

引文格式: 张辉, 潘新, 李海伟, 等. 面向航空总窝孔制孔质量的手持式视觉检测方法[J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 71-78.

ZHANG Hui, PAN Xin, LI Haiwei, et al. Hand-held visual inspection method for countersink hole quality measuring during aircraft assembling[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(18): 71-78.

# 面向航空总窝孔制孔质量的手持式视觉检测方法\*

张辉<sup>1</sup>, 潘新<sup>1</sup>, 李海伟<sup>1</sup>, 杜杰<sup>1</sup>, 罗志光<sup>1</sup>, 郭飞燕<sup>2</sup>

(1. 航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850;

2. 北京科技大学, 北京 100083)

**[摘要]** 飞机结构存在大量的标准连接孔, 为了保证飞机装配质量, 需要对总窝孔的制孔质量进行检测。基于机器人或机床的视觉检测设备存在定位精度低、局部位置难到达、易受环境光影响等问题, 提出了一种面向航空总窝孔制孔质量的手持式视觉检测方法, 开发了总窝孔孔径及窝深的亚像素检测算法, 设计了一种手持式视觉检测设备, 对机械结构、硬件系统和软件系统进行了详细阐述。以航空结构标准试验件为对象, 将本方法所测孔径和总窝深度与第三方认证机构的测试结果进行了对比。结果表明, 本方法孔径精度测量精度优于0.01 mm, 总窝深度测量精度优于0.1 mm。设计的手持式视觉检测设备检测精度高、应用范围广且不受环境光的影响。

**关键词:** 总窝孔; 亚像素; 手持式; 视觉检测; 飞机装配

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2022.18.071



张辉

高级工程师, 博士, 主要研究方向为飞行器制造。

标准件是构成飞机结构及系统的基础零件, 其数量多、应用范围广, 必须具有良好的质量一致性和可靠性, 并经过有效的试验验证, 才能保证飞机装配的精度和服役的可靠性。而实现高精度装配的前提是需要有高精度的连接孔。就目前的制孔技术而言, 由于总窝深度的不稳定, 存在部分总窝超差和需要人工补总窝的现象。为了制造高质量的装配孔, 需要对总窝孔的制孔质量进行检测。然而, 传统的塞规、止规等接触式检测方法需要将塞规等插入连接孔中, 不仅检测精度低, 而且在测量时容易划伤孔壁表面, 造成不可修复的损伤。同时, 长时间使用也会使得塞规和止规等产生磨损, 导致检测结果不准确。因此, 需要寻求新的检测方式来实现总窝孔制孔质量的高精度检测。

目前应用最为广泛的检测方法

为视觉检测。视觉检测技术能够有效替代人眼作业, 尤其是在零件质量检测中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。视觉检测算法具有非接触式、高精度等特征, 在结构的特征检测中得到了越来越广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。毕运波等<sup>[6]</sup>提出了一种基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法, 并将其在机器人自动化制孔设备上进行了验证。勾江洋等<sup>[7]</sup>设计开发了一套在机视觉检测系统, 在五轴数控机床进行了应用验证。唐君萍等<sup>[8]</sup>设计并开发了一套用于飞机复杂零件上大量小尺寸导孔的快速检测系统, 并在多轴数控机床进行了验证。Lee等<sup>[9]</sup>提出了一种三维激光视觉圆孔检测技术, 取得了较好的检测效果。然而, 激光视觉技术容易受到外界环境光的干扰。Moru等<sup>[10]</sup>提出了一种检测齿轮尺寸的机器视觉算法, 并基于算法开发了图像处理系统以实现测量和

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52175450、51805502); 国防基础科研项目(JCKY2019205A003)。

检测功能。Zhu 等<sup>[11]</sup>利用机器视觉方法建立了机器人钻削中钻头与工件的相对误差模型,并提出一种垂直度和距离控制方法。陈璐<sup>[12]</sup>和张晓林<sup>[13]</sup>等基于改进的 Zernike 方法实现了圆孔边缘亚像素级别的视觉检测;谢俊<sup>[14]</sup>和陈怡然<sup>[15]</sup>等针对传统测量方法在圆形零件尺寸测量时效率低、一致性差及同心度参数不易测量的问题,提出了基于机器视觉的尺寸测量算法。

上述研究开发的视觉设备多用于机床或机器人的末端执行器上。但存在以下 3 个限制因素。(1)检测时,通常需要调整机器人末端执行器到达指定的位姿。机器人本身定位精度较低,同时悬臂梁结构的刚度较低,进行检测时很容易产生定位偏差,导致检测结果不准确。(2)受限于机器人或机床的工作位置,航空结构件的某些位置导致机器人或机床无法达到,难以完成检测任务。(3)为了防止碰撞干涉,光源与待测孔之间通常存在一定的距离,检测结果容易受到外界环境光的影响。因此,急需开发一种便携式的视觉检测设备,既能满足航空结构制孔质量的高精度检测,又能满足难到达区域的检测需求,同时保证检测结果不受外界环境光的影响。

