

基于机器视觉的斜齿轮廓参数测量方法

易思敏, 曾绍锋, 于明源, 郭浩浩

(福建理工大学机械与汽车工程学院, 福建福州 350118)

摘要: 针对采用机器视觉测量斜齿轮廓参数时斜齿螺旋角易造成端面图像阴影, 从而导致测量精度低的问题, 提出采用高分辨率双远心镜头和近距离背光光源的改进测量方案, 并结合 Otsu 图像二值化处理方法, 以获取理想的齿轮端面图像。同时, 提出轮廓特征点法, 获取齿轮中心与各齿牙质心相连线段与齿顶轮廓交点, 以及相连线段同一方向旋转一定角度后与齿根轮廓交点, 将获取的交点圆拟合实现齿轮参数测量。结果表明, 所测量的绝对误差值在 0.02 mm 范围内, 测量结果误差小。

关键词: 斜齿轮; 机器视觉; 轮廓特征点

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0549-05

Measurement method of helical gear profile parameters based on machine vision

YI Simin, ZENG Shaofeng, YU Mingyuan, GUO Haohao

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to solve the problem that the helical angle of the helical gear is easy to produce a shadow of the end face image when measuring the contour parameters of the helical gear by machine vision, which leads to low measurement accuracy, an improved measurement scheme using high-resolution double telecentric lens and close-range backlight source is proposed, and the Otsu image binarization processing method is combined to obtain the ideal gear end face image. At the same time, the contour feature point method is proposed to obtain the intersection point between the line segment connected to the center of mass of the gear center and the tooth tip contour, and the intersection point between the connected line segment and the tooth root contour after rotating a certain angle in the same direction, and the obtained intersection point is used to realize gear parameter measurement by circle fitting. Experimental results show that the absolute error value of the measurement is within the range of 0.02 mm, and the error of the measurement result is small.

Keywords: helical gear; machine vision; contour feature point

齿轮是机械设备中重要传动部件之一, 在制造、自动化等领域应用广泛, 其生产质量直接影响机械整体的运行情况。随着机器视觉技术的迅速发展, 利用该技术测量齿轮已取得诸多研究成果。侯恩光^[1]通过影像仪采集齿轮的轮廓图像并提取边缘特征, 将待测齿廓分解成 5 段连续的圆弧, 再拟合出齿轮的轮廓图像, 进而实现齿轮参数测量。Chai H^[2]提出了一种新的图像采集方法可解决齿轮重叠现象并设计了齿轮参数自动测量数据

实时分析系统, 可实现齿轮参数的自动测量。但以上研究主要集中在直齿轮上, 目前对斜齿轮尺寸测量研究相对较少。不同于直齿轮, 斜齿轮具有螺旋角, 在端面图像采集过程中其部分侧面轮廓会被相机捕捉到, 倾斜表面的亮度略高于背景亮度, 因此斜齿轮端面图像采集有阴影部分存在。基于此, 宋栓军^[3]对采集图像二值化处理, 以去除图像阴影部分, 从而获取只包含黑色齿形部分与白色背景的斜齿轮端面图像, 但该方法只适用

收稿日期: 2024-03-26

第一作者简介: 易思敏(2000—), 女, 湖北荆门人, 硕士研究生, 研究方向: 机器视觉。

通信作者: 曾绍锋(1974—), 男, 山西长治人, 副教授, 博士, 研究方向: 机械设计及理论、材料塑性加工、先进结构材料。

于阴影部分与黑色齿形部分差异明显的齿轮图像;饶承剑^[4]采用 Gamma 变换得到理想的斜齿轮端面图像,但难以保证后续获取齿轮轮廓的完整性。金昭^[5]采用全局低照度增强以及 Otsu 二值化结合的方式获取理想的斜齿轮端面图像,但全局低照度可能会造成图像细节损失,降低测量准确性。

本文针对斜齿轮端面图像采集存在阴影部分的问题,搭建配备高分辨率双远心镜头和近距离背光源测量方法,通过对采集图像 Otsu 二值化处理,获取每个齿顶、齿根轮廓特征点并拟合,从而实现齿轮参数测量。

1 视觉测量系统设计

1.1 测量系统装置设计

以斜齿圆柱齿轮为研究对象,待测参数为齿数、齿顶圆直径和齿根圆直径,如图 1 所示。确定齿轮待测参数以及测量需求(测量精度要求达到 0.02 mm)后,设计视觉测量装置如图 2 所示。测量系统采用分辨率 4 024×3 036 的工业面阵相机,畸变小视野大的双远心镜头,以获得高质量齿轮图像;光源采用发光效率高、响应速度快和效果稳定的 LED 白色光源。

