

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314048

面向航空发动机叶片榫齿轮廓的尺寸测量技术*

罗佳睿¹ 黄沁元^{1,2} 黄家雄¹ 曹立佳^{1,2}

(1.四川轻化工大学自动化与信息工程学院 自贡 643000; 2.人工智能四川省重点实验室 自贡 643000)

摘要: 榫齿作为航空发动机叶片的重要组件之一,其轮廓尺寸的精密性决定了叶片安装的牢固性以及发动机工作的安全性。然而,当前工业生产中仍然采用传统的人工投影方式作为测量手段,存在测量效率低、精度不稳定等问题。基于机器视觉技术,提出了针对航空发动机叶片榫齿轮廓尺寸的测量方法并开发了相应测量系统。其采用工业相机实时采集榫齿轮廓图像,通过 HALCON 机器视觉软件对榫齿轮廓图像依次进行预处理、边缘提取、几何量特征提取、几何尺寸变换等操作,以此准确获得榫齿轮廓的尺寸信息,并联合 Visual Studio 2019 设计了相关信息交互的可视化图形软件。测试结果表明,所开发系统在直线和角度上的平均测量精度误差可分别控制在 0.023 6 mm 和 0.270 1° 以内,且单次测量耗时不超过 2 s。相比于传统的人工投影测量方法,显著提升了测量的精度和速度,且降低了人工成本,拥有更友好的现场部署潜力。

关键词: 叶片榫齿轮廓;机器视觉;HALCON;图像处理;尺寸测量

中图分类号: TP391;TG806 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Dimensional measurement technology for the tenon tooth profile of
aero-engine bladesLuo Jiarui¹ Huang Qinyuan^{1,2} Huang Jiaxiong¹ Cao Lijia^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China;

2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, China)

Abstract: The tenon tooth serves as a vital component of aero-engine blades, where its profile dimension precision plays a pivotal role in establishing the firmness of blade installation and ensuring the safety of engine operations. However, the conventional manual projection continues to be employed as the prevailing measurement approach in current industrial production, exhibiting drawbacks including low efficiency and inconsistent accuracy. Drawing upon machine vision technology, this paper puts forth a novel measurement method and designs a corresponding system aimed at measuring the dimension of aero-engine blade tenon tooth profiles. Employ an industrial camera to acquire real-time images of tenon tooth profiles. The obtained images are subsequently processed using machine vision software based on HALCON, which includes sequential operations such as image pre-processing, edge extraction, geometric feature extraction, and geometric dimension transformation. Through these operations, precise dimensional information of the tenon tooth profile is obtained. Additionally, a visual graphical software with interactive information is designed using Visual Studio 2019 to facilitate the analysis and visualization of the obtained data. The experimental results demonstrate that the developed system achieves an average accuracy error of 0.023 6 mm and 0.270 1° for straight line and angle measurements, respectively, and the time consumption for a single measurement does not exceed 2 s. Compared to the conventional manual projection measurement method, the developed system significantly enhances the accuracy and speed of measurements while reducing manual labor costs. Furthermore, it exhibits the promising potential for user-friendly on-site deployment, offering enhanced convenience in practical applications.

Keywords: blade tenon tooth profile; machine vision; HALCON; image processing; dimensional measurement

0 引言

随着我国工业制造与航空领域的不断发展,现代工业

生产对航空领域工件产品的要求越来越严格,我国对这类测量技术的研究起步较晚,榫齿轮廓尺寸测量的先进技术仍掌握在部分发达国家手中。当前,我国航空发动机叶片

收稿日期:2023-07-07

* 基金项目:自贡市工业企业技术创新项目(2021QYCX07)、四川轻化工大学研究生创新基金(Y2022126)项目资助

榫齿的制造企业还在大量沿用光学投影仪的人工检测方法来判断榫齿轮廓是否合格,这种方法标准模糊、速度慢、受检测员的主观影响较大,在精度上也不能完全满足要求,无法匹配当前航空发动机生产制造的需求。

随着机器视觉的快速发展^[1],机器视觉在尺寸测量方面得到广泛应用。李捷等^[2]利用机器视觉技术设计了一种针对斜齿轮几何参数的测量系统,该系统使用工业相机采集工件图像,有效控制了系统成本,且获得了较高的测量效率,但对尺寸小、齿数少的小齿轮的测量精度较低;Wang等^[3]开发了一种高精度工业 CT 的方法来测量航空发动机空心涡轮叶片的型面和壁厚,使用三次样条插值算法来获取工件边缘,实际测量精度达 0.015 mm,但硬件成本过高;朱浪等^[4]在 MATLAB 软件环境下设计了一种测量齿轮模数与齿底圆、齿顶圆的方法,该方法采用一种组合形态学算法来进行边缘检测,形态学算法在消除图像噪声方面起到了不错效果,有利于测量精度的提升,且运算简单,测量精度达到 0.017 8 mm;许斌等^[5]采用区域灰度梯度的方法提取摆片基片的边缘特征,并根据摆片基片特征窗口的框线区域位置对边缘点进行分类,最后进行尺寸测量,该系统的精度误差在 0.008 mm 内,取得了不错的效果,且单次测量时间不到 2 s,但该系统的边缘检测算法无法做到阈值的自适应;Chu 等^[6]提出了一种基于强度积分阈值的尺寸测量算法,首先使用 Sobel 算子获取工件边缘像素,然后在每个边缘像素上提取一个像素序列,再沿着像素序列计算像素强度的不定积分,使用误差函数确定积分阈值以此定位工件的亚像素边缘,亚像素边缘对测量精度的提升有较大帮助,但运算相对复杂,致使测量效率有部分丢失;刘志毅等^[7]利用 HalCON 与 C++ 联合编程实现多类型工件二维尺寸测量系统,该系统在边缘轮廓的基础上使用轮廓分割和轮廓选择算法,有效提取到了工件的几何特征,测量算法平均耗时 32.543 ms,且能够测量多种类型工件,适用性强,但精度上未考虑相机采集图像时的图像畸变以及图像噪声所带来的误差;Xiao 等^[8]提出了一种纺纱过程中被纺工件的直线度与圆度尺寸的机器视觉方法,可实现实时、无接触测量,优点是测量效率高,单件测量时间在 100 ms 内,但测量精度有所欠缺;余智超等^[9]提出了一种基于面积法求解螺纹螺距的测量与评定方法,其测量效率明显高于综合测量仪和工具显微镜,但该方法仅适用于普通外螺纹的测量;王凯等^[10]使用 HALCON 机器视觉软件与机器人视觉定位技术设计了一种齿轮自适应测量系统,可以测量多类型齿轮且精度误差可以达到 0.02 mm,但未完全解决图像径向畸变带来的误差。从近年来有关使用机器视觉方法开展尺寸测量的研究可见,测量的精度和效率仍有继续提升的必要,且精度和效率往往不能同时得到保障;亚像素边缘检测有潜力实现高精度效果,但并没有在榫齿轮廓尺寸测量中得到尝试。

