

文章编号 1004-924X(2007)02-0186-06

光针轮廓扫描技术测量内螺纹曲面

吕东方,丁振良,袁 峰

(哈尔滨工业大学 自动化控制与测量系,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:分析了激光光针扫描在测量内螺纹曲面时的特性及影响精度的因素。根据光斑在被测面的噪声分布特点,采用中值滤波与小波阈值去噪相结合的综合滤波算法对光斑图像进行了去噪处理,其中中值滤波可以有效地消除光斑图像中的脉冲噪声,而基于小波变换的阈值去噪算法可以消除图像中的高斯噪声。通过综合滤波算法对光斑图像进行处理,可以有效消除激光光斑噪声,消除图像噪声对测量精度的影响,同时保持了光斑图像的细部特征。根据激光光斑图像在倾斜被测物体表面光强分布特点,设计了近似圆拟合算法来确定光斑中心,该算法相对传统算法具有计算量小、计算效率高,适合在线检测的特点,可以克服测量面倾斜对激光光斑中心的影响。利用采用上述方法的坐标机激光光针扫描系统,对标准内螺纹量规进行测量,对比应用前后的测量结果,螺距精度提高了 0.48 mm,中径测量精度提高了 0.44 mm,牙型角精度提高 0.57°。

关键词:内螺纹曲面测量;激光光针扫描;综合滤波算法;圆近似算法

中图分类号:TG85;TN247 **文献标识码:**A

Measurement of inside screw curve surface by laser probe

LU Dong-fang DING Zhen-liang YUAN Feng

(*Department of Automation Measurement and Control,
Harbin Institute of Technology, Harbin 15001, China*)

Abstract: The characters and factors were analyzed when the laser probe measurement was used in inside screw surface. According to the noise distribution of the laser speckle on the measured plane, a synthesis filter algorithm combined the median filter and the wavelet threshold denoising method was designed to eliminate noise of the image, in which median filter can effectively wipe off the impulse noise in the speckle image, and the threshold denoising algorithm based on wavelet transform can eliminate Gaussian noise of the image. The algorithm is able to remove the noise influence on measurement accuracy and maintain the image individual character. According to the intensity distribution of the laser speckle image on the declining object surface, the circle-fitting algorithm was proposed to overcome the affect of the laser speckle center shift caused by the slope surface to locate the center of the laser speckle image at the sub-pixel level. The algorithm has the features of high efficiency, less calculation compared with the traditional ones and is more suitable for testing on line. Laser probe scanning measurement base on coordinate machine using the above techniques was designed to measure an internal screw standard gauge. The results show that the internal screw-pitch measurement accura-

收稿日期:2006-06-21;修订日期:2006-10-20.

基金项目:国家 863 计划项目(No. 2002AA2Z9999, 2004AA99)

cy, pitch diameter of thread and the thread angle accuracy increase 0.48 mm, 0.44 mm and 0.57° , respectively.

Key words: inside screw measurement; laser probe scanning; filter algorithm; circle-fitting algorithm

1 引言

内螺纹连接件是机械工业广泛应用的机械零件,它的制造精度直接影响着机件连接的可靠性、装配精度和互换性,特别是在航天飞行的设计制造中,大量采用螺纹连接,大约有50%以上的零件间的联接要靠螺纹配合来实现,联接质量决定了飞行器等工业产品的可靠性和寿命。从国外的发展现状来看,内螺纹的测量正逐步向量化方向发展。美国 NASC 重新修订的军用标准要求除公称直径 $D \leq 0.19$ in (4.826 mm) 的内螺纹允许继续使用螺纹极限量规检验外,对其他直径的螺纹的所有参数必须进行量化检测。我国根据 ISO 标准指定的国内军用标准 GJB3.2~3.5,对航空、航天用内螺纹规定中也做了具体的要求。

