

轨道式爬行机器人制孔基准的视觉高精度定位

崔海华^{1,2*}, 漏华铖^{1,2**}, 田威¹, 张益华¹¹南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;²江苏省数字化设计制造工程技术研究中心, 江苏 南京 210016

摘要 航空航天产品结构尺寸大、面形复杂、装配精度要求高, 移动式机器人作为一种自动化装配装备, 可实现飞行器表面爬行移动装配位姿的精准定位, 补偿制孔机器人刀具中心点与工件之间的相对定位误差。针对穿心夹遮挡干扰下的装配基准三维识别与测量定位需求, 提出了一种轨道式爬行机器人制孔基准的高精度定位方法。首先, 基于灰度聚类的自适应轮廓提取算法实现基准孔轮廓的分割、识别和坐标计算; 然后, 基于靶标式高精度手眼标定方法实现基准孔坐标的三维转换; 最后, 在制孔装备上集成视觉测量系统并进行了现场测试和精度验证。实验结果表明, 本方法对基准孔的定位误差小于 0.05 mm, 满足轨道式爬行制孔机器人的装配定位需求。

关键词 机器视觉; 制孔机器人; 基准孔; 边缘检测; 手眼标定

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0915002

High-Precision Visual Positioning of Hole-Making Datum for Orbital Crawling Robot

Cui Haihua^{1,2*}, Lou Huacheng^{1,2**}, Tian Wei¹, Zhang Yihua¹

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China;

²Research Center of Digital Design and Manufacturing Engineering Technology of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Aerospace products have large structural sizes, complex surface shapes, and high assembly accuracy requirements. As automated assembly equipment, mobile robots can achieve precise positioning of aircraft surface crawling and moving assembly poses as well as compensate the relative positioning error between the tool center point of the hole-making robot and the workpiece. Aiming at the requirement of the three-dimensional recognition and measurement positioning of assembly datum under the core clip interference, we propose a high-precision positioning method for the hole-making datum of the orbital crawling robot. First, the adaptive contour extraction algorithm based on gray-scale clustering is used to achieve the segmentation, recognition, and coordinate calculation of the reference hole contour. Then, the three-dimensional conversion of the reference hole coordinates is realized using the target-type high-precision hand-eye calibration method. Finally, a visual measurement system is integrated on the hole-making equipment, and field testing and accuracy verification are carried out. Experimental results show that the positioning error of the reference hole of the method is less than 0.05 mm, thus meeting the assembly and positioning requirements of the orbital crawling hole-making robot.

Key words machine vision; hole-making robot; reference hole; edge detection; hand-eye calibration

OCIS codes 150.6910; 150.5758; 120.6650; 150.1488

收稿日期: 2020-10-26; 修回日期: 2020-11-18; 录用日期: 2020-12-01

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707501, 2019YFB2006100)、江苏省自然科学基金(BK20191280)、中央高校基本科研业务费(NS2020030)

* E-mail: cuihh@nuaa.edu.com; ** E-mail: lhc_nuaa@163.com

1 引言

新一代飞机装配零件具有体积大、装配关系复杂、一致性要求高等特点,且零件的装配用时约占飞机制造工时的一半,导致传统的人工制孔方式无法满足现代飞机制造的要求。随着现代机器人技术以及视觉测量技术的进步,基于视觉测量的机器人在航空装配中得到了广泛应用^[1-3];且相比激光测量等非接触测量技术,视觉测量技术具有布置灵活、适用范围广、局部范围测量精度高等优点。目前,德国宝捷公司、美国通用电气(GE)公司^[4-6]研制的自动钻铆系统可实现自动定位、制孔、镗窝等工艺流程,我国南京航空航天大学、浙江大学、北京航空航天大学^[7-10]也研制了专用于大型飞机装配的自动化制孔系统。

对于基于三维(3D)视觉测量引导的自动化制孔系统,高精度的制孔效果依赖于视觉系统的精密测量^[11]。定位基准圆孔经透视变换后为椭圆形,易于实现高精度测量,可应用于基于视觉测量的自动化制孔机器人领域。关于基准孔视觉测量的研究可分为两类,一类是结合基准孔的轮廓和图像灰度信息建立目标方程,继而求解方程最优解的方法,如 Wu 等^[12]提出了一种新的两步法空间圆标定法,Mei 等^[13]提出了一种基于 snake 模型的基准孔显著区域检测与优化方法,Xia 等^[14]提出了基于像素强度和能量函数模型的孔边缘检测方法,并基于双目视觉理论对提取的边缘进行优化。这类方法在干扰较少时定位精度较高,但当提取的轮廓中含有较多不属于基准孔的轮廓时,定位精度较低。另一类是基于轮廓提取的基准孔边缘高精度定位方法,如 Yu 等^[15]提出了一种基于边缘跟踪的孔轮廓提取方法,Dong 等^[16]基于椭圆的几何性质提出了一种快速弧

组合的多椭圆检测方法。这类方法的鲁棒性较强,能找到属于同一基准孔的边缘,但当基准孔被部分遮挡且边缘存在破损时,该方法的识别难度较大。上述方法得到的结果均为图像坐标,为了将定位的坐标转换到末端坐标系下还需要进行手眼标定,即求解不同坐标系之间的转换关系,一般通过多次改变机器人末端位姿的方式求解^[17-18]。如 Zhan 等^[19]针对制孔系统提出了一种忽略景深方向的二维手眼标定方法,Jiang 等^[20]提出了一种基于坐标变换的手眼标定方法,王飞龙等^[21]研究了一种基于靶标和单应性的手眼标定方法,韦溟等^[22]提出了一种基于单个工业相机的现场机器人快速自定位方法。上述标定方法在六自由度机器人中均取得了较好的标定结果,但受轨道式爬行制孔机器人姿态变化范围的限制,标定精度略低。