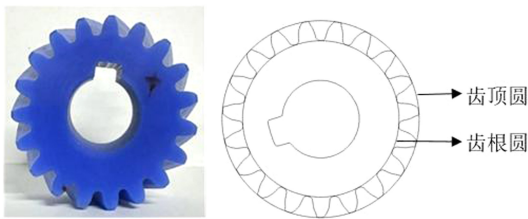


图 1 测量对象及测量参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of measurement object and parameters

分别采用远、近距离背光源进行实验(其他条件保持不变),图 3(a)采用远距离背光源采集图像,此时存在大量阴影部分;图 3(b)采用近距离背光源时阴影部分明显减少且与齿轮目标区域差异显著。因此,本文采用近距离背光源的照明方式。

1.2 测量系统流程设计

为精确测量齿轮端面参数,设计了如图 4 所示的测量系统执行流程图,该测量系统包括优选曝光区间图像采集、图像处理、参数测量 3 个模块。

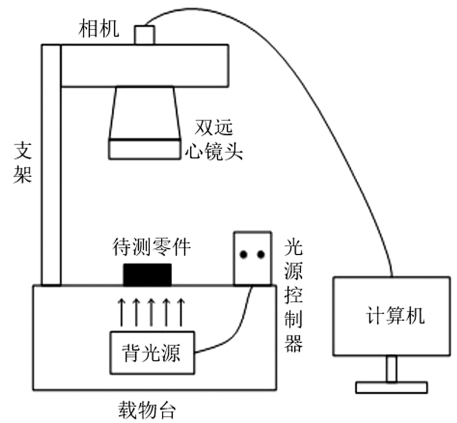


图 2 视觉测量系统装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of visual measurement system device

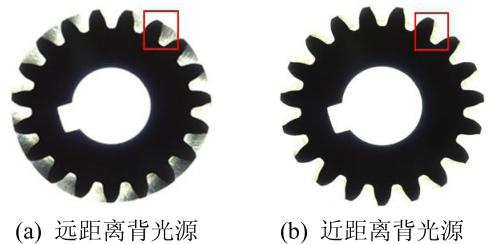


图 3 齿轮采集对比图

Fig.3 Gear acquisition comparison diagram

(1) 优选曝光区间图像采集模块:曝光时间影响到采集图片质量及后续尺寸测量的准确性。基于王筠翔等^[7]关于曝光时间对测量精度影响的研究,本文设计并实现了优选曝光区间图像采集模块。预设采样曝光时间变化步长 Δt 和起始曝光时间 ΔT 作为自动调整曝光时间的基准。然后初始化曝光时间 ($t=T_0$),并设置光照强度 L 为 30 级。最后,模块按照预设的步长逐步调整曝光时间,并采集图片及检测图片曝光状态。找到合适的曝光区间采集和存储图像。

(2) 图像处理模块:针对相机采集到的图像中可能存在的多种问题,如形状失真、亮度不足、噪声干扰,以及由光照变化、环境差异等外部因素导致的图像质量下降,进行灰度化、滤波降噪、二值化等一系列图像处理,可有效改善图像质量。保证边缘检测和尺寸测量的准确性。

(3) 参数测量模块:提出轮廓特征点法,即获取齿轮中心与各齿牙质心相连线段与齿顶轮廓交点,以及相连线段同一方向旋转一定角度后与齿根轮廓交点,对所获取的交点进行圆拟合从而实

现齿顶圆直径、齿根圆直径的测量。

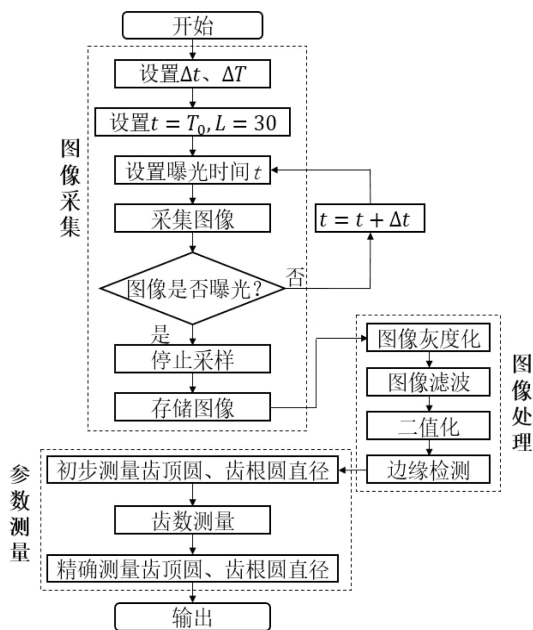


图4 测量系统流程图

Fig.4 Flowchart of measurement system

2 图像处理

2.1 灰度变换

相机采集的图像为RGB三通道彩色图像,信息含量大。识别齿轮图像的边缘,灰度信息足够,因此采用加权平均法^[8]进行灰度变换,以减少计算量。将R、G、B三颜色通道按不同的权值加权平均,得到一个灰度值,如式1所示。

