

引文格式:王德重,黄翔,李泂泉,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(23/24):57-65.

WANG Dezhong, HUANG Xiang, LI Shuangqiao, et al. Rivet flatness measurement method based on binocular multi-line structured light[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23/24): 57-65.

基于双目多线结构光的 铆钉齐平度测量方法*

王德重¹,黄翔¹,李泂泉¹,李根²

(1.南京航空航天大学机电学院,南京210016;

2.南京航空航天大学苏州研究院,苏州215000)

[摘要] 对于铆钉齐平度的测量,使用传统检具或非接触式点云扫描的测量方法分别存在局限较大、准备周期长、数据难处理等缺点。针对上述问题,提出一种基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法,首先对双目系统采集到的结构光图像进行双目匹配与重建,提取、拟合出在测量坐标系下铆钉头圆轮廓内离散像素点的坐标与局部蒙皮平面的表达式,随后引入离散点筛选比例系数进一步优化局部蒙皮平面的拟合精度,将其代入铆钉齐平度测量模型中进行计算获得结果。相比于传统接触式测量与点云扫描,此研究方法节省了处理点云数据所需的大量时间,提高了测量效率,通过机械臂搭载小型测量末端能够完成对飞机进气道等狭窄内腔的检测任务,降低了局限性。试验结果表明,该方法对于铆钉头凹凸两种特征均适用,且齐平度的最大测量误差小于0.03mm,满足视觉测量要求。

关键词: 铆钉装配;齐平度测量;双目视觉;多线结构光;离散点筛选

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.23/24.057



王德重

硕士研究生,研究方向为机器视觉、飞机装配及装配质量测量。

近年来随着航空工业技术的飞速发展,飞机的飞行速度以及飞行高度也在不断提高,这对于飞机装配的质量检测也提出了更为严苛的要求。为了满足飞机高出勤率,降低经常性部件的拆卸率与更换率,以及减小装配残余应力对飞机结构的影响等,使用航空铆钉铆接的装配工艺已经成为飞机装配中应用最为广泛的连接技术,而工人在紧固铆钉的过程中无法精确把控力的大小,在铆接后可能会出现铆钉头上表面略高于或低于飞机外壳的装配缺陷,在飞机高速飞行的过程中,这些凸起与凹坑将会产生不必要的风阻,影响飞机飞行的平稳性和速

度,降低新型战机的隐身性能,因此,铆钉齐平度的检测是飞机装配质量检测任务中相当重要的一个环节。

对于铆钉齐平度的检测,以传统卡尺或专用铆钉齐平度规等人工检测方式^[1-2]局限性较大,如王红涛等^[3]研发出的由支架、深度尺及转轴等机构组成的铆钉齐平度检测装置能够对铆钉齐平度进行较为精准的测量,但使用该装置需要具备足够的操作空间,难以完成飞机进气道等狭窄内腔中的检测任务,也无法应用于飞机蒙皮大批量的铆钉齐平度快速测量任务中。随着非接触式数字化测量技术与机器视觉技术^[4-8]水平的提高,

* 基金项目:国防基础科研项目(JCKY2018205B005)。

越来越多的研究者也开始将这些新技术应用到铆钉孔位、尺寸与齐平度测量的研究中。针对铆钉孔位的测量,田清廉等^[9]提出了一种基于散乱点云的铆钉孔孔位与孔径提取方法,该方法采用欧式聚类分割算法对边界点云中的边界特征进行分割,随后使用椭圆拟合算法提取铆钉孔边界,可以自动识别散乱点云中的全部铆钉孔特征,并精确提取孔位与孔径参数,但该方法在计算前需要花费大量时间用于扫描点云数据,准备周期较长,对点云数据的处理过程也较为繁琐,当铆钉数量较多时,测量效率难以满足检测需求。在铆接质量检测方面,孙延鹏等^[10]基于机器视觉原理搭建出一套铆接质量视觉检测系统,并提出一种具有针对性的霍夫变换圆检测算法,实现了铆钉端面圆轮廓的快速提取,最后通过仿真分析判断铆钉铆接质量是否满足装配需求,该系统能够快速识别并获取铆钉铆接后的端面轮廓与圆心坐标。Qian^[11]和Paul等^[12]采用点云处理技术提取铆钉区域,前者提出了一种新的铆钉区域自动化识别与测量框架,并结合深度学习技术与卷积神经网络提高区域识别的稳定性和准确性,后者则对三维点云数据中的表面法向簇进行分类,使用概率占用映射技术来预测铆钉安装孔位。蒋滔等^[13]通过分析视觉检测系统中图像分割方法的特点,结合改进的遗传算法与最大类间方差法(OTSU)对图像进行分割,实现了铆钉端面圆轮廓的快速提取,但上述研究成果主要是针对铆接区域、铆钉端面轮廓的快速识别与提取,无法实现铆钉齐平度的快速测量。

基于以上分析,针对铆钉齐平度测量中待检测样本数据多、检测效率低、待检测内腔空间小等问题,本研究提出了一种基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法,多线结构光与待测特征发生干涉时会形成能够

表征特征形貌的结构光光条,对光条图像进行分析、处理并将关键特征代入齐平度解算模型实现铆钉齐平度的快速测量。该系统结构紧凑,可集成于由机器人搭载的小型测量末端,这为飞机进气道等狭窄内腔的检测提供了新的解决思路。本研究通过试验验证了使用该方法测量得到的结果具有较好的精度、稳定性及实用性。

铆钉齐平度测量方法

1 双目多线结构光测量系统

在工业生产领域,单目单线结构光的三维测量技术已比较成熟,当待测物体的表面形貌比较复杂时,单目相机可能会因为凸包的遮挡而无法采集到结构光与物体表面干涉的完整图像^[14],导致后续测量无法进行,如图1所示。

在目前的工业生产和装配领域,为了解决上述问题、提高测量系统的实用性和鲁棒性,常采用双目多线结构光测量系统,根据双目匹配和视差原理,能够更加完整地获取待测物体的表面特征信息。考虑到在实际的铆钉齐平度测量中,也可能会出现类似的情况,因此本研究采用双目多线结构光的测量模式,其测量系统结构如图2所示。

