

大型收获机械发动机孔组位置度误差在线检测方法

张亚伟¹ 王冬¹ 陈度^{1,2} 王书茂¹ 付函¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 发动机是收获机械的动力源,其安装位置精度将直接影响整机装配质量,进而关系机器的作业效率和可靠性。由于收获机械底盘机架结构复杂、表面粗糙度大,现有测量方法及设备难以满足大跨距孔组位置度误差测量需求,针对收获机械发动机安装孔位置度的自动化测量需求,提出了基于机器视觉的大跨距孔组位置度误差在线检测方法,通过建立孔组位置度误差模型,使用多部工业相机获取安装孔二维图像,通过相机在线标定、图像增强处理、特征提取、坐标变换等手段,实时测取并计算安装孔组之间的位置度误差。在此基础上,基于 LabWindows/CVI 平台,开发了自动检测软件,实现了发动机安装孔位置度的快速检测。以某型玉米收获机底盘机架发动机安装孔组为对象开展了试验研究,结果表明,利用该方法能够有效获取安装孔组的位置度关系,建立的孔组位置度误差模型能够进行误差分析与评定,在分辨率和测量精度上均优于传统测量方式,检测效率较高,能够满足生产线自动化检测需求。

关键词: 收获机械; 孔组; 位置度; 机器视觉; 在线检测

中图分类号: S22; S219.032 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0071-08

Online Method for Large-scale Harvester Engine Punch Combination Position Accuracy Measurement

ZHANG Yawei¹ WANG Dong¹ CHEN Du^{1,2} WANG Shumao¹ FU Han¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China)

Abstract: The engine is primary power source of harvester, and its punch combination position has a direct impact on machine assembly quality and further affections on operating efficiency and reliability of the whole machine. At present, the engine punch combination position measurement is mainly performed manually with quite low precision and bad consistency. Focused on the automatic measurement of engine punch combination position, a machine vision based online measurement method for engine punch combination position of large-scale harvesters was proposed in this paper through establishing a punch combination position error model. A certain number of cameras were used to capture the two-dimensional images of each energy mounting hole, and the punch combination position error was measured and calculated real-timely through online calibration, image enhancement, feature extraction, coordinate transformation and so on. On this basis, a measurement and control software was developed based on Labwindows/CVI, and realized the rapid measurement of punch combination position. In this paper, engine punch combination position of a certain type of harvesting chassis of corn harvester was studied. The experiment results showed that the punch combination position relationships could be achieved effectively, and the error analysis and assessment could be fulfilled by the established punch combination position error model. Furthermore, its measuring results were superior to traditional calipers measuring tools readings in resolution and accuracy with a highly efficiency. This proposed online measurement method could meet the demand of automated production-line measurements.

Key words: harvester; punch combination; position accuracy; machine vision; online measurement

收稿日期: 2017-07-03 修回日期: 2017-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700204)、北京市科技计划项目(D161100003216002)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017GX001)

作者简介: 张亚伟(1988—),女,博士生,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: zywcau@cau.edu.cn

通信作者: 陈度(1981—),男,高级工程师,主要从事智能农机装备与测控技术研究,E-mail: tchendu@cau.edu.cn

引言

底盘机架作为发动机、传动系、脱粒分离部件等的承载装置,是大型收获机械最为重要的部件之一。发动机、变速箱、脱粒滚筒、剥皮机等部件通常通过螺栓与底盘机架安装孔联接,以确保相互之间的相对位置,从而实现动力的有效传递。大型收获机械底盘机架经多道工艺焊接成型,容易受到定位和焊接应力的影响,造成一定程度的变形,引起孔组位置度误差^[1-4]。其中,发动机安装孔组位置度对发动机动力传递、整机振动及作业可靠性有直接影响。因此,装配过程中发动机孔组位置度的精确测量对于保证底盘机架焊接质量,提升大型收获机械制造水平具有重要意义和实用价值^[5-7]。

传统孔组位置度测量多采用综合量规检验法和平台测量法^[8]。综合量规检验法只能定性判断是否合格,不能定量得到误差的大小和方向;平台测量法测量过程复杂,且效率较低,难以满足大批量生产需求。随着光学、机械、电子等技术的发展和高度融合,目前国内外主要采用三坐标测量机、三维激光扫描仪和影像式测绘仪进行大中型结构件孔组位置度的测量。三坐标测量机作为高精度通用测量设备已有几十年的发展历史,其原理是先采点,然后编辑测量程序对采点进行拟合计算,实现零件位置度的自动检测。其特点是通用性好,测量精度高,但效率较低,且测量精度受被测零件表面的毛刺(沙眼)影响较大^[9-13]。三维激光扫描仪突破了传统的单点测量方法,能够提供被测体表面的三维点云数据,但受测量范围和效率的影响难以满足生产线在线检测要求^[14-18]。影像式测绘仪建立在 CCD 数字影像基础上,效率高,但受材质和形状限制较多^[19-20]。综上,由于收获机械底盘机架具有结构复杂、表面粗糙度较大等特点,现有测量仪器难以满足大型收获机械发动机安装孔组位置度误差在线测量需求。

