

基于图像-点云映射的铆钉平齐度高效检测

国荣辉¹, 张益华¹, 崔海华^{1*}, 程筱胜¹, 李兰柱²

¹南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016;

²航天材料及工艺研究所, 北京 100048

摘要 铆钉平齐度是铆接质量参数中的一项重要指标,但在实际检测中缺少高效、稳定的检测方法。针对铆钉平齐度的检测,本文提出了一种基于图像-点云映射分割策略的平齐度检测方法。首先,为了快速、稳定地提取图像中的铆钉轮廓,本文提出了一种图像噪声轮廓的分割方法,并基于铆钉轮廓像素的邻域特征,总结出轮廓拐点处的三种邻域特征,据此判断轮廓点是否为拐点,依据拐点对噪声轮廓进行分割;然后,基于图像-点云映射策略,将图像中的铆钉特征映射到测量得到的三维点云中,实现铆钉点云区域的快速、稳定分割。实验结果验证了本文所提铆钉平齐度检测方法具有较高的稳定性和检测精度。

关键词 图像处理; 图像识别; 形貌测量; 铆钉平齐度; 轮廓检测; 点云分割

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2012002

An Efficient Rivet Flushness Measurement Method Based on Image-to-Point-Cloud Mapping

Guo Ronghui¹, Zhang Yihua¹, Cui Haihua^{1*}, Cheng Xiaosheng¹, Li Lanzhu²

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

²Institute of Aerospace Materials and Technology, Beijing 100048, China

Abstract Rivet flushness is an important indicator of riveting quality parameters; however, efficient and stable methods for actual testing are lacking. We propose a technique for flushness detection based on image-to-point-cloud segmentation algorithm for detecting rivet flushness. First, we propose a separating method of the image noise contour to stably and quickly extract the rivet contour in images. Three neighborhood features at the inflection point of the contour are summarized on the basis of an analysis of the neighborhood features of the rivet contour pixel. According to the neighborhood features, whether the contour point is an inflection point is judged, and the noise contour separation is realized. Second, the rivets features in the image are mapped to the measured three-dimensional point cloud to realize fast and stable segmentation of the rivets after extracting the contours of the rivets in the image. The experiment confirms the excellent stability and accuracy of the rivet flushness detection method proposed in this paper.

Key words image processing; image recognition; shape measurement; rivet flushness; contours detection; point cloud segmentation

OCIS codes 120.3940; 100.5010; 120.1880

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2020-12-23; 录用日期: 2021-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1707500, 2019YFB2006100)、国防基础科研计划(JCKY2018605C002)、江苏省自然科学基金(BK20191280)

通信作者: *cuihh@nuaa.edu.cn

1 引言

铆接是飞机制造中主要的一种连接方式,铆接质量的好坏直接影响着飞机的性能。在铆接质量的各项评价指标中,反映铆钉与飞机蒙皮表面贴合程度的铆钉平齐度是最重要的一项检验指标。尤其是在新一代高性能飞机中,飞机蒙皮表面的铆钉平齐度对飞机的气动性能和隐身性能有着重要影响。然而,在铆钉平齐度的实际检测中存在两个主要问题:一是飞机蒙皮表面往往排布着大量铆钉,对铆钉逐一检测的任务量大;二是可以定量检测铆钉平齐度的数字化检测手段较少,而且检测结果的可靠性较低。

近年来,针对铆接质量的检测方式主要分为两类:基于图像的检测方式和基于点云的检测方式^[1-4]。Li 等^[1]根据磁光成像仪捕获的图像进行了铆钉检查和缺陷识别。Jiang 等^[2]通过分析图像中铆钉的轮廓,采用基于多重腐蚀和膨胀算子的铆钉图像处理实现了铆钉轮廓的提取。蒋滔等^[3]针对飞机蒙皮铆接质量的检测构建了一套视觉检测系统,该系统通过提取图像中铆钉轮廓的圆心、半径和圆心距等信息对铆接质量进行了评价;但由于提取的图像中缺少三维信息,因此通过图像的方式只能对铆钉的损伤缺陷指标参数进行检测,难以对铆钉

的平齐度等三维尺寸参数实现准确可靠的测量。研究人员在基于三维点云信息的铆接质量检测方面进行了探索^[5-8],如: Xie 等^[5]设计了一套移动式三维扫描系统,并用它来获取飞机蒙皮表面的点云数据,然后基于深度学习的方法在飞机蒙皮表面点云中自动识别铆钉区域,并计算铆钉的平齐度,实现了铆钉平齐度参数的定量检测;但是,该方法通过对大量点云数据的分析处理实现数据集的建立及铆钉区域的分割,因此实现效率较低。另外, Xia 等^[6]针对飞机蒙皮接缝宽度和铆钉平齐度的检测开发了一套基于条纹投影的测量系统,但铆钉及蒙皮表面存在的高反光等问题会导致条纹投影测量系统出现测量误差,对最终的尺寸检测精度造成了影响。