$$\text{Gray}(i,j) = 0.299 \times R(i,j) + 0.587 \times G(i,j) + 0.114 \times B(i,j) \quad (1)$$

式中, (i,j) 为像素坐标位置; $R(i,j)$ 、 $G(i,j)$ 、 $B(i,j)$ 分别为坐标 (i,j) 处像素的红色、绿色和蓝色通道的数值。

2.2 图像滤波

选用双边滤波^[9]对图像中的噪声加以抑制,双边滤波同时考虑了像素点的空域和值域信息,以像素值权值和距离权值为基础滤波,如式2所示。

$$\begin{cases} h(i,j) = \frac{\sum_{k,l} f(k,l)w_s(k,l)w_r(k,l)}{\sum_{k,l} w_s(k,l)w_r(k,l)} \\ w_s(k,l) = \exp\left[-\frac{|i-k|^2 + |j-l|^2}{2\sigma_s^2}\right] \\ w_r(k,l) = \exp\left[-\frac{|f(i,j) - f(k,l)|^2}{2\sigma_r^2}\right] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $f(k,l)$ 为待滤波图像在坐标 (k,l) 处的像素值; $h(i,j)$ 为滤波后图像在坐标 (i,j) 处的像素值; $w_s(k,l)$ 为空间距离权重系数; $w_r(k,l)$ 为灰度权重系数; σ_s 为空间距离标准差; σ_r 为灰度标准差。

2.3 图像二值化

采用Otsu法(最大类间方差法)^[10]选取合适阈值 T ,把齿轮图像分为目标区域和背景,实现图像的二值化。并采用 `select_shape` 算子去除小面积连通域,只保留齿轮目标区域,可获得理想的齿轮端面图像,如图5所示。

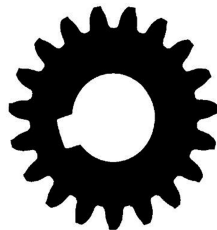


图5 齿轮二值化图

Fig.5 Gear binary graph

2.4 边缘检测

采用 `edges_sub_pix` 算子检测齿轮图片的亚像素级边缘,并使用 `select_shape_xld` 算子选取齿轮外轮廓,方便后续尺寸测量。边缘检测如图6所示。

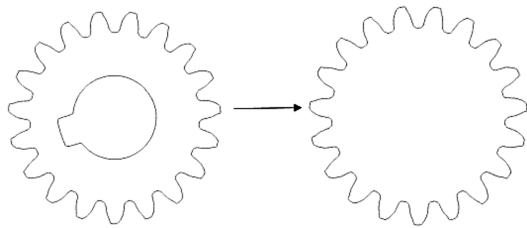


图6 边缘检测效果图

Fig.6 Edge detection effect diagram

3 测量实验

3.1 曝光区间优选实验及结果分析

在工件、相机、光照强度等条件都不变的前提下,以 $24\ 000\ \mu\text{s}$ 为起始曝光时间, $\Delta t = 1\ 000\ \mu\text{s}$ 为变化步长,逐次递增采样直至采集图像出现明显曝光为止。分析曝光时间对齿顶圆、齿根圆直径测量绝对误差 ($|\text{视觉测量值} - \text{理论值}|$) 的影响,选取最优曝光区间采集图像。测量结果如图7所示。由图7可知,曝光时间对齿顶圆直径测量影