当测量末端运动到合适的测量位置时,三线结构光将照射在待测铆钉特征上,中间结构光与铆钉头上表面发生干涉形成光条 l_2 ,另外两束结构光与飞机蒙皮表面发生干涉形成对应的光条 l_1 、 l_3 ,3束结构光平面之间两两夹角基本相等,所以 l_1 、 l_2 、 l_3 3根光条基本平行。通过分析工业相机采集的图像中光条的形态特征并

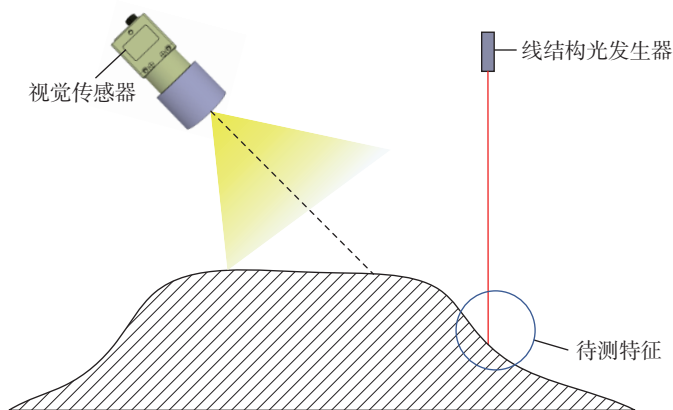


图1 特征信息缺失示意图

Fig.1 Schematic diagram of lack feature information

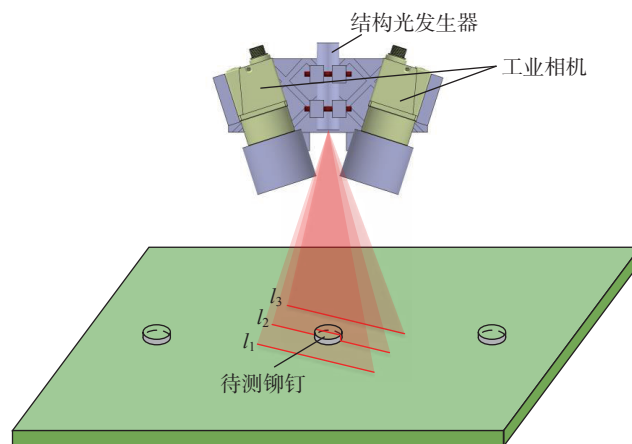


图2 铆钉齐平度测量示意图

Fig.2 Schematic diagram of rivet flatness measurement

进行解算,即可间接获取铆钉头上表面以及飞机蒙皮平面的形貌信息,代入解算模型即可获得铆钉齐平度测量值。

2 干涉端点提取方法与齐平度检测流程

检测流程

计算铆钉齐平度,关键是提取出结构光光条在铆钉头圆轮廓处的干涉端点,因铆钉头表面与飞机蒙皮表面间的垂直距离很小,三线结构光与待测特征发生干涉形成的光条如图3所示,由图3(b)可以观察到光条骨架在干涉端点处没有被打断,且干涉端点斜率也无明显变化,基于此图像进行干涉端点提取的难度极大。

针对上述铆钉头表面干涉端点难识别、难提取问题,本研究将铆钉齐平度测量过程分解为两部分。

(1)在结构光发生器关闭的情况下,提高相机曝光度进行图像采集,获取清晰、易识别的铆钉头部圆形轮廓图像,对其进行灰度化、Canny边缘检测与霍夫变换,调整霍夫变换参数使其能稳定识别出图像中铆钉头部的圆形轮廓(图4),并记录此圆在测量坐标系即相机坐标系下的方程。

关闭结构光发生器可以避免在高曝光条件下结构光光条或结构光与其他特征产生反射、折射后的次光条影响霍夫变换算法对铆钉头部圆轮廓的提取结果,提高霍夫变换识别圆轮廓的准确性与稳定性。当结构光发生器开启时,可能会出现铆钉头轮廓误提取的情况(图5)。

(2)在不改变测量末端位置的情况下,打开结构光发生器降低相机曝光,减小次光条的影响并触发相机进行第2次采集,对采集到的图片进行光条骨架细化、双目匹配与重建^[15-17],根据前文中得到的铆钉头圆轮廓方程求出圆轮廓与中间结构光光条的交点,两交点间的连线即为铆钉头平面上的光条线段,由此即可获得铆钉头表面的关键干涉端点。

铆钉齐平度完整检测流程如图

6所示。

齐平度解算

1 解算模型

理想情况下,经双目重建后可用如图7所示的一系列离散点来表征干涉形成的结构光光条,其中点 $P_1^{(l)}$ 与 $P_2^{(l)}$ 、 $P_1^{(l_2)}$ 与 $P_2^{(l_2)}$ 、 $P_1^{(l_3)}$ 与 $P_2^{(l_3)}$ 分别为结构光光条 l_1 、 l_2 、 l_3 的起始点和终止点;点 a 与 d 是铆钉下边缘轮

廓与结构光干涉形成的端点;点 b 与 c 是铆钉上边缘轮廓与结构光干涉形成的端点;根据铆钉齐平度的定义,铆钉头上平面 α 与飞机蒙皮 β 两平面间的高度差即为铆钉齐平度 r 。

分析可知,计算铆钉齐平度 r 需分别拟合出飞机蒙皮平面 β 与铆钉头上表面 α ,并获取二者在测量坐标系下的平面方程,随后计算出两平面间的距离即为所求的齐平度 r 。但