本文提出了一种面向航空铤窝孔制孔质量的手持式视觉检测方法。对图像处理整体流程、孔径检测原理和铤窝深度检测原理进行了阐述。设计了一种手持式的视觉检测设备,并在航空结构件上进行了应用验证。

## 1 铤窝孔亚像素检测算法

本文铤窝孔亚像素检测算法共分为图像处理、孔径检测和铤窝深度检测 3 个部分。图像处理部分主要是对视觉相机拍摄到的原始图像进行预处理。孔径检测部分主要是通过亚像素级别的像素统计识别圆孔

长短轴,进而计算长短轴。铤窝深度检测是在孔径检测的基础上,通过三角函数关系计算标准孔铤窝深度。本文提出的铤窝孔亚像素检测算法流程如图 1 所示。

### 1.1 图像处理

利用高精度视觉相机获取到铤窝孔的原始图片后,需要进行一系列的图像处理操作,获取铤窝孔的圆周轮廓。原始图像处理的整体流程如图 2 所示。首先对原始图像(图 2(a))进行阈值化处理,初步确定铤窝孔内外圆的轮廓。设置固定的灰度阈值,将大于阈值的像素点的灰度值设置为 255(白色),将小于阈值的像素点的灰度值设置为 0(黑色),使图像只剩下黑白二色(图 2(b))。其次通过高斯滤波操作,去掉二值化图像中存在的噪声。由于二值化处理化的图像有较多的噪声,因此选择 Sobel 算子对轮廓边缘进行初步的识别,其对于灰度渐变和噪声较多的图像处理效果较好。

### 1.2 孔径检测

获取到圆孔的边缘轮廓后,即可对孔径进行检测。孔径检测的原理为通过双重循环遍历边缘轮廓点之间的距离,进而确定出轮廓的长短轴,是一种亚像素级别的检测算法。

首先确定边缘轮廓上任意两点之间的计算方式,如式(1)所示。

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad i, j \in (1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中,  $i$  和  $j$  为边缘轮廓上的任意两点;  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_j, y_j)$  为这两点的坐标;  $m$  为边缘轮廓像素点的总数。

其次,开始第 1 层循环遍历,计算经过点 1 的长轴的像素个数。如图 3(a)所示,首先确定边缘上的一个像素点,并将其下标设置为 1,沿逆时针方向计算其与所有轮廓点之间的距离  $d_{1i}$ ,即为第 1 层循环遍历。需要注意的是图 3(a)仅给出了  $O_1$  点与 7 个边缘点之间距离的示意,实际的边缘轮廓上有  $m$  个像素点,需要计算  $O_1$  点与所有边缘点之间的距

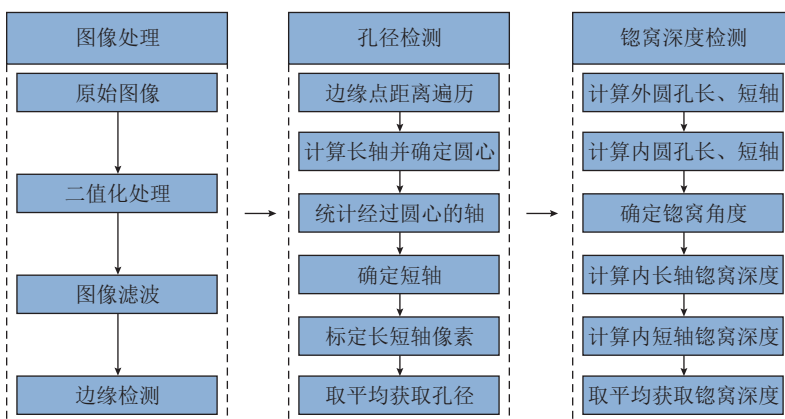


图 1 铤窝孔亚像素检测算法流程图

Fig.1 Flow chart of sub-pixel detection algorithm of countersink hole

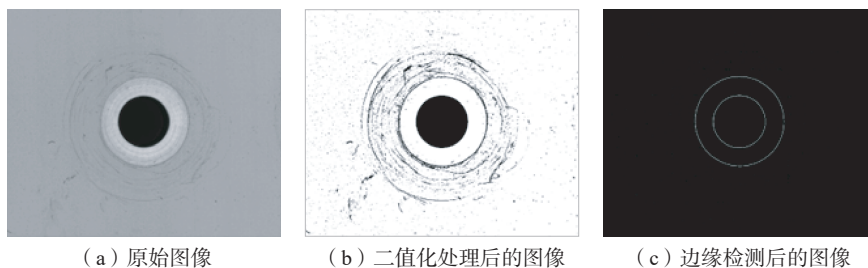


图 2 图像处理整体流程

Fig.2 Overall flow of image processing

离。在此之后,计算经过第 1 个像素点的距离的最大值,即为通过点 1 的长轴距离,如式(2)所示。

$$d_{1\max} = \max(d_{11}, d_{12}, \dots, d_{1m}) \quad (2)$$

然后,沿逆时针方向依次选择边缘像素点  $i$ ,再次计算边缘像素点  $i$  与所有其他边缘点  $j$  之间的距离  $d_{ij}$ ,即为第 2 层循环。如图 3 (b) 所示为  $30^\circ$  角时的边缘点距离遍历示意图。与第 1 点的计算方式相同,通过第  $i$  点的距离最大值  $d_{i\max}$  即为第  $i$  点的长轴距离,如式(3)所示。

$$d_{i\max} = \max(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im}) \quad i \in (1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