内螺纹曲面参数,由于受其内孔空间的限制,直接对内螺纹进行量化测量是比较困难的。传统测量内螺纹的方法有千分尺、量块和精密仪器测量等,这些方法只能间接地计算出内螺纹的牙型角和中径。内螺纹的光学测量方法一直是测量中的难点,传统螺纹参数的光学测量方法是使用万能工具显微镜、万能测长仪或是与这些仪器结构类似的仪器。这些方法存在测量环节多、定位精度低、工艺复杂等缺点,使得测量精度难以提高。这些方法虽然实现了对内螺纹参数的光学测量,但是对于内螺纹的牙型半角、牙型角和中径等参数还是无法直接量化。工业 CT 技术是内螺纹测量的另一种方法,通过透视内螺纹工件来获得相应的螺纹参数。由于这种方法空间分辨力低,重建图像的工作量大,设备投资成本高,因此现场应用较少。

2 光针法轮廓测量原理

基于三角法的激光光针扫描测量,因具有非接触,高精度,容易控制等特点而被广泛应用于机器人视觉,自动化生产过程和商业测量。随着新型半导体激光器件和光学传感器的发展,如 CCD

和 PSD,已经使得激光扫描精度小于 $1 \mu\text{m}$ 。微型的激光扫描测头可以很容易地安装在三坐标测量机上,在逆向工程中有广泛的应用^[1,2]。图1为三角法测量原理图。通过测头部分光路的改进可以量测量螺纹截面量,根据扫描测得的数据,可以快速地得出内螺纹参数。

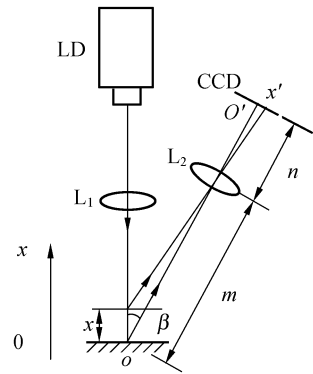


图1 三角法测量原理图

Fig.1 Schematic diagram of trigonometry

L_1 和 L_2 是准直透镜,LD 为激光光源,通过成像原理可以计算出 x 和 x' 之间的关系^[4]

$$x = \frac{mx'}{n \sin \beta + x' \cos \beta}$$

激光光针测量方法也有不足之处,该方法受环境温度和被测物体表面特性的影响。以光学扫描测量外螺纹轮廓为例来说明形貌对于测量结果的影响,图2为螺纹曲面外轮廓的实物图。

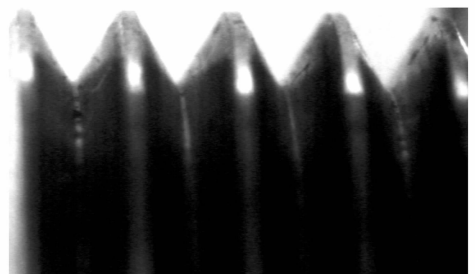


图2 螺纹曲面外轮廓

Fig.2 Screw profile picture

图 3 为用激光光针扫描该螺纹曲面的测量结果,结果显示测量数值与实际螺纹测量值之间有很大的偏差。

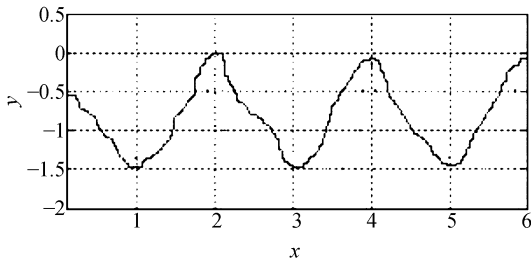
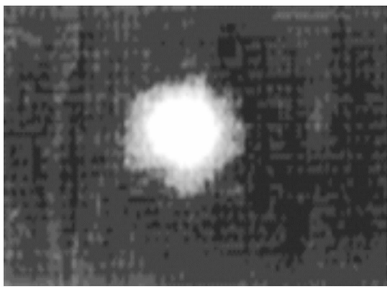
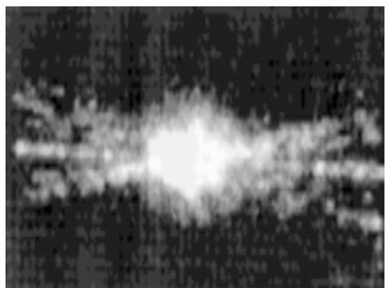