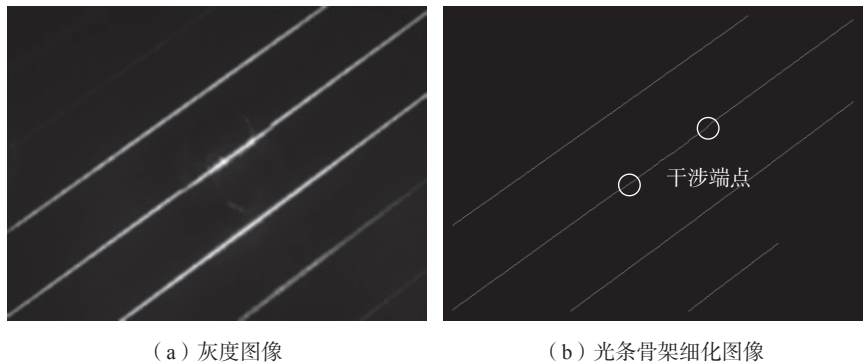


图3 铆钉 ROI 图像
Fig.3 Rivet ROI image

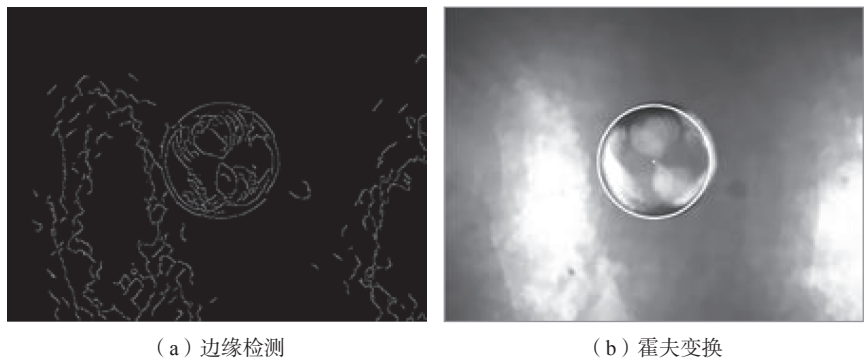


图4 无结构光干扰的铆钉头轮廓提取
Fig.4 Rivet head contour extraction without structured light interference

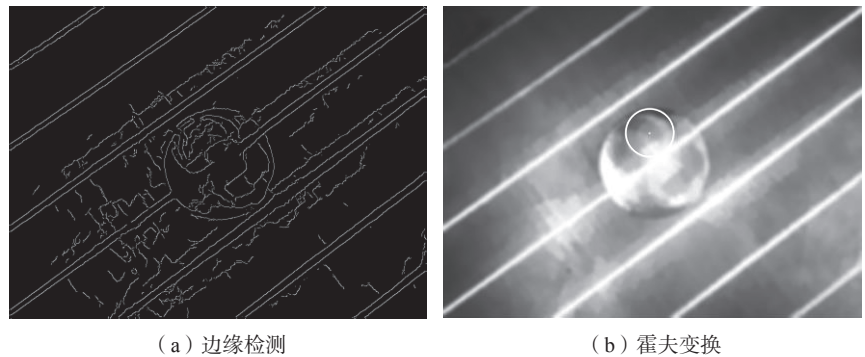


图5 结构光干扰下的铆钉头轮廓误提取
Fig.5 False extraction of rivet head contour under structured light interference

在实际测量中,拟合出的 α 与 β 平面往往不是平行平面,无法通过平面间的距离公式求出齐平度 r ,需要对计算过程做如下转换。

(1) 飞机蒙皮平面 β 。对于结构光光条 l_1 ,从端点 $P_1^{(l_1)}$ 、 $P_2^{(l_1)}$ 开始,分别沿着光条骨架向内收缩 n 个离散点并将其剔除,保留下来的离散点设为点集 $P_\beta^{(l_1)}$,同理可以在结构光光条 l_3 上获取点集 $P_\beta^{(l_3)}$;对于中间结构光光条 l_2 ,以铆钉下边缘轮廓与结构光干涉形成的端点 a 为起点,

沿着光条骨架向外取 m 个离散点并将其设为点集 $P_\beta^{(l_2)}$,同理可以在另一侧获取点集 $P_\beta^{(l_2)}$ 。其中, n 与 m 的取值需要考虑到结构光光条的整体长度,若保留的离散点数量过少,则点集无法准确表征铆钉周围的蒙皮平面 β ,增大测量误差;若离散点数量过多则会降低检测效率,更有可能引入误差较大的干扰点,降低齐平度测量精度。

对上述点集使用最小二乘法拟合平面即可得到飞机蒙皮平面 β 在

测量坐标系下的表达式:

$$A_\beta x + B_\beta y + C_\beta z + D_\beta = 0 \quad (1)$$

式中, A_β 、 B_β 、 C_β 和 D_β 为飞机蒙皮平面 β 的一般方程式系数, A_β 、 B_β 、 C_β 不同时为0。

(2) 铆钉头上表面 α 。在实际测量中,铆钉头上表面面积较小,当测量末端处于正常工作位置时仅有一条结构光光条与铆钉头上表面发生干涉,而仅凭单根光条上的离散点无法拟合出准确的平面方程。考虑到通过干涉在铆钉头上表面形成的结构光光条离散点(点 $b\sim c$)数量较少,对于铆钉齐平度 r 的计算可以转换为遍历点 $b\sim c$,逐点计算出点 $P_i^{(l_2)}(x_i, y_i, z_i), (i=1, 2, 3, \dots, j)$ 到平面 β 的距离 r_i :

$$r_i = \frac{|A_\beta x_i + B_\beta y_i + C_\beta z_i + D_\beta|}{\sqrt{A_\beta^2 + B_\beta^2 + C_\beta^2}}, \quad (i=1, 2, 3, \dots, j) \quad (2)$$

最后计算均值即为铆钉齐平度 r :

$$r = \frac{1}{j}(r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_j) = \sum_{i=1}^j \frac{r_i}{j} \quad (3)$$

式中, j 为光条骨架 bc 线段中像素离散点的个数。

2 引入比例系数优化

使用上节中描述的计算方法可以实现铆钉齐平度的快速测量。在实际测量中,双目视觉测量系统通过图像像素点恢复出的三维空间坐标是存在误差的,其值与摄像机的摆放角度 θ 、两相机间的距离 σ 、左相机(测量坐标系)与被测物体间的距离 z 、相机的焦距 f 以及相机电耦合器件(Charge couple device, CCD)的分辨率有关,其关系^[18-19]为:

$$\Delta z = \frac{z(z \times \sin \theta + \sigma) \sin \theta}{100\sigma \times f \times \cos \theta - (z \times \sin \theta + \sigma) \sin \theta} \quad (4)$$