通过所有点的长轴计算完成之后,取所有点长轴距离的最大值,即为待检测圆孔的长轴距离  $d_L$ ,如式(4)所示。

$$d_L = \max d_{i\max} = \max(d_{1\max}, d_{2\max}, \dots, d_{m\max}) \quad i \in 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

取长轴中心的坐标为圆心的位置,再次统计所有大致经过圆心的距离长度,其中最短的距离即为短轴  $d_S$ 。根据实际距离对视觉相机进行标定,可以得到一个像素所代表的实际距离  $d_{\text{cali}}$ 。将椭圆长轴距离  $d_L$  和短轴距离  $d_S$  分别与标定距离  $d_{\text{cali}}$  相乘,可以获得实际的长轴距离  $d_{LR}$  和短轴距离  $d_{SR}$ ,如式(5)所示。

$$\begin{cases} d_{LR} = d_L \times d_{\text{cali}} \\ d_{SR} = d_S \times d_{\text{cali}} \end{cases} \quad (5)$$

最后对长轴实际距离  $d_{LR}$  和短轴实际距离  $d_{SR}$  取平均,即可得到待检测圆孔的孔径,如式(6)所示。

$$d_{\text{Hole}} = \frac{d_{LR} + d_{SR}}{2} \quad (6)$$

### 1.3 镗窝深度检测

镗窝深度的检测原理建立在孔径检测原理之上,如图 4 所示。

首先通过孔径检测原理,分别计算出内椭圆长轴距离  $d_{Lin}$ 、内椭圆短轴距离  $d_{Sin}$ 、外椭圆长轴距离  $d_{Lout}$ 、外椭圆短轴距离  $d_{Sout}$ 。

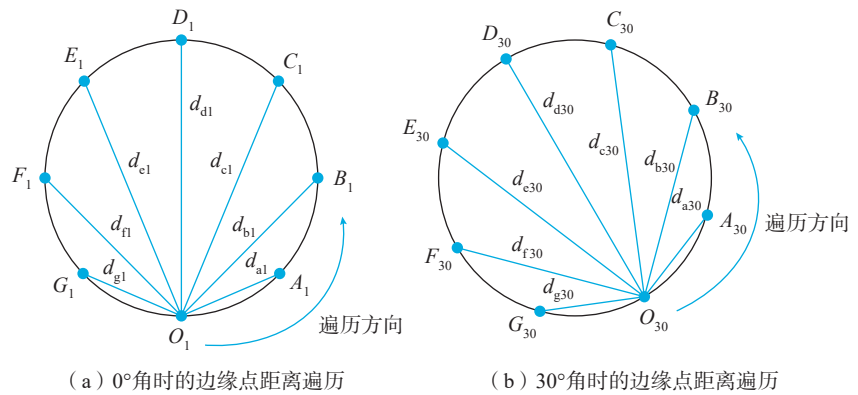


图 3 孔径检测原理

Fig.3 Aperture detection principle

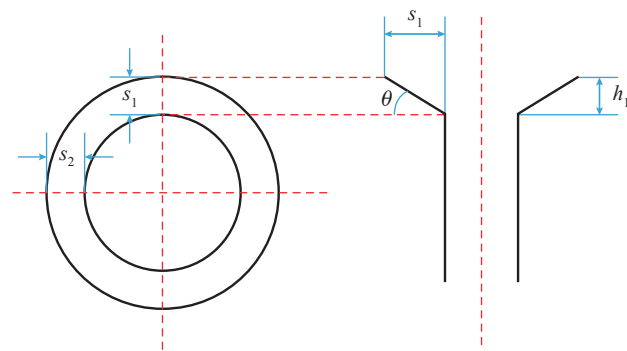


图 4 镗窝深度检测原理

Fig.4 Countersink hole depth detection principle

其次,将外椭圆长轴距离的一半减去内椭圆长轴距离的一半可以获得两个椭圆在长轴方向的水平距离差  $s_1$ ,如式(7)所示。

$$s_1 = \frac{d_{Lout} - d_{Lin}}{2} \quad (7)$$

再利用已知的刀具镗窝角度  $\theta$ ,由三角函数关系的转换关系,可以获得相应的长轴方向的镗窝深度信息  $h_1$ ,如式(8)所示。

$$h_1 = s_1 \tan \theta \quad (8)$$

同理,将外椭圆短轴像素个数的一半减去内椭圆短轴像素个数的一半可以获得两个椭圆在短轴方向的水平距离差  $s_2$ ,如式(9)所示。

$$s_2 = \frac{d_{Sout} - d_{Sin}}{2} \quad (9)$$

同理,再利用三角函数关系,可以获得相应的短轴方向的镗窝深度信息  $h_2$ ,如式(10)所示。

$$h_2 = s_2 \tan \theta \quad (10)$$

最后,将长短轴方向的镗窝深度信息进行取平均处理,可以获得最终的镗窝深度信息,如式(11)所示。

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{s_1 \tan \theta + s_2 \tan \theta}{2} \quad (11)$$

