

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2023.06.041

# 一种面向机器人抓取的铆钉视觉识别与定位测量方法

王菲儿,姜涛,朱磊,陈胤竹,金子阳  
(宿迁学院 机电工程学院,江苏 宿迁 223865)

**摘要:**视觉引导机器人定位抓取研究和应用逐渐广泛,其关键问题是基于视觉的被测对象高精度测量定位。以抽芯铆钉作为研究对象,研究一种面向机器人抓取的抽芯铆钉视觉识别与定位测量方法,研制一种融合视觉系统的抓取末端。设计一种基于多重腐蚀和膨胀算子的抽芯铆钉钉头图像分割方法,可有效实现抽芯铆钉钉头和钉杆的分离。基于PCA算法对抓取角度进行主方向分析,根据抓取要求对主方向进行校正。基于单应矩阵变换,实现图像坐标系和机器人末端夹爪坐标系标定。通过实验验证了抽芯铆钉视觉识别的效果。

**关键词:**视觉测量;识别抓取;图像处理;抽芯铆钉;单应矩阵

**中图分类号:**TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0164-04

## A Rivet Visual Recognition and Positioning Measurement Method for Robot Grasping

WANG Feier, JIANG Tao, ZHU Lei, CHEN Yinzhong, JIN Ziyang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian University, Suqian 223865, China)

**Abstract:** The research and application of vision guided robot positioning and grasping are becoming more and more extensive, and the key factor lies in the high-precision measurement and positioning of the measured object based on vision. Taking blind rivets as the research object, studies a visual recognition and positioning measurement method of blind rivets for robot grasping, and develops a grasping end of fusion vision system. An image segmentation method of blind rivet head based on multiple corrosion and expansion operators is designed, which can effectively realize the separation of blind rivet head and nail rod. The principal direction of the grasping angle is analyzed based on PCA algorithm, and the principal direction is corrected according to the grasping requirements. Based on homography matrix transformation, the image coordinate system and the robot end gripper coordinate system are calibrated. The effect of visual recognition of blind rivets is verified by experiments.

**Keywords:** visual measurement; recognition and grasping; image processing; blind rivets; homography matrix

## 0 引言

抽芯铆钉是航空航天领域常用的连接件,在飞机表面有大量的铆钉,采用人工铆接效率低、费时而且价格昂贵,利用工业机器人进行铆接工作,节省了大量的时间和劳动力,提高了自动化水平。视觉系统在零件尺寸测量方面应用越来越广泛,也产生了视觉引导机器人抓取技术的研究和应用<sup>[1-2]</sup>。利用视觉系统作为测量设备,对抽芯铆钉进行测量和定位,然后将测量到的位姿信息通过标定变换到机器人坐标系下<sup>[3]</sup>,控制机器人进行抓取,对提升自动铆接效率具有重要意义。

大量的铆钉散乱地堆叠在盒子容器中,需要识别与分割出铆钉轮廓,对视觉识别与定位是个挑战。针对具有特殊结构的视觉测量,主要难点在于在图像中提取被测特征。目前基于视觉或光学的铆钉检测方法主要集中在研究端面尺寸、平齐度等参数的测量。例如,王德重等<sup>[4]</sup>提出了利用双目多线结构光系统进行铆钉平齐度的测量方法,该方法通过重建铆钉钉头轮廓三维坐标,进行铆钉端

面轮廓尺寸参数测量。该方法是基于三维点云处理的方法,较难实现自动化测量。类似地,国荣辉等<sup>[5]</sup>提出基于图像-点云映射的铆钉平齐度测量方法,提升了铆钉测量的效率,其点云分割效果依赖于图像处理结果。谢松乐<sup>[6]</sup>研制了基于机器视觉的铆钉薄板几何参数测量系统,实现了铆钉连接处尺寸特征的测量。XIE Q等<sup>[7]</sup>提出了一种基于三维点云的铆钉端面尺寸自动分割与测量方法,但是其依赖大量的铆钉真实端面点云,较为耗时。同样,WANG Y F等<sup>[8]</sup>利用结构光测量系统重建出铆钉端面点云,然后从点云中提取特征得到铆钉尺寸信息。除了铆钉的端面尺寸,铆钉整体尺寸测量对于确定铆钉工艺参数具有重要意义,JIANG T等<sup>[9]</sup>研究了基于双目的铆钉骨架线三维重建方法,其可以得到铆钉钉头尺寸及铆钉的偏转角度,便于后续铆钉分拣处理。石双江等<sup>[10]</sup>研发了一种基于视觉测量的铆钉分拣系统,实现了铆钉尺寸测量,但是其铆钉图像较为理想,在复杂背景下将失去效果。胡江涛<sup>[11]</sup>研制了一种基于视觉的铆钉尺寸和缺陷检测系统,可实现铆钉内径、埋头角度、外圆直径、表面缺陷等特征参