本文针对现有问题,利用机器视觉技术开发了一个集

软硬件于一体的航空发动机叶片榫齿轮廓尺寸测量系统。其使用工业相机获取高质量的榫齿图像,通过图像滤波、阈值分割和形态学处理算法对榫齿图像进行预处理,然后通过 Canny 滤波算子的亚像素边缘检测算法得到榫齿轮廓边缘,再经 Ramer 轮廓分割算法与最小二乘边缘拟合算法得到边缘几何量特征,最后借助几何变换处理获得测量结果并输出到软件界面显示,从而实现从图像采集到结果数据保存的一体化测量。该系统大大提高了测量效率与测量精度,弥补了传统人工投影测量的不足,同时降低了人工成本,可实际运用在工业生产中。

1 榫齿轮廓尺寸测量需求

榫齿是航空发动机叶片的一部分^[11],具有一定的齿状锥形榫卯结构,通过特殊的齿形将叶片牢牢固定在转轴上,榫齿的外形实物如图 1 所示。

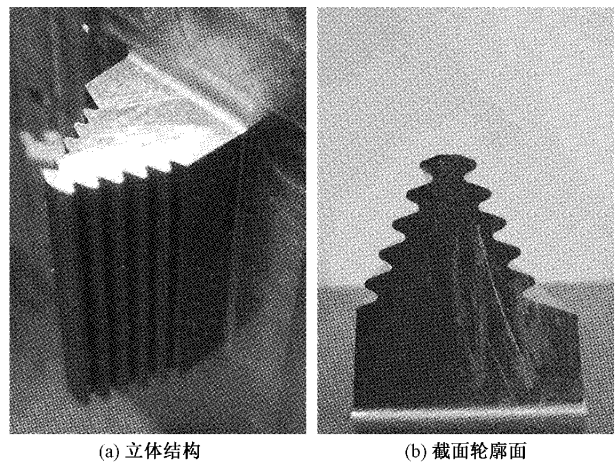


图 1 榫齿外貌实物图

由于榫齿特殊的结构样貌,使得榫齿轮廓需要众多的尺寸参数指标来衡量其规范性,本文将针对这些尺寸参数进行测量,轮廓尺寸参数指标如图 2 所示。

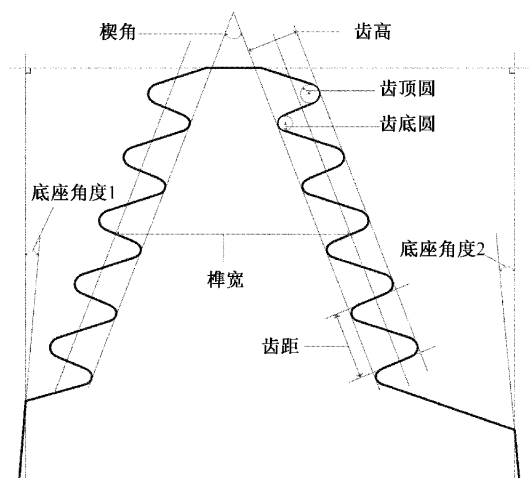


图 2 轮廓尺寸参数指标示意图

对应尺寸大小要求如表1所示。

表1 尺寸大小要求

轮廓参数指标	大小	轮廓参数指标	大小
齿高/mm	1.145±0.04	榫宽/mm	6.364±0.02
齿距/mm	1.98±0.02	楔角/(°)	52±0.5
齿顶圆/mm	R0.35±0.03	底座角度1/(°)	3.579±0.5
齿底圆/mm	R0.24±0.03	底座角度2/(°)	4.775±0.5

2 测量系统设计

2.1 硬件设计

测量系统硬件结构如图3所示,主要包含工业相机、镜头、平行光源、USB数据传输线、电子计算机和载物台等设备。工业相机采集平行光照射的榫齿轮廓图像,经USB数据传输线传入电子计算机中;计算机结合软件系统对采集到的榫齿轮廓图像进行一系列视觉图像处理,最终输出测量结果。



图3 测量系统硬件结构

1)工业相机

根据榫齿轮廓结构特征,其最大截面尺寸为14 mm(宽)×10.5 mm(高),因此本文选用最大视场为16 mm(宽)×12 mm(高)的CMOS工业相机,分辨率为4 000 pixel×3 000 pixel,最大像素尺寸可由如下公式计算得出:

$$P_{W_{max}} = \frac{F_{W_{max}}}{R_W} = \frac{16 \text{ mm}}{4000} = 4 \mu\text{m} \quad (1)$$

$$P_{H_{max}} = \frac{F_{H_{max}}}{R_H} = \frac{12 \text{ mm}}{3000} = 4 \mu\text{m} \quad (2)$$

式中: $P_{W_{max}}$ 、 $P_{H_{max}}$ 分别为宽度和高度方向上的最大像素尺寸, $F_{W_{max}}$ 、 $F_{H_{max}}$ 为宽度和高度方向上的最大视场, R_W 、 R_H 为分辨率大小,可知相机最大像素尺寸为 $4 \mu\text{m}$ (宽)× $4 \mu\text{m}$ (高),能够满足本实验的测量需求。在实际图像采集过程中,可通过调整相机放大倍数,在保证能获取到全部榫

