面向蜂窝结构件的机器人视觉定位方法

张嘉礼'李 特'谭朝元'刘海波'刘 阔'李兰柱'王永青'

大连理工大学机械工程学院精密与特种加工教育部重点实验室,大连 116024;
 1. 航天材料及工艺研究所,北京 100076)



摘要:针对航空航天等领域蜂窝夹层结构件机器人化制造中的蜂窝型特征精确定位问题,提 出了一种利用双目视觉引导工业机器人进行蜂窝夹层结构件单孔灌注的定位方法。目标区域分割 原始双目图像,并通过双目匹配计算生成三维深度图;边缘检测、膨胀、腐蚀、骨骼提取、多边 形拟合处理左图像蜂窝棱边,获得蜂窝角点特征的二维坐标,再利用深度图获得蜂窝特征角点空 间坐标。利用6个角点坐标计算得到蜂窝芯孔的空间定位位姿信息。最后,在工业机器人和双目 相机构成的定位系统上定位试验蜂窝结构件。结果表明:该定位方法能够精确定位存在一定变形 的蜂窝芯孔(非标准六边形),其定位精度约为2mm,能够满足灌注作业精度要求。

关键词:工业机器人;机器视觉;机器人定位;蜂窝特征

Robot Vision Location Method for Honeycomb Structures

Zhang Jiali¹ Li Te¹ Tan Chaoyuan² Liu Haibo¹ Liu Kuo¹ Li Lanzhu² Wang Yongqing¹ (1. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract: Aiming at the problem of accurate localization of honeycomb feature in robotic manufacturing of honeycomb sandwich structure in aerospace field, a localization method using binocular vision to guide industrial robots in single hole filling of honeycomb sandwich structure is proposed. Firstly, the binocular image is segmented into target regions, and the three-dimensional depth map is generated by binocular matching calculation. Then, edge detection, dilation, erosion, skeleton extraction and polygon fitting are carried out on the left camera image to obtain the two-dimensional coordinates of the honeycomb corner feature, and then the actual three-dimensional coordinates are calculated according to the two-dimensional positioning results in depth maps. The position and rotation information of honeycomb holes are obtained by the three-dimensional coordinates. Finally, the positioning experiment of honeycomb structure parts is carried out on the positioning system composed of industrial robot and binocular camera. The experimental results show that the proposed location method can accurately locate honeycomb holes (non-standard hexagon) with certain deformation. The positioning accuracy is less than 2mm, and the positioning accuracy can meet the accuracy requirements of subsequent perfusion operations.

Key words: industrial robot; machine vision; robot localization; honeycomb structure

基金项目:国家自然科学基金 (51805071);中央高校基本科研业务费 DUT17JC16、DUT18RC(3)073。

作者简介:张嘉礼(1994),硕士,机械设计制造及其自动化专业;研究方向:机器人控制。 收稿日期:2019-02-25

设计・工艺

1 引言

为保证飞机等飞行器内部重要仪器设备的安全 性,需要在某些结构部件中安装蜂窝夹层^[1, 2]。密集排 列的蜂窝状芯孔较多采用隔热件夹层结构。制造蜂窝 夹层结构件时,需要在芯孔中填充隔热材料^[3, 4]。为解 决人工灌注出现的质量差、效率低、劳动强度高等难 题,制造过程机器人化已成为迫切需求。机器人灌注 装置在蜂窝结构件上的精准定位是技术难题之一。

针对机器人定位问题,国内外学者提出了很多行 之有效的方法。孟浩^[5]等提出了一种结合 SIFT 特征点 的双目立体视觉定位方法,能够对双目视觉中的左右 图像分别检测特征点实现精确双目定位。李靖^[6]等为降 低双目视觉中稠密对应点匹配的复杂度,引入编码结 构光条纹约束空间从而实现三维重建。宋忠超^[7]基于三 维光学扫描,将处理后的点云数据与三坐标测量仪数 据相融合,有效解决了蜂窝轮廓的计算。李刚^[8]针对密 集规则排列物体,提出了一种特征拟合方法实现蜂窝 孔中心的识别定位。仲训杲^[9]等研究了多模特征深度学 习与融合方法,并应用于高精度定位引导。然而,由 于密集排列的隔热夹层件存在局部变形、毛刺、大量 重复特征等不利于识别因素,导致机器人末端执行装 置定位难度较大。