**基金项目:**宿迁学院大学生创新创业训练计划项目(2021XSJ140Y);宿迁学院高层次人才引进项目(校2022XRC012)

**第一作者简介:**王菲儿(2001—),女,江苏宿迁人,本科,研究方向为智能制造,552361273@qq.com。

数的测量。该测量系统鲁棒性较差,对于有重叠交叉的铆钉图像处理效果有待提升。综上所述,目前采用机器视觉进行铆钉尺寸测量的方法中,针对散堆抽芯铆钉尺寸测量的研究较少,故面向自动化引导抓取的铆钉测量系统仍具有较大研究空间。

本文针对机器人自动化铆钉识别抓取应用,研制了融合视觉测量的末端抓取机构,提出了一种基于多重腐蚀和膨胀算子的铆钉钉头图像分割方法,基于 PCA 算法进行抓取方向的提取和校正,利用单应矩阵对机器人视觉系统进行标定,并开展实验验证了铆钉图像处理效果和机器人抓取效果。本文所提方法实现了在散堆状态下铆钉抓取点的定位测量,对提升机器人抓取和铆接作业的自动化具有重要意义。

## 1 视觉引导机器人铆钉抓取系统

### 1.1 系统构成及工作原理

视觉引导机器人铆钉抓取系统如图 1 所示。主要包括 1 台基于 KUKA KR6 R900 工业机器人,它通过 6 个伺服电机连接减速器、同步带轮等驱动 6 个关节轴转动,具有精度高、可编程等特点,有利于提高抽芯铆钉抓取率,可控制错误率。此外系统还包括 1 台可通过 USB 接口、

DVI-I 接口、互联网及多核技术进行连接的示教器;1 台具有无反射触摸屏、集成 USB 接口、触觉移动键、可热插拔的示教器;2 个 Imaging 工业相机;1 个具有黑色背景盒子容器以及自主研制的夹爪。图 1(a)中末端夹爪由 1 台伺服电机通过减速器同步带轮实现 2 个夹爪的啮合与展开,在夹爪的两侧分别对称设置 2 台 Imaging 工业相机,以此实现对于抽芯铆钉的定位。此外,除了传统的夹取与啮合结构,在夹具内部设置有 1 个电磁装置,使夹爪前端产生一定量磁场,磁场大小经计算仅在夹爪靠近抽芯铆钉时才具有一定吸附能力,以此方便夹爪更加迅速稳固地夹取抽芯铆钉。

系统工作原理如下:双目相机安装在机器人末端,装有铆钉的盒子放在工作平台上,铆钉散乱放置在铆钉盒子中。在进行检测与抓取控制之前,需要对整个系统进行标定。机器人每次运动到一个示教点,触发相机捕获图像,检测出铆钉的位姿后,通过标定的转换关系,将铆钉位姿信息转到机器人坐标系下,控制机器人进行抓取。

图 1(b)为铆钉的结构图,抽芯铆钉由钉头和钉杆两部分组成。机器人抓取的点为钉头的  $e$  点,并且保证抓取的方向一致,针对不同的铆钉和不同抓取次数,抓取的方向均为  $da$  方向,故需要双目测量的信息为抓取点  $e$  的坐标和抓取角度  $\alpha$ 。