## 2 手持式视觉检测设备原理设计

为了实现镗窝孔质量的视觉检测,本文首先对手持式视觉检测的原理进行了设计,包括机械结构设计、硬件系统设计和软件系统设计。

### 2.1 机械结构设计

手持式视觉检测设备的内部结构设计如图 5 所示。整体结构通过 6 个连接孔实现密封功能,既方便拆卸,又能阻隔实际操作环境中的细小灰尘。内部设计有排线固定器,方便机身内部走线,便于日后维修保养。采用双向翻转式,使得机身侧面的触

触屏可以多角度翻转并悬停。内部采用丝杠导轨滑块,通过步进电机转动带动滑块前后移动实现相机的自动对焦。

手持式视觉检测设备整体效果如图6所示。整体结构采用电钻造型,在检测时将设备与待测孔进行贴合,能够有效避免外界环境光的影响。基于人机工程学思想,握把角度与枪体呈70°,使用时更为舒适方便,有助于提高工作效率。侧边LCD显示屏可触控、可反转,在开机使用时点击屏幕上相应的按键,即可实现对应的测量功能。使用完毕后LCD屏幕可以翻转收起靠近设备本体,方便存放。

## 2.2 硬件系统设计

硬件系统组成及电路连接原理如图7所示。硬件系统整体分为微型电脑模块、机械模块和视觉检测模块。

微型电脑模块是整个设备的核心,用于控制视觉相机、步进电机等结构。控制器采用2.5寸J3160 X86工控主板。搭载四核处理器,主频1.6 GHz,睿频2.24 GHz,功率6 W。配备联想ST900 128GB M.2 2242型固态硬盘,读写速度均达500 MB/s以上。

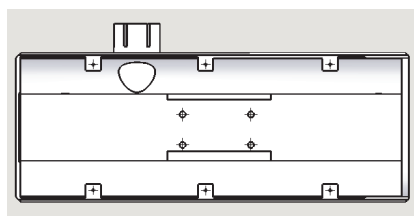


图5 手持式检测设备内部设计图

Fig.5 Internal design drawing of hand-held detection equipment



图6 手持式视觉检测设备整体效果

Fig.6 Overall effect of hand-held visual inspection equipment

触摸屏选用Pocketlcd 5.5寸1080P触摸液晶屏。电源输入为Type-C(5~5.5 V,2 A),视频信号输入支持Micro USB和HDMI,屏幕刷新率为60 Hz。基于微型电脑运转所需电压,选用12 V锂电池,容量约4500 mAh。

机械模块包括步进电机和导轨。步进电机采用28步进电机,工作电压12 V,额定电流0.6 A,转矩0.07 N·m,步距角1.8°。导轨最大负载小于2.5 kg,精度大于0.1 mm,有效行程为10~300 mm。

视觉检测模块包括视觉相机、镜头和光源。视觉相机型号为Basler acA4024-29 μm,水平/垂直分辨率为4024 px×3036 px,帧速率为31 FPS,额定功率3 W。采用Moritex公司生产的ML-MC35HR工业镜头,固定焦距35 mm,工作距离51~139.8 mm,光圈范围3.6~16,TV畸变率小于0.05,重量约73 g。采用东莞锐视光电科技有限公司生产的半球形积分光源,额定电压24 V、功率11 W、有效工作距离10~50 mm。

电池模组直接对微型电脑、电机控制器和光源进行供电。由于光源要求电压为24 V,因此在电池和光源之间添加12 V/24 V转换器。微型电脑与工业相机之间通过USB 3.0进行连接,同时实现供电和通信。微型电脑与触摸屏之间通过USB 3.0和HDMI进行连接,其中HDMI

用于实现界面的显示,USB用于实现触摸操作。微型电脑和电机控制器通过RS485进行通信。电机控制器与步进电机之间进行4线制连接。

## 2.3 软件系统设计

考虑到本装置所选微型电脑的性能和装置对人机交互界面的需求,电脑系统选用Ubuntu 18.04.5 Desktop(64-bit)。该系统对于硬件的性能要求较低,满足本装置所选微型电脑的要求,并且可以提供图形界面,方便开发人员和使用人员操作。软件系统架构如图8所示。软件的底层驱动程序包括相机底层驱动程序和电机底层驱动程序。基于底层驱动程序,编写相机应用程序和电机应用程序。应用程序算法包括图像处理算法和自动对焦算法。由于视觉相机人机界面二次开发支持C++,图像后期处理算法也支持C++,因此选择C++作为软件的开发语言。开发平台选用QT5,QT5在嵌入式和桌面应用中有较多的应用,所写程序在不同平台上具有较高的通用性,使用C++在QT5中进行软件开发较为方便。此外,该开发软件在人机交互界面的制作上具有较大的优势。