针对轨道式爬行制孔机器人的装配定位需求,本文提出了一种基于轮廓识别的基准孔三维定位算法。首先,针对被遮挡基准孔边缘不易识别导致的定位精度低问题,将基准孔区域的轮廓分割成轮廓弧;然后,基于孔区域的灰度值提高系统对基准孔边缘的识别率,从而实现基准孔的高精度定位;最后,针对轨道式机器人末端姿态变化范围小的特点,设计了一种靶标式高精度手眼标定方法,实现了基准孔坐标在相机坐标系和制孔机器人末端坐标系之间的精确转换。实验结果表明,本方法在实际工况下的测量精度符合制孔机器人对基准孔的定位精度要求。

2 基准测量原理和方法

2.1 基准测量原理

轨道式爬行制孔机器人整体结构呈方形,如图 1 所示。其中,四周的四条支撑柱控制机器人的上下运动,以调整末端与底面的相对距离;两侧分别

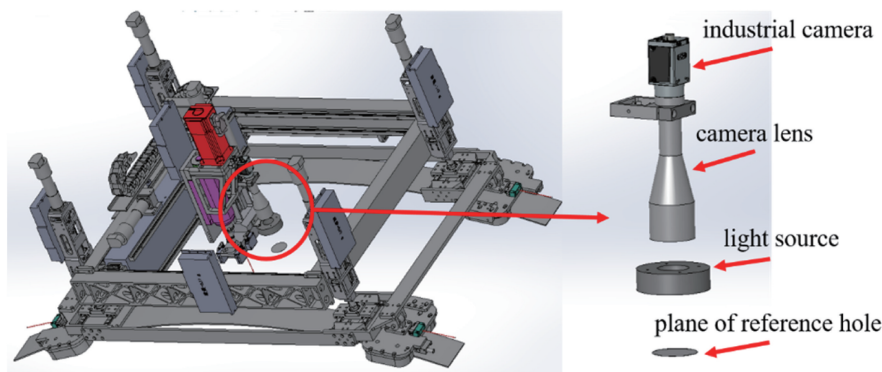


图 1 轨道式爬行制孔机器人的结构

Fig. 1 Structure of the orbital crawling hole-making robot

跨在移动轨道上,方形中间的结构为制孔末端执行器,通过末端执行的上下运动实现底面的飞机蒙皮表面制孔。末端执行器上集成了视觉定位装置(圆框部分),包括工业相机、镜头、光源和支持架等。

获得图像中的基准孔轮廓后,拟合得到基准孔孔心的图像坐标为 $[X^{pic}, Y^{pic}]^T$ 。通过轨道式爬行制孔机器人末端上的激光位移传感器以及四条支撑柱保证相机光轴与基准孔所在的平面垂直且测量高度 h 固定,则相机坐标系下的基准孔位置坐标 $[X^{camera}, Y^{camera}, Z^{camera}]^T$ 可表示为

$$s \begin{bmatrix} X^{pic} \\ Y^{pic} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{camera} \\ Y^{camera} \\ Z^{camera} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, s 为任意非零尺度因子, $\begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为相机的内参矩阵, γ 为水平与垂直方向像素尺寸比例系数, $r_{3 \times 3}$ 和 $t_{3 \times 1}$ 分别为相机的外参旋转矩阵和平移

矩阵, α_x 和 α_y 分别为图像水平和垂直方向像素比例系数, u_0 和 v_0 分别为镜头光轴在图像中心的像素坐标, $\alpha_x, \alpha_y, u_0, v_0$ 均为相机内参数,可由张正友标定法^[23]求解得到。考虑到单目测量,将世界坐标系与相机坐标系重合,即 $[r_{3 \times 3} \quad t_{3 \times 1}] = [I_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 1}]$, $Z^{camera} = h$,则 $[X^{camera}, Y^{camera}, Z^{camera}]^T$ 可表示为

$$\begin{cases} X^{camera} = \frac{h(X^{pic} - u_0)}{\alpha_x} - \frac{\gamma h(Y^{pic} - v_0)}{\alpha_x \alpha_y} \\ Y^{camera} = \frac{h(Y^{pic} - v_0)}{\alpha_y} \\ Z^{camera} = h \end{cases} \quad (2)$$

基准孔坐标的测量流程如图 2 所示,由(2)式可得到相机坐标系下基准孔的坐标,通过标定相机坐标系与环形轨道末端坐标系之间的转换矩阵 $[r_{3 \times 3}^{cam2end} \quad t_{3 \times 1}^{cam2end}]$ 将坐标 $[X^{camera}, Y^{camera}, Z^{camera}]^T$ 转换为末端坐标系下的坐标 $[X^{end}, Y^{end}, Z^{end}]^T$,可表示为

$$\begin{bmatrix} X^{end} & Y^{end} & Z^{end} \end{bmatrix}^T = [r_{3 \times 3}^{cam2end} \quad t_{3 \times 1}^{cam2end}] \begin{bmatrix} X^{camera} & Y^{camera} & Z^{camera} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