响较大,综合分析曝光时间在 26 000 ~ 32 000 μs 区间测量效果最好,对齿顶圆直径及齿根圆直径测量绝对误差均较小。

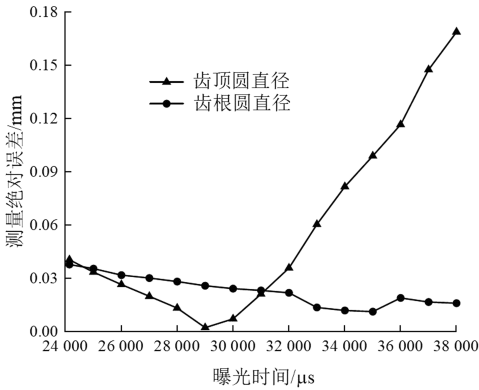


图 7 曝光时间对测量结果影响

Fig.7 Influence of exposure time on measurement results

3.2 测量方法

利用机器视觉测量齿轮齿顶圆和齿根圆直径最常用的方法是直接获取齿轮轮廓的最小外接圆为齿顶圆、最大内接圆为齿根圆。该方法简单,但测量精度不高。为提高测量精度,提出轮廓特征点法,即获取齿轮中心与各齿牙质心相连线段与齿顶轮廓交点,以及相连线段同一方向旋转一定角度后与齿根轮廓交点,对所获取的交点进行圆拟合从而实现齿顶圆直径、齿根圆直径的测量。

首先获得齿轮外轮廓的最小外接圆和最大内接圆,并获得两圆直径。然后采用连通域法获取齿轮齿数 Z ,即取两圆直径的平均值绘制圆形掩膜,求该圆形掩膜与齿轮目标区域的差集,得到齿轮端面齿牙部分,求得齿牙数量即为齿数,效果图如图 8 所示。计算出各齿牙部分的质心坐标为后续尺寸测量做好准备工作。

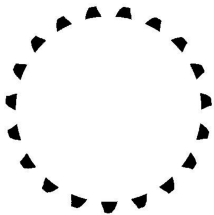


图 8 齿数测量效果图

Fig.8 Tooth number measurement effect diagram

选用长度、宽度和数量分别为 50 pixel、1 pixel、180 个的卡尺工具测量齿轮轴孔圆,将获取的圆心坐标作为齿轮中心坐标。如图 9 所示。

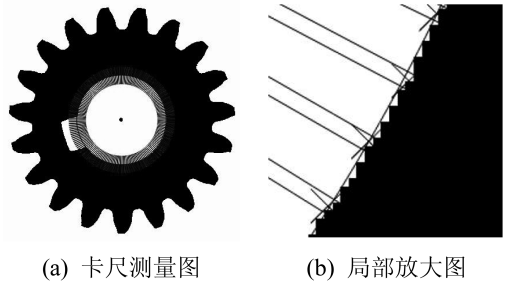


图 9 卡尺法测量图

Fig.9 Caliper method measurement diagram

将齿轮中心坐标与齿牙各连通域质心坐标相连,得到若干条线段并延长,为减少误差将线段左右各偏离 1 度,获取延长线与轮廓交点,将所获取的交点进行最小二乘圆拟合^[11]得到齿顶圆。然后将所获取的线段顺时针旋转 $\pi/2Z$ 度 (Z 为齿轮齿数),获取线段与齿根轮廓的交点,并采用最小二乘圆拟合得齿根圆。效果如图 10 所示。

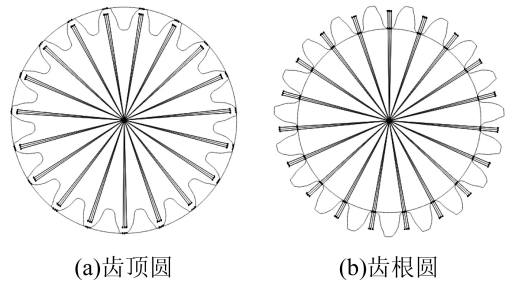
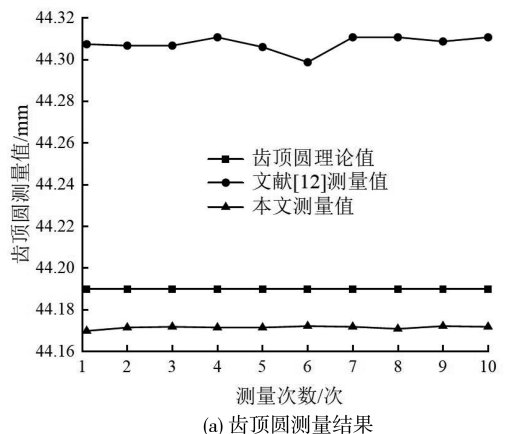