齿轮廓的情况下使榫齿轮廓尽量填满整个相机视场,从而进一步缩小像素尺寸。

2)镜头

本文选用三镨泰达的SQTD-12A工业镜头,10~200放大倍率,80~120 mm工作距离。

3)光源

在机器视觉测量中,常用光源有环形光源、条形光源、面光源等,本文选用面板式LED平行光源,并采用背光放置的方式。由于榫齿为金属工件,平行光源由多束相互平行的入射光构成,入射光以垂直的角度到达榫齿轮廓表面,能够大量减少榫齿轮廓表面的光反射,保证榫齿边缘轮廓的特征,减少彩色分量;另外背光放置可增强图像对比度,进一步增强榫齿边缘轮廓特征。

2.2 软件设计

本文软件由HALCON 18.11.0.1与Visual Studio 2019联合编程的方式实现。HALCON是德国Mvtec公司开发的一款综合性机器视觉软件,因其强大的视觉处理功能和可移植性,被广泛应用在尺寸测量、缺陷检测、特征识别等^[12-13]。本文使用HALCON机器视觉软件对采集到的榫齿轮廓图像进行视觉处理与尺寸测量,再输出为C#语言并结合Visual Studio 2019中的Windows窗体应用开发具有榫齿轮廓尺寸测量功能的界面软件。

3 提出的榫齿轮廓尺寸测量方法

尺寸测量部分流程如图4所示,首先对采集到的榫齿轮廓图像进行预处理,包含图像滤波、阈值分割、形态学处理,接着提取边缘轮廓,在此基础上对边缘轮廓进行分割和拟合,得到几何量特征,最后根据几何量特征做几何变换得到榫齿真实尺寸。

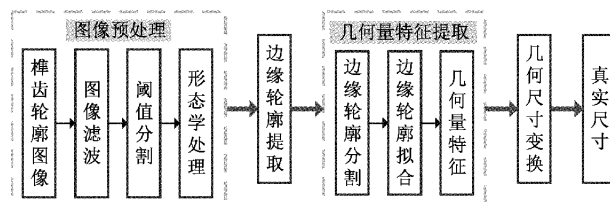


图4 尺寸测量流程图

3.1 相机标定

为满足榫齿轮廓尺寸高精度测量的需求,本文采用定制的HALCON微米级陶瓷圆点标定板进行相机标定,根据电子显微镜视场大小,相机标定过程中标定板图案大小应大于相机视场大小的1/3,因此本文所选标定板规格如表2所示。

表2 标定板尺寸规格

图案尺寸/ mm	点阵大小	中心距/ mm	圆点直径/ mm	精度/ mm
8×8	7×7	1.0	0.5	0.001

本文使用 HALCON 标定助手采集标定图像,在尽量保证镜头对焦的情况下获取 20 张不同姿态且图案完整的标定图像,采集过程中若出现存在品质问题的图像如“标定板曝光过度”、“标记没有对焦”和“对比度太低”等,删除问题图像后根据质量问题调整相机重新采集图像,直至标定图像满足 20 张且都没有品质问题后完成标定图像的采集,采集到的部分标定图像如图 5 所示。从采集到的标定图像中选择一张位于视场中央且与视场对称的图像作为参考位姿,随后完成标定,得到相机的内部参数和外部参数^[14],如表 3 和 4 所示。

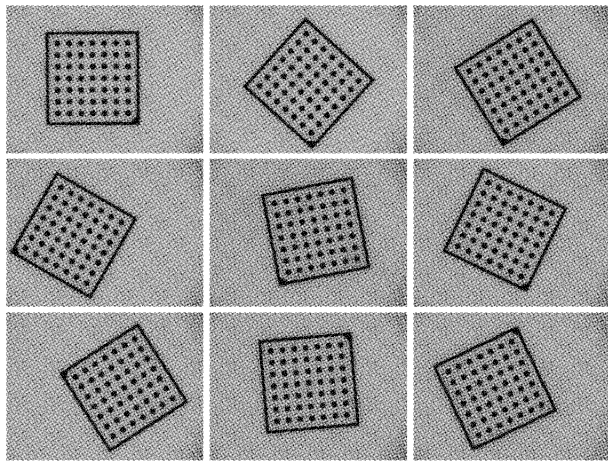


图 5 部分标定图像

表 3 相机内参数据

内部参数	标定值	内部参数	标定值
焦距 f/mm	53.678	单个像元的高 $S_y/\mu\text{m}$	3.82
畸变 k	-903.921	中心点 x 坐标 C_x/pixel	447.15
单个像元的宽 $S_x/\mu\text{m}$	3.82	中心点 y 坐标 C_y/pixel	310.86

表 4 相机外参数据

外部参数	标定值	外部参数	标定值		
旋转矩阵	x 方向/ $^\circ$	359.941	平移矩阵	x 方向/ mm	-2.015 29
	y 方向/ $^\circ$	359.547		y 方向/ mm	-0.326 95
	z 方向/ $^\circ$	179.578		z 方向/ mm	297.057

3.2 图像预处理

在榫齿轮廓图像的采集过程中,图像质量受众多因素的影响,除采集图像的硬件因素如相机、镜头、光源等,外界噪声以及榫齿工件本身附着的毛刺、灰尘等都会对榫齿轮廓图像造成极大干扰,因此在机器视觉测量中,图像预处理往往是不可或缺的一部分,可极大程度的消除图像中的非理想信息,增强图像真实特征效果。常采用的图像预处理手段包括图像滤波降噪、阈值分割、形态学处理等^[15-17]。

1) 图像滤波

图像滤波可大幅度降低图像噪声,增强图像结构特征,为了对比各滤波方法性能,在榫齿轮廓图像中加入高斯噪声,分别进行了高斯滤波、均值滤波、双边滤波和中值滤波的实验分析,结果如图 6 所示。同时计算了相应滤波方法的图像质量评价指标均方误差(mean square error, MSE)和峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)^[18]。以两张 $x \times y$ 大小的滤波前的图像 A 和滤波后的图像 B 为例, MSE 计算公式为:

$$MSE = \frac{1}{xy} \sum_{i=0}^{x-1} \sum_{j=0}^{y-1} [A(i, j) - B(i, j)]^2 \quad (3)$$