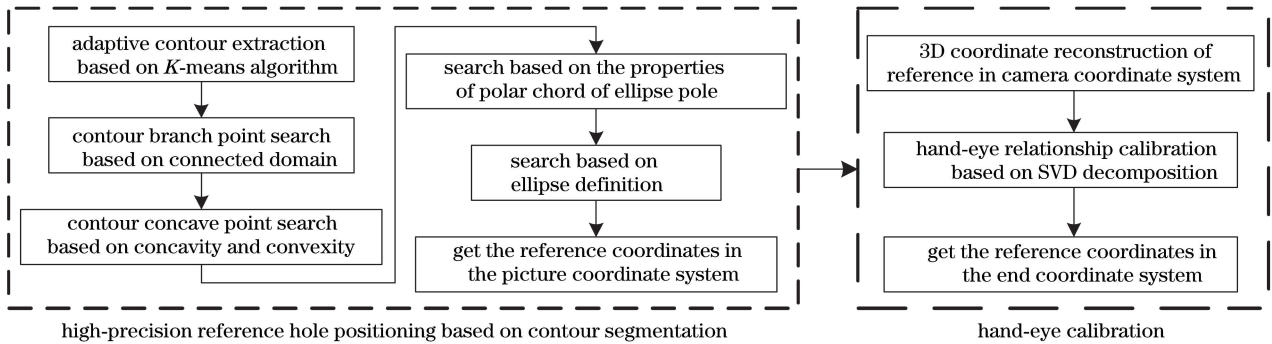


图 2 测量基准孔的流程图

Fig. 2 Flow chart of measuring reference hole

2.2 基于轮廓分割的高精度基准孔定位

一般来说,圆形基准孔边缘经成像镜头的透视变换后呈椭圆形,如图 3(a)所示。但实际上基准孔中通常含有穿心夹(航空航天装配中一种常用的初始定位工件),如图 3(b)所示。由于穿心夹是一种非标准件,用其作为定位基准难以满足制孔时对定位精度的要求。因此,定位被遮挡的基准孔需将属于基准孔的轮廓分割出来,以拟合满足制孔定位精度要求的基准测量结果。考虑到基准孔所在舱段的曲率半径远大于相机视场,本方法忽略了舱段曲率带来的影响。为了尽可能减少待分割轮廓的数量,分析了被穿心夹遮挡的基准孔图像灰度分布,结果如图 4 所示。

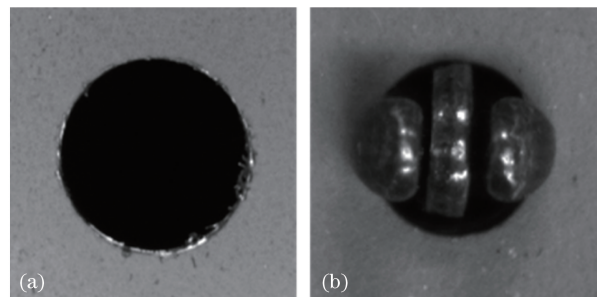


图 3 基准孔的对比。(a)普通基准孔;
(b)含穿心夹的基准孔

Fig. 3 Comparison of reference holes. (a) Ordinary reference hole; (b) reference hole with core clip

从图 4 可以发现,图像的灰度分布主要存在 5 个

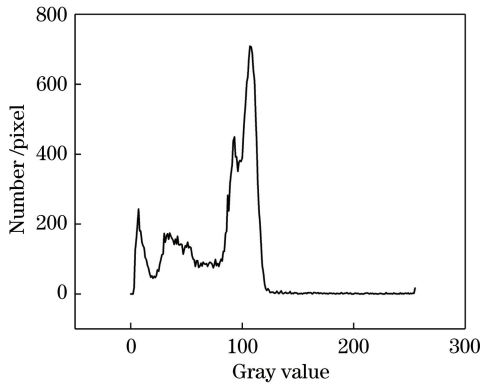


图 4 含穿心夹基准孔图像的灰度分布

Fig. 4 Gray distribution of the reference hole image with the core clip

波峰,因此用 K -means 聚类方法将基准孔图像灰度值划分为 5 类,5 个类的中心值从小到大依次为 $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$ 。由于最终需要拟合的目标是椭圆,因此需将轮廓分割成弧,主要分为轮廓分支点搜索和轮廓凹点搜索两步。首先,用 Canny 算法提取图像边缘,可表示为

$$\begin{cases} T_H = 3 \times (C_2 - C_1) \\ T_L = C_2 - C_1 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, T_H 和 T_L 分别为 Canny 算法的高阈值和低阈值。如果像素点既属于 Canny 算法提取的边缘又属于 K -means 聚类结果的 C_1 类,则保留该像素点,处理后的图像为 M_{fit} 。为了搜索图像 M_{fit} 上轮廓的分支点,定义了卷积核

$$S_{branch} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

用 l_p 表示一条轮廓,以 l_p 上的点 n_k 为中心,获取尺寸为 5×5 的图像区域 M_{branch} 与 S_{branch} 进行点乘运算。计算的图像连通域数量为 δ ,当 $\delta > 2$ 时,点 n_k 为轮廓分支点。根据获得的分支点,对轮廓进行分割后得到无分支轮廓。一个椭圆的曲率一定是平滑且连续的,即椭圆轮廓不存在曲率突变点。因此,通过搜索轮廓中的曲率突变点,将轮廓分割成多段轮廓弧。图 5 为凹点搜索示意图,选取 l_p 上点 n_k 前后连续的 i (实验中 $i=5$) 个点拟合直线,并将该直线作为点 n_k 处轮廓的切线方向 θ_k 。计算轮廓上所有点的切线方向 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$ 并计算 $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k\}$ 中连续两个切线方向 θ_{k-1}, θ_k 的变化量 $\Delta\theta$ 。如果切线的方向发生变化,则该点为凹点(如点 n_5),可

表示为

$$\begin{cases} \Delta\theta_k = \begin{cases} 1, & \theta_{k-1} \times \theta_k > 0 \\ 0, & \theta_{k-1} \times \theta_k < 0 \end{cases} \\ \Delta\theta_{k-1} + \Delta\theta_k = 1, & n_k \text{ is concave point} \end{cases}. \quad (6)$$

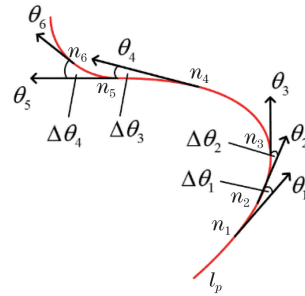


图 5 凹点搜索示意图

Fig. 5 Searching process of the concave point

根据获得的凹点再次分割上一步得到的无分支轮廓,最终获得轮廓弧。通过上述方法获得的轮廓弧包含大量的穿心夹轮廓,因此,还需结合椭圆极点、极弦性质对轮廓弧进行筛选。基准孔轮廓的粗定位如图 6 所示,同一椭圆弧上过任意两点 P_1, P_2 的两条切线交点 P_3 与 P_1P_2 中点 P_4 的连线经过椭圆中心。由于图像中只存在一个需要被检测的基准孔,因此被识别的弧应属于同一个椭圆。

