	-13.897
3	686.485	443.309	30.964
4	642.016	511.404	-35.869
5	553.598	481.075	-89.256
6	386.654	646.553	71.565
7	477.937	553.598	0.744

综上所述机械臂往返精度 ± 0.03 mm，图像处理过程像素误差约为 0.130 pixel，像素精度为 0.147 mm/pixel，则 μ_c 小于装配精度要求：

$$u_c = \sqrt{0.03^2 + (0.13 \times 0.147)^2} = 0.036 \text{ mm}$$

5 结论

本文构建的机器视觉系统，利用工业相机获取移动工件的图像数据，采用图像处理对工件进行定位，后续引导机械臂对工件进行抓取与装配，系统处理时间约为 150 ms，实验结果表明，系统定位误差小于 0.1 mm，抓取装配成功率为 100%，满足工业现场的需求。其对节约劳动力成本，提高生产线柔性具有很高应用价值。

参考文献：

[1] 刘振宇, 赵彬, 邹风山. 机器视觉技术在工件分拣中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 29 (11): 87-91.
 [2] 朱代先. 基于双目视觉的工件定位与抓取研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 92-94.
 [3] 余文勇, 石绘. 机器视觉自动检测技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
 [4] 夏良正, 李久贤. 数字图像处理 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2011.
 [5] 查英, 刘铁根, 等. 基于机器视觉的零件自动装配系统 [J]. 天津大学学报, 2006, 39 (6): 722-726.
 [6] 赵鹏. 机器视觉理论及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
 [7] 潘武. 基于机器视觉的工件识别与定位 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.

(上接第 2326 页)

参考文献：

[1] 杜里, 张其善. 电子装备自动测试系统发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 7 (6): 1019-1021.
 [2] 赵会兵. 虚拟仪器技术规范与系统集成 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
 [3] James Truchard. The future of virtual instrumentation [J]. Measurement & Control Technology, 2002, 21 (9): 1-2.

[4] 焦金辉. 电台自动测试系统软件实现与故障诊断技术研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
 [5] 张光军. 嵌入式电台测试仪显控软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
 [6] GB/T6933-1995, 短波单边带发射机电性能测量方法 [S].
 [7] GB/T6934-1995, 短波单边带接收机电性能测量方法 [S].
 [8] 江波, 唐普英. 基于复调制的 ZoomFFT 算法在局部频谱细化中的研究与实现 [J]. 大众科技, 2010 (7): 48-49.