PSNR 为 MSE 的 db 形式,本文图像数据为 uint8 类型,则 $L=255$, PSNR 计算公式为:

$$PSNR = 10 \lg \frac{L}{MSE} \quad (4)$$

MSE 值越小, PSNR 值就越大,代表滤波后的图像与原图像之间的差异越小,滤波后的图像质量越高,4 种滤波方法的评价指标结果对比如表 5 所示。

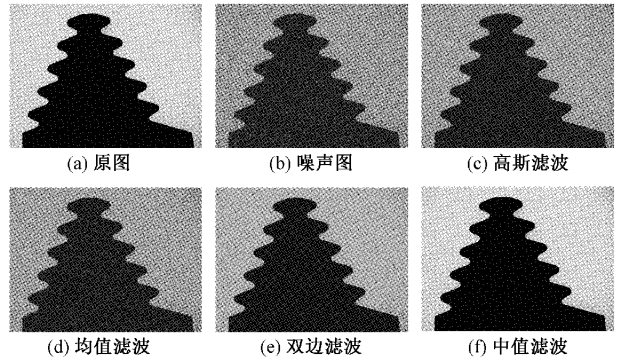


图 6 图像滤波对比

表 5 各滤波方法 MSE 和 PSNR 对比结果

滤波方法	MSE	PSNR
高斯滤波	7.112	39.610
均值滤波	6.726	39.853
双边滤波	2.654	43.891
中值滤波	0.852	48.823

通过对比滤波后图像和评价指标,可以看出中值滤波在消除图像噪声的同时,更好的保留了原有图像信息特征,榫齿边缘轮廓特征相比于其他三种方法也更清晰,质量更高,同时中值滤波的评价指标也更优。因此本文选择中值滤波来进行图像降噪处理。

2) 阈值分割

由于榫齿为金属工件,其表面并非绝对光滑,在图像采集过程中,平行光到达榫齿工件时难免会发生光反射现象,以至于采集到的榫齿轮廓图像中存在一定彩色分量,本文采用一维高斯滤波器对上述滤波后的图像进行自适应阈值分割,其主要步骤如下:

- (1) 获取输入榫齿图像的灰度直方图;
- (2) 对灰度直方图使用一维高斯滤波器进行滤波;
- (3) 根据滤波后的直方图求得极小值;
- (4) 以极小值对应的灰度值作为阈值对榫齿轮廓图像进行阈值分割。

阈值分割前后的对比如图 7 所示。

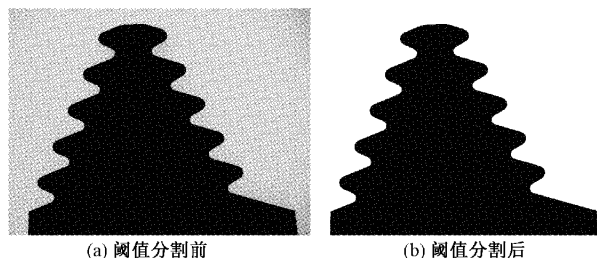


图 7 阈值分割前后对比图

对比结果可知, 阈值分割消除了图像的彩色信息, 只保留了图像的亮度信息, 增强了图像的识别效率, 增强了榫齿边缘轮廓特征, 方便后续处理。

3) 形态学处理

榫齿在切削加工过程中, 难免会附着一些金属毛刺, 此外榫齿在保存过程中较易粘附空气中的灰尘颗粒, 这些因素都极大程度的影响着榫齿轮廓尺寸的高精度测量。本文使用形态学开运算方法去除金属毛刺、灰尘颗粒等干扰因素, 处理前后的对比图如图 8 所示。

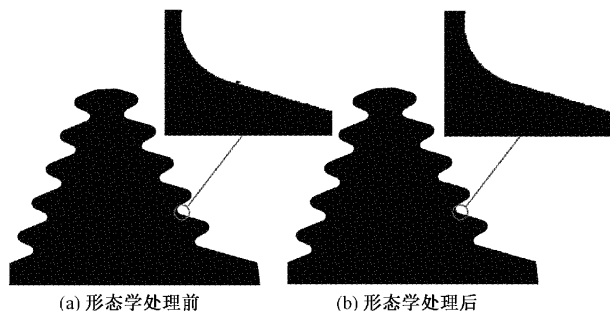


图 8 形态学处理前后对比图

3.3 边缘轮廓提取

榫齿轮廓尺寸参数指标都是建立在榫齿边缘轮廓的基础上, 因此获得准确的榫齿边缘轮廓尤为重要, 常见的边缘检测算法有一阶的 Sobel 算子、Roberts 算子、二阶的 Laplacian 算子和 Canny 算子等^[19], 但这些算子都是像素级的边缘检测算法, 无法达到本研究所需的高精度测量的要求。为进一步提高精度, 可采用的方法是从硬件上提高图像质量, 但相应的会大大增加硬件成本; 或从算法上增强图像的分辨率, 但这会增加图像处理的时间, 降低测量速度, 因此本文使用亚像素的边缘检测算法来获取榫齿轮廓图像的边缘轮廓特征。

亚像素边缘将原本大小的像素分化成多个亚像素当量, 从另一个角度来看可视为增强了图像的分辨率, 以达到

更高的精度。本文采用 HALCON 机器视觉软件中的亚像素边缘检测算子 `edges_sub_pix()` 提取榫齿轮廓图像的边缘轮廓, 该算子可选用不同边缘滤波算子, 本文选用其中 4 种做对比分析, 分别为 Dericel 边缘滤波算子、Lanser1 边缘滤波算子、Sobel 边缘滤波算子和 Canny 边缘滤波算子, 对比结果如图 9 所示。