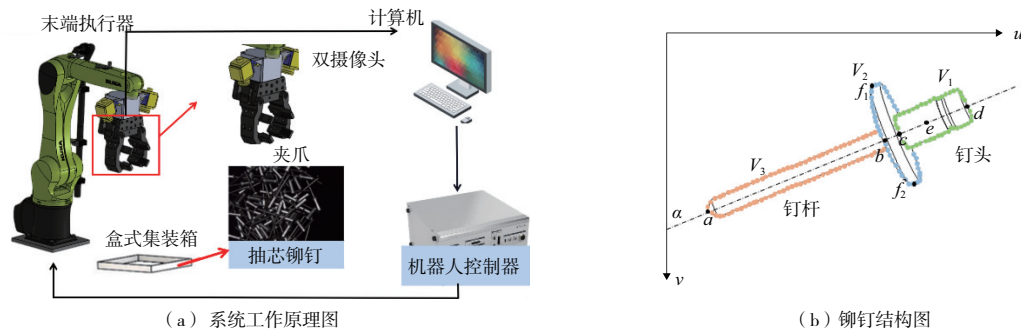


图 1 双目视觉辅助机器人铆钉抓取的系统结构图

### 1.2 基于单应矩阵的手眼标定

假设散堆铆钉近似分布在同一个平面内,则图像平面和机器人抓取平面存在一一映射的关系。本文基于平面变换原理,采用单应矩阵变换的方法,实现图像坐标系到机器人抓取坐标系的标定。单应性变换从一个平面到另一个平面的透视投影,在相机标定、相机成像、图像拼接等领域应用广泛。单应矩阵是  $3 \times 3$  的矩阵,若两个平面上的点  $(x, y)$  和  $(x', y')$  存在一一映射关系,则其单应性变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $(x, y)$ 、 $(x', y')$  分别表示原始点与对应变换点的坐标;  $\mathbf{H}$  为  $3 \times 3$  单应性矩阵。如令  $h_{33} = 1$ , 则可将上式整理为  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  形式的矩阵方程。单应性矩阵  $\mathbf{H}$  的自由度为 8,

在相差一个尺度因子的情况下,需要 4 对特征点即可求解  $\mathbf{H}$  各个元素的值,通过多组匹配点可对单应矩阵进行优化:

$$\mathbf{H}^* = \sum_{i=1}^n \|m_i - \mathbf{H}m'_i\| \quad (2)$$

具体实施时,在平面内设置 4 个标志点,保证 4 个标志点在相机视野的同一平面内,记录标志点在图像坐标系下的坐标。控制机器人移动,分别顺序移动到标志点中心位置,记录此时机器人坐标系下末端坐标。将获得的图像坐标系下和机器人坐标系下的对应点输入单应矩阵求解公式,计算出单应矩阵数值,得到标定结果。移动标定板对标定参数进行检验。

## 2 散堆铆钉抓取点识别与定位

本文提出了基于视觉的抽芯铆钉测量图像处理路线,如图 2 所示。

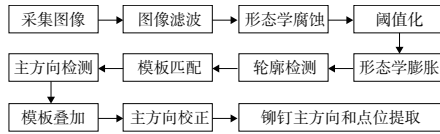


图2 抽芯铆钉图像处理算法流程图

图2展示了抽芯铆钉图像处理的路线,其主要目的是获得铆钉钉头的图像点以及铆钉钉杆的朝向。首先,采集到图像之后,对图像进行中值滤波和高斯滤波,去除图像中的椒盐噪声和高斯噪声。然后,对滤波后的图像进行多次腐蚀运算,将高光部分腐蚀掉,去除了钉芯部分的图像信息,同时保留钉头的图像信息。由于进行了多次腐蚀运算,图像整体灰度降低,只需要设置很低的阈值即可满足要求。接下来对图像进行多重膨胀操作,使得大部分钉头图像得到保留,再对图像进行查找轮廓处理,便得到图像中所有的轮廓。为保证查找的轮廓是钉头轮廓,进行轮廓矩匹配。确定了钉头轮廓之后便可以确定机器人抓取点坐标。但是,为保证抓取方向一致性,必须确定抽芯铆钉钉头和钉杆的朝向。在图像处理中,引入PCA算法,对检测到的轮廓进行主成分分析,并提出利用图像掩膜相减的方法进行主方向的校正。通过校正之后的主方向作为机器人抓取的角度。

## 2.1 钉头检测与抓取点计算

考虑到铆钉是堆叠在黑色背景中的,并且在相对稳定的测量环境中,图像处理的主要目标就是提取出铆钉抓取部分的钉头部分对应的图像。观察铆钉图像可以看出,铆钉是圆柱形,图像具有高亮的部分,而且钉头与钉芯亮度不同。因此,可采用形态学运算进行处理。

首先,对图像进行中值滤波和高斯滤波,去除图像中的椒盐噪声和高斯噪声。若原图像为 $I_0$ ,经过中值滤波和高斯滤波后,更新图像 $I_0$ 。其次,对滤波后的图像进行多次腐蚀运算。腐蚀运算的目的是将高光部分的腐蚀掉,这样操作的好处是去除了钉芯部分的图像信息,同时保留了钉头的图像信息。铆钉背景为黑色,利用腐蚀运算可以将灰度较低的像素变为黑色。定义输入图像和输出图像分

别为 $src$ 和 $dst$ ,定义 $5 \times 5$ 的腐蚀模板 $S$ 。若腐蚀算子表示为 $\odot$ ,腐蚀后的图像为 $I_1$ ,则 $I_1 = I_0 \odot S_1 \dots S_1$ , $S_1$ 为腐蚀模板。接着,对图像进行二值化操作,二值化的阈值是需要确定的参数,阈值化后的图像 $I_2$ 可表示为

$$I_2 = \begin{cases} 0, & I_2(x,y) < T \\ 255, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