基于机器视觉的非接触检测技术具有测量速度快、检测精度高、成本低等特点,为孔组位置度在线检测提供了新的手段^[21-27]。牛雨生^[28]通过单目 CCD 相机获得 2 种孔组零件的横截面图像,采用不同方法对单张图像进行处理,对比分析其效果后提出了孔组位置度图像检测算法,测取孔组零部件参数并进行了误差分析。陈朝^[29]在上述方法的基础上,提出基于结构光的孔组位置度视觉测量方法,利用线结构光标定被测孔组平面,对圆孔边缘点进行坐标变换以降低透视投影畸变影响测量的精度。孙沛泽等^[30]采用白色平行光束和单目 CDD 正投影相结合的方法实现了行星架孔位置度的测量。采用机

器视觉开展孔组位置度在线测量方法的研究取得了一定的成果,但其测量方法仍然难以满足大跨距孔组位置度误差测量需要,因此,开展基于机器视觉技术的大型收获机械孔组位置度误差测量方法研究,具有较为重要的实用价值。

本文以某型玉米收获机底盘机架发动机孔组为研究对象,提出基于机器视觉的大跨距孔组位置度误差检测方法,通过构建孔组位置度误差模型,基于 LabWindows/CVI 平台开发孔组位置度在线检测软件,以期实现大型收获机械发动机孔组位置度的在线检测。

1 发动机孔组位置度误差检测原理

大型收获机械发动机安装孔组的位置度关系包括孔组与底盘机架之间的位置关系和孔组内部之间的位置关系两部分。在焊接过程中,孔组与底盘机架之间的位置关系通常采用定位卡具保证其位置精度,具有较好的效果。但受机架结构的影响,卡具定位方式难以适用于孔组内部位置定位,且内部位置关系受焊后应力变形影响较大,因此,本文将主要研究安装孔组内部位置度误差检测方法。

以某型玉米收获机底盘机架为例,如图 1 所示,底盘机架为桥梁式结构,采用组合拼接焊合成型方式,焊接方钢为热轧钢材,表面粗糙度在 Ra 25 ~ 12.5 μm 范围内,表面喷有黑色防锈漆。发动机安装孔组包含 4 个安装孔,呈矩形分布于 2 条平行横梁上。安装孔直径为 27 mm,铣床钻孔成型,精度为 ± 0.02 mm,孔深为 6 mm,4 个安装孔的设计间距为横向 740 mm,纵向 630 mm,允许位置度误差为 ± 0.5 mm。

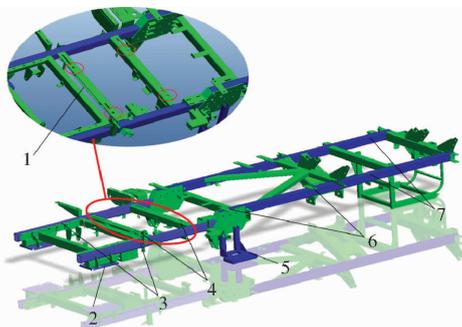


图 1 某大型玉米收获机械机架结构三维模型

Fig. 1 3D model of large-scale corn harvester chassis

1. 发动机孔组 2. 前桥连接板座 3. 左右前梁 4. 发动机底座焊接 5. 切碎器齿轮箱座 6. 剥皮机底座 7. 后纵梁

针对发动机安装孔的矩形分布特点,建立平面坐标系 xOy , 4 个安装孔组圆心 (Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4) 在坐标系中的坐标为

$$Q_i(x_i, y_i) = \begin{bmatrix} (x_1, y_1) \\ (x_2, y_2) \\ (x_3, y_3) \\ (x_4, y_4) \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

理想条件下, 4 个安装孔所形成的矩形长为 l , 宽为 h 。首先以任一圆心 Q_i 为起点, 以任一邻边为基准绘制长度为 l , 宽度为 h 的矩形。如图 2 所示, 以 Q_1 为起点, 以 Q_1Q_2 为基准, 虚线矩形 Q_1ABC 为 4 个圆心形成的理想矩形, 实线四边形 $Q_1Q_2Q_3Q_4$ 为 4 个圆心形成的实际四边形形状。

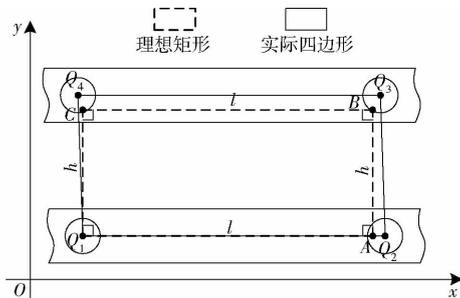


图 2 收获机发动机孔组位置度检测原理

Fig. 2 Punch combination position measurement principle of harvester engine

分别以 Q_2, Q_3, Q_4 为圆心, 以 Q_2A, Q_3B, Q_4C 为半径画圆, 如图 3 所示。

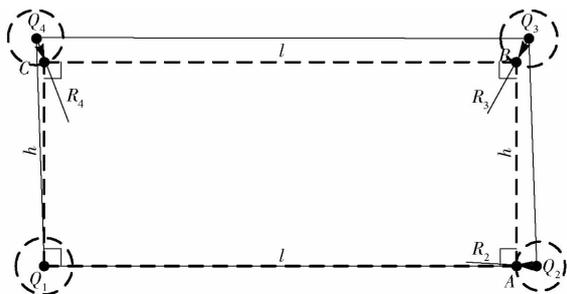


图 3 圆心位置度误差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of position error