图 3 激光三角法扫描该螺纹曲面的测量结果
Fig. 3 Measurement results of screw

可以从测量原理中分析造成这种偏差的原因,三角法测量原理是通过物光斑在成像器件的成像位置来进行测量的,因此光斑图像很大程度上决定了测量的精确性。图 4 为相同激光在不同物体表面的光斑图像,两幅图像中包含了图像噪声。图 4(b)中还包含了图像的扭曲和拉伸,这就造成了激光光斑光强中心的偏移,使测量精度降低。因此必须提高图像成像质量,对光斑图像进行滤波和边缘搜索,从而确定图像成像中心位置来提高测量精度^[3-5]。



(a)



(b)

图 4 激光光斑在不同被测表面的图像

Fig. 4 Speckle images of different surface qualities

3 光斑图像综合去噪算法

在三角测量中,光斑图像噪声的产生主要是受到被测物体表面和感光元件 CCD 的影响而产生的,因此必须对光斑的图像进行去噪处理,既要有效地抑制噪声,又要保持光斑图像细节不丢失。图像噪声中包括高斯噪声和脉冲噪声,现行的滤波方法由于原理上的限制,只能有效地去除其中的一种,因此须用综合算法来去除。中值滤波是一种非线性滤波,可以有效地消除脉冲噪声而对于高斯噪声不是十分有效,而且容易造成图像边缘信息的丢失;而基于小波变换的自适应阈值去噪算法对于脉冲噪声没有很好的效果,但是可以消除图像失真并且保留图像特征^[7]。因此结合两种算法的特点,利用中值滤波消除大部分脉冲噪声后,再进行小波变换,结合模糊理论,建立隶属函数,对高频系数自适应地进行软阈值滤波。

典型的中值滤波公式是典型的非线性滤波,一般公式为:

$$g(x, y) = \text{median}\{f(x-k, y-l), (k, l) \in \omega\}, \quad (1)$$

这里 $f(x, y)$ 是图像方程, ω 是滤波窗, median 是取中值。光斑图像脉冲噪声是噪声均匀地分布于整个图像,依据这个特点,对 $M \times N$ 的图像进行扫描,搜索最大灰度值 \max_k 和最小灰度值 \min_k ,若 $M \times N$ 区域内某点灰度值等于最大灰度值或最小灰度值,则判定该点为脉冲噪声点,用 1 来表示,否则用 0 来表示。在公式(2)中 p 表示图像受噪声污染程度

$$p = \frac{q_k}{r_k}, \quad (2)$$

其中, r_k 表示所有像素个数, q_k 表示像素中为 1 的个数。根据 p 来选择滤波窗 ω 的大小

$$\omega = \begin{cases} 3 & p \leq 5\% \\ 5 & 15\% < p \leq 40\% \\ 7 & p > 40\% \end{cases}, \quad (3)$$

图像经过中值滤波处理后得到平滑效果不佳的图像,大部分的噪声滤波可以除掉,然后对该图像进行小波阈值去噪。小波阈值去噪的基本思想是对含噪声信号 $f(k)$ 做小波变换,选择合适的小波和小波分解层数 j 得到相应的小波系数。对分解得到的系数 w_{ij} 进行阈值处理,得出估计小波系

数 w_{ij} , 使得 $\|\hat{w}_{ij} - u_{ij}\|$ 尽可能小, u_{ij} 为原始信号的小波变换系数, 利用 \hat{w}_{ij} 进行小波重构, 得到估计信号 $\hat{f}(k)$, 即为去噪后的图像信号。针对高频系数, 采用自适应模糊软阈值处理得到重建系数 \hat{w}_{ij} , 如果小波系数 w_{ij} 随着尺度的增加也增加, 这表明是图像的边缘细节, 对此小波系数保持不变; 对于其他小波系数, 采用如下估计系数^[6]