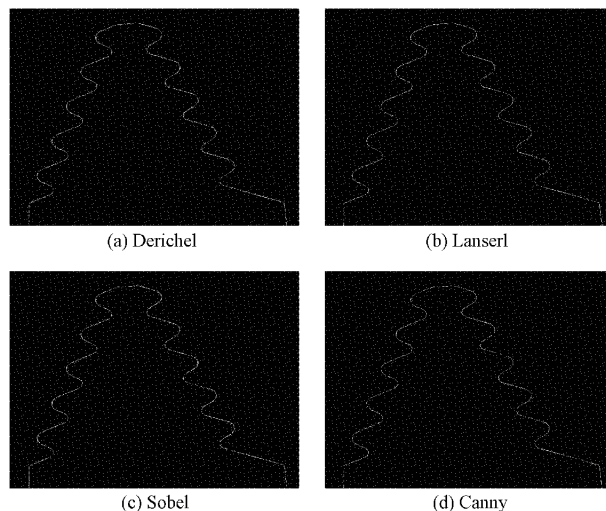


图 9 边缘提取对比结果图

由图 9 可以看出, Dericel 滤波算子、Lanser1 滤波算子和 Sobel 滤波算子提取到的边缘都存在真实边缘丢失和伪边缘的问题, 而 Canny 滤波算子提取到的边缘定位准确性更高, 抗噪声的性能更强, 得到的榫齿边缘轮廓更加完整、平滑, 且边缘质量明显要优于前三种方法, 因此, 本文选择 Canny 算子作为 `edges_sub_pix()` 亚像素边缘检测算子的滤波算子来提取榫齿轮廓图像的亚像素边缘。

3.4 几何量特征提取

1) 边缘轮廓分割

根据榫齿外貌特征, 榫齿边缘轮廓由直线和圆弧交替连接构成, 为提取到直线和圆弧的几何特征, 需先将直线段和圆弧段分割开。Ramer 算法^[20]以多边形逼近的原理进行轮廓分割, 并且分割准确性高, 其算法原理可近似如图 10 所示。

实现步骤如下:

- (1) 设定逼近阈值 $Dist$;
- (2) 设定起始点 A 与结尾点 B, 并连接两点作为开始线段 L_0 ;
- (3) 计算轮廓点到 L_0 的最大距离 D ;
- (4) 如果 $D > Dist$, 则连接最大距离点与起始点 A 和结尾点 B, 作为新的逼近线段 L_1 和 L_2 ;
- (5) 持续计算轮廓点到逼近线段最大距离, 直到 $D < Dist$;
- (6) 当某段轮廓点近似满足直线方程 $y = kx + b$, 则该段轮廓被分割为直线;

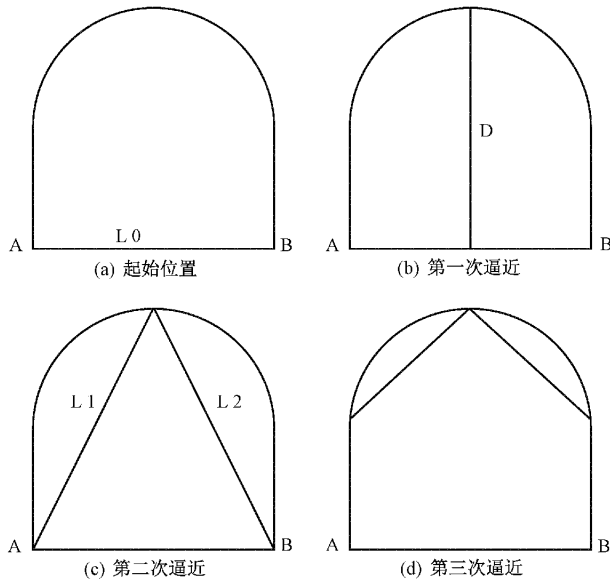


图 10 Ramer 近似原理图

(7)若不满足直线方程,则用圆弧去近似轮廓内所有逼近线段,当圆弧到轮廓线最大距离小于相邻逼近线段最大距离时,该段轮廓被分割为圆弧;

本文使用高低双阈值两次逼近的 Ramer 算法来进行轮廓分割,并使用全局阈值 $Cont$ 对分割后的轮廓进行圆弧和直线的分类。首先使用高阈值 $Dist_{max}$ 进行轮廓逼近,将较大的圆弧和直线段选择出来,再使用低阈值 $Dist_{min}$ 进行轮廓逼近,分割得到较小半径的圆弧,根据分割后全局阈值 $Cont$ 的返回值大小,将轮廓分为圆弧 ($Cont \geq 0$)、直线 ($Cont < 0$)。两次轮廓逼近的方法相较于一步逼近效率更高,分割效果更理想,并减少了算法处理时间,分割得到的轮廓如图 11 所示。



图 11 轮廓分割结果图

2)边缘轮廓拟合

分割得到的圆弧轮廓和直线轮廓并非标准的圆弧和直线,因此还需要将圆弧和直线拟合成为标准圆和直线,常用

的拟合方法有代数逼近法、正交距离回归法、最小二乘法等^[21 23]。本文使用最小二乘法分别对圆弧和直线进行拟合,最小二乘法通过寻找最小化误差的平方和来匹配最优亚像素点坐标,其原理可表达如下:

(1)圆拟合

假设拟合圆的方程为:

$$R^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 \tag{5}$$

其中 R 为圆半径, (x_c, y_c) 为圆心坐标, (x, y) 为圆上任意点,可将式(5)改写为:

$$R^2 = x^2 + y^2 - 2x_c x - 2y_c y + x_c^2 + y_c^2 \tag{6}$$

令式(6)中 $-2x_c = a, -2y_c = b, x_c^2 + y_c^2 - R^2 = c$,

可将式(6)转换为:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \tag{7}$$

求得 a, b, c 的值即可求得 x_c, y_c, R 的值,圆弧轮廓上的点 (x_i, y_i) 到圆心 (x_c, y_c) 的距离为:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \tag{8}$$

设圆弧轮廓亚像素点数量为 N , 求 d_i 与半径 R 的差的平方和,可表示为:

$$Q_c = \sum_{i=1}^N (d_i^2 - R^2)^2 = \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)^2 \tag{9}$$