则以圆心 Q_1 为基准, 圆心 Q_2, Q_3, Q_4 的位置度误差分别为圆 Q_2, Q_3, Q_4 的直径。假定 A, B, C 的坐标为

$$(x, y) = ((x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)) \quad (2)$$

圆心 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 的位置度误差为

$$\phi_{ij} = \begin{bmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{12} \\ \phi_{13} \\ \phi_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_2A \\ Q_3B \\ Q_4C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\sqrt{(x_2 - x_A)^2 + (y_2 - y_A)^2} \\ 2\sqrt{(x_3 - x_B)^2 + (y_3 - y_B)^2} \\ 2\sqrt{(x_4 - x_C)^2 + (y_4 - y_C)^2} \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

同上, 可得到分别以圆心 Q_2, Q_3, Q_4 为基准, 其他 3 个圆心的位置度误差。则以不同圆心为基准, 其余圆心的位置度误差可表示为

$$\phi_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & \phi_{12} & \phi_{13} & \phi_{14} \\ \phi_{21} & 0 & \phi_{23} & \phi_{24} \\ \phi_{31} & \phi_{32} & 0 & \phi_{34} \\ \phi_{41} & \phi_{42} & \phi_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad (i, j=1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

在每组测量中, 最大位置度误差表示为

$$\text{MAX}(\phi_{ij}) = \begin{bmatrix} \text{MAX}(\phi_{1j}) \\ \text{MAX}(\phi_{2j}) \\ \text{MAX}(\phi_{3j}) \\ \text{MAX}(\phi_{4j}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{MAX}(0, \phi_{12}, \phi_{13}, \phi_{14}) \\ \text{MAX}(\phi_{21}, 0, \phi_{23}, \phi_{24}) \\ \text{MAX}(\phi_{31}, \phi_{32}, 0, \phi_{34}) \\ \text{MAX}(\phi_{41}, \phi_{42}, \phi_{43}, 0) \end{bmatrix} \quad (5)$$

依据最小条件, 孔组位置度误差认定为 $\text{MAX}(\phi_{ij})$ 中的最小值, 即为

$$\phi = \text{MIN}(\text{MAX}(\phi_{ij})) \quad (i, j=1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

因此, 为确定发动机安装孔组位置度误差, 需要检测孔组圆心的坐标。

2 基于机器视觉的发动机孔组圆心检测方法

2.1 图像采集系统搭建

图像采集装置主要由相机、镜头、图像采集卡、矩形标准板、光照结构组成, 如图 4 所示。其中相机位于发动机孔组平面正上方, 垂直对准各个安装孔。为减少外部光源干涉, 相机安装架为不透光矩形箱体。矩形标准板用于为图像检测提供基准坐标系, 以减少图像处理的计算量, 并提高检测精度。

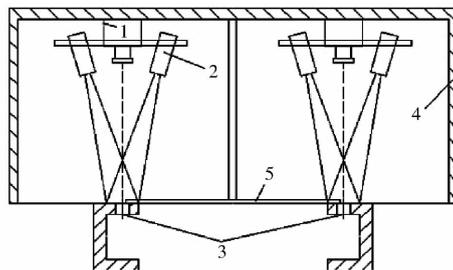


图 4 图像采集系统安装结构

Fig. 4 Installation chart of shaft pin load cell

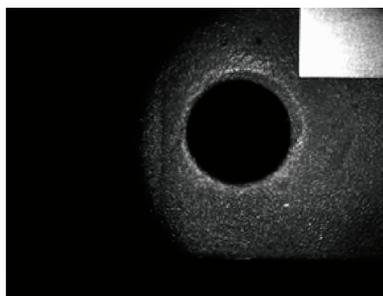
1. 相机 2. 光源 3. 安装孔及横梁 4. 不透光矩形箱体 5. 矩形标准板

图像采集装置主要部件技术参数如下: ①相机: 维视 MV-3010FC 型, 分辨率为 2048 像素 × 1536 像素, 视野高度为 100 mm 时有效成像面为 6.4 mm × 4.8 mm。②镜头: 日本 computar 工业镜头 M1214-MP2 型, 12 mm 焦距。③图像采集卡: 会声会影 X4HD1302 型 1394 采集卡, 传输距离 4.5 m, 传输率 800 Mb/s。④矩形标准板: 长 × 宽 × 高为 700 mm × 600 mm × 5 mm, 加工精度为 0.01 mm, 相邻两边互为基准的垂直度小于 0.1 mm, 各边直线度