本设备设计的功能有:(1)实时显示相机所采集的图像;(2)通过触摸屏上的按钮操作相机,拍摄所需图像;(3)通过按钮操作装置,对所拍

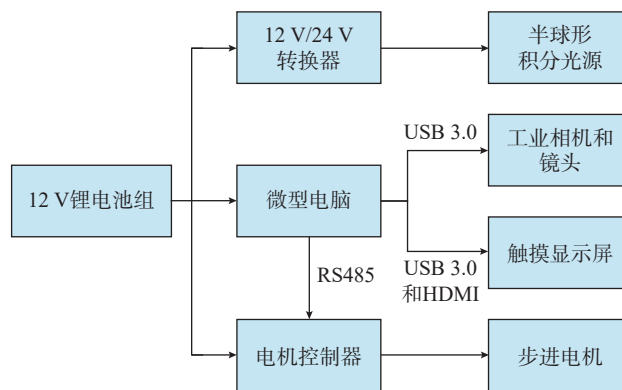


图7 硬件系统组成及电路连接原理

Fig.7 Hardware system composition and circuit connection principle

摄的图像进行处理识别；(4)通过按钮操作装置,实现相机的自动对焦；(5)在界面上显示图像的处理结果。因此本设备的人机交互界面包括7个部分(图9),分别为图像显示窗口、拍摄按钮、图像识别按钮、图像显示按钮、自动对焦按钮、关机按钮和处理结果显示窗口。

图像实时显示窗口的主要功能有:(1)未对相机进行操作时,实时显示相机采集图像;(2)对相机执行拍摄命令后,显示拍摄图像;(3)执行图像处理算法后,在窗口显示处理后的图像。处理信息显示窗口主要用于显示图像识别结果信息,具体包括:(1)连接孔中心点位置,长短轴长度,连接孔拟合椭圆的角度;(2)镗窝轮廓中心点位置,长短轴长度,镗窝轮廓拟合椭圆的角度。图像处理按钮用于调用图像处理算法,该算法提取相机拍摄图像,并对图像进行检测识别,将检测结果输出至处理信息显示窗口。自动对焦按钮用于调用步进电机的应用程序和自动对焦算法,实现工业相机的自动对焦。由于不同使用场景下测量人员按压力量不同,以及被测材料的刚度差异和材料的反光性影响,相机与试件表面的最佳对焦位置产生微小变化,因此为保证测量精度,需在不同场景下对相机进行对焦校准。图像显示按钮用于将装置转化为图像实时显示的状态,并在图像实时显示窗口中显示采集图像。相机拍摄按钮用于调用工业相机的应用程序。关机按钮用于向相机、电机和微型电脑发送关机命令。

### 3 应用验证

#### 3.1 实物构建

按照第2节的手持式设备检测原理,完成了设备的软硬件集成。通过3D打印技术完成了设备外壳制造。打印完成后,对设备外壳进行了喷漆处理。将微型电脑模块、步进电

机、导轨、光源、电池等硬件设备与打印好的设备外壳进行组装,实现硬件系统的集成,在此基础上运行软件系统,实现软件系统的调试。软硬件集成后的手持式视觉检测设备实物如图10所示。

#### 3.2 验证流程

本文所提手持式视觉检测设备检测流程如图11所示。首先将本文

设备垂直贴紧待测试件。其次,调整检测设备位置,使待测孔图像处于显示屏正中间。然后,通过光源调节旋钮,缓慢地调整光源亮度,使待测孔周围处于全白状态,待测孔内部处于全黑状态,即边缘轮廓分明。最后,在软件上进行拍摄、自动对焦和图像识别等操作,即可通过提出的检测算法对孔径和镗窝深度进行检测。