因此,以蜂窝夹层件芯孔的精确定位为目标,提 出了一种基于双目立体视觉的机器人末端执行装置定 位方法。通过分析蜂窝排列方式,分割出目标区域降 低处理难度;采用基于闭运算的蜂窝角点特征提取方 法计算蜂窝角点坐标;根据角点坐标计算出蜂窝轮廓 的空间位姿;最后,验证了所提定位方法对蜂窝特征 结构件的有效性。

2 基于双目立体视觉的定位原理



图1 隔热夹层件实物

夹层结构件一般由密集排布的正六边形蜂窝芯孔 构成,如图 1 所示。视觉定位目的在于辅助机器人及 末端执行装置精准定位在芯孔的中心位置。由于制造 工艺限制,蜂窝芯孔往往存在一定程度的不规则形变 和边缘毛刺。因此,蜂窝芯孔的视觉定位存在以下特 点:

a. 特征重复:蜂窝芯孔的高重复性会使几何特征 难以区分,引起视觉测量过程中目标点误匹配,从而 导致识别误差;

b. 几何变形:蜂窝受挤压等因素影响,实际形状 与正六边形有一定偏差,导致难以用先验模型特征匹 配识别;

c. 毛刺干扰:蜂窝棱边凸起的毛刺会影响边界特征分布,导致边缘提取困难。

综合考虑蜂窝芯孔视觉定位特点及空间位姿识别 需求,提出了一种基于双目立体视觉信息的机器人精 准定位方法。



双目立体视觉定位是基于视差原理由左右两个相 机图像中匹配点的二维像素坐标重建空间点三维坐 标。如图 2 所示,设左相机坐标系为 *O_rX₁Y₁Z₁*,原点位 于光心上,其图像坐标系为 *o_r-X₁y₁Z₁*,有效焦距为 *f₁*; 右相机坐标系为 *O_r-X_rY₁Z_r*,原点位于光心上,其图像 坐标系为 *o_r-x_ry_rZ_r*,有效焦距为 *f_r*;*P* 为物体空间点, 在左右两相机平面内的坐标分别为(*x₁*, *y₁*)和(*x_r*, *y_r*);世 界坐标系与左相机坐标系重合,且右相机坐标系与左 相机坐标系之间的位置关系可由一个空间转换矩阵表 示:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \begin{vmatrix} X_l \\ Y_l \\ Z_l \\ 1 \end{vmatrix}$$
(1)

空间点三维坐标可以表示为:

$$\begin{cases} X = Zx_{l} / f_{l} \\ Y = Zy_{l} / f_{l} \\ Z = \frac{f_{l} (f_{r}t_{x} - x_{r}t_{z})}{X_{r} (r_{7}x_{l} + r_{8}y_{l} + f_{l}r_{9}) - f_{r} (r_{1}x_{l} + r_{2}y_{1} + f_{l}r_{3})} \\ = \frac{f_{l} (f_{r}t_{y} - y_{r}t_{z})}{Y_{r} (r_{7}x_{l} + r_{8}Yy + f_{l}r_{9}) - f_{r} (r_{4}x_{l} + r_{5}y_{1} + f_{l}r_{6})} \end{cases}$$
(2)



图 3 双目视觉定位流程图

基于双目视觉的蜂窝特征定位方法流程如图 3 所 示,具体为:

a. 将双目相机安装于工业机器人末端法兰盘上, 组成手眼检测系统;

b. 根据蜂窝分布特征分割定位芯孔的目标区域图 像,以降低计算复杂度;

c. 双目图像立体匹配、视差计算及深度图构建;

d. 左右相机图像预处理,获取蜂窝角点在图像中的二维坐标信息;

e. 根据深度图, 解算角点特征的三维坐标信息;

f. 根据目标蜂窝角点特征的空间坐标计算蜂窝芯 孔位姿,完成空间定位。

3 蜂窝芯孔特征图像处理方法

3.1 目标区域图像分割

蜂窝型结构中含有大量重复性特征,在双目匹配 过程中会导致特征点的误匹配从而对测量精度产生影 响。因此,提出分割双目图像的方法,以保留目标区 域局部特征,同时缩小搜索空间,提高计算速度。