式中, Δz 为三维空间中的一点 P 到相机深度的测量误差; z 为该点到相机的实际距离。

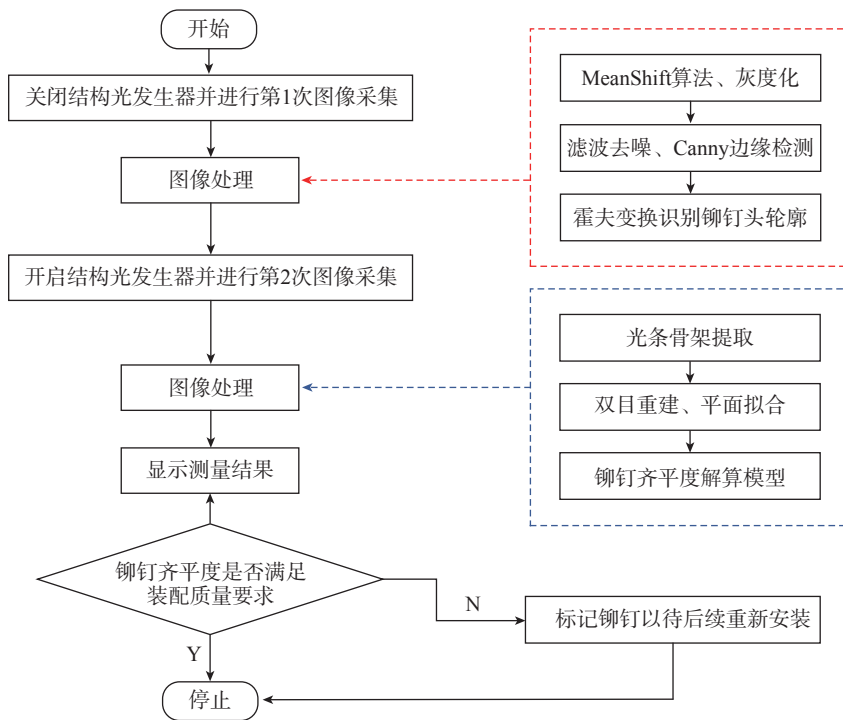


图6 铆钉齐平度检测流程图

Fig.6 Flow chart of rivet flatness detection

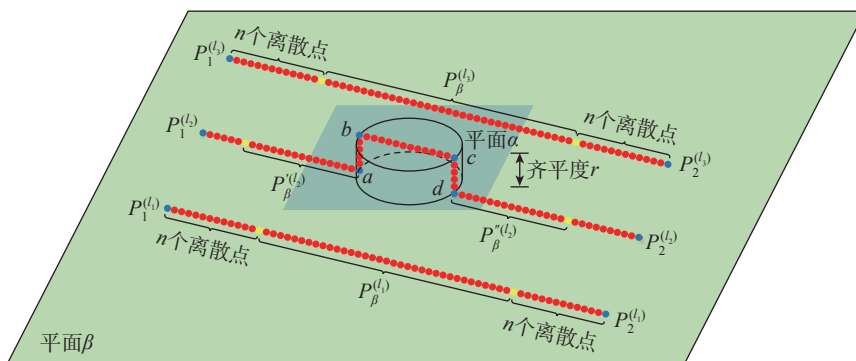


图7 铆钉齐平度解算模型示意图

Fig.7 Diagram of rivet flatness measurement model

对距离 z 求导:

$$\Delta z' = \frac{200\sigma \times z \times f \sin^2 \theta \cos \theta + 100\sigma^2 \times f \sin \theta \cos \theta - \sin^2 \theta (z \sin \theta + \sigma)^2}{(100\sigma \times f \cos \theta - z \times \sin^2 \theta - \sigma \times \sin \theta)^2} \quad (5)$$

考虑到工业相机的工作距离基本不变,通过数形结合分析可知,对于结构光光条上的每一个离散点 P_i ,均有 $\Delta z'_i > 0$,即测量误差 Δz 随着距离 z 的增大而增大。

基于此,可进一步建立优化的铆钉齐平度解算模型(图 8),多次实测发现,用于拟合飞机蒙皮平面的光条离散点数量对于平面拟合结果、铆钉齐平度测量的精度影响较大,当测量末端的工作距离确定时,由式(4)即可预先计算出铆钉齐平度解算模型中各离散点的系统测量误差,通过划分阈值舍弃掉系统测量误差较大的离散点,提高飞机蒙皮平面 β 的拟合精度,最终提高铆钉齐平度 r 的测量精度以及测量系统的鲁棒性,具体过程如下。

因左右相机间隔较近,式(4)中左相机与待测物体的距离 z 可简化为双目视觉系统中心点 O 与待测物体间的距离, O 点即两相机光轴连线的中点;对于中间结构光光条 l_2 ,由几何关系可以得到测量末端中心点 O 到 l_2 的最远距离:

$$D_1 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + h^2} \quad (6)$$

式中, l 为结构光光条长度; h 为 O 点到飞机蒙皮平面(图 8 中绿色平面)的距离。将 D_1 与 h 分别代入式(4)作为测量距离 z 进行运算,即可得到测量系统在中间结构光光条 l_2 上产生的最大系统测量误差 $\Delta z_{\max}^{(l_2)}$ 与最小系统测量误差 $\Delta z_{\min}^{(l_2)}$ 。通过设定合适的比例系数 μ ,使得光条 l_2 上经过筛选后的所有离散点的系统测量误差 $\Delta z_i^{(l_2)}$ 均满足:

$$\Delta z_i^{(l_2)} \leq \mu \cdot \Delta z_{\max}^{(l_2)}, \left(\frac{\Delta z_{\min}^{(l_2)}}{\Delta z_{\max}^{(l_2)}} < \mu < 1 \right) \quad (7)$$