图 10 拟合效果图

Fig.10 Fitting effect diagram

3.3 测量结果

分别采用文献[12]和本文测量方法进行测量实验,为减少误差进行多次测量取均值,测量结果如图 11、表 1 所示。



(a) 齿顶圆测量结果

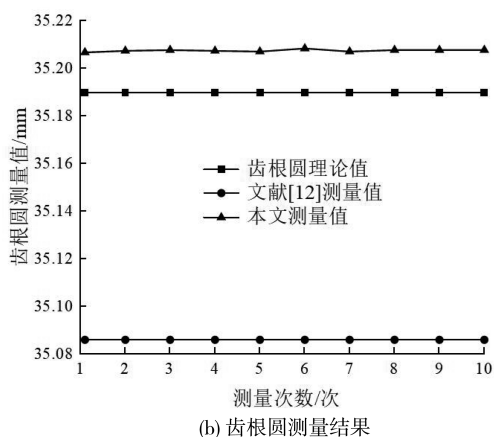


图 11 斜齿轮廓参数测量结果对比图

Fig.11 Comparison of measurement results of helical gear profile parameters

表 1 文献[12]与本文测量方法对斜齿轮测量的结果

Tab.1 Results of helical gear measurement by method in reference [12] and that proposed in this research

测量项目	理论值	文献[12]		本文测量	
		测量值	绝对误差值	测量值	绝对误差值
齿顶圆直径	44.19	44.307 7	0.117 7	44.171 6	0.018 4
齿根圆直径	35.19	35.086 0	0.104 0	35.207 6	0.017 6

由图、表可知,文献[12]测得的齿顶圆直径结果偏大,齿根圆直径结果偏小,测量结果误差大,这是由于该测量方法易受到轮廓突变点的影

参考文献:

[1] 侯恩光. 基于机器视觉的直齿轮几何尺寸测量方法[J]. 机电技术,2020,43(6):27-30,43.
 [2] CHAI H X. Measurement method for geometric parameters of small module gears based on machine vision[J]. International Journal of Frontiers in Engineering Technology,2024,6(1):92-100.
 [3] 宋栓军,王启宇,贾秀海,等. 基于斜齿轮端面与侧面图像处理的螺旋角测量方法[J]. 西安工程大学学报,2021,35(3):81-85.
 [4] 饶承剑.基于机器视觉的斜齿轮参数检测方法研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2023.
 [5] 金昭. 基于机器视觉的斜齿轮参数测量研究及应用[D]. 淄博:山东理工大学,2022.
 [6] 逯海滨. 基于机器视觉的齿轮几何参数检测方法研究[D]. 淄博:山东理工大学,2023.
 [7] 王筠翔,花海燕,朱广磊. 基于行为自适应的台钻主轴轴径视觉测量策略[J]. 机床与液压,2023,51(3):96-102.
 [8] 李忠虎,薛婉婷,吕鑫,等. 基于图像融合的风电塔筒边缘检测及提取方法[J]. 国外电子测量技术,2022,41(3):90-95.
 [9] TOMASI C,MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271). Bombay,India. Narosa Publishing House,1998: 839-846.
 [10] 黄南海. 基于机器视觉的大尺寸工件圆孔测量系统的研究与设计[D]. 抚州:东华理工大学,2022.
 [11] 徐永亮,谢小辉. 基于多级优化的圆拟合算法[J]. 电子科技,2023,36(10):87-94.
 [12] 高志强,曾志强,杜文华,等. 基于机器视觉的尼龙齿轮检测研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(5):74-77.

响。而本文方法测量结果值与理论值接近,测量绝对误差值在 0.02 mm 范围内。

为进一步验证所提方法在齿轮轮廓参数测量上的适用性,分别采用文献[12]和本文测量方法对模数为 2、齿数为 18 的标准直齿圆柱齿轮进行多次测量,测量结果取均值如表 2 所示。由表 2 可知,文献[12]测量结果误差较大,而本文方法的测量绝对误差值在 0.02 mm 范围内。

表 2 文献[12]与本文测量方法对直齿轮的测量结果

Tab.2 Results of spur gear measurement by method in reference [12] and that proposed in this research

测量项目	理论值	文献[12]		本文测量	
		测量值	绝对误差值	测量值	绝对误差值
齿顶圆直径	40	40.090 4	0.090 4	40.015 9	0.015 9
齿根圆直径	31	30.902 5	0.097 5	30.984 6	0.015 4

4 结论

1)对于斜齿轮端面图像采集存在阴影部分的问题,本文采用近距离背光源的照明方式,结合 Otsu 二值化处理方法获得理想的齿轮端面图像。

2)本文提出的齿轮尺寸测量方法,测量结果误差小,对齿顶圆直径和齿根圆直径的测量绝对误差值均在 0.02 mm 范围内。