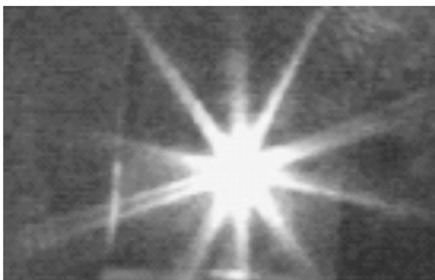
$$\hat{w}_{ij} = \begin{cases} \text{sig}(w_{ij}) \cdot (|w_{ij}| - \mu\lambda) & |w_{ij}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{ij}| < \lambda \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $\lambda = \frac{\sigma\sqrt{2\ln(N)}}{\ln(j+1)}$, σ^2 为噪声的方差, N 为离散信号的长度, j 为分解尺度, μ 为隶属函数, $\mu = \frac{1}{(w_{ij} - \lambda)^2 + 1}$ 。 λ 随着 j 的增大而减小, 这样保证了 w_{ij} 接近 λ 时, \hat{w}_{ij} 趋近与 $-\lambda$, \hat{w}_{ij} 的整体连续性得到了保证, 避免出现信号振荡, 比传统方法获得了更好的滤波效果。

应用综合滤波算法对图 5(a) 进行噪声剔除。图(a)为 256×256 bit 的光斑图像, 中值滤波的滤波窗口为 5×5 , 采用 coif2 小波, 分解尺度为 3 自适应阈值去噪。图(b)为去噪结果, 图中噪声明显减小, 图像细节也比较清晰。



(a)



(b)

图5 应用综合去噪算法结果对比

Fig.5 Comparison results of filter images

4 确定光斑中心的算法

光斑中心位置的确定是提高激光光针测量精度的关键技术。光斑中心确定算法一般测头信号处理系统, 应用 DSP 等小型单片机系统实现, 因此对于算法的硬件资源有比较苛刻的要求。已有的光斑中心确定算法, 比如中心模型法、Hough 变换法, 在计算光斑中心时需要占用大量的内存和硬件资源, 并且程序编制和运算非常复杂, 计算量大, 效率较低, 难以满足快速测量的需要。因此本文采用基于最小二乘法 (LSM) 圆近似的光斑中心测量方法, 用圆来近似光斑的边缘。该算法的原理推导如下:

对于任意圆的方程为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (5)$$

变化方程(5), 写成带有残差 ϵ_i 的方程:

$$\epsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2, \quad (6)$$

式中, $i \in E$, E 为圆边界集合, (x_i, y_i) 为边界上的一点。残差 ϵ_i 的平方和

$$Q = \sum_{i \in E} \epsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2, \quad (7)$$

根据 LSM, 有

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

根据式(7)和(8)可以得到

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(y_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)r = 0 \end{cases}, \quad (9)$$

方程(5)可以变为

$$\begin{cases} a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b - r^2 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2 = 0 \\ \bar{x}a^2 - 2\bar{x}^2a + \bar{y}b^2 - 2\bar{y}^2b - \bar{x}r^2 + \bar{x}^3 + \bar{y}^3 = 0 \\ \bar{y}a^2 - 2\bar{x}ya + \bar{y}b^2 - 2\bar{y}^2b - \bar{y}r^2 + \bar{x}^2y + \bar{y}^3 = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

公式(9)中的参数可以写为

$$\overline{x^m y^n} = \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n / \sum_{i \in E} 1, \quad (11)$$

去掉(9)式中的平方项, 整理得

$$\begin{cases} (\bar{x}^2 - \bar{x}^2)a + (\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})b = \frac{1}{2}(\bar{x}^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2) \\ (\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})a + (\bar{y}^2 \cdot \bar{y}^2)b = \frac{1}{2}(\bar{x}^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{x}^3) \end{cases} \quad (12)$$

根据公式(9)和(12),可得参数 a, b 和 r 的表达式

$$\begin{cases} a = \frac{(\bar{x}^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{x}^3)(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x} - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ b = \frac{(\bar{x}^2 \cdot \bar{y} + \bar{y} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^2\bar{y} - \bar{x}^3)(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2 \cdot \bar{x} + \bar{x} \cdot \bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x} - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\bar{x}a + b^2 - 2\bar{y}b + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{cases} \quad (13)$$

尽管公式(13)看起来复杂,但其主要参数 a, b 可以通过循环一次计算光斑边界点就可得到。当参数 a, b 确定之后,就可计算得到参数 r ,相对传统算法,该算法计算量小,计算效率高,适合在线检测。