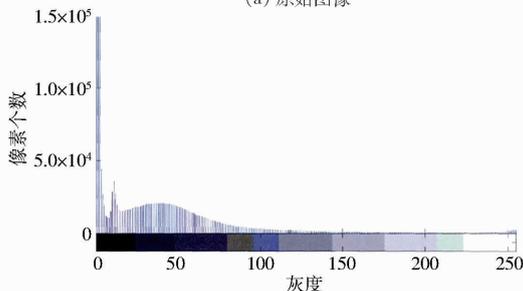
小于 0.02 mm。⑤光照结构:两平行光源对称布置在相机两侧,光斑重合于发动机安装孔开孔平面,其中心与安装孔中心重合。

2.2 图像处理算法

图像处理的目的是获得安装孔直径大小、圆心坐标和矩形标准板直角边线的方程。以一个发动机安装孔为例,圆孔和圆形光斑以及光斑外部区域具有明显的灰度差异,图 5a 为采集的发动机安装孔原始图像,其灰度直方图如图 5b 所示。



(a) 原始图像



(b) 灰度直方图

图 5 发动机孔原始图像与其灰度直方图

Fig. 5 Original image and its gray histogram of engine hole

根据被测对象的图像特点,利用 Matlab 对原始图像进行滤波、二值化和边缘检测等处理,以确定发动机孔圆心坐标。

(1) 图像滤波处理

图像采集过程中会受到一些噪声的干扰,孔边缘的漫反射也会对图像采集造成干扰,影响发动机孔圆心的定位,因此,需对图像进行滤波处理。本文采用了分区自适应方法,其基本原理为首先判断图像是否具有噪声,然后根据其灰度值范围自动选择高斯平滑或中值滤波平滑。算法流程为:首先逐行扫描图像,以每个像素为中心,计算其周边区域 R 的统计特征,包括平均值 $\text{ave}(R)$ 、最大值 $\text{max}(R)$ 、最小值 $\text{min}(R)$ 、方差 $D(R)$,设定灰度阈值 T_0 及方差阈值 T_{00} ,当在局部区域 R 内满足

$$\begin{cases} \text{max}(R) - \text{min}(R) > T_0 \\ D(R) > T_{00} \end{cases} \quad (7)$$

时,则认为存在噪声需要滤波处理,否则不进行滤波处理。

设灰度平均值阈值 T_1 、 T_2 ,当

$$\text{ave}(R) < T_1 \quad (8)$$

$$\text{或} \quad \text{ave}(R) > T_2 \quad (9)$$

时,采用高斯平滑。

当满足

$$\begin{cases} T_1 < \text{ave}(R) < T_2 \\ f(R)' = 0 \end{cases} \quad (10)$$

时,采用中值滤波。

根据所采集图像灰度直方图,取 $T_0 = 150$, $T_1 = 10$, $T_2 = 200$,处理效果如图 6 所示。

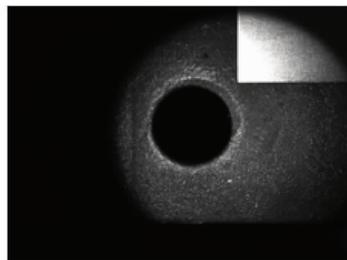


图 6 分区自适应滤波效果

Fig. 6 Effect of adaptive region filter

(2) 图像锐化处理

常见图像锐化算子主要有基于一阶导数的 Robert 和 Sobel,及基于二阶导数的 Laplacian 算子。其中基于二阶导数的图像锐化算子对图像增强效果更为明显。本文对 Laplacian 锐化方法引入权比重系数,将锐化后的图像和原图叠加以达到更好的锐化效果。引入权比重系数的图像锐化效果与一阶、二阶图像锐化效果对比如图 7 所示。显然,权比重系数为 1 的 Laplacian 锐化效果优于其他 3 种。