针对目前铆钉平齐度检测方法中存在的不足,本文提出了一种基于面结构光测量的铆钉平齐度检测方法。本文首先针对飞机蒙皮图像中铆钉轮廓的提取提出了一种抗噪声性能良好的提取算法;然后,利用自主开发的面结构光测量系统的便捷性,将在图像中提取到的铆钉轮廓映射到对应的三维点云中,实现铆钉区域的快速分割;最后,采用一种两步式方法,在消除铆钉点云中异常值的前提下计算铆钉的平齐度。该方法的鲁棒性高,对铆钉平齐度的检测具有较高的精度。所提方法的流程如图 1 所示。

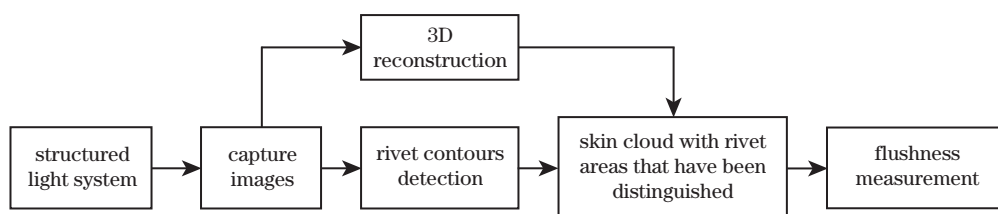


图 1 铆钉平齐度检测算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of rivet flushness measurement algorithm

2 基于图像邻域特征的铆钉轮廓鲁棒性提取算法

由于铆钉表面不平整以及铆钉表面的高反

光特性和油污等的干扰,图像边缘检测得到的结果中通常包含有过多的干扰轮廓,如图 2 所示,使用单一的椭圆拟合算法难以将铆钉的真实轮廓还原。

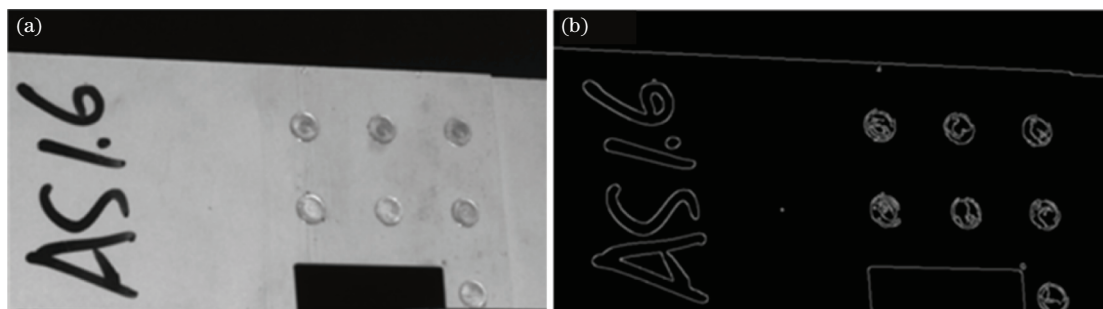


图 2 蒙皮的表面情况。(a)蒙皮表面图像;(b) Canny 边缘检测结果

Fig. 2 Skin surface condition. (a) Image of skin surface; (b) Canny edge detection

2.1 基于邻域特征的轮廓拐点检测与轮廓分割

由于铆钉在图像中的轮廓是椭圆形状,因此用于拟合的轮廓必须是平滑、没有急剧拐点的。首先根据图像中轮廓的拐点信息将不具有平滑特性的轮廓进行分割。在本节,本课题组提出了一种基于邻