当式(7)取等号时,将 $\Delta z_i^{(l_2)}$ 的

值代入式(4)中即可求出筛选端点 $q_1^{(l_2)}$ 与中心点 O 之间的距离 D_2 ,同样由几何关系可以计算出需要筛选并剔除的点集线段长度 D_3 :

$$D_3 = \frac{1}{2} \sqrt{D_2^2 - h^2} \quad (8)$$

再由视觉传感器长边尺寸除以长边的像素数量即可得到单个离散点的宽度 ε ,计算出从中间结构光光条端点 $P_1^{(l_2)}$ 到筛选端点 $q_1^{(l_2)}$ 之间的离散点个数:

$$I^{(l_2)} = \frac{D_3}{\varepsilon} \quad (9)$$

确定离散点数量后,将结构光光条 l_2 左侧经过筛选后的离散点,即从筛选端点 $q_1^{(l_2)}$ 至干涉端点 a 线段中的所有离散点设为点集 $P_\beta^{(l_2)}$,同理可以在 l_2 右侧获取筛选端点 $q_2^{(l_2)}$ 与点集 $P_\beta^{(l_2)}$ 。

对于结构光光条 l_1 ,通过结构光平面标定可以获取 3 个结构光平面之间的夹角 γ ,根据几何关系即可计算出中心点 O 与结构光光条 l_1 之间的最短距离 D_4 以及结构光光条间的距离 D_5 :

$$D_4 = \frac{h}{\cos \gamma} \quad (10)$$

$$D_5 = h \times \tan \gamma \quad (11)$$

进而求出中心点 O 与端点 $P_1^{(l_1)}$ 之间的距离 D_6 :

$$D_6 = \sqrt{h^2 + D_5^2 + \frac{l^2}{4}} \quad (12)$$

分别将 D_6 、 D_4 代入式(4)中作为测量距离 z 进行运算,可以得到测量系统在结构光光条 l_1 上产生的最大测量系统误差 $\Delta z_{\max}^{(l_1)}$ 与最小测量系统误差 $\Delta z_{\min}^{(l_1)}$,按照与 l_2 同样的处理方法可求出光条 l_1 上的筛选端点 $q_1^{(l_1)}$ 、 $q_2^{(l_1)}$,将 $q_1^{(l_1)}$ 与 $q_2^{(l_1)}$ 之间所有的离散点设为点集 $P_\beta^{(l_1)}$ 。同理,可以在对称的光条 l_3 上获取点集 $P_\beta^{(l_1)}$,最后对点集 $P_\beta^{(l_1)}$ 、 $P_\beta^{(l_2)}$ 、 $P_\beta^{(l_3)}$ 、 $P_\beta^{(l_4)}$ 使用最小二乘法拟合平面即可得到更加精确的飞机蒙皮 β 平面方程。

试验验证与讨论

为验证本研究提出的铆钉齐平度测量算法的精度以及引入比例系数的离散点筛选算法的有效性,本研究对铆钉装配模拟件进行多次试验测量,记录该算法对不同尺寸铆钉特征的测量值与测量误差,并通过添加对照组验证离散点筛选算法对提高测量精度的有效性,所搭建的整体试验平台如图 9 (a) 所示。试验所使用的铆钉装配试验件如图 9 (b) 所示,在模拟件的 A 、 B 面各布有 6 个不同尺寸的圆形凸台与凹坑,其半径为 4mm、

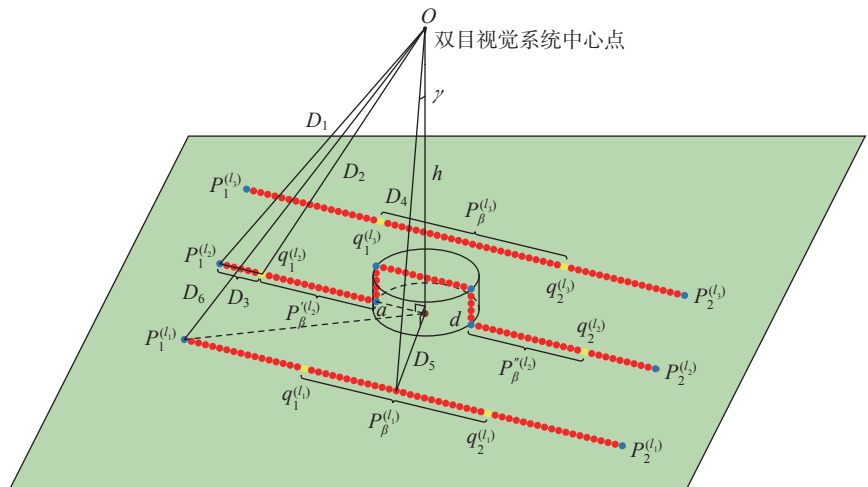
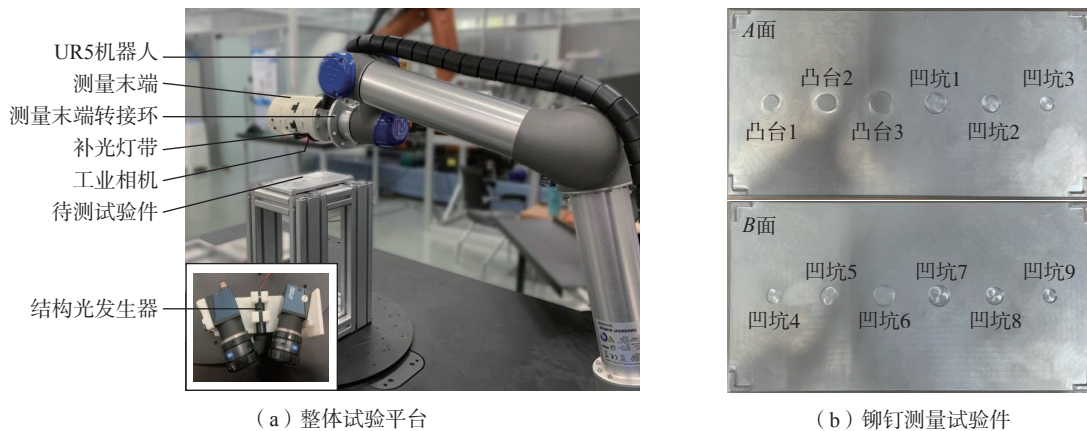