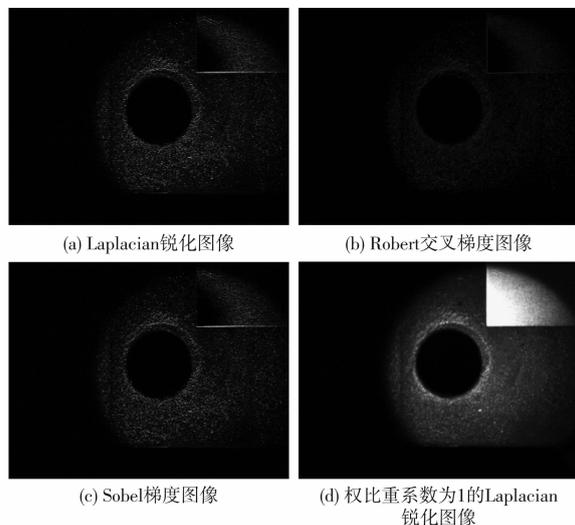


图 7 几种图像锐化效果对比

Fig. 7 Contrast of sharpening effect by different methods

(3) 图像二值化处理

为了对孔边缘进行精确提取,对图像进行二值化处理,归一化直方图如图 8 所示。

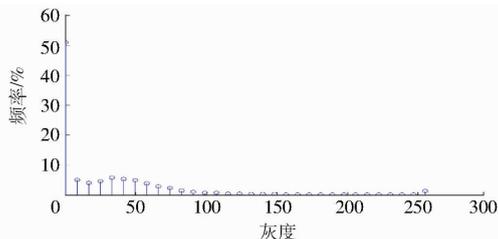


图8 归一化直方图

Fig. 8 Normalized histogram

由图8可知,灰度值为0的黑色像素比例高于50%,灰度值在250以上的白色比例较小,而且由于图中圆孔和矩形标准板直角的灰度差异较大,因此采用两个不同阈值分别处理,用于凸显圆弧和直角特征。二值化阈值分别取5和250时,圆孔和直角二值化图像如图9所示。



(a) 圆孔

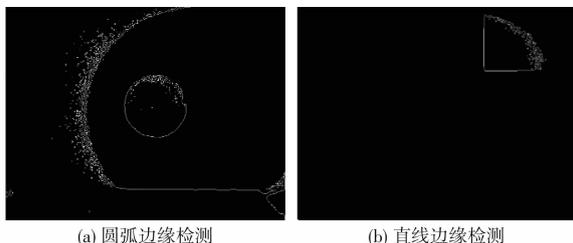
(b) 直角

图9 二值化图像

Fig. 9 Binary image

(4) 安装孔及矩形标准板直角边缘提取

常用的边缘检测算子主要有梯度算子(Roberts、Sobel、Prewitt)、高斯-拉普拉斯算子(LoG)、Canny算子等。从圆弧和直线特征的整体效果来看,Canny算子给出的效果在完整性和可识别性更好一些。本文采用Canny算子对圆孔和直角边进行边缘提取,如图10所示。



(a) 圆弧边缘检测

(b) 直线边缘检测

图10 Canny算子边缘检测效果

Fig. 10 Circular arc edge images used different operators

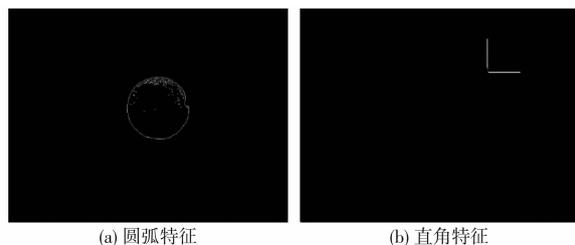
由图10可知,图像中既有圆弧和直线特征,也混合有大量不相关边界信息。为去除不相关信息,本文采用一个圆形区域去套取图中特征信息,其原理是划定一个圆形区域,在区域内的像素保留原始值,区域外则全部归零。计算方法如下

$$f(i,j) = \begin{cases} f(i,j) & (D(i,j) \in D) \\ 0 & (D(i,j) \notin D) \end{cases} \quad (11)$$

式中 D ——圆形区域

$f(i,j)$ ——图像内像素灰度值

根据图10a,圆弧特征位于图像中部,圆弧直径约为图像高度的1/3,因此将圆形区域圆心设置在图像中心,直径为图像高度的1/2,略大于圆弧特征直径。根据图10b,矩形标准板直角边长约为图像高度的1/5,因此,将圆形区域的圆心设置在直角边的90°角上,直径确定为图像高度的1/6,略小于直角边的长度。处理后效果如图11所示。



(a) 圆弧特征

(b) 直角特征

图11 特征图像

Fig. 11 Characteristic images of engine hole and catheters

为进一步去除圆形内部干扰,通过设定一个区域 D ,计算区域内所有像素和的平均值 $\text{ave}(D)$,如果平均值大于某个阈值 P 就将该区域内点的灰度值归零,小于某个值就保留。对于单条线段,求得的平均值一般会小于一个值,对于密集的点阵则很容易大于某个值,该方法的数学表达式为

$$f(i,j) = \begin{cases} 255 & (\text{ave}(D) \leq P) \\ 0 & (\text{ave}(D) > P) \end{cases} \quad (12)$$

取阈值 $P = 128$, D 为 6×6 区域,处理效果如图12所示。

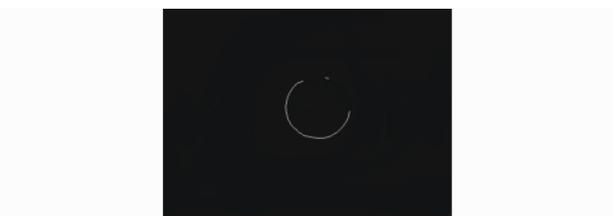


图12 不相关特征清除效果

Fig. 12 Uncorrelated features despeckle

由图12可知,待检测圆弧特征比较清晰,但有残缺。本文采用霍夫(Hough)变换连接了残缺边缘,实现了直线和圆弧拟合。并利用Hough变换计算出了待测圆孔的直径和圆心坐标。