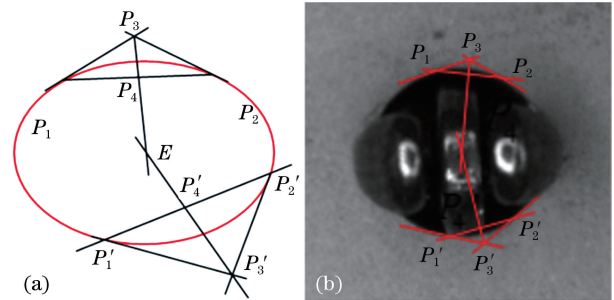


图 6 基准孔轮廓的粗定位。(a)椭圆的极点极弦定理; (b)实际基准孔的粗定位

Fig. 6 Rough positioning of the reference hole profile.

(a) Pole and pole chord theorem of the ellipse; (b) rough positioning of the actual reference hole

轮廓弧的筛选过程如下。

1) 根据 K -means 的聚类结果,提取属于 C_1 类的图像区域并对该区域进行形态学闭运算,提取形态学闭运算后图像的外轮廓。

2) 每次从外轮廓中任意选取两个像素点,计算两点切线交点和两点连线中点之间的连线,即图 6(a)中的 P_3P_4 。

3) 重复步骤 1)和步骤 2) N_{sum} (实验中取 $N_{sum} = 50$)次,计算 N_{sum} 条 P_3P_4 的交点。然后用 DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications

with noise)算法对交点进行聚类,将数量最大的类对应的点作为基准孔上的点。

4) 从步骤 3)获得的点中任意选取 5 个像素点拟合椭圆,并计算椭圆经过步骤 1)中外轮廓的像素数量;进行 50 次实验后,取经过外轮廓像素数量最多的椭圆作为基准孔对应的椭圆 E 。

5) 计算每段轮廓弧到椭圆 E 的平均距离,即轮廓弧上每一点到椭圆 E 最短距离的平均值 δ_{dis} 。当 $\delta_{dis} < 10$ 时,轮廓弧属于基准孔。

基于上述步骤筛选出的轮廓弧基本属于基准孔的边缘,但仍然包含部分干扰轮廓,因此,基于椭圆的定义对提取的弧再次进行筛选,图 7 为轮廓拟合示意图,其中,椭圆是平面内到椭圆焦点 F_1 、 F_2 距离和 $D = 2a$ 的点集合,其中, a 为椭圆长轴半径。如弧 l_2^{refer} 不属于椭圆,则无法保证 l_2^{refer} 上的点到椭圆焦点距离和 $D = 2a$ 。基于该特点,提出的轮廓弧筛选规则如下。

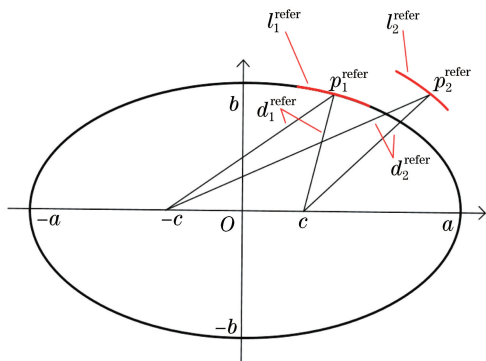


图 7 轮廓拟合示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the profile fitting

1) 将粗筛选获得的弧按弧长从长到短排序,得到轮廓弧 $\{l_1^{refer}, l_2^{refer}, l_3^{refer}, \dots, l_n^{refer}\}$ 。

2) 利用 l_1^{refer} 拟合椭圆 E_1 , p_i^{refer1} 是 l_1^{refer} 上的点, d_i^{refer1} 为点 p_i^{refer1} 到 E_1 两个焦点的距离和。当 l_1^{refer} 属于基准孔轮廓时,满足

$$\frac{1}{m} \sum_i^m |d_i^{refer1} - 2a| \leq 2, \quad (7)$$

式中, m 为 l_1^{refer} 上选择点的个数。

3) 利用 l_1^{refer} 和 l_2^{refer} 拟合椭圆 E_2 , 当 p_i^{refer2} 满足 (7) 式时, l_2^{refer} 属于基准孔轮廓。

4) 重复步骤 3), 完成对所有轮廓弧的筛选。为了防止 l_1^{refer} 是不属于基准孔的轮廓, 设置阈值 T (实验中取 $T=5$)。当连续筛选的 T 条轮廓弧均不属于基准孔轮廓时, 将 l_2^{refer} 确定为第 1 条轮廓, 以此类推, 最终确定出属于基准孔轮廓的第一条轮廓弧。

5) 用步骤 4) 筛选的轮廓弧拟合椭圆, 得到基准孔对应的轮廓。

2.3 基于靶标的高精度手眼标定

2.2 节得到的是基准孔在图像坐标系中的坐标, 还需将该坐标转换到末端坐标系下。如图 8(a) 所示, 将一块特制的标定板置于相机视场中, 标定板如图 8(b) 所示。标定板上的坐标系建立规则: 3 个大基准孔孔心连线组成的直角三角形直角处的基准孔孔心为坐标系原点 O_{calib} ; 相距较近的两个大基准孔孔心连线为 X 轴; 相距较远的两个大基准孔孔心连线为 Y 轴; 确定 X 轴、 Y 轴后根据右手法则确定出 Z 轴。

根据基准孔定位算法提取的基准孔坐标为 $\{(x_1^{pic}, y_1^{pic}), (x_2^{pic}, y_2^{pic}), \dots, (x_{12}^{pic}, y_{12}^{pic})\}$, 则标定板坐标系与相机坐标系之间的转换矩阵 $[r_{3 \times 3}^{calib2cam} \quad t_{3 \times 1}^{calib2cam}]$ 可表示为