域特征的轮廓拐点检测算法,根据每个轮廓点的邻域信息判断该点是否为拐点。

对于轮廓的拐点,本文首先根据曲线的几何特征将其定义为轮廓曲率的正负发生变化的点或者轮廓曲率变化较大的点^[9-11],如图 3 所示。

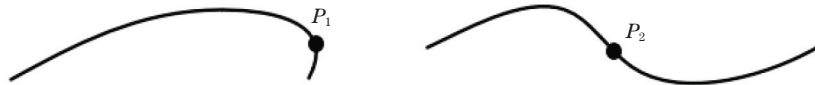


图 3 两种轮廓拐点的几何特征。

Fig. 3 Two geometric features of contour inflection point

通过对蒙皮表面图像进行分析发现,在具有上述几何特征的轮廓点处,其邻域中的轮廓点也具有特殊的分布特征。如图 4(a)中矩形框标示的位置为一处

拐点,其邻域中轮廓点的分布如图 4(d)所示。同样,对于图 4(b)和图 4(c)中矩形框标示的拐点,其邻域中轮廓点的分布分别如图 4(e)和图 4(f)所示。

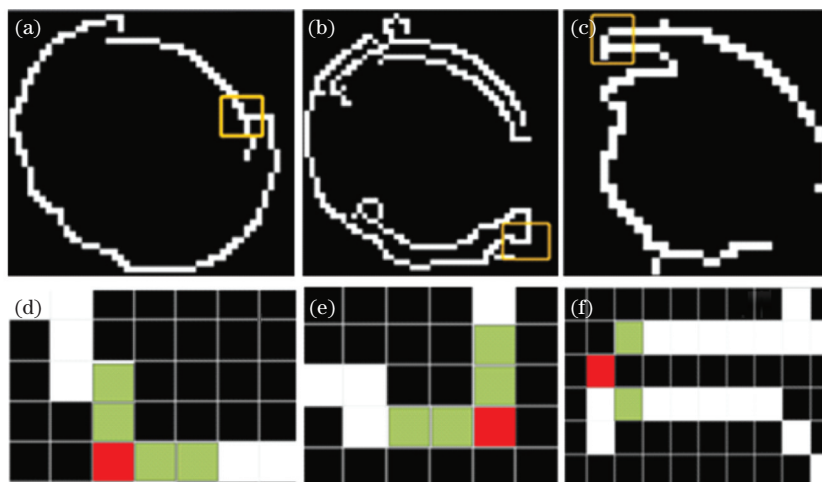


图 4 基于邻域特征的轮廓分割。(a)(b)(c)受噪声干扰的初始轮廓;(d)(e)(f)轮廓拐点处的邻域特征

Fig. 4 Contour segmentation based on neighborhood features. (a)(b)(c) Original contours disturbed by noise; (d)(e)(f) neighborhood features at the inflection point of the contours

通过对图像中众多轮廓拐点处的邻域特征进行分析,将拐点邻域中轮廓点的分布特征总结为以下三种情况:

1) 在拐点的 3×3 邻域中,位于拐点同侧的两个角上的邻域像素同为该拐点所在轮廓的像素,如

图 5(a)所示;

2) 在拐点的 5×5 邻域中,轮廓点分布呈直角趋势,如图 5(b)所示;

3) 在拐点的 5×5 邻域中,轮廓点分布同样呈直角趋势,如图 5(c)所示。

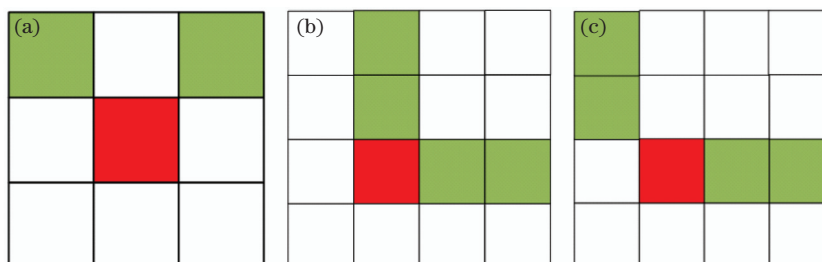


图 5 铆钉轮廓拐点的三种邻域特征

Fig. 5 Three kinds of neighborhood features at the inflection point of the rivet contour

根据拐点分割轮廓后会产生新的离散点,并且分割后的轮廓长度过短,本文将这些情况下的点和轮廓进行滤除。图 6(a)~(c)三幅图分别展示的是

对图 4(a)~(c)所示轮廓进行分割后的结果,可以看到,初始轮廓中的拐点被完全检测到,并实现了轮廓的分割,得到了一系列相对平滑的轮廓。

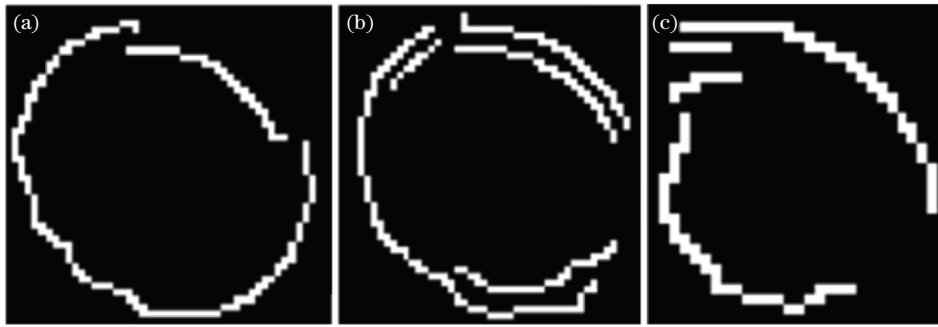


图 6 基于邻域特征的轮廓分割。(a)(b)(c)轮廓分割后的结果

Fig. 6 Contour segmentation based on neighborhood features. (a)(b)(c) Contour segmentation