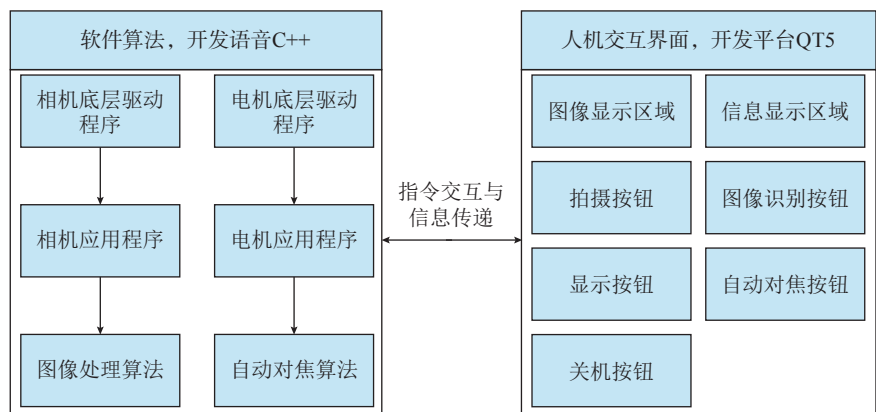


图8 软件架构设计

Fig.8 Software architecture design

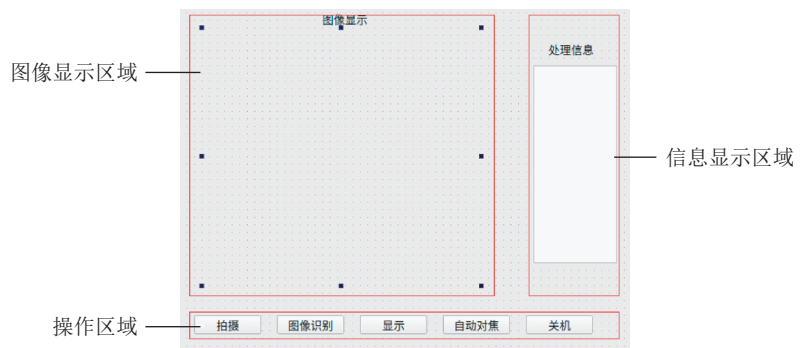


图9 人机交互界面

Fig.9 Human computer interaction interface



(a) 监控屏幕视角

(b) 镜头光源视角

图10 手持式视觉检测设备

Fig.10 Hand-held visual inspection equipment

在完成软硬件集成后,将所开发的手持视觉检测设备及检测算法进行验证。孔径检测试验件如图 12 所示。首先通过本文的手持式检测设备对孔径进行检测。为了减少偶然性误差,对每个孔进行 3 次测量,取平均,将平均值作为最终的孔径标称值。然后,采用第三方检测公司西安航天计量测试研究所(该研究所已通过中国合格评定国家认可委员会(CNAS)认可和国防科技工业实验室认可委员会(DILAC)认可,具备第三方检测认证资格)的高精度三坐标测量机对待测孔进行再次测量,将其测量结果作为实测值。本文采用的三坐标测量机的测量范围为 0~1000 mm,最大测量误差为  $\pm (1.5 + L/350) \mu\text{m}$ 。

同样地,采用本文开发的视觉检测设备对窝深进行检测。窝深检测试验件如图 13 所示。与孔径检测流程相同,将 3 次测量结果的平均值作为最终的镗窝深度标称值。然后采用高精度三坐标测量机对窝深进行再次测量,将其结果作为实

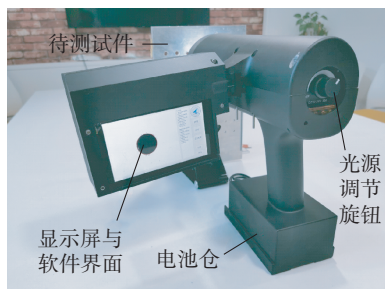


图 11 手持式视觉检测系统构成  
Fig.11 Composition of hand-held visual inspection system

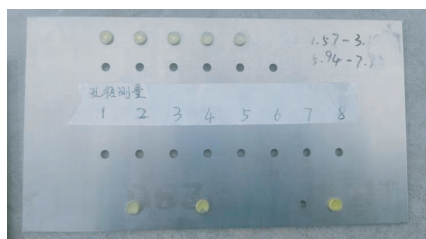


图 12 孔径检测试验件  
Fig.12 Aperture test piece

测值。

### 3.3 验证结果

通过本文手持式检测设备获得的孔径检测结果如图 14 所示。采用本文手持式孔径检测方法得到的孔径结果误差分布相对均匀,其中孔径检测结果的最大误差为 0.0017 mm,在试验允许误差范围内。上述结果表明,本文方法在孔径检测方面的一致性较好。

为了验证本文孔径检测结果的准确性,将本文所测孔径标称值与第三方检测的实测值进行对比,对比结果如表 1 所示。经过西安航天计量测试研究所的检测认证,标称值和实测值的正负误差绝对值之和为 0.009 mm,孔径的整体检测精度优于 0.01 mm。

通过本文手持式检测设备获得的镗窝深度检测结果如图 15 所示。本文手持式镗窝深度检测方法得到的镗窝深度结果误差分布也相对均匀,其中镗窝深度检测结果的最大误差为 0.0022 mm,也在试验允许误差

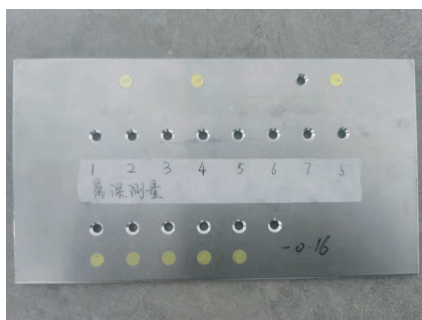


图 13 窝深检测试验件  
Fig.13 Test piece for dimple depth detection

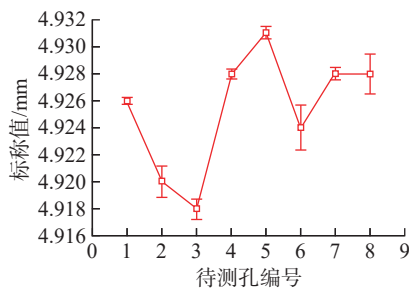


图 14 孔径检测结果  
Fig.14 Aperture test results

范围内。上述结果表明,本文方法在镗窝深度检测方面的一致性同样较好。

同理,为了验证本文镗窝深度检测结果的准确性,将本文所测镗窝深度标称值与第三方检测的实测值进行对比,对比结果如表 2 所示。经过西安航天计量测试研究所的检测认证,标称值和实测值的正负误差绝对值之和为 0.067 mm,窝深的整体检测精度优于 0.1 mm。