当 Q_c 最小时,求得对应 a, b, c 的值即可求出拟合圆的圆心坐标和半径。

(2)直线拟合

假设拟合直线的方程为:

$$y = kx + b \tag{10}$$

其中, k 为直线斜率, b 为直线截距,设直线轮廓上亚像素点坐标为 (x_i, y_i) , 数量为 M, x_i 为已知准确值,最小二乘法就是找到合适的 k, b 值使得 y_i 的偏差的加权平方和 Q_l 最小,可表示为:

$$Q_l = \sum_{i=1}^M [y_i - (kx_i + b)]^2 \tag{11}$$

对式(11)求偏导,整理后得到:

$$\begin{cases} bM + k \sum x_i = \sum y_i \\ b \sum x_i + k \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \end{cases} \tag{12}$$

求解式(12)方程组即可得到最佳直线斜率 k 和截距 b 进一步求得拟合直线方程。通过最小二乘圆拟合和直线拟合算法,拟合结果如图 12 所示。

3.5 几何尺寸变换

根据圆拟合与直线拟合结果即可求得对应几何量特征——圆心坐标、圆半径、直线起始坐标、直线斜率和直线截距;榫齿轮廓尺寸的测量指标参数具体包含圆半径、直线距离、直线夹角,其中直线距离包含点到点距离、点到线距离。由几何量特征进行相应数学几何变换,再结合 HALCON 现有测量算子 $distance_pp()$ ——点到点距离、 $distance_pl()$ ——点到线距离、 $angle_ll()$ ——线与线夹角,最终可得到所求榫齿轮廓像素尺寸数据。

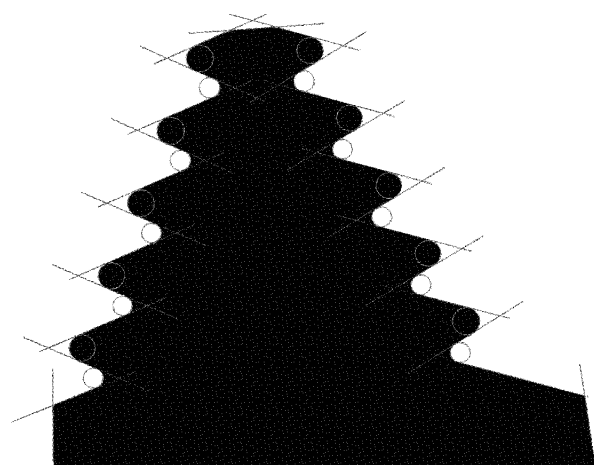


图12 最小二乘拟合圆和直线

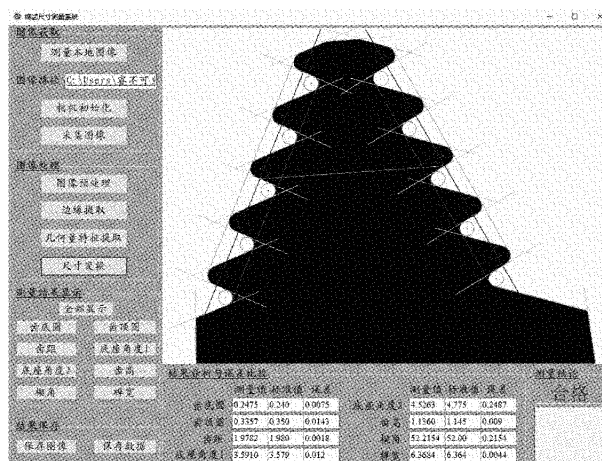


图13 软件界面结果显示

3.6 软件界面显示测量结果

在像素尺寸数据基础上,结合相机标定获得的内外参数,将像素距离转换为真实距离,得到榫齿轮廓尺寸的实际测量数据,根据标准数据自动计算误差,并做出是否合格的结论判定,最后显示在软件界面上,如图13所示,结果数据和图像可进一步保存到本地计算机中。

4 实验结果分析

为了验证测量误差与评定测量系统性能,本文对航空发动机叶片榫齿轮廓尺寸进行重复测量,并与传统像素级Canny边缘检测算法和现有方法做对比,现有方法为工业相机配套测量软件,其包含直线、角度、平行线间距等尺寸测量工具,如图14所示。实验测量5个不同榫齿工件,每个工件测量20次求平均值,其中每个榫齿工件在采集图像时都以不同姿态摆放,以保证每张榫齿轮廓图像位姿的差



图14 工业相机配套软件工具界面

异性,测量结果如表6~13所示。

表6 齿底圆测量结果对比

mm

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	0.240 0	0.248 6	0.008 6	0.251 2	0.011 2	0.257 9	0.017 9
2	0.240 0	0.247 5	0.007 5	0.253 8	0.013 8	0.255 3	0.015 3
3	0.240 0	0.246 5	0.006 5	0.255 1	0.015 1	0.258 4	0.018 4
4	0.240 0	0.248 9	0.008 9	0.252 7	0.012 7	0.258 8	0.018 8
5	0.240 0	0.247 7	0.007 7	0.251 0	0.011 0	0.256 2	0.016 2
均值	0.240 0	0.247 8	0.007 8	0.252 8	0.012 8	0.257 3	0.017 3

表7 齿顶圆测量结果对比

mm

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	0.350 0	0.330 7	0.019 3	0.328 3	0.021 7	0.312 3	0.037 7
2	0.350 0	0.331 0	0.019 0	0.326 4	0.023 6	0.322 7	0.027 3
3	0.350 0	0.330 8	0.019 2	0.323 9	0.026 1	0.321 9	0.028 1
4	0.350 0	0.328 8	0.021 2	0.326 9	0.023 1	0.318 4	0.031 6
5	0.350 0	0.330 4	0.019 6	0.327 5	0.022 5	0.313 5	0.036 5
均值	0.350 0	0.330 3	0.019 7	0.326 6	0.023 4	0.317 8	0.032 2