图 8 优化的铆钉齐平度解算模型

Fig.8 Improved model for measuring the flatness of rivets



(a) 整体试验平台

(b) 铆钉测量试验件

图9 试验平台与试验件

Fig.9 Integrated experimental platform and the casting

表1 铆钉装配试验件特征的齐平度测量数据

Table 1 Flatness measurement data of the experimental casting for rivet assembly

待测特征	齐平度 /mm	待测特征	齐平度 /mm
凸台 1	1.141	凹坑 4	0.562
凸台 2	1.142	凹坑 5	0.561
凸台 3	1.145	凹坑 6	0.565
凹坑 1	0.863	凹坑 7	1.660
凹坑 2	0.861	凹坑 8	1.663
凹坑 3	0.866	凹坑 9	1.663

5mm 和 6mm。使用三坐标机测量各个凸台与凹坑齐平度,结果如表 1 所示。

试验平台采用的相机像素为 2448×2048, u, v 轴的像元尺寸为 3.45 μm , 相机工作距离为 120mm。当三坐标测量机量程在 1000mm 以内时,测量精度为 2 μm , 以下的测量试验将忽略三坐标测量仪的测量误差, 并将其结果作为参考理论值代入式 (13) 中进行相应的计算和误差分析。

$$\begin{cases} \Delta_i = |a_i - L|, (i = 1, 2, 3, \dots, 20) \\ \Delta_{\max} = \max \{ \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_{20} \} \\ \bar{a} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} a_i \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (a_i - \bar{a})^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中, a_i 为第 i 次测量值; L 为当前待测铆钉的齐平度参考理论值; Δ_i 为第 i 次测量的绝对误差; Δ_{\max} 为最大测

量误差; \bar{a} 为测量均值; σ 为重复测量标准差。

1 铆钉齐平度测量算法的精度验证

为验证测量算法的精度、重复测量误差以及铆钉头部尺寸对测量结果的影响,在不使用离散点筛选算法的条件下对凸台 1、凸台 3、凹坑 4、凹坑 6、凹坑 7、凹坑 9 各进行 20 次测量,根据测量结果绘制出的测量绝对误差折线图如图 10 所示。

由折线图可获取该算法对于不同特征的最大测量误差,由式 (13) 计算出各组别的重复测量标准差,具体数据如表 2 所示。由数据分析可知,该算法对于凸台与凹坑两种特征均适用,当测量特征的圆轮廓直径更大时,该算法的测量精度更高,因为直径较大的圆轮廓面与结构光干涉后产生的结构光光条长度更长,代入铆钉齐平度解算模型的离散点数量更多,测量结果受个别误差较大离散点

的影响更小。

2 离散点筛选算法的有效性

为验证离散点筛选算法的有效性,在原有的测量算法中引入比例系数 μ 以设计对照试验,每组测量试验中保证测量末端的工作距离、相机曝光等条件基本不变,只改变比例系数 μ 。由式 (7) 计算可知,当末端工作距离为 120mm、结构光光条长度为 100mm 时,比例系数 μ 的取值应大于 0.88,因此 μ 的取值为 0.98、0.96、0.94、0.92 与 0.9 时分别对凸台 3 特征各进行 20 次齐平度测量,由测量结果绘制出的绝对误差折线图如图 11 所示。

同样,由图 11 与式 (13) 可获取每组测量试验的最大测量误差与重复测量标准差,具体数据如表 3 所示。由数据分析可知,当比例系数 μ 的取值适当时,使用离散点筛选算法能提高铆钉齐平度的测量精度,若比例系数 μ 取值过小、接近于临界值时,测量精度反而会降低。将 $\mu=0.94$ 与 $\mu=0.9$ 的对照试验组中筛选后的离散点坐标导入到 Matlab 软件中,并使用 CFtool 工具箱进行平面拟合,拟合结果如图 12 所示。

由图 12 可知,当比例系数 $\mu=0.94$ 时,用于拟合平面的离散点更贴近于拟合出的平面,拟合残差平方和 SSE 小于 $\mu=0.9$ 时的拟合结果,且决

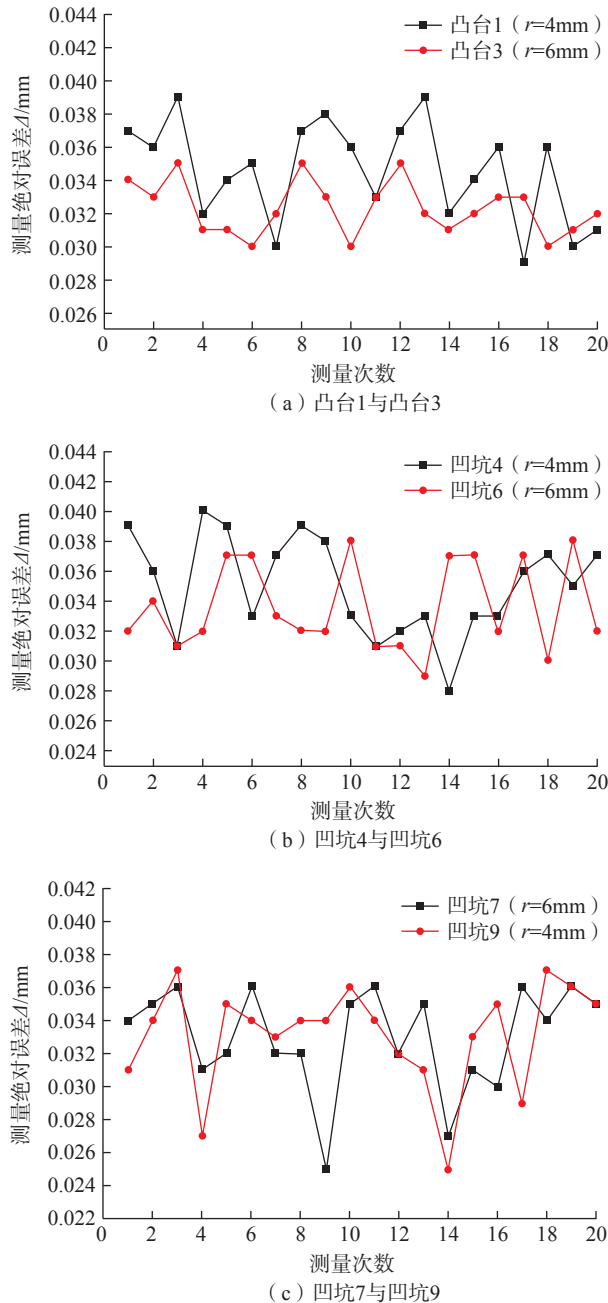


图 10 各特征齐平度测量的绝对误差折线图

Fig.10 Line charts of absolute errors for each object's flatness measurement

表 2 各特征测量结果

Table 2 Measurement results of each object

待测特征	齐平度参考理论值 L/mm	最大测量误差 Δ_{max}/mm	重复测量标准差 σ/mm
凸台 1	1.141	0.039	0.034
凸台 3	1.145	0.035	0.032
凹坑 4	0.562	0.040	0.035
凹坑 6	0.565	0.038	0.030
凹坑 7	1.660	0.036	0.032
凹坑 9	1.663	0.037	0.032