综上所述,本文所提手持式检测方法的孔径检测精度优于 0.01 mm,镗窝深度检测精度优于 0.1 mm。

## 4 结论

本文面向航空结构镗窝孔的装配质量,提出了一种手持式视觉检测方法。对镗窝孔的图像处理流程、孔径检测原理和镗窝深度检测原理进

表 1 孔径检测标称值与实测值对比结果  
Table 1 Comparison results of nominal value and measured value of aperture detection mm

序号	标称值	实测值	绝对误差
1	4.926	4.922	0.004
2	4.920	4.922	-0.002
3	4.918	4.922	-0.004
4	4.928	4.924	0.004
5	4.931	4.928	0.003
6	4.924	4.927	-0.003
7	4.928	4.931	-0.003
8	4.928	4.933	-0.005

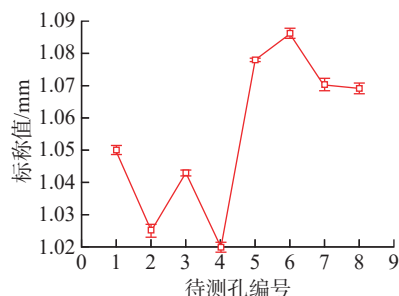


图 15 镗窝深度检测结果  
Fig.15 Dimple depth test results

表2 镗窝深度检测标称值与实测值对比结果

Table 2 Comparison results of nominal value and measured value of dimple depth detection mm

序号	标称值	实测值	绝对误差
1	1.050	1.075	-0.025
2	1.025	1.068	-0.043
3	1.043	1.052	-0.009
4	1.020	1.067	-0.047
5	1.078	1.071	0.007
6	1.086	1.066	0.02
7	1.070	1.057	0.013
8	1.069	1.059	0.01

行了阐述。对手持式视觉检测设备的机械结构、硬件系统和软件系统进行了设计。在航空结构试验件上对本文方法的有效性和精度进行了验证。本文主要结论如下。

(1) 本文方法测量得到的孔径标称值和三坐标测量机测量得到的实测值之间正负误差绝对值之和为0.009 mm, 孔径精度的整体测量精度优于0.01 mm。

(2) 本文方法测量得到的镗窝深度标称值和三坐标测量机测量得到的实测值之间正负误差绝对值之和为0.067 mm, 镗窝深度的整体测量精度优于0.1 mm。

(3) 本文设计的手持式视觉检测设备检测精度高、应用范围广且不受环境光的影响, 在复杂的装配现场环境中能够实现高效应用。此外, 本文设计的手持式视觉检测设备还能推广应用到汽车、高铁等行业的连接孔质量检测中。

尽管本文提出了一种便携式的高精度视觉检测设备, 然而本文研究仍然具有一定的局限性。由于本文算法在计算孔径长轴和短轴时, 需要对所有像素点之间的距离进行验证, 结果的处理存在数秒延迟, 因此在后续研究中还需要对检测算法进一步优