2.3 测控软件设计

基于LabWindows/CVI测控平台,开发了大型收获机械机架发动机孔位置度公差检测软件,主要实现了操作流程控制、数据采集与处理、孔位置度检测、数据存储与报表打印等功能。软件主界面如图13所示,界面右上方为系统的操作按钮区,包括自动操作、操作结束、参数设置面板、自检面板、退出。界面下方实时显示4个发动机安装孔图像处理的实时效果图。

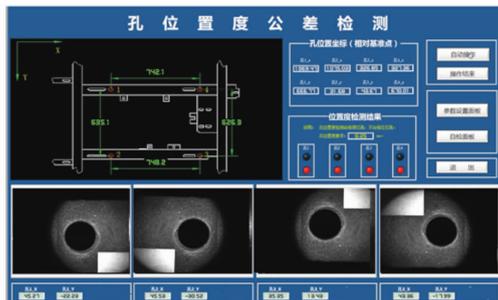


图13 测控软件界面

Fig. 13 Interface of measurement and control software

3 试验验证与结果分析

3.1 相机标定

发动机安装孔由铣床钻孔成型,具有较高的加工精度($\pm 0.02\text{ mm}$),因此将安装孔的直径作为标准量,通过比例变换计算其他位移量。设安装孔直径的像素尺寸为 D_1 ,孔的实际物理直径为 D_0 ,某待测距离的像素尺寸为 L_1 ,则待测距离的物理尺寸 L_0 表示为

$$L_0 = \frac{L_1 D_1}{D_0} \quad (13)$$

选用精度为 $\pm 0.001\text{ mm}$ 的Halcon光学玻璃标定板,用图像处理软件NI Vision Assistant 2014对圆孔直径进行在线标定。通过计算开孔直径和标定板内边框尺寸,等比例换算得出开孔的实际尺寸。软件界面如图14所示,玻璃标定板的矩形框完全覆盖安装孔,圆孔轮廓及标定板内特征清晰可辨。标定结果如表1所示。由表1可知,图像测量平均误差为 0.015 mm 。

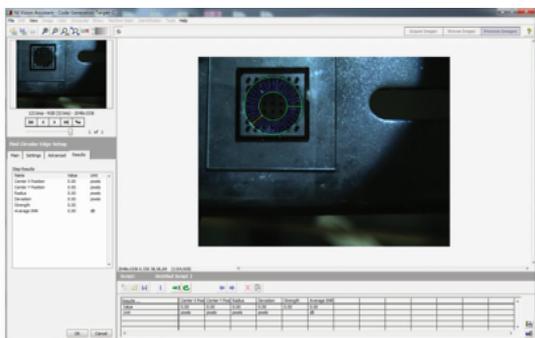


图14 相机标定

Fig. 14 Camera calibration

表1 相机标定结果

Tab. 1 Result of camera calibration mm

左上孔	右上孔	左下孔	右下孔	均值	误差
直径	直径	直径	直径		
27.013	27.016	27.010	27.019	27.015	0.015

3.2 检测线试验

利用标定过的检测系统对某型号玉米收获机底盘机架发动机孔组进行位置度检测。检测装置及系

统如图15所示。检测流程为:系统上电,打开发动机孔位置度公差检测软件,控制电动机驱动器实现总装线自走平台、液压升降检测平台等执行机构的运行,将机架运送到指定检测位置,然后自动打开光源和摄像头进行检测,通过图像采集与处理,实现孔位置度评定,并对原始数据和计算结果进行保存,生成检测报告;检测结束后,自走平台回落,移出检测暗室。

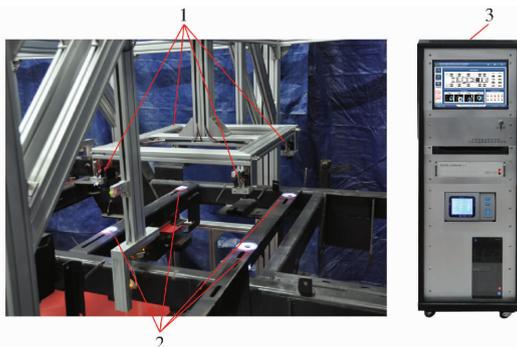


图15 发动机孔组检测装置

Fig. 15 Detection device for engine punch combination position measurement

1. 工业相机 2. 发动机孔组 3. 检测机柜

为对比该系统检测精度,利用精度为 0.02 mm 的游标卡尺人工进行检测,将检测结果与该检测系统测试结果进行对比,结果如表2所示。

表2 4个发动机安装孔圆心距检测结果

Tab. 2 Distance of circle centers of four engine punches

	mm					
圆心距	$O_1 - O_2$	$O_3 - O_2$	$O_3 - O_4$	$O_1 - O_4$	$O_1 - O_3$	$O_2 - O_4$
相机	739.857	629.768	740.212	629.928	971.865	971.655
游标卡尺	739.86	629.76	740.26	629.92	971.86	971.66
误差	0.003	0.008	0.048	0.008	0.005	0.005