表 8 齿距测量结果对比

mm

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	1.980 0	1.977 6	0.002 4	1.972 5	0.007 5	1.966 4	0.013 6
2	1.980 0	1.981 2	0.001 2	1.973 2	0.006 8	1.973 2	0.006 8
3	1.980 0	1.977 2	0.002 8	1.970 8	0.009 2	1.970 5	0.009 5
4	1.980 0	1.974 4	0.005 6	1.974 5	0.005 5	1.968 4	0.011 6
5	1.980 0	1.976 1	0.003 9	1.975 2	0.004 8	1.962 8	0.017 2
均值	1.980 0	1.977 3	0.003 2	1.973 2	0.006 8	1.968 3	0.011 7

表 9 底座角度 1 测量结果对比

(°)

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	3.579 0	3.571 3	0.007 7	3.421 0	0.158 0	3.274 7	0.304 3
2	3.579 0	3.824 4	0.245 4	3.490 8	0.088 2	3.335 6	0.243 4
3	3.579 0	3.606 6	0.027 6	3.518 7	0.060 3	3.307 1	0.271 9
4	3.579 0	3.520 2	0.058 8	3.419 6	0.159 4	3.385 5	0.193 5
5	3.579 0	3.488 4	0.090 6	3.473 0	0.106 0	3.346 3	0.232 7
均值	3.579 0	3.602 2	0.086 0	3.464 6	0.114 4	3.329 8	0.249 2

表 10 底座角度 2 测量结果对比

(°)

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	4.775 0	4.433 6	0.341 4	4.425 0	0.350 0	4.418 7	0.356 3
2	4.775 0	4.515 0	0.260 0	4.418 8	0.356 2	4.455 6	0.319 4
3	4.775 0	4.439 8	0.335 2	4.443 6	0.331 4	4.388 9	0.386 1
4	4.775 0	4.488 0	0.287 0	4.610 7	0.164 3	4.407 2	0.367 8
5	4.775 0	4.647 9	0.127 1	4.387 9	0.387 1	4.483 3	0.291 7
均值	4.775 0	4.504 9	0.270 1	4.457 2	0.317 8	4.430 7	0.344 3

表 11 齿高测量结果对比

mm

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	1.145 0	1.112 8	0.032 2	1.102 3	0.042 7	1.107 7	0.037 3
2	1.145 0	1.109 1	0.035 9	1.109 7	0.035 3	1.115 4	0.029 6
3	1.145 0	1.126 8	0.018 2	1.105 6	0.039 4	1.109 2	0.035 8
4	1.145 0	1.152 6	0.007 6	1.106 9	0.038 1	1.108 8	0.036 2
5	1.145 0	1.121 0	0.024 0	1.104 7	0.040 3	1.104 3	0.040 7
均值	1.145 0	1.124 5	0.023 6	1.105 8	0.039 2	1.109 1	0.035 9

表 12 楔角测量结果对比

(°)

工件编号	标准值	本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	52.000 0	52.149 8	0.149 8	52.081 9	0.081 9	52.446 8	0.446 8
2	52.000 0	52.073 9	0.073 9	52.134 6	0.134 6	52.357 8	0.357 8
3	52.000 0	52.066 2	0.066 2	52.330 7	0.330 7	52.362 0	0.362 0
4	52.000 0	52.045 1	0.045 1	52.020 3	0.020 3	52.214 7	0.214 7
5	52.000 0	52.062 5	0.062 5	52.070 6	0.070 6	52.245 9	0.245 9
均值	52.000 0	52.079 5	0.079 5	52.127 6	0.127 6	52.325 4	0.325 4

表 13 榫宽测量结果对比

工件编号	标准值	mm					
		本实验方法	误差	像素级 Canny 边缘	误差	现有方法	误差
1	6.364 0	6.365 3	0.001 3	6.380 3	0.016 3	6.377 5	0.013 5
2	6.364 0	6.370 1	0.006 1	6.372 2	0.008 2	6.376 4	0.012 4
3	6.364 0	6.367 0	0.003 0	6.362 1	0.001 9	6.369 8	0.005 8
4	6.364 0	6.368 8	0.004 8	6.387 4	0.023 4	6.380 5	0.016 5
5	6.364 0	6.367 1	0.003 1	6.369 9	0.005 9	6.367 9	0.003 9
均值	6.364 0	6.367 7	0.003 7	6.374 4	0.011 1	6.374 8	0.010 8

由表 6~13 数据可知榫齿各尺寸参数由不同测量方法所得的最大误差、最小误差和平均误差,如表 14 所示。

表 14 误差统计

尺寸参数	本实验方法			像素级 Canny 边缘			现有方法		
	最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差
齿底圆/mm	0.008 9	0.006 5	0.007 8	0.015 1	0.011 0	0.012 8	0.018 8	0.015 3	0.017 3
齿顶圆/mm	0.021 2	0.019 0	0.019 7	0.026 1	0.021 7	0.023 4	0.037 7	0.027 3	0.032 2
齿距/mm	0.005 6	0.001 2	0.003 2	0.009 2	0.004 8	0.006 8	0.017 2	0.006 8	0.011 7
底座角度 1/(°)	0.245 4	0.007 7	0.086 0	0.195 4	0.060 3	0.114 4	0.304 3	0.193 5	0.249 2
底座角度 2/(°)	0.341 4	0.127 1	0.270 1	0.387 1	0.164 3	0.317 8	0.386 1	0.291 7	0.344 3
齿高/mm	0.035 9	0.007 6	0.023 6	0.042 7	0.035 3	0.039 2	0.040 7	0.029 6	0.035 9
楔角/(°)	0.149 8	0.045 1	0.079 5	0.330 7	0.020 3	0.127 6	0.446 8	0.214 7	0.325 4
榫宽/mm	0.006 1	0.001 3	0.003 7	0.023 4	0.001 9	0.011 1	0.016 5	0.003 9	0.010 8

由表 14 可知,本实验方法明显优于像素级 Canny 边缘算法和现有的工业相机测量软件方法,本实验方法平均最大直线误差为 0.023 6 mm,最小为 0.003 2 mm;平均最大角度误差为 0.270 1°,最小为 0.079 5°,根据榫齿轮廓尺寸测量指标,能够满足实际工业生产的任务需求。由测量数据可以看出,本测量系统性能稳定,各尺寸参数测量值偏差波动较小,在 Inter(R)Core(TM)i5-7300HQ CPU 计算机硬件环境下完成 100 次测量任务仅耗时 197 s,单次测量时间在 2 s 内,且提升硬件算力可进一步缩短测量时间,相较于传统人工投影测量大大提高了测量效率,降低了测量时间成本,能够实际运用在工业现场。