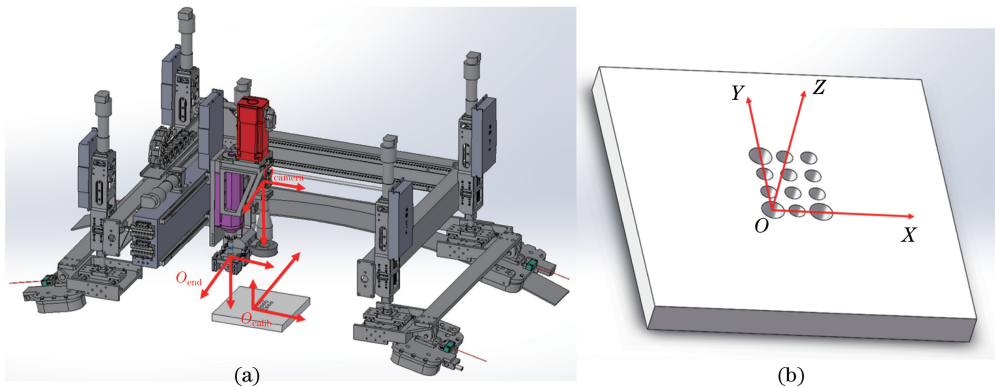


图 8 手眼标定示意图。(a)手眼标定坐标系;(b)特制靶标示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the hand-eye calibration. (a) Hand-eye calibration coordinate system; (b) schematic diagram of the special target

$$s \begin{bmatrix} x_1^{\text{pic}} & \cdots & x_{12}^{\text{pic}} \\ y_1^{\text{pic}} & \cdots & y_{12}^{\text{pic}} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & r & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1^{\text{calib}} & \cdots & x_{12}^{\text{calib}} \\ y_1^{\text{calib}} & \cdots & y_{12}^{\text{calib}} \\ z_1^{\text{calib}} & \cdots & z_{12}^{\text{calib}} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, 矩阵 $\begin{bmatrix} x_1^{\text{calib}} & \cdots & x_{12}^{\text{calib}} \\ y_1^{\text{calib}} & \cdots & y_{12}^{\text{calib}} \\ z_1^{\text{calib}} & \cdots & z_{12}^{\text{calib}} \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$ 为标定板坐标系下基准孔的坐标。

建立相机坐标系与标定板坐标系的转换关系后, 还需建立标定板坐标系与末端坐标系之间的联系。激光跟踪仪能精确测量出物体的位置, 因此用激光跟踪仪辅助建立末端坐标系与标定板坐标系之间的转换关系, 具体步骤如下。

1) 末端坐标系原点 O_{end} 建立在末端主轴刀柄安装面向下偏置一定距离的平面与主轴的交点上, X 、 Y 、 Z 轴的方向与轨道式爬行制孔机器人平移方向相同。

2) 用激光跟踪仪靶标球测量标定板上基准孔孔心在激光跟踪仪坐标系下的坐标, 并根据步骤 1) 获得末端坐标系下基准孔孔心的坐标 $P^{\text{end}} \{(x_1^{\text{end}}, y_1^{\text{end}}, z_1^{\text{end}}), \dots, (x_{12}^{\text{end}}, y_{12}^{\text{end}}, z_{12}^{\text{end}})\}$ 。

3) 基于奇异值分解 (SVD) 得到点集 $P^{\text{end}} \{(x_1^{\text{end}}, y_1^{\text{end}}, z_1^{\text{end}}), \dots, (x_{12}^{\text{end}}, y_{12}^{\text{end}}, z_{12}^{\text{end}})\}$ 和标定板坐标系下基准孔孔心的坐标 $P^{\text{calib}} \{(x_1^{\text{calib}}, y_1^{\text{calib}}, z_1^{\text{calib}}), \dots, (x_{12}^{\text{calib}}, y_{12}^{\text{calib}}, z_{12}^{\text{calib}})\}$ 之间的转换关系, 可表示为

$$\mathbf{H} = \left(\begin{bmatrix} x_1^{\text{calib}} & \cdots & x_{12}^{\text{calib}} \\ y_1^{\text{calib}} & \cdots & y_{12}^{\text{calib}} \\ z_1^{\text{calib}} & \cdots & z_{12}^{\text{calib}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{x^{\text{calib}}} & \cdots & \overline{x^{\text{calib}}} \\ \overline{y^{\text{calib}}} & \cdots & \overline{y^{\text{calib}}} \\ \overline{z^{\text{calib}}} & \cdots & \overline{z^{\text{calib}}} \end{bmatrix} \right) \cdot \left(\begin{bmatrix} x_1^{\text{end}} & \cdots & x_{12}^{\text{end}} \\ y_1^{\text{end}} & \cdots & y_{12}^{\text{end}} \\ z_1^{\text{end}} & \cdots & z_{12}^{\text{end}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{x^{\text{end}}} & \cdots & \overline{x^{\text{end}}} \\ \overline{y^{\text{end}}} & \cdots & \overline{y^{\text{end}}} \\ \overline{z^{\text{end}}} & \cdots & \overline{z^{\text{end}}} \end{bmatrix} \right)^{\text{T}}, \quad (9)$$

式中, $\overline{x^{\text{calib}}}$ 、 $\overline{y^{\text{calib}}}$ 、 $\overline{z^{\text{calib}}}$ 分别为 x^{calib} 、 y^{calib} 和 z^{calib} 的平均值, $\overline{x^{\text{end}}}$ 、 $\overline{y^{\text{end}}}$ 和 $\overline{z^{\text{end}}}$ 分别为 x^{end} 、 y^{end} 和 z^{end} 的平均值。对矩阵 \mathbf{H} 进行 SVD 分解, 得到

$$\mathbf{U} \cdot \mathbf{\Delta} \cdot \mathbf{V}^{\text{T}} = X_{\text{SVD}}(\mathbf{H}), \quad (10)$$