2.2 基于平滑轮廓的铆钉提取鲁棒性算法

得到平滑的轮廓后,对图像中的各轮廓进行椭圆拟合。设置椭圆拟合的误差阈值,对拟合结果进行筛选,排除非椭圆轮廓的干扰。对于同一个铆钉,其表面的高反光特性及油污等的干扰,会引入与真实铆钉轮廓有一定偏差的边缘轮廓。因此,在对飞机蒙皮表面图像特点进行分析的基础上,本文根据下述条件对椭圆拟合结果进行筛选(设拟合椭圆的宽和高分别为 a 和 b),以保留真实的铆钉椭圆轮廓:首先将符合条件 1) 和 2) 的拟合椭圆作为候选,如(1)式所示,由于测量系统的工作距离具有一定的范围,且常用的铆钉钉头的实际直径多在几毫米到十几毫米之间,据此可以预先设置图像中铆钉对应的椭圆轮廓面积的阈值 T_1 和 T_2 (本文设为 400 和 10000);另外,为保证测量精度需尽量使测量系统正对蒙皮表面,据此可以设置图像中铆钉椭圆轮廓宽高比的阈值 T_3 和 T_4 (本文设为 1.5 和 0.6);完成上述筛选后,在候选椭圆中选择具有包围关系的较大椭圆,在中心距离较近的候选椭圆中选择其中由较长轮廓拟合得到的椭圆。

$$\begin{cases} T_1 < a \times b < T_2 \\ T_3 < a/b < T_4 \end{cases} \quad (1)$$

采用本文提出的铆钉图像轮廓提取方法可以对图 2 所示的蒙皮表面图像实现准确的铆钉轮廓提取,提取结果如图 7 所示。可以看到,铆钉的轮廓被



图 7 图 2 所示蒙皮图像中铆钉轮廓的提取结果
Fig. 7 Rivet contour extraction result corresponding to the skin image shown in Fig. 2

很好地提取到了,而且并没有错误地提取到蒙皮表面其他的干扰特征。这说明本文所提铆钉图像轮廓提取方法具有较高的鲁棒性。

3 基于图像-点云映射策略的铆钉特征分割

得益于本课题组自主开发的结构光测量系统的便捷性,本实验可以充分利用测量过程各个阶段的信息。由此,本文提出了一种基于图像-点云映射策略的铆钉点云分割方法,利用铆钉在图像中的提取结果实现其在点云中的快速分割。

3.1 基于图像-点云映射的铆钉区域分割

根据文献[12]所述的蒙皮表面形貌三维点云的获取方法计算得到的点云中的每个三维点都对应图像中的某个像素,如图 8 所示。因此,基于图像中铆钉轮廓提取的结果,铆钉轮廓区域内的像素均可以在点云中找到对应的三维点,对其进行标记,则点云中铆钉区域的点都可以被标记出来,从而可以实现点云数据中铆钉区域的分割。采用这种图像-点云映射策略对点云中的铆钉区域进行分割,分割结果如图 9(b)所示。图 9(a)为铆钉图像轮廓,图 9(b)为映射得到的点云中的铆钉区域。

为了验证本文所提出的基于图像-点云映射策略的点云分割方法的高效性,将相关点云分割方法^[12-15]与本文方法进行比较,基于 PCL 开源库中的点云处理算法实现同样的铆钉点云分割。实现方法如下:首先基于 RANSAC 算法实现蒙皮表面的分割,然后对非蒙皮表面的点通过欧氏聚类方法进行分割,得到各铆钉区域的点。对图 2 所示飞机蒙皮点云区域的分割结果如图 10 所示。基于 PCL 点云处理算法的分割程序的时间消耗为 5.5 s,而采用本文所提出的基于图像-点云映射算法的分割程序的时间消耗为 1.5 s,说明本文所提方法具有较高的分割效率。