图像的分割效果如图 4 所示。结合蜂窝材料的成 型方法,找到与粘胶垂直的方向,即图 4 中的水平方 向,该方向上的蜂窝呈直线均布。根据视场范围、相 机机距和采集高度计算出同一特征在左右两幅图像中 的视差值。分别只选取固定视差的区域为有效区域计 算,例如图 4 中的实线框区域。完成一个蜂窝孔的定 位后,相机沿水平方向平移一个蜂窝的位置,则虚线 框中的蜂窝会进入有效区域。通过调整第一次拍照的 位置就可以对同一行的蜂窝连续定位计算。



a 左相机图像



b 右相机图像 图4 图像分割效果

3.2 基于闭运算的蜂窝角点特征提取

蜂窝的不规则变形与随机分布的毛刺会导致特征 边界像素点灰度值分布不均匀,从而严重干扰对蜂窝 边界特征的识别与提取。提出基于闭运算原理的蜂窝 角点特征提取方法,获得角点三维坐标。

首先,立体匹配分割处理后的双目图像。综合考虑计算速度与精度要求,采用块匹配算法^[10]。块匹配算法使用绝对误差累计的小窗口来检测两幅图像之间的匹配点。最优匹配点是由匹配代价决定的。匹配代价值越小表示匹配度越高。双目匹配分割后有效区域得到视差图,结合相机内外参数计算出深度信息,即图像每个特征点的三维坐标。

匹配代价公式如下:

$$C(x, y, d) = \sum_{(x, y) \in D} \left| E_l(x, y) - E_r(x + d, y) \right|$$
(3)

其中, *E*、*D*和*d*分别表示匹配窗口中点的灰度值、 窗口大小和窗口位移量。



图 5 左图像二维角点特征提取

选取左图像,基于闭运算提取二维角点特征坐标, 如图 5 所示。提取过程包括边缘检测、膨胀、腐蚀和 骨骼提取 4 个步骤。

步骤 1: 基于 Canny 边缘检测方法检测分割后的 局部蜂窝图像边缘。Canny 边缘检测是基于图像梯度 理论的边缘检测算法,其原理是将原始图像矩阵f(x, y)进行高斯滤波,并得到矩阵 $f(x, y) \times G_a(x, y)$ (α 为尺度 因子)。再对矩阵 $f(x, y) \times G_a(x, y)$ 进行梯度计算,其梯 度矢量的模 M_a 和方向 A_a 分别为:

$$M_a = \left\| f(x, y) * \nabla G_a(x, y) \right\| \tag{4}$$

$$A_{\alpha} = \frac{f(x,y)^* \nabla G_{\alpha}(x,y)}{\left\| f(x,y)^* \nabla G_{\alpha}(x,y) \right\|}$$
(5)

图像边缘特征点即为在 A_a方向上使 M_a取得局部 极大值的点。如图 5a 所示, 左蜂窝图像经边缘检测后 只剩下六边形蜂窝边缘轮廓信息。边缘提取实现了亮 度变化明显特征点的标识及噪点剔除。

步骤 2:采用膨胀算法将由蜂窝变形和光线引起的 边缘不完整特征进行修补,如图 5b 所示,实现两条不 完整的蜂窝棱边的封闭连接。

步骤 3: 基于腐蚀算法细化膨胀后图像如图 5c 所示,消除小且无意义的点。由膨胀和腐蚀组成的闭运 算方法具有填充蜂窝棱边图像的不规则细小空洞、连 接邻近特征及平滑边界的作用。

步骤 4: 基于 Zhang 并行快速细化算法的骨骼提 取运算。骨骼提取运算是将图像核心骨架特征保留与 赘余点删除的方法。Zhang 并行快速细化算法具有速 度快、曲线连通和无毛刺等特点^[11],适合于蜂窝型结 构的骨骼提取。如图 5d 所示,经骨骼提取后,可将腐 蚀后的蜂窝棱边厚度进一步消除,得到由棱边中心特 征点组成的单像素厚度轮廓。

基于道格拉斯-普克算法进行蜂窝棱边轮廓点集 的多边形拟合,获得蜂窝角点在图像当中的二维坐标 值。道格拉斯-普克算法是将曲线近似表示为一系列点 组成的折线,以减少点数量的一种拟合算法。拟合效 果如图 6a 所示,将拟合结果投影到原图上的效果如图 6b 所示。可以看出,本文所提出的基于闭运算的蜂窝 角点特征提取方法能够准确有效地得到蜂窝角点在单 幅图像中的二维坐标值。将拟合得到的二维蜂窝角点 坐标代入深度图中,计算得到目标蜂窝的 6 个角点三 维坐标值。