式中, \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 为分解得到的酉矩阵, $\mathbf{\Delta}$ 为分解得到的对

角矩阵。则标定板坐标系到末端坐标系的旋转矩阵和平移矩阵可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}^{\text{calib2end}} &= \mathbf{V} \cdot \mathbf{U}^{\text{T}} \\ \mathbf{t}^{\text{calib2end}} &= -\mathbf{r}^{\text{calib2end}} \cdot \overline{\mathbf{P}^{\text{calib}}} + \overline{\mathbf{P}^{\text{end}}}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\overline{\mathbf{P}^{\text{calib}}}$ 为标定板坐标系下各基准孔坐标的平均值, $\overline{\mathbf{P}^{\text{end}}}$ 为末端坐标系下各基准孔坐标的平均值。

相机坐标系与末端坐标系之间的转换关系 $\mathbf{T}^{\text{cam2end}}$ 可表示为

$$\mathbf{T}^{\text{cam2end}} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{3 \times 3}^{\text{cam2end}} & \mathbf{t}_{3 \times 1}^{\text{cam2end}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{\text{calib2end}} & \mathbf{t}^{\text{calib2end}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} (\mathbf{R}_{3 \times 3}^{\text{calib2cam}})^{\text{T}} & -(\mathbf{R}_{3 \times 3}^{\text{cam2calib}})^{\text{T}} \cdot \mathbf{t}_{3 \times 1}^{\text{calib2cam}} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中, $\mathbf{R}_{3 \times 3}^{\text{cam2calib}}$ 为相机坐标系到标定板坐标系的旋转矩阵。

3 实验和分析

3.1 实验装置

轨道式爬行制孔机器人的工作状态如图 9(a) 所示, 其视觉系统由工业 CCD 相机 Imaging Source、镜头和光源组成。CCD 相机拍摄的图像尺寸为 1280 pixel \times 960 pixel, 镜头是焦距为 25 mm 的 RICOH 镜头, 光源为红色环形光源。相机测量高度 $h = 250$ mm, 相机的视场范围为 48 mm \times 36 mm, 具体安装位置如图 9(b) 所示。

3.2 参数分析

基准孔定位方法中涉及到两个重要的参数: 随机选取的极点极弦次数 N_{sum} 和轮廓粗定位阈值 δ_{dis} 。为了验证这两个参数对基准孔定位的影响, 给出了不同的 N_{sum} 和 δ_{dis} 对同一张含穿心夹基准孔图像的定位结果, 如图 10 所示。坐标轴 X 、 Y 分别为基准孔定位结果的 X 坐标和 Y 坐标, Z 轴为不同的 N_{sum} 。可以发现, 当 $\delta_{\text{dis}} = 3$ 时, 随着 N_{sum} 的增大, 基准孔的测量结果存在较大波动, 不能满足制孔系统的定位要求; 相比 $\delta_{\text{dis}} = 3$, $\delta_{\text{dis}} = 6$ 时的基准孔测量结果稳定性有较大提升, 但仍存在一定的波动; 当 $\delta_{\text{dis}} = 10$ 且 $N_{\text{sum}} > 40$ 时, 测量结果已经稳定。 N_{sum} 越大, 算法的运行时间也越长, 因此, 实验时选择 $\delta_{\text{dis}} = 10$, $N_{\text{sum}} = 50$ 。

3.3 实验结果分析

用图 9(a) 中的轨道式爬行制孔机器人测试了光线较弱、光线适中、光线过强三种情况下含穿心夹基准孔的定位情况, 结果如图 11 所示。可以发现, 图像上的定位结果(椭圆区域)与基准孔的边缘重合

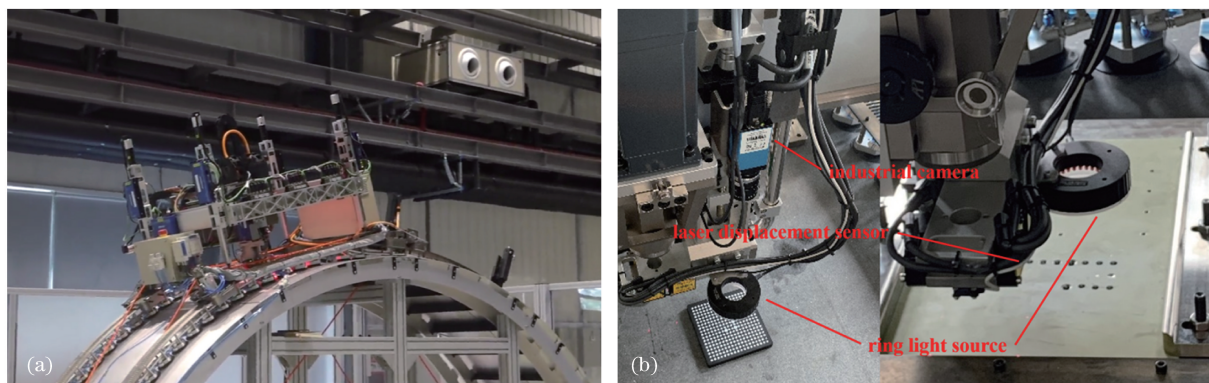


图 9 实验装置图。(a)制孔机器人;(b)视觉系统的位置

Fig. 9 Diagram of the experimental setup. (a) Hole-making robot; (b) position of the vision system