化, 提高检测效率。另外, 本文提出的方法及开发的设备在平面或微曲率情况下具有良好的精度, 但不适用于较大曲率的面。

## 参考文献

- [1] 薛峰, 郭萍. 计算机视觉检测技术的发展及应用研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 133-134.
- XUE Feng, GUO Ping. The development and application of computer vision inspection technology[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(6): 133-134.
- [2] 邵铁乾. 计算机视觉检测技术应用研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2016(17): 62-63.
- SHAO Tieqian. Application research of computer vision detection technology[J]. China Computer & Communication, 2016(17): 62-63.
- [3] GOLNABI H, ASADPOUR A. Design and application of industrial machine vision systems[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 630-637.
- [4] VYSAKH S, SURENDRAN K N, UDUPA G. Evaluation of roundness error for cylindrical surfaces using vision system[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 4807-4811.
- [5] 唐寒冰, 巢渊, 刘文汇, 等. 基于机器视觉的大尺寸零件测量方法研究综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(17): 33-40.
- TANG Hanbing, CHAO Yuan, LIU Wenhui, et al. Review of measurement methods of large-size parts based on machine vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(17): 33-40.
- [6] 毕运波, 徐超, 樊新田, 等. 基于视觉测量的沉头孔垂直度检测方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(2): 312-318.
- BI Yunbo, XU Chao, FAN Xintian, et al. Method of countersink perpendicularity detection using vision measurement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 312-318.
- [7] 勾江洋, 陈雪梅, 叶南, 等. 飞机零部件连接孔在机视觉检测系统开发[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5): 37-43, 50.
- GOU Jiangyang, CHEN Xuemei, YE Nan, et al. Development of on-machine vision inspection system for connection holes on aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(5): 37-43, 50.
- [8] 唐君萍, 张丽艳, 刘胜兰, 等. 飞机复杂零件上大量小尺寸导孔的快速视觉检测[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2456-2465.
- TANG Junping, ZHANG Liyan, LIU Shenglan, et al. Quick vision inspection for large number of small size guide holes on complex aircraft parts[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(18): 2456-2465.
- [9] LEE B R, NGUYEN H C. Development of laser-vision system for three-dimensional circle detection and radius measurement[J]. Optik, 2015, 126(24): 5412-5419.
- [10] MORU D K, BORRO D. A machine vision algorithm for quality control inspection of gears[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(1-2): 105-123.
- [11] ZHU W D, MEI B, YAN G R, et al. Measurement error analysis and accuracy enhancement of 2D vision system for robotic drilling[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(2): 160-171.
- [12] 陈璐, 关立文. 基于改进 Zernike 矩的亚像素钻铆圆孔检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6): 438-444.
- CHEN Lu, GUAN Liwen. Subpixel drilling and riveting circular hole detection method based on an improved Zernike moment[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(6): 438-444.
- [13] 张晓林, 周哲海, 王晓玲, 等. 基于改进 Zernike 方法实现圆形边缘亚像素检测[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(20): 157-161.
- ZHANG Xiaolin, ZHOU Zhehai, WANG Xiaoling, et al. Realizing circular subpixel edge detection based on improved Zernike method[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(20): 157-161.
- [14] 谢俊, 李玉萍, 左飞飞, 等. 基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 93-98.
- XIE Jun, LI Yuping, ZUO Feifei, et al. On-line dimension detection of hole parts based on machine vision[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(2): 93-98.
- [15] 陈怡然, 廖宁, 刘超. 基于机器视觉的圆形零件尺寸参数测量[J]. 工具技术, 2022, 56(3): 109-113.
- CHEN Yiran, LIAO Ning, LIU Chao. Dimension measurement of circular parts based on machine vision[J]. Tool Engineering, 2022, 56(3): 109-113.

## Hand-Held Visual Inspection Method for Countersink Hole Quality Measuring During Aircraft Assembling

ZHANG Hui<sup>1</sup>, PAN Xin<sup>1</sup>, LI Haiwei<sup>1</sup>, DU Jie<sup>1</sup>, LUO Zhiguang<sup>1</sup>, GUO Feiyan<sup>2</sup>

(1. AVIC Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China;

(2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**[ABSTRACT]** In aircraft structures, there are a lot of standard connection holes. In order to ensure the assembly quality, it is necessary to detect the quality of the countersink holes. The visual inspection equipment based on robot or machine tool has the problems of low positioning accuracy, difficult to reach local position and easy to be affected by ambient light. In this study, a hand-held visual detection method for checking the quality of the countersink holes is proposed. The sub-pixel detection algorithm for the diameter and depth of the countersink is developed, and a hand-held visual detection device is designed. The mechanical structure, hardware system and software system are described in detail. The diameter and the countersink depth measured by this method are compared with the test results of the third party certification. The results show that the accuracy of diameter measurement is better than 0.01 mm, and the accuracy of depth is better than 0.1 mm. The hand-held vision detection equipment designed in this study has high detection accuracy, wide application and is not affected by ambient light.

**Keywords:** Countersink hole; Sub-pixel; Hand-held type; Visual inspection; Aircraft assembly

(责编 古京)

(上接第 54 页)

## Research and Application Progress of Deformation Control Technology for Aircraft Composite Panel Assembly

LIU Zhenyang, ZHAI Yunong, LI Dongsheng, SUI Yi

(Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Due to its excellent property, the application amount of composite materials on the new generation airframe has gradually increased. As a result, it's of vital importance to improve the quality of assembly process and reduce the stress during assembly process. However, composite components have different characteristics from traditional metal structures. They are large in scale, nonrigid, easy to deform due to its own weight, and with large manufacture deviation. Moreover, they are easy to be damaged when confronted forced assembly. In order to meet the requirements of composite structures during assembly process, new technologies and methods need to be developed. This research takes the Airbus A320 wing box model as an example, states the typical assembly process of composite aircraft structure, and points out some problems in the process, such as high dependence on engineering experience, difficulty in prediction of gaps, and weak ability of shape adjusting; to solve those questions, three kinds of new airframe assembly technology were developed, which are assembly simulation technologies for tolerance control of composite structures, online control technology for assembling deformation of aircraft composite panels and effect of assembling deformation of cladding panel on service performance. At last, the shortcomings and the prospects in assembly deformation control technology of aircraft composite panel are pointed out.

**Keyword:** Aircraft composite panel; Assembly deflections control technology; Tolerance simulation; Online control; Service performance

(责编 逸飞)