图 6 图像预处理流程

3.3 蜂窝芯孔空间定位模型

在获得蜂窝特征角点在世界坐标系(即左相机坐标系)*O_l-X_lY_lZ_l*下的空间坐标*P*₁~*P*₆后,如图7所示, 需要建立蜂窝芯孔定位模型,即机器人末端为实现灌 注操作需要到达的空间位姿点。



图 7 蜂窝芯孔位姿计算方法

蜂窝芯孔中心点 P 的坐标可以认为是 6 个蜂窝角 点坐标值的平均值:

$$P = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6)/6$$
(6)

使用最小二乘法可以将 6 个蜂窝角点拟合出一个 蜂窝表面所在的平面,该平面的法向量即为蜂窝芯孔 的空间姿态 *R*。

4 机器人视觉定位实验

4.1 系统搭建

基于双目视觉的工业机器人蜂窝灌注定位系统主要由 KUKA 工业机器人、双目工业相机和控制系统三部分组成,如图 8 所示。



图 8 基于视觉的工业机器人蜂窝灌注定位系统

采用 KUKA KR120R 2500PRO 型工业机器人,其 有效负载120kg、工作半径2500mm,能够实现2m×1.5m 蜂窝件的全区域定位。采用 Basler acA2440-20gm 型工 业相机,其分辨率为2440px×2040px、搭配镜头焦距为 8mm。当相机采集距离为200mm 时,有效视野为 215mm×180mm、分辨率为0.088mm,能够满足视觉定位精度需求。

工业相机固定在机器人末端的执行装置上,与机器人构成一个"眼在手"的视觉定位系统。工业相机通过网线将采集到的蜂窝图像发送给控制系统。控制系统以 visual studio2017为开发工具,实现机器人定位功能。控制系统通过 TCP/IP 协议将蜂窝芯孔定位的位姿数据传递给机器人。机器人根据接收到位姿数据规划轨迹并移动到目标位置,完成定位。

4.2 定位实验结果

在基于双目视觉的机器人定位精度验证试验中, 采用边长 15mm、棱边厚 1.5mm、孔深 50mm 的蜂窝 结构件,并选取 5 个具有不同变形特征的蜂窝芯孔, 如图 9 所示。



图 9 试验用蜂窝件

	表1 >	mm	
编号	实际定位坐标	理论坐标	定位误差
1	(1597.28, -1711.69, 553.13)	(1596.37, -1710.53, 551.25)	(0.91, -1.16, 1.88)
2	(1665.37, -1643.13, 550.71)	(1664.94, -1642.22, 549.53)	(0.43, -0.91, 1.24)
3	(1396.64, -1951.60, 551.33)	(1395.85, -1951.33, 552.52)	(0.79, -0.27, -1.19,)
4	(1804.30, -1840.15, 552.27)	(1802.93, -1839.84, 551.11)	(1.37, -0.31, 1.16)
5	(1917.95, -1236.92, 544.24)	(1917.22, -1236.32, 543.55)	(0.73, -0.30, 0.69)

表2 机器人B、C轴定位结果

编号	实际定位偏角	理论偏角	定位误差
1	(45.00, 2.15, -178.86)	(45.00, 0.83, -178.44)	(0, 1.32, -0.42)
2	(45.00, 1.99, -179.56)	(45.00, -0.09, 179.12)	(0, 2.08, -1.44)
3	(45.00, -8.47, -176.96)	(45.00, -11.02, -174.07)	(0, 2.55, -2.89)
4	(45.00, -4.54, -178.45)	(45.00, -2.12, -177.29)	(0, 2.42, -1.16)
5	(45.00, 19.88, 175.26)	(45.00, 22.21, 177.83)	(0, -2.33, -2.57)

在机器人达到实际定位位置后,记录下实际定位

位置的机器人末端执行器六自由度坐标。再通过示教

()