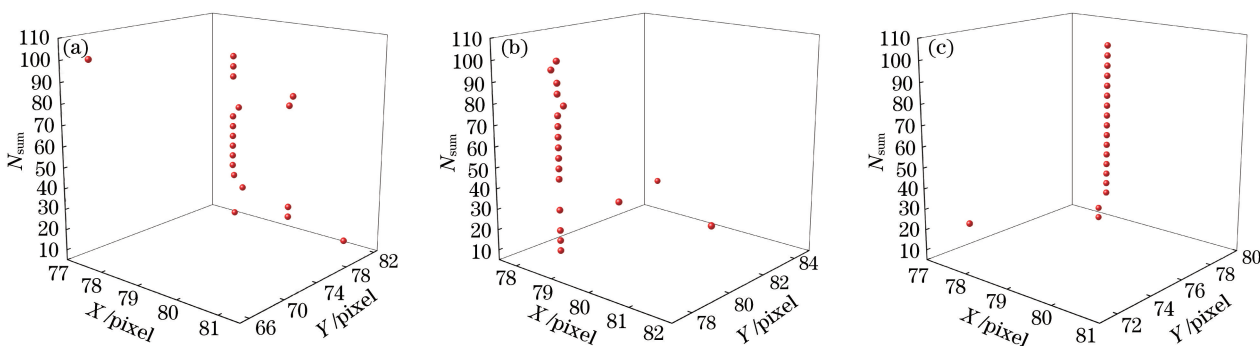


图 10 不同参数下的基准孔定位结果。(a) $\delta_{dis}=3$; (b) $\delta_{dis}=6$; (c) $\delta_{dis}=10$

Fig. 10 Reference hole positioning results under different parameters. (a) $\delta_{dis}=3$; (b) $\delta_{dis}=6$; (c) $\delta_{dis}=10$



图 11 不同光照条件下本方法的定位结果。(a)光照较弱;(b)光照适中(c)光照较强

Fig. 11 Positioning results of our method under different lighting conditions. (a) Light is weak; (b) light is moderate; (c) light is strong

度较高,这表明本方法在三种光照条件下对基准孔的定位精度均较高。

表 1 为 10 组基准孔在三种光照情况下的测量结果,可以发现,基准孔通过相机定位的结果与激光跟踪仪的结果偏差小于 0.04 mm,激光跟踪仪的测量误差小于 0.01 mm,这表明本方法的定位误差小于 0.05 mm,满足轨道式爬行制孔机器人对于基准定位的精度要求。按照上述方法将基准孔的坐标转换到末端坐标系后与激光跟踪仪的测量的结果(标准值)进行对比。用 2.3 节的方法标定的末端坐标

系与相机坐标系之间的转换矩阵为

$$T^{\text{cam2end}} = \begin{bmatrix} -0.010 & -0.998 & -0.047 & 70.990 \\ -0.999 & -0.008 & -0.039 & 85.296 \\ -0.038 & -0.048 & -0.998 & 244.619 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

对于整个视觉系统,测量误差主要由图像上基准孔边缘的定位误差以及实际测量过程中飞机舱段存在的曲率导致。如图 12 中识别到的基准孔边缘的数量不同导致了不同的定位结果,这表明当识别

表 1 末端坐标系下基准孔的定位误差

Table 1 Positioning error of the reference hole in the end coordinate system

unit: mm

Number	Standard value			Measured value			Error
	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	65.2928	102.5748	-49.4749	65.2749	102.5532	-49.5643	0.0280
2	65.6441	95.5909	-49.4757	65.6135	95.5753	-49.5694	0.0343
3	66.0154	88.5851	-49.4790	65.9882	88.5639	-49.5746	0.0344
4	66.3486	81.5873	-49.4823	66.3130	81.5882	-49.5797	0.0355
5	59.3361	81.2690	-49.4765	59.3172	81.2706	-49.5737	0.0188
6	52.3535	80.8911	-49.4707	52.3590	80.8935	-49.5678	0.0060
7	51.6676	94.8957	-49.4642	51.6541	94.8653	-49.5575	0.0314
8	51.3349	101.8817	-49.4610	51.3088	101.8675	-49.5523	0.0297
9	59.0229	88.2326	-49.4733	59.0064	88.2234	-49.5686	0.0188
10	58.6777	95.2383	-49.4700	58.6569	95.2261	-49.5635	0.0240

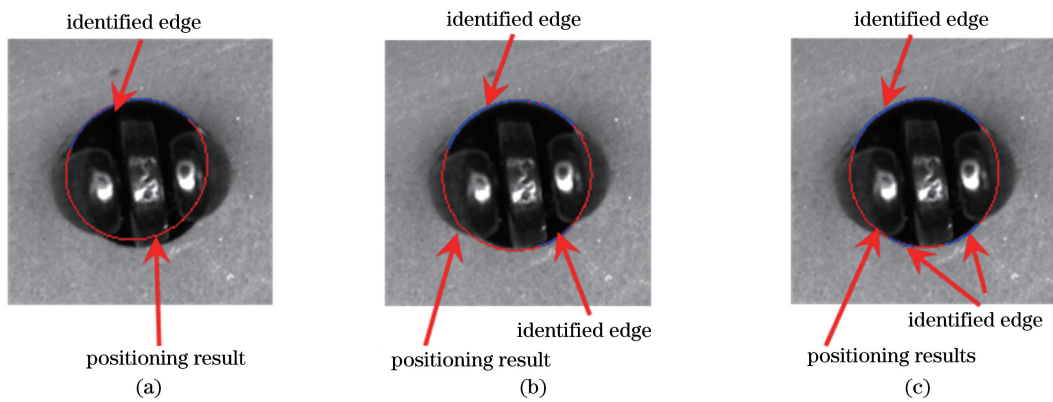


图 12 不同轮廓的定位结果。(a)小部分基准孔边缘;(b)大部分基准孔边缘;(c)全部基准孔边缘

Fig. 12 Positioning results of different contours. (a) Small part of the reference hole edge;

(b) most of the reference hole edge; (c) all the reference hole edges

到的基准孔轮廓不完整时,拟合的椭圆与基准孔边缘不完全重合,从而降低了定位精度。

制孔机器人利用末端的激光位移传感器保证每次测量的高度 $h = 250 \text{ mm}$,但基准孔所在飞机舱段的曲率半径 R 使基准孔所处的小平面到相机坐标系原点的距离存在偏差 Δh , $\Delta h \leq R - \sqrt{R^2 - (\frac{l}{2})^2}$,