由于游标卡尺精度限制,人工读数比图像处理计算得到的值小一位,由表2可知,游标卡尺检测结果的小数点前两位数值与该系统检测结果基本一致,表明该图像检测精度优于人工检测,可满足测量对精度的要求。表3为计算得到的不同基准下各圆心的位置度误差。

表3 各圆心的位置度误差

Tab. 3 Position error of each engine punch mm

基准	O_1	O_2	O_3	O_4
$O_1 - O_1 O_4$	0	0.315	0.184	0.144
$O_1 - O_1 O_2$	0	0.286	0.335	0.184
$O_2 - O_1 O_2$	0.285	0	0.511	0.457
$O_2 - O_2 O_3$	0.692	0	0.386	0.660
$O_3 - O_2 O_3$	0.323	0.318	0	0.295
$O_3 - O_3 O_4$	0.148	0.405	0.001	0
$O_4 - O_1 O_4$	0.072	0.036	0.040	0
$O_4 - O_3 O_4$	0.148	0.405	0.001	0

注释:基准 $O_1 - O_1 O_4$ 表示以 O_1 为起点, $O_1 O_4$ 方向为标准矩形一条边的孔位置度误差。

4 结论

(1)根据发动机安装孔的位置关系建立了孔组位置度误差模型,提出了一种基于机器视觉的孔组位置度误差检测方法。该方法有效规避了传统测量方法中的图像拼接和角度变换的问题,降低了检测复杂度,提高了检测效率。

(2)采用自适应图像平滑滤波算法结合了高斯

平滑和中值滤波各自的优势,有效降低平滑带来的边界模糊的弊端,实现了较好的处理效果。图像边缘提取中采用了圆形区域套取图中有用信息特征的方法,有效去除了干扰信息。

(3)试验结果表明,该大型收获机械发动机孔组位置度误差在线检测方法具有较高的检测精度,并且检测过程实现了自动化,方便快捷,能够满足生产线自动化检测需求。

参 考 文 献

- 1 王冬,张亚伟,王书茂,等. 大型收获机械机架平面度在线测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊):17-22.
WANG Dong, ZHANG Yawei, WANG Shumao, et al. Design and test of online flatness measuring system for large-scale chassis of combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.): 17-22. (in Chinese)
- 2 ZHANG Yawei, CHEN Du, WANG Shumao. Design of combine harvester chassis weld deformation prediction system based on virtual instrument [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (475-476): 1468-1473.
- 3 王德成,高林,张达群,等. 玉米收获机底盘机架机器人焊接工作站设计[J]. 农业工程, 2015, 5(3):77-79.
WANG Decheng, GAO Lin, ZHANG Daqun, et al. Design on robot welding workstation of chassis frame for corn harvester [J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(3): 77-79. (in Chinese)
- 4 张达群,高林,杨大成,等. 大型玉米收获机底盘组立工装及柔性焊接方案[J]. 农业工程, 2015, 5(1):63-66.
ZHANG Daqun, GAO Lin, YANG Dacheng, et al. Assembly fixture and flexible welding scheme about chassis of large corn harvester [J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(1): 63-66. (in Chinese)
- 5 王鹏,石永强,孙长库. 发动机缸体结合面孔位置度测量方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):51-56.
WANG Peng, SHI Yongqiang, SUN Changku. Study on position measurement method for the holes in engine block [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 51-56. (in Chinese)
- 6 VEENA C, MANJUSHA J, NILESH K. Design of ARM based data acquisition and control system for engine assembly monitoring [J]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2017, 4(5): 29-33.
- 7 KEVIN J P, KENNETH J H, WILLIAM A M, et al. Engine mount assembly; USA, 9403558 B1 [P]. 2016-08-02.
- 8 冯乾新,梁瑞丽. 孔组位置度量规的设计[J]. 工具技术,2015, 49(1):87-88.
FENG Qianxin, LIANG Ruili. Design of hole set position gauge [J]. Journal of Tool Engineering, 2015, 49(1):87-88. (in Chinese)
- 9 石永强. 发动机缸体孔组位置测量系统研究[D]. 天津:天津大学,2012:4-15.
SHI Yongqiang. Study on engine block holes position measurement system [D]. Tianjing: Tianjing University, 2012: 4-15. (in Chinese)
- 10 潘芳煜,白跃伟,聂黎,等. 三坐标测量机几何误差的建模及测量[J]. 上海第二工业大学学报, 2017, 34(1): 37-42.
PAN Fangyu, BAI Yuewei, NIE Li, et al. Geometric error modeling and measurement for coordinate measuring machines [J]. Journal of Shanghai Polytechnic University, 2017, 34(1): 37-42. (in Chinese)
- 11 燕必希,董明利,宗敏. 多高度小零件视觉测量方法设计[J]. 机械设计与制造, 2017(4):140-143.
YAN Bixi, DONG Mingli, ZONG Min. Design of step-style work piece measurement method based on computer-vision [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(4):140-143. (in Chinese)
- 12 AXEL R, ROLF H, REINHARD B, et al. Portable device for optically measuring three-dimensional coordinates; USA, 9671221 B2 [P]. 2017-06-06.
- 13 SHIH Y P, YOU C H. On-machine quasi-3D scanning measurement of bevel gears on a five-axis CNC machine [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2017, 40(3): 207-218.
- 14 马俊伟,唐辉明,胡新丽,等. 三维激光扫描技术在滑坡物理模型试验中的应用[J]. 岩土力学,2014,35(5):1495-1505.
MA Junwei, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1495-1505. (in Chinese)
- 15 谢雄耀,卢晓智,田海洋,等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报,2013, 32(11):2214-2224.
XIE Xiongyao, LU Xiaozhi, TIAN Haiyang, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2214-2224. (in Chinese)
- 16 程小龙,程效军,贾东峰,等. 三维激光扫描技术在考古发掘中的应用[J]. 工程勘察,2015,43(8):79-86.
CHENG Xiaolong, CHENG Xiaojun, JIA Dongfeng, et al. The application of 3D laser scanning in archaeological exploration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 43(8): 79-86. (in Chinese)