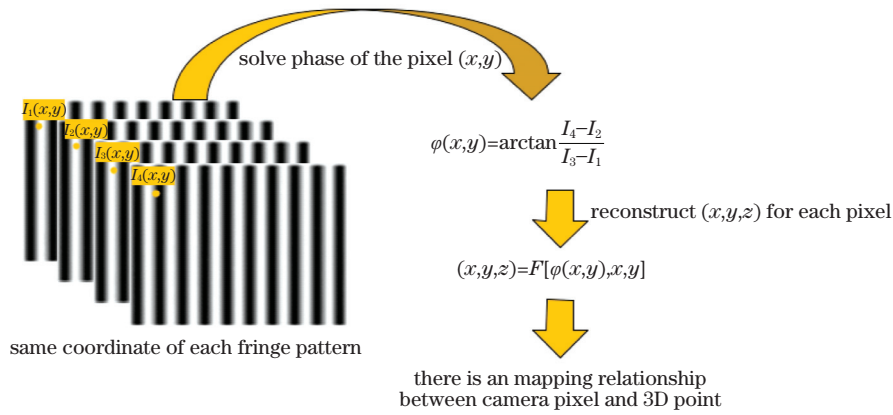


图 8 相机像素与重建三维点之间的映射关系

Fig. 8 Mapping relationship between camera pixel and three-dimensional point

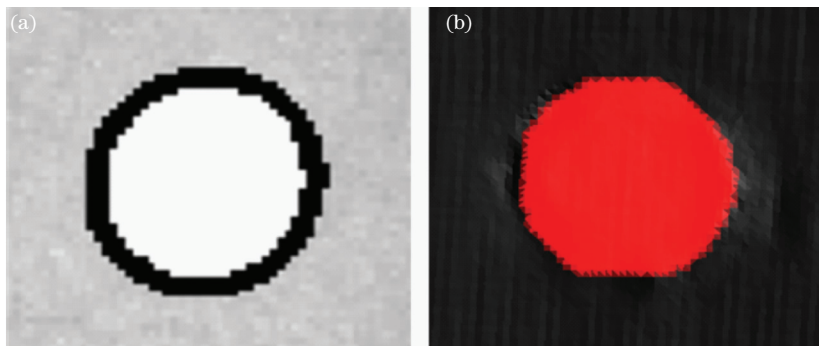


图 9 基于图像-点云映射的铆钉点云区域分割。(a) 铆钉图像轮廓的提取; (b) 铆钉点云区域的分割

Fig. 9 Rivet segmentation in point cloud based on image-point cloud mapping.

(a) Extraction of rivet contour in image; (b) rivet segmentation in point cloud

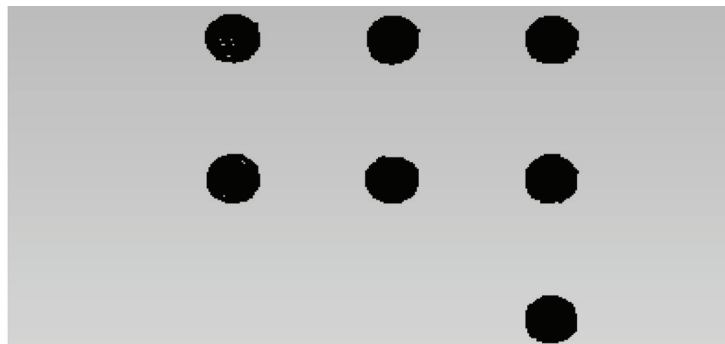


图 10 基于 PCL 的铆钉点云区域的分割结果

Fig. 10 Rivet segmentation in point cloud based on PCL

3.2 铆钉平齐度两步式计算方法

由于点云中铆钉区域边缘处的测量误差较大, 在计算铆钉平齐度参数时会引入较大误差, 因此, 本文提出了两步式计算方法。

首先采用基于 RANSAC 算法的平面对铆钉区域的点云进行拟合, 设置较小的离群阈值 (设为 0.01 mm), 将铆钉边缘处偏差较大的点滤除。之后, 同样采用基于 RANSAC 算法的平面对铆钉周围区域的蒙皮点云进行拟合, 消除靠近铆钉区域偏差较大的点。

对滤除较大偏差点之后的铆钉区域的点到蒙皮平面的距离进行统计, 得到其中的最大距离 d_{\max} 和最小距离 d_{\min} , 然后计算铆钉平齐度 d 。计算公式为

$$d = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad (2)$$

4 实验与分析

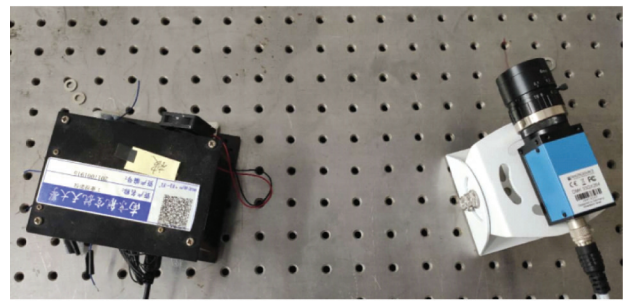
4.1 测量系统的搭建

本文采用自主开发的结构光测量系统进行三维

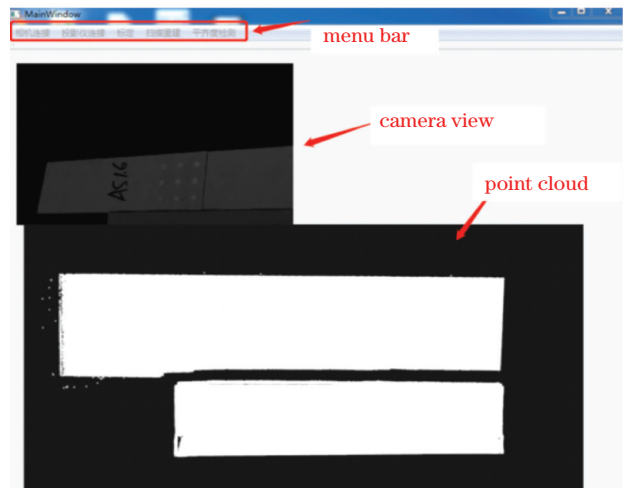
形貌的测量,该系统由一台数字投影机(型号为 DLP LightCrafter 4500)、一台工业相机(型号为 DMK 33GP1300,镜头选用 RICOH 公司生产的焦距为 12 mm 的镜头),以及用于控制和数据处理的计算机组成。测量系统的视场范围为 400 mm × 300 mm × 200 mm,单次测量可以实现视场区域内所有铆钉的平齐度检测。搭建的测量系统如图 11(a)所示。此外,本课题组还基于 Qt 开发了软件系统交互界面,如图 11(b)所示。在测量过程中通过交互界面中的相关功能实现硬件设备的连接,并触发系统进行扫描测量;通过交互界面中的检测功能可以完成铆钉平齐度的计算。