5 结 论

本文提出了一种针对航空发动机叶片榫齿轮廓尺寸测量的机器视觉技术,并设计开发了集软、硬件于一体的测量系统,系统采用工业相机与平行光源采集榫齿轮廓图像,借助 HALCON 机器视觉软件对榫齿轮廓图像进行了包含图像滤波、阈值分割和形态学处理的图像预处理;进而使用亚像素 Canny 边缘检测算子提取榫齿边缘轮廓,由两次 Ramer 算法对榫齿边缘轮廓进行分割,分割后的结果经最小二乘法拟合边缘之后得到榫齿轮廓几何量特征;再经过几何尺寸变换得到榫齿轮廓尺寸测量值,并联合 Visual Studio 2019 创建了可视化图形软件界面,用于交互测量信息。最后对比分析了本文测量方法与传统像素级

Canny 边缘提取算法、现有工业相机测量软件三者的测量性能。结果表明,本文所设计的测量系统明显优于其他两种方法,且平均直线精度误差可达 0.023 6 mm,平均角度精度误差可达 0.270 1°,单次测量时间小于 2 s。相比于传统人工测量手段,本文的方法及其系统显著提升了测量效率,更利于满足榫齿轮廓尺寸的测量精度要求,具备在工业现场低成本部署的潜力。本研究在测量精度和速度上仍然存在不足,且图像采集时光源强度大小对后续图像处理和尺寸测量都有较大影响,未来将着重考虑拓宽可测量榫齿工件的类型,且根据当前测量结果,可见系统有将精度误差控制在 0.01 mm 内的潜力,在现有基础上通过对测量算法的改进,进一步提高测量精度的稳定性与准确性。

参考文献

- [1] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术,2021,44(3):22-26.
- [2] 李捷,刘永,李昊泽,等. 基于视觉原理的斜齿轮几何参数测量方法研究[J]. 机电工程,2021,38(11):1451-1457.
- [3] WANG Y N, SHUAI S S, REN X F, et al. Sub-pixel high precision dimensional measurement method for aero-engine hollow turbine blade based on industrial computed tomography image [J]. China Foundry 2022, 19(4), DOI:10.1007/S41230-022-2044-8. 8.
- [4] 朱浪,方成刚,粟序明. 基于组合形态学的齿轮参数视

- 觉测量方法[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 33-39.
- [5] 许斌,徐凡颖,辛若铭. 基于区域灰度梯度差异的摆片基片特征尺寸视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):128-135.
- [6] CHU M L, HANG W, XU M F, et al. Sub-pixel dimensional measurement algorithm based on intensityintegration threshold [J]. *Osa Continuum*, 2020, 3(10), DOI:10.1364/OSAC.402101.
- [7] 刘志毅,杨桂华,唐卫卫. 基于机器视觉的多类型工件测量系统研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(4):6-12.
- [8] XIAO G F, LI Y T, XIA Q X, et al. Research on the on-line dimensional accuracy measurement method of conical spun workpieces based on machine vision technology [J]. *Measurement*, 2019, 148, DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106881.
- [9] 余智超,陈曼龙,林葵,等. 机器视觉螺纹螺距的测量与评定[J]. 光学技术, 2023, 49(3):317-323.
- [10] 王凯,李兴成,黄飞宏,等. 基于机器视觉的齿轮自适应测量系统设计[J]. 工具技术, 2023, 57(3):125-129.
- [11] 王立斐,刘尚瑀,于俊杰,等. 发动机涡轮叶片榫齿磨削裂纹原因分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(7):921-924.
- [12] 高成,樊易飞,佟维妍. 基于 Halcon 的机器人视觉标定与应用研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(18):178-181,186.
- [13] 丁建军,苏通,朱勇杰,等. 基于 Halcon 的汽车连杆工件 WD-2 的图像处理方法研究[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(1):225-230.
- [14] 王福斌,陈波,沈小伟. 基于 Halcon 的单目相机标定案例实现[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(10):87-93.
- [15] 李小丽,陈新波,吴松华,等. 基于图像预处理的发动机叶片掉块损伤自动测量技术[J]. 推进技术, 2023, 44(4):220-229.
- [16] 黄鹤,梁祺策,罗德安. 车道线检测中自适应图像预处理算法研究[J]. 测绘科学, 2021, 46(9):76-82.
- [17] 赵杰,孙伟,徐中达,等. 基于形态学预处理的数字图像相关方法研究[J]. 实验力学, 2022, 37(5):629-637.
- [18] 杨凯,陈纯毅,胡小娟,等. 蒙卡渲染画面多特征非局部均值滤波降噪算法[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(6):1259-1266.
- [19] 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.
- [20] 李执,闫坤,傅琪,等. 基于机器视觉的金属工件尺寸测量[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3):92-97.
- [21] FAREBROTHER R W. Supplementary notes on the minimax and orthogonal least squares line fitting procedures[J]. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, 2023, 52(10), DOI: 10.1080/03610926.2021.1971247.
- [22] 冯文月. 移动多曲线/曲面逼近权函数的改进[J]. 合肥学院学报(综合版), 2019, 36(2):1-4,15.
- [23] LUCA G, SIMONA P, PIERA M. An impartial trimming algorithm for robust circle fitting [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2023, 181, DOI:10.1016/J.CSDA.2022.107686.

作者简介

罗佳睿,硕士研究生,主要研究方向为航空精密零部件智能测量。

E-mail:321085404329@stu.suse.edu.cn

黄沁元(通信作者),副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能信息处理及其无损检测应用。

E-mail:qyhuang@suse.edu.cn

黄家雄,硕士研究生,主要研究方向为航空精密零部件智能测量。

E-mail:32085404422@stu.suse.edu.cn

曹立佳,副教授,硕士生导师,主要研究方向为航空发动机状态监测。

E-mail:caolj@suse.edu.cn