- 17 ENRICO Q, PAOLO C, MIRKO R. Fast, low cost and safe methodology for the assessment of the state of conservation of historical buildings from 3D laser scanning: the case study of Santa Maria in Portonovo (Italy) [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2017(24): 175 – 183.
- 18 ŁUKASZ P, ŁUKASZ A S, WIESLAW J S, et al. Damage detection in composite panels based on mode-converted lamb waves sensed using 3D laser scanning vibrometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017(99): 80 – 87.
- 19 陈晓红,游林儒,刘少君. 基于机器视觉的影像测量仪自动寻边技术研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2013(2): 103 – 106.
CHEN Xiaohong, YOU Linru, LIU Shaojun. Research of image measuring instrument automatic tracing-edge technology based on computer vision [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2013(2): 103 – 106. (in Chinese)
- 20 付琰. 三维影像仪中影像测量关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012: 8 – 20.
FU Yan. Key techniques of image measurement in 3D vision measuring system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012: 8 – 20. (in Chinese)
- 21 韩冰,林明星,丁凤华. 机器视觉技术及其应用分析[J]. *农业装备与车辆工程*, 2008(10): 24 – 27.
Han Bing, Lin Mingxing, Ding Fenghua. Machine vision technology and application analysis [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2008 (10): 24 – 27. (in Chinese)
- 22 LI Yuan, LI Youfu, WANG Qinglin. Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(7): 1841 – 1847.
- 23 ZOU Xiangjun, YE Min, LUO Chengyu, et al. Fault-tolerant design of a limited universal fruit-picking end-effector based on vision-positioning error [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2016, 32(1): 5 – 18.
- 24 黄仕磊,廖俊必,徐涛,等. 基于机器视觉的液压阀阀芯关键尺寸的自动检测系统 [J]. *工具技术*, 2017, 51(3): 93 – 96.
HUANG Shilei, LIAO Junbi, XU Tao, et al. Automatic inspection system of partial parameter of valve core based on machine vision [J]. *Journal of Tool Engineering*, 2017, 51(3): 93 – 96. (in Chinese)
- 25 单忠德,张飞,任永新,等. 基于机器视觉铸件布氏硬度在线检测技术研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(1): 157 – 164.
SHAN Zhongde, ZHANG Fei, REN Yongxin, et al. On line detection technology of the hardness of cast iron parts based on machine vision[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(1): 157 – 164. (in Chinese)
- 26 周晓东,张雅超,谭庆昌,等. 基于结构光视觉技术的圆柱度测量新方法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2017, 47(2): 524 – 529.
ZHOU Xiaodong, ZHANG Yachao, TAN Qingchang, et al. New method of cylindricity measurement based on structured light vision technology [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2017, 47(2): 524 – 529. (in Chinese)
- 27 VEDANG C, BRIAN S. A comparative study of machine vision based methods for fault detection in an automated assembly machine [J]. *Procedia Manufacturing*, 2015(1): 416 – 428.
- 28 牛雨生. 基于数字图像处理的孔组位置度测量技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
NIU Yusheng. Study on measurement techniques of position degree of hole group based on digital image processing[D]. Taiyuan: North University of China, 2012. (in Chinese)
- 29 陈朝. 孔组位置度视觉测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 25 – 40.
CHEN Chao. Research on vision measuring technology for position degree of hole group [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 25 – 40. (in Chinese)
- 30 孙沛泽,焦洪智,陶孟仑,等. 基于视觉测量的行星架孔位置度测量方法研究[J]. *南昌工程学院学报*, 2016, 35(4): 67 – 70.
SUN Peize, JIAO Hongzhi, TAO Menglun, et al. Measure method of position tolerance of holes on planetary carriers based on machine vision [J]. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2016, 35(4): 67 – 70. (in Chinese)