4.2 标准量块的测试与分析

为了验证本文测量系统的精度,本课题组设计了包含铆钉特征的标准件,如图 12(a)所示。标准件上圆形铆钉特征的直径均为 4 mm,上面一排特征相对于表面凸起,凸起高度从左到右分别为 0.1,0.2,0.5,1 mm,下面一排特征相对于表面凹下,凹下的深度从左到右分别为 0.1,0.2,0.5,1 mm。采用测量系统对标准件进行测量,测量结果如图 12(b)所示。在 Geomagic Studio 软件中对各圆形铆钉特征的凸起高度或凹下深度进行分析与提取,得到的结果如表 1 所示,各特征与序号的对应关系如图 12(b)所示。由标准件上圆形铆钉特征的尺寸测量偏差可知,本文搭建的测量系统对相应特征的测量精度优于 0.03 mm。



(a)



(b)

图 11 铆钉平齐度测量系统。(a)测量系统的硬件组成; (b)软件交互界面

Fig. 11 Measurement system for rivet flushness. (a) Hardware of measurement system; (b) software interface

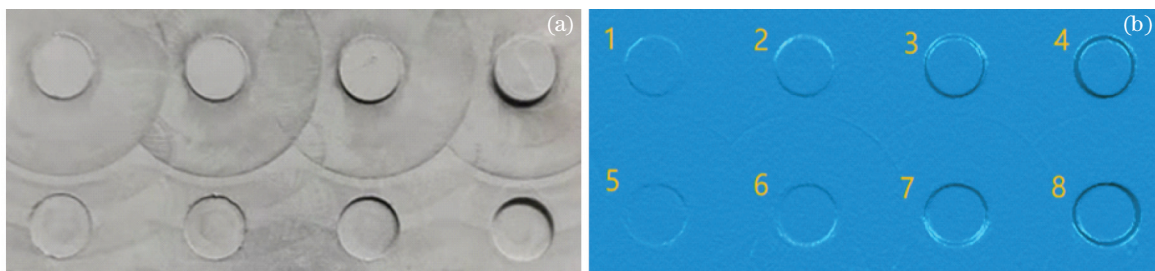


图 12 设计的标准件及测量结果。(a)设计的标准件;(b)标准件的测量结果

Fig. 12 Standard part and its measurement result. (a)Standard part; (b)measurement result of standard part

表 1 标准件上圆形铆钉特征的尺寸测量偏差

Table 1 Measurement deviation of rivet features on standard part

Index	1	2	3	4	5	6	7	8
Standard value/mm	0.1	0.2	0.5	1	0.1	0.2	0.5	1
Measurement value/mm	0.088	0.190	0.520	0.991	0.092	0.186	0.528	0.992
Deviation/mm	0.012	0.010	0.020	0.009	0.008	0.014	0.028	0.008

4.3 蒙皮件的验证与分析

对测量系统的精度进行验证后,本课题组对如图 13 所示的飞机蒙皮件进行了测量,并对其上的铆钉进行了平齐度检测。

铆钉表面具有高反光特性,在进行结构光三维

测量时会产生较多的误差点,因此,本文参考关于高反光表面测量方法的相关研究^[16-19],采用基于自适应投影的结构光测量方法对蒙皮的表面形貌进行测量重建。引入自适应投影测量方法前后的测量结果对比如图 14 所示。