定系数 R -square 也更接近于 1。分析可知,当比例系数 μ 取值过小、接近于临界值时,系统测量误差累计会更小,但同时也会导致被筛选掉的离散点数量过多,剩下用于飞机蒙皮平面拟合的离散点数量过少,拟合出的飞机蒙皮平面方程受误差点的影响更大,反而会降低测量精度。比例系数 μ 的最佳取值是由多次试验测试获取,由式(4)可知,双目视觉测量系统恢复图像像素点的三维空间坐标的误差与摄像机的摆放角度 θ 、两相机间的距离 σ 、左相机(测量坐标系)与被测物体间的距离 z 、相机的焦距 f 以及相机 CCD 的分辨率有关,因此当双目视觉测量系统中两相机的摆放角度 θ 、相机间的距离 σ 、相机焦距 f 以及测量末端的工作距离基本不变时,比例系数 μ 的最佳取值不会改变。

结论

(1) 本研究提出了一种基于双目多线结构光的铆钉齐平度测量方法。使用该方法对试验件进行测量,多次试验结果表明,该方法能够实现对于铆钉齐平度的精准测量,且对于铆钉头部高于或者低于飞机蒙皮平面的凸台与凹坑特征均适用,测量精度小于 0.03mm。

(2) 本研究所搭建的双目多线结构光测量系统不能同时对多个铆钉进行测量,因此需要保证工业相机在进行图像采集时,测量系统应处于合适位置,即待测铆钉正上方,实现同时对相机视野内的多个铆钉进行快速识别与测量是未来可行的改进方向。

参考文献

[1] 周江,任锟,帅英琦,等.基于机器视觉的磁钢片缺陷检测研究[J].机电工程,2014,31(12):1541-1546.

ZHOU Jiang, REN Kun, SHUAI Yingqi, et al. Research on defect detection of magnetic steel sheet based on machine vision[J]. Mechanical and

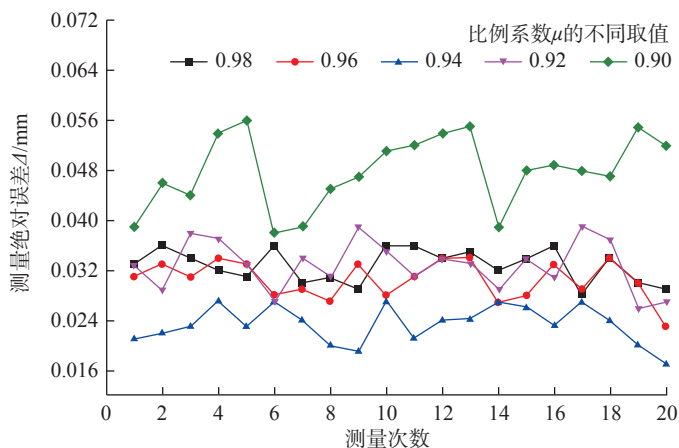


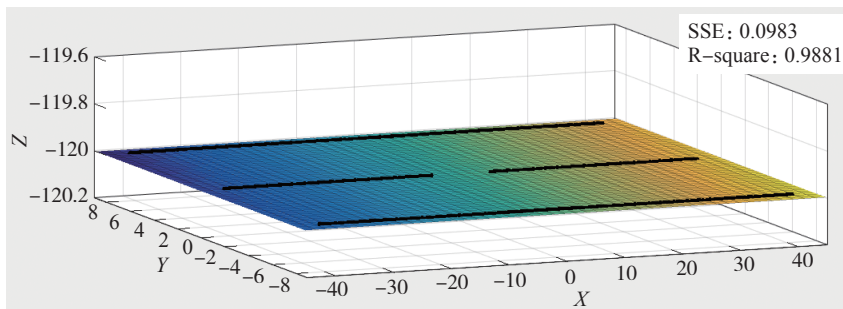
图 11 比例系数 μ 不同取值时的绝对误差折线图

Fig.11 Line chart of absolute error with different proportional coefficients μ

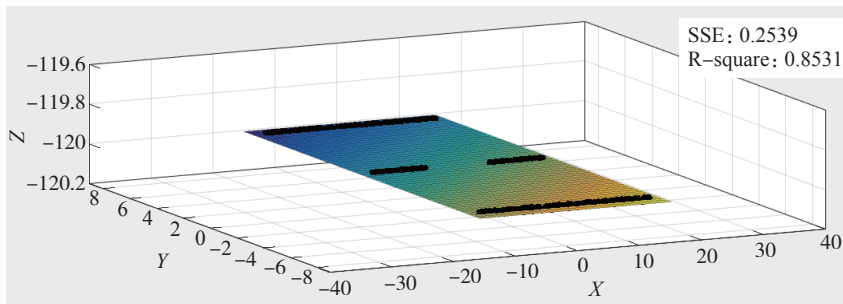
表 3 比例系数 μ 的不同取值对测量精度的影响

Table 3 Influence of different values of proportional coefficient μ on measurement accuracy

比例系数 μ	最大测量误差 Δ_{max}/mm	重复测量标准差 σ/mm
0.98	0.036	0.033
0.96	0.034	0.031
0.94	0.027	0.023
0.92	0.039	0.033
0.9	0.056	0.048



(a) $\mu=0.94$



(b) $\mu=0.9$

图 12 比例系数 μ 取不同值时的平面拟合结果

Fig.12 Results of plane fitting with different proportional coefficients μ

Electrical Engineering, 2014, 31(12): 1541–1546.