其中, l 为相机视场。根据(2)式得到

$$\begin{cases} \Delta X^{\text{camera}} = \left[\frac{(X^{\text{pic}} - u_0)}{\alpha_x} - \frac{\gamma(Y^{\text{pic}} - v_0)}{\alpha_x \alpha_y} \right] \Delta h \\ \Delta Y^{\text{camera}} = \frac{(Y^{\text{pic}} - v_0)}{\alpha_y} \Delta h \end{cases} \quad (14)$$

实验时相机的内参矩阵 $\begin{bmatrix} \alpha_x & \gamma & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} 7655.69 & 0 & 478.57 \\ 0 & 7655.86 & 383.58 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{将 } R = 1700 \text{ mm 代}$$

入(14)式,得到 $\Delta X_{\text{max}}^{\text{camera}} = 0.018 \text{ mm}$, $\Delta Y_{\text{max}}^{\text{camera}} = 0.013 \text{ mm}$,这表明舱段存在的弯曲对基准孔的定位会产生一定的影响,但依然能满足测量精度的要求。

4 结 论

针对轨道式爬行制孔机器人定位基准的三维视觉测量方法以及含遮挡的基准孔,提出了一种基于轮廓分割的定位算法,此外,针对轨道式爬行制孔机器人设计了一种基于特制靶标的高精度手眼标定方法,保证了坐标在视觉系统与机器人系统之间的精确准换。实验结果表明,自适应轮廓提取算法使本方法在不同的光照条件下均能保持较高的定位精度。同时,基于靶标的手眼标定能满足实际现场的

应用需求,但还需进一步优化本方法在表面上的定位精度,从而提高制孔的准确度。

参 考 文 献

- [1] Du Z C, Yao Y B, Wang J, et al. Research status and development trends of robot drilling and riveting system[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(4): 26-31.
杜兆才,姚艳彬,王健,等. 机器人钻铆系统研究现状及发展趋势[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(4): 26-31.
- [2] Tian W, Jiao J C, Li B, et al. High precision robot operation equipment and technology in aerospace manufacturing[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 341-352.
田威,焦嘉琛,李波,等. 航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 341-352.
- [3] Yan G R. Study on the development of visual measuring system for robot drilling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
闫国瑞. 机器人制孔视觉测量系统开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [4] Atkinson J, Hartmann J, Jones S, et al. Robotic drilling system for 737 aileron[C]//SAE Technical Paper Series, September 17, 2007, Warrendale, PA, US. Warrendale: SAE International, 2007: 11728141.
- [5] Hartmann J, Meeker C, Minshull A, et al. Automated wing panel assembly for the A340-600[J]. *SAE Transactions*, 2000, 109(1): 746-754.
- [6] Zieve P, Smith A. Wing assembly system for British aerospace airbus for the A320[C]//SAE Technical Paper Series, September 15, 1998, Warrendale, PA, US. Warrendale: SAE International, 1998: 982151.
- [7] Devlieg R, Sitton K, Feikert E, et al. ONCE (one-sided cell end effector) robotic drilling system[C]//SAE Technical Paper Series, September 30, 2002, Warrendale, PA, US. Warrendale: SAE International, 2002: 16536704.
- [8] Zhang A L. Efficient and accurate drilling technology for fuselage circumferential splice of large aircraft[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
张阿龙. 大型飞机机身环形对接区高效精确制孔技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [9] Ma F C, Yuan P J, Gong M Z, et al. A design of aircraft drilling end-effector based on flexible railway[C]//IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics, July 25-27, 2012, Beijing, China. New York: IEEE Press, 2012: 536-539.
- [10] Wang M, Chen W L, Zhang D L, et al. Light-weight automatic drilling system and key technology for aircraft[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012, 55(19): 40-43.
王珉,陈文亮,张得礼,等. 飞机轻型自动化制孔系统及关键技术[J]. *航空制造技术*, 2012, 55(19): 40-43.
- [11] Jiang T, Cui H H, Cheng X S, et al. A measurement method for robot peg-in-hole prealignment based on combined two-level visual sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-12.
- [12] Wu B, Xue T, Ye S H, et al. A two-step method for spatial circle orientation with a structured light vision sensor and error analysis[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(7): 075105.
- [13] Mei B, Zhu W D, Yan G R, et al. A new elliptic contour extraction method for reference hole detection in robotic drilling[J]. *Pattern Analysis and Applications*, 2015, 18(3): 695-712.
- [14] Xia R B, Su R, Zhao J B, et al. An accurate and robust method for the measurement of circular holes based on binocular vision[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(2): 025006.
- [15] Yu L, Bi Q Z, Ji Y L, et al. Vision based in-process inspection for countersink in automated drilling and riveting[J]. *Precision Engineering*, 2019, 58: 35-46.
- [16] Dong H X, Prasad D K, Chen I M, et al. Accurate detection of ellipses with false detection control at video rates using a gradient analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2018, 81: 112-130.
- [17] Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(3): 345-358.
- [18] Shiu Y C, Ahmad S. Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form $AX=XB$ [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, 5(1): 16-29.
- [19] Zhan Q, Wang X. Hand-eye calibration and positioning for a robot drilling system[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(5/6/7/8): 691-701.
- [20] Jiang T, Cheng X S, Cui H 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.
- [21] Wang L F, Zhang L Y, Ye N, et al. An on-line compensation technology for robotic drilling error suitable for curved structure[J]. *Acta Aeronautica et*

Astronautica Sinica, 2019, 40(10): 292-306.

王龙飞, 张丽艳, 叶南, 等. 一种适用于曲面结构的机器人制孔误差在线补偿技术[J]. 航空学报, 2019, 40(10): 292-306.

- [22] Wei M, Zhang L Y. Fast on-site self-positioning method for robot automatic drilling and riveting system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2020, 41(6): 66-75.

韦溟, 张丽艳. 机器人自动钻铆系统的现场快速自定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 66-75.

- [23] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.