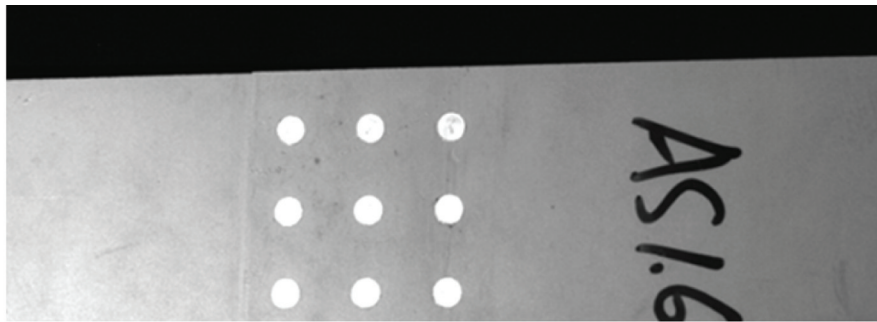


图 13 待测蒙皮件

Fig. 13 Skin part to be measured

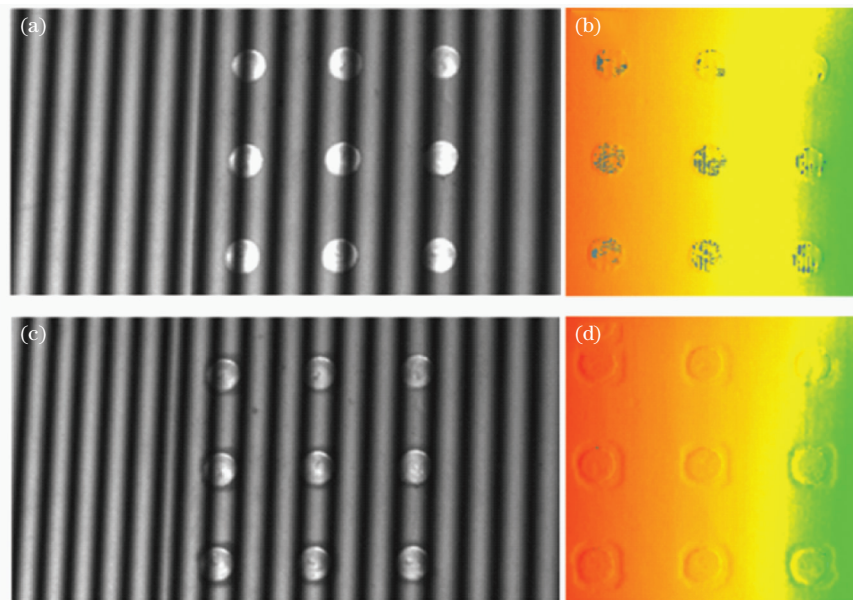


图 14 引入自适应投影测量方法前后的图像及重建效果。(a)(b)引入自适应投影测量方法前；
(c)(d)引入自适应投影测量方法后

Fig. 14 Images and reconstruction results before and after introducing adaptive projection measurement method.
(a)(b) Before introducing adaptive projection measurement method; (c)(d) after introducing adaptive projection measurement method

采用本文提出的铆钉轮廓提取算法对蒙皮表面图像进行提取。首先对图像进行高斯滤波,之后采用 Canny 边缘检测算法提取图像的边缘信息。滤波和边缘检测均采用 OpenCV 视觉库中封装好的对应功能,边缘检测结果如图 15(a)所示。接下来对提取到的每条轮廓进行检查,提取其中的拐点,根据拐点将初始轮廓分割为多段平滑的轮廓,并且滤除分割后的较短的轮廓(因为较短的轮廓缺少椭圆的曲率信息),得到如图 15(b)所示

的结果。然后对剩余的轮廓进行椭圆拟合,并对拟合得到的椭圆进行筛选,得到最终的铆钉轮廓检测结果,如图 15(c)所示。最后将图像中的铆钉检测结果映射到三维点云中,便得到了如图 15(d)所示的点云分割结果。

最后采用两步式计算方法计算铆钉的平齐度。对同一组蒙皮进行了 5 次测量,9 个铆钉的平齐度测量平均值和标准偏差如表 2 所示,标准偏差均在 0.006 mm 以下。

表 2 铆钉平齐度检测值

Table 2 Flushness measurement of rivets

Rivet	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
Average value/mm	0.107	0.111	0.091	0.101	0.098	0.081	0.127	0.084	0.090
Standard deviation/mm	0.0048	0.0033	0.0045	0.0042	0.0043	0.0058	0.0045	0.0050	0.0037

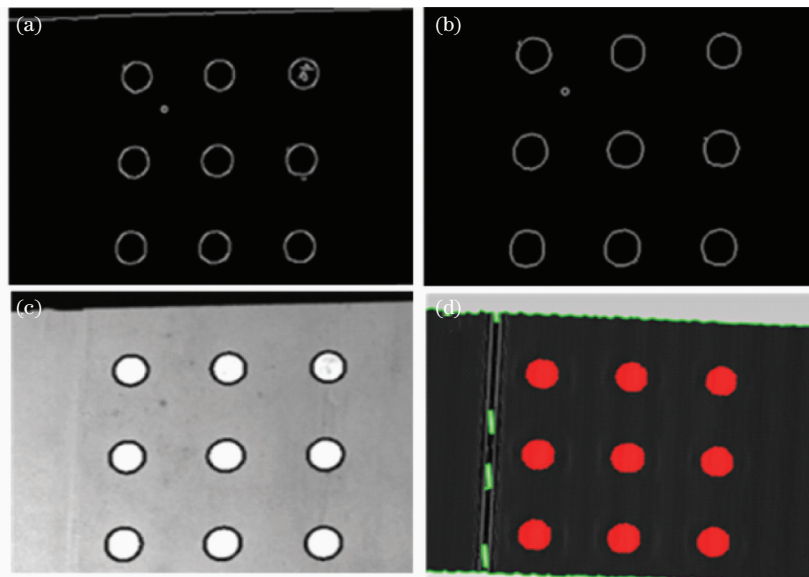


图 15 铆钉的轮廓提取与点云分割。(a)Canny 边缘检测结果;(b)基于拐点分割后的平滑轮廓;(c)铆钉轮廓的提取结果;(d)基于铆钉图像轮廓的点云分割结果