[2] 刘金桥, 吴金强. 机器视觉系统发展及其应用[J]. 机械工程与自动化, 2010(1): 215–216.

LIU Jinqiao, WU Jinqiang. Development of machine vision system and its application[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2010(1): 215–216.

[3] 王红涛, 焦悦, 冯连强, 等. 一种飞机蒙皮铆钉阶差检测装置: CN212030420U[P]. 2020–11–27.

WANG Hongtao, JIAO Yue, FENG Lianqiang, et al. The invention relates to an aircraft skin rivet order difference detection device: CN212030420U[P]. 2020–11–27.

[4] 卢清华, 许重川, 王华, 等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 172–178.

LU Qinghua, XU Chongchuan, WANG Hua, et al. Study on the dimension measurement of large-format ceramic floor tiles based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 172–178.

[5] 梁秀满, 刘文涛, 牛福生, 等. 基于机器视觉的浮选气泡体积和表面积测量研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 271–278.

LIANG Xiuman, LIU Wentao, NIU Fusheng, et al. Study on volume and surface area measurement of flotation bubble based on machine vision[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 271–278.

[6] 解则晓, 李俊朋, 迟书凯, 等. 基于线结构光的水下双目测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 439–448.

XIE Zexiao, LI Junpeng, CHI Shukai, et al. Underwater binocular measurement method based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 439–448.

[7] 丁力平. 一种航空铆钉自动检测系统研制[J]. 航空制造技术, 2017, 60(21): 50–55.

DING Liping. Development of an automatic detection system for aeronautic rivets[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(21): 50–55.

[8] 汪俊, 谢乾, 鲁德宁, 等. 一种点云铆钉齐平度自动检测方法: CN111028220B[P]. 2020–09–22.

WANG Jun, XIE Qian, LU Dening, et al. An automatic detection method for the flatness of point cloud rivet: CN111028220B[P]. 2020–09–22.

[9] 田清廉, 熊天辰, 黄翔, 等. 一种基于散乱点云的铆钉孔孔位提取方法[J/OL]. 航空制造技术, [2021–06–08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20210208.0935.004.html>.

TIAN Qinglian, XIONG Tianchen, HUANG

Xiang, et al. An extraction method of rivet hole location based on scattered point cloud[J/OL]. Aeronautical Manufacturing Technology, [2021-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4387.V.20210208.0935.004.html>.

[10] 孙延鹏, 王海燕, 张弛. 机身蒙皮铆接质量检测算法的研究与分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(4): 69-76.

SUN Yanpeng, WANG Haiyan, ZHANG Chi. Research and analysis of riveting quality detection algorithm for fuselage skin[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(4): 69-76.

[11] QIAN X, DENING L, ANYI H, et al. RRCNet: Rivet region classification network for rivet flush measurement based on 3D point cloud[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.

[12] PAUL G, LIU L Y, LIU D. A novel approach to steel rivet detection in poorly illuminated steel structural environments[C]// International Conference on Control. Piscataway: IEEE, 2017: 630-639.

[13] 蒋滔, 方辉, 董秀丽. 飞机蒙皮铆接质量视觉检测系统的构建[J]. 航空制造技术, 2017, 60(6): 88-91.

JIANG Tao, FANG Hui, DONG Xiuli. Construction of visual inspection system for riveting quality of aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 88-91.

[14] 杨帆. 基于点云融合的双目线结构光三维测量系统的研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

YANG Fan. Research and application of binocular linear structured light three-dimensional measurement system based on point cloud fusion[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[15] KELLER K, ACKERMAN J D. Real-time structured light depth extraction[C]// Conference on Three-Dimensional Image Capture & Applications III. San Jose: DBLP, 2000: 3958.

[16] SAMPER D, SANTOLARIA J, BROSED F J, et al. Analysis of Tsai calibration method using two and three-dimensional calibration objects[J]. Machine Vision and Applications, 2013,

24(1): 117-131.

[17] 张辉, 张丽艳, 韦虎. 双目立体测量系统标定的三步法[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1899-1903.

ZHANG Hui, ZHANG Liyan, WEI Hu. Three-step calibration method for binocular stereo measuring system[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(16): 1899-1903.

[18] 孟环标. 双目视觉测量系统误差分析与控制[D]. 济南: 山东大学, 2012.

MENG Huanbiao. Error analysis and control of binocular vision measurement system[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[19] 余慧杰, 韩平畴. 双目视觉系统的测量误差分析[J]. 光学技术, 2007(1): 157-159.

YU Huijie, HAN Pingchou. Measurement error analysis of binocular vision system[J]. Optical Technique, 2007(1): 157-159.

通讯作者: 黄翔, 教授, 博士, 研究方向为飞机装配、数字化测量和智能制造。

Rivet Flatness Measurement Method Based on Binocular Multi-Line Structured Light

WANG Dezhong¹, HUANG Xiang¹, LI Shuanggao¹, LI Gen²

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

2. Suzhou Research Institute of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Suzhou 215000, China)

[ABSTRACT] As for rivet flatness measuring, the measurement methods using traditional gage measurement or non-contact point cloud scanning have disadvantages such as large limitations, long preparation periods and difficult data processing. In response to the above problems, this paper proposes a method for measuring the flatness of rivets based on binocular multi-line structured light. Firstly, binocular matching and reconstruction are performed on the structured light image collected by the binocular system, and the measured coordinate system is extracted and fitted. Next, discrete point screening proportional coefficient is introduced to optimize the fitting accuracy of local skin plane and then the discrete point screening scale factor is introduced to further optimize the fitting accuracy of the local skin plane, and finally it is substituted into the rivet flatness measurement model to perform calculations to obtain results. Compared with the traditional contact measurement and point cloud scanning, this method saves a lot of time for point cloud data processing and improves the measurement efficiency, and can complete the detection task of narrow cavity such as the aircraft inlet by mechanical arm equipped with a small measurement terminal, which reduces limitations. The experimental results show that this method is applicable to both concave and convex features of the rivet head, and the maximum measurement error of rivet flatness is less than 0.03mm, which meets the requirements of visual measurement of rivet flatness.

Keywords: Rivet assembly; Flatness measurement; Binocular vision; Multi-line structured light; Discrete point screening

(责编 七七)