5 结束语

参考文献

- 梁馨,谭朝元,罗丽娟,等. 低密度防热材料烧蚀性能研究[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 298~301
- 2 陈华建.大型球冠蜂窝结构防热层自动灌注机器人系统研究[D].北京: 北京交通大学,2016
- 3 马秀萍,郭亚林,张祎. 轻质烧蚀防热材料研究进展[J]. 航天制造技术, 2018(1): 2~6
- 4 武海生,郑建虎,徐伟丽,等. 航天器蜂窝夹层结构胶膜热破工艺研究[J]. 航天制造技术,2015(4): 10~13
- 5 孟浩,程康. 基于 SIFT 特征点的双目视觉定位[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(6): 649~652, 675
- 6 李靖,王炜,张茂军.双目立体视觉和编码结构光相结合的三维重建方法[J].计算机应用,2012,32(S2):154~158,161
- 7 宋忠超. 蜂窝芯类复合材料零件数字化测量方法研究[D]. 成都:西南交 通大学,2017
- 8 李刚. 基于机器视觉的密集复杂物体识别与定位[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013
- 9 仲训杲,徐敏,仲训昱,等.基于多模特征深度学习的机器人抓取判别 方法[J].自动化学报,2016,42(7):1022~1029
- 10 林森,殷新勇,唐延东.双目视觉立体匹配技术研究现状和展望[J].科学技术与工程,2017,17(30): 135~147
- 11 Zhang T Y, Suen C Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns[J]. Communications of the ACM, 1984, 27(3): 236~239

载试验^[6]。在四种工况下对吊具整体作加载试验,载荷 为对应的筒体状态。

器调整机器人位置,使其运动到后续能够灌注的理论

位置并记录下此时机器人末端执行器六自由度坐标,

将两者进行比较。X、Y、Z轴误定位结果如表1所示,

B、C轴定位结果如表 2 所示 (A 轴上误差为 0)。在水

平位移方向上实际定位位置和理论位置的定位误差最

大值为 1.37mm, 平均值为 0.72mm。考虑到灌注头直

径为16mm、蜂窝内切圆直径约为26mm,在此误差范

围内灌注头能够保证完全在蜂窝芯孔内而不会对蜂窝

造成破坏。在竖直方向上实际定位位置和理论位置的

定位误差最大值为1.88mm,平均值为1.23mm,在后

续灌注工艺允许的高度误差内。旋转方向上误差最大

值为 2.89°, 平均值为 1.92°, 蜂窝孔平均深度为 50mm

时伸入底端的最大偏差为 2.52mm, 平均偏差为

针对蜂窝材料灌注定位困难的问题,提出了一种

基于双目视觉信息定位蜂窝芯孔特征的方法,并以工

业机器人为载体,实现了机器人末端执行器的准确定

位。实验结果表明:本方法能够有效定位有轻度变形

的蜂窝芯孔,其定位精度可以满足灌注工艺需求。

2.34mm,能够满足对于后续工艺定位的需求。

a. 静载试验:将载荷提升至离地约 200mm 高,持续 15min,卸载检查,各零部件无永久变形,用十倍放大镜检查无裂纹。

b. 动载试验: 以上升不大于 3m/min; 下降不大于 2m/min 的升降速度将载荷提升至离地面约为 2.5~3m 的高度, 然后降至地面。在下降过程中制动 3 次。上 述试验过程重复 3 次。试验时在吊具正下方放置木块 保护。经试验, 吊具各组成部分无永久变形, 用十倍 放大镜检查, 无裂纹产生, 满足使用强度要求。

6 结束语

通过对筒体起吊要求分析,确定了整体方案,通 过调整链条长度适应工况变化,采用作图法计算了链 条长度,计算出链条载荷并进行选型,对关键零部件 进行了有限元分析,并通过加载试验进行验证。结果 表明,设计的吊具能够满足简体不同工况的起吊要求, 为同类吊具的设计提供参考。

参考文献

- 1 王小明. 导弹吊具自动化设计系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015
- 2 杨明元. 核电大型筒体特种专用吊具的设计研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017
- 3 王鹤. 风电传动链重心自动调整吊具的研制[J]. 金属制品, 2017, 43(2): 47~48
- 4 张珂,龙彦泽,陈建平,等.导架爬升式升降工作平台标准节吊具的设 计及其结构静力分析[J]. 沈阳建筑大学学报,2011,27(6):1183~1186
- 5 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 6 吴士杰.载荷自平衡式核岛安全壳吊具制造与试验研究[D].大连:大连 理工大学,2016