Fig. 15 Rivet contour extraction and point cloud segmentation. (a) Canny edge detection result; (b) smooth contour after segmentation based on inflection point; (c) extracted rivet contour; (d) point cloud segmentation based on rivet image contour

从以上的精度验证实验以及蒙皮试件测试结果可以看到,采用本文提出的铆钉平齐度检测方法对实际飞机蒙皮上的铆钉平齐度进行检测,在多次测量的情况下,检测值具有较高的检测精度与稳定性。

5 结 论

本文提出了一种基于图像-点云映射策略的铆钉平齐度检测方法,该方法可以对铆钉的平齐度实现快速、精确测量。该方法先提取图像中的铆钉轮廓,并在结构光测量系统重建蒙皮表面形貌过程中将其映射到对应的铆钉点云区域,实现铆钉特征点云分割,然后采用两步式方法计算铆钉的平齐度。针对图像中铆钉轮廓的提取,本文提出了一种基于像素点邻域特征的轮廓拐点检测方法。本文通过对铆钉图像中轮廓拐点的几种邻域特征进行分析,总结出了轮廓拐点处的三种主要邻域特征,这三种邻域特征可以较好地实现图像中铆钉轮廓拐点的检测。基于这三种邻域特征对铆钉图像的初始轮廓进行分割,得到平滑的轮廓,通过对各平滑轮廓进行椭圆拟合及筛选就可以得到最终的铆钉轮廓提取结果。通过对实际的蒙皮件进行检测,验证了本文所提铆钉图像轮廓提取方法的准确性。所提方法可以实现铆钉平齐度的稳定、可靠测量。

参 考 文 献

[1] Li B, Wang X F, Yang H P, et al. Aircraft rivets

defect recognition method based on magneto-optical images [C] // Proceedings of the 2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface. [S.l.:s.n.], 2010: 788-791.

[2] 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.

[3] Jiang T, Fang H, Dong X L. Construction of visual inspection system for riveting quality of aircraft skin [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(6): 88-91.

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.

[4] Sun Y P, Wang H Y, Zhang C. Research and analysis of riveting quality detection algorithm for fuselage skin [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(4): 69-76.

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.

[5] 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.

[6] Xia R B, Zhao J B, Zhang T Y, et al. Detection method of manufacturing defects on aircraft surface based on fringe projection [J]. Optik, 2020, 208: 164332.

- [7] Chen S L, Xia R B, Zhao J B, et al. Visual display method for grating projection measurement system [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2017(9): 40-44, 49.
陈松林, 夏仁波, 赵吉宾, 等. 光栅投影测量中结果可视化显示方法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017(9): 40-44, 49.
- [8] Xie Q, Lu D N, Du K P, et al. Aircraft skin rivet detection based on 3D point cloud via multiple structures fitting[J]. *Computer-Aided Design*, 2020, 120: 102805.
- [9] Chen S L, Xia R B, Zhao J B, et al. A hybrid method for ellipse detection in industrial images[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 68: 82-98.
- [10] Fornaciari M, Prati A, Cucchiara R. A fast and effective ellipse detector for embedded vision applications[J]. *Pattern Recognition*, 2014, 47(11): 3693-3708.
- [11] Prasad D K, Leung M K H, Cho S Y. Edge curvature and convexity based ellipse detection method [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45 (9): 3204-3221.
- [12] Cao G P, Liu X S, Liu N, et al. Segmentation of subway tunnel wall surface objects based on laser 3D point cloud[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(21): 2110001.
曹桂萍, 刘行思, 刘念, 等. 基于激光三维点云分割地铁隧道壁表面物体[J]. *光学学报*, 2020, 40(21): 2110001.
- [13] Lü M, Meng Y. Study on point cloud management strategy based on octree-like index [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 141025.
吕敏, 孟芸. 基于类八叉树索引的点云管理策略研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(14): 141025.
- [14] Guo Q D, Quan Y M. Depth image point cloud segmentation using spatial projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1815001.
郭清达, 全燕鸣. 采用空间投影的深度图像点云分割[J]. *光学学报*, 2020, 40(18): 1815001.
- [15] Li R Z, Liu Z W. New segmentation method combining three-dimensional point cloud skeleton points and feature points[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(12): 121104.
李仁忠, 刘哲闻. 一种新的结合三维点云骨架点和特征点的分割方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(12): 121104.
- [16] Li Z J, Cui H H, Liu C Y, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112004.
李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1112004.
- [17] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. High dynamic range 3D shape measurement based on the intensity response function of a camera [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1378-1386.
- [18] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (8): 9887-9901.
- [19] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48 (3): 033604.