由于进行了多次腐蚀运算,图像整体灰度降低,只需要设置很低的阈值即可满足要求。接下来对图像进行膨胀操作,即 $I_3 = (I_2 \oplus S_2) \dots \oplus S_2$ , $S_2$ 为膨胀模板。这个操作就扩大了图像白色区域的大小。大部分钉头图像得到保留,对图像进行查找轮廓处理,便得到图像中所有的轮廓。最后,为保证查找的轮廓是钉头轮廓,事先训练钉头轮廓的样本,然后将查找到的轮廓的轮廓矩进行相似度比较。

图1中 $V_i(i=1,2,3)$ 分别为铆钉不同部分的轮廓,用 $V_{ij}(x_{ij},y_{ij})$ 表示对应轮廓的图像坐标,则钉头部分轮廓质心即为 $V_1$ 的矩心 $e=(x_e,y_e)$ 。抓取的图像坐标计算完成后,利用单应变换,可将其坐标系转至机器人末端坐标系下。

## 2.2 基于PCA的抓取方向计算

$V_{ij}$ 是图像平面的一些散点,由于铆钉结构的特殊性,这些散点之间存在一定相关性,即散点的一个主方向与铆钉轴线方向平行。根据PCA算法知,二维散点的主方向就是协方差矩阵的特征向量。从而,根据特征向量与图像坐标系的夹角可以确定 $\alpha$ 。对PCA进行一定改进,即用SVD分解求解特征向量。由于协方差矩阵是正定矩阵,记为 $C=AA^T=A^T A$ 。由SVD分解可知, $A=USV^T$ 。其中, $U$ 是 $C$ 的特征向量, $V$ 是 $C$ 的特征向量,而 $S$ 则是 $C$ 特征值的平方根。所以,对 $C$ 进行特征值分解就等价于对 $A$ 直接进行SVD分解。这个过程省去了协方差矩阵的计算,因此效率更高。铆钉轮廓的两个主方向即为 $V=[v_1,v_2]$ 。则抓取角度 $\alpha=\arctan(v_{12}/v_{11})$ ,其中 $v_{11},v_{12}$ 为 $v_1$ 的两个分量。

## 3 实验及结果分析

### 3.1 钉头定位测量结果与分析

获得铆钉图像后,利用图2的算法流程进行铆钉钉头部分的识别与检测。钉头轮廓的检测结果如图3所示。

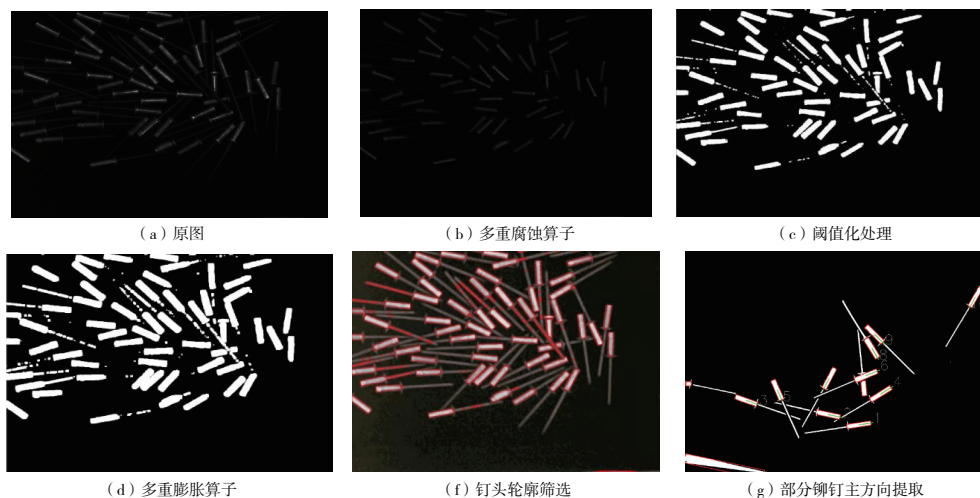


图3 钉头检测图像处理

图 3(a) 是铆钉原图像,是铆钉比较分散且曝光较低的情况,散堆的铆钉之间有较少的相互遮挡。从图 3(a) 可以看出,钉头部分灰度值较高,具有较多的铆钉且曝光较高,但是铆钉之间的遮挡情况比较少。图 3(b) 是经过多次腐蚀处理之后,钉芯图像几乎消失。图 3(c) 是经过阈值化和膨胀处理,基本保留了所有的钉头信息。图 3(d) 经过多次膨胀可以容易获得钉头轮廓图 3(f)。获得铆钉钉头轮廓后,进行铆钉理想主方向检测。以图 3(a) 为例,计算所有检测到的铆钉位姿参数。部分铆钉的位姿数据如表 1 所示。数据  $z$  方向相差不大,这与实际情况相符合,因为铆钉基本位于同一个平面。

表 1 34 个铆钉位姿参数

铆钉序号	$x$	$y$	$z$	$\alpha$
0	58.46	7.38	593.55	-0.07
1	45.38	4.78	591.60	-0.44
2	79.82	0.95	594.05	-0.34
3	86.97	0.76	593.92	-0.70
4	-16.72	-7.42	589.76	2.18
5	46.01	-6.64	592.58	0.05

### 3.2 机器人抓取结果与分析

对于机器人抓取系统,一次测量至少能准确检测到一个铆钉,双目测量结果可以满足需求。根据测量结果和预先标定的手眼矩阵,引导机器人进行抓取动作。为验证视觉引导机器人抓取精度,在标定平面设置圆形标记,通过视觉测量识别定位到圆形标记点的圆心,然后将坐标变换到机器人坐标系下,控制机器人运动。经过图像识别后的圆形标志点坐标变换到机器人坐标系后,能够通过控制机器人准确定位到圆心处。为量化评价这一误差,分别计算相机坐标系下和机器人坐标系下圆形标志点圆心之间的位置。经过计算得到距离误差小于 0.2 mm,该精度完全可以保证铆钉抓取。进一步对铆钉识别抓取进行实验验证,如图 4 所示。识别之后的铆钉均能有效被抓取,说明铆钉检测的有效性。

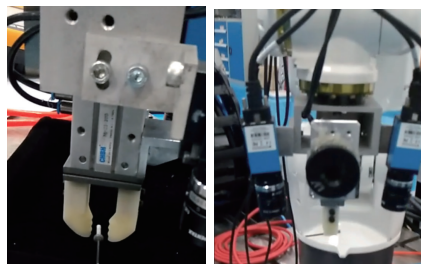


图 4 机器人抓取实验

## 4 结语

本文研究了面向机器人抓取的铆钉视觉识别与定位测量方法。提出了形态学组合图像处理方法,利用基于 SVD 分解的 PCA 算法初步确定钉头轮廓主方向,接着利用图像模板进行主方向检测。从实验结果可以看出,本系统可以获得相对稳定的铆钉检测结果,测量的准确度较高,机器人通过测量结果和预先标定好的手眼矩阵可以实现准确抓取。本文为抽芯铆钉的检测和定位测量提供了一种新的方法,为机器人视觉引导抓取提供了新的测量手段和工具。

### 参考文献:

- [1] 李世裴,韩家哺,路博凡,等. 视觉引导下协作机器人抓取技术研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(1): 42-48.
- [2] 徐博凡,赵华东,薛文凯,等. 基于视觉引导的 FANUC 机器人抓取系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(7): 111-114.
- [3] 闫兴,曹禹,王晓楠,等. 眼科手术机器人双目视觉标定方法研究[J]. 工具技术,2019,53(12):97-101.
- [4] 王德重,黄翔,李泷杲,等. 基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法[J]. 航空制造技术,2021,64(S2):57-65.
- [5] 国荣辉,张益华,崔海华,等. 基于图像-点云映射的铆钉齐平度高效检测[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(20): 328-336.
- [6] 谢松乐. 基于机器视觉的铆钉薄板几何参数测量系统研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2018.
- [7] XIE Q, LU D N, HUANG A Y, et al. RRCNet: rivet region classification network for rivet flush measurement based on 3-D point cloud [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021,70:1-12.
- [8] WANG Y F, ZHAO H J, LI X D, et al. High-accuracy 3-D sensor for rivet inspection using fringe projection profilometry with texture constraint [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(24):7270.
- [9] JIANG T, CHENG X, CUI H, et al. Dual-camera-based method for identification and location of scattered self-plugging rivets for robot grasping[J]. Measurement,2019,134:688-697.
- [10] 石双江,陈文亮,王子昱. 面向干涉量控制的铆钉智能选配技术研究[J]. 航空制造技术,2021,64(10):74-79,85.
- [11] 胡江涛. 基于机器视觉的飞机铆钉尺寸测量和缺陷检测系统的研究[D]. 西安:陕西科技大学,2017.

收稿日期:2022-05-17