5 试验装置和实验结果

为了适应内螺纹孔径测量的需要,必须在三角法测量原理的基础上对光路进行改造,在光路中添加相应的测量镜组,既要保证测量原理不变,又要适合内螺纹孔径的尺寸,测量装置原理如图 6 所示。Y 向和 X 向滑台滑动距离可以选用光栅尺来测量,被测内螺纹零件和测头通过卡具固定在 Y 向和 X 向滑台上。首先通过 X 向滑台调整测头相对内螺纹测件的相对位置,然后驱动 Y 向滑台使测头对内螺纹牙形进行扫描。通常应使内螺纹牙形高度在测头的测量范围之内,如果超出范围,需要配合 X 轴测尺来测量牙形。应用前

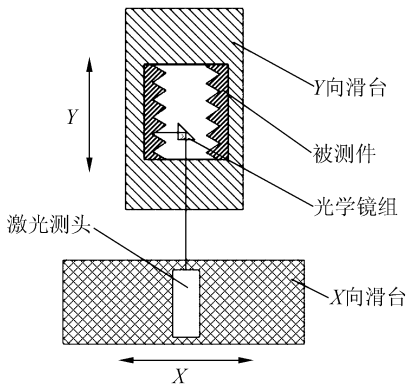


图 6 内螺纹测试装置原理图

Fig. 6 Inside screw test device schematic diagram

面论述的提高精度的算法和测试装置对内螺纹环量规进行检测,单面测量结果如图 7 所示,对比测量结果图 3,由于测头精度的提高,使测量结果插值曲线已经非常接近于牙形截面轮廓。

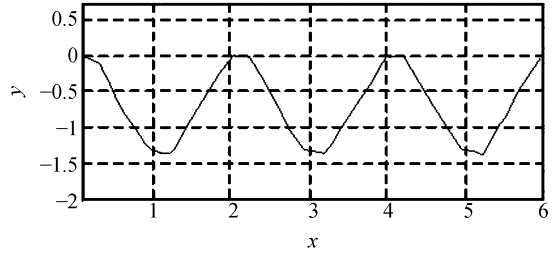


图 7 内螺纹测量轮廓图形

Fig. 7 Result figure of inside screw profile measurement

对公称直径为 52 mm 的内螺纹量规进行测试,并计算螺纹的主要参数,测试结果如表 1 所示,其中标准值为被测量规的理论值,测量值 1 为直接测量结果,测量值 2 为应用方法之后的测量结果。对比应用方法前后的结果,螺距精度提高 0.48 mm,中径测量精度提高 0.44 mm,牙型角精度提高 0.57°。

表 1 标准内螺纹环量规测试结果

Tab.1 Results of standard internal screw gauge measurement

	标准值	测量值 1	测量值 2
中径(mm)	48.752	48.254 8	48.692 5
螺距(mm)	5.000	4.513 2	4.996 3
牙型角	60°	59.445°	60.015°
左半角	30°	29.642°	29.954°
右半角	30°	29.803°	30.061°

6 结 论

消除光斑噪声、判定光斑的中心对于激光扫描测量来说是十分重要的。内螺纹测量方法采用光斑图像综合去噪算法可以有效地消除光斑噪声;采用基于 LSM 圆近似求光斑中心方法可以快速有效地确定光斑中心位置。设计了试验装置实现对标准内螺纹量规进行扫描测量,测量结果显示,应用上述方法使内螺纹参数螺距精度提高了 0.48 mm,中径测量精度提高 0.44 mm,牙型角精度提高 0.57°。

参考文献:

- [1] MICHAEL T B. Laser distance measuring method and apparatus[P]. *United States Patent*, 485693. 1996-08-15.
- [2] ESPIAU B. An overview of local environment sensing in robotics application [J]. *NATOASIS Series*, 1997,(43): 126-151.
- [3] XIE Z X, ZHANG H J. Factors affecting the measurement precision of laser triangular probe and the compensation methods[J]. *Modern Measurement and Test*, 1999(1): 23-26.
- [4] 杜颖, 李真. 三维曲面的光学非接触测量技术[J]. *光学精密工程*, 1999,7(3):2-4.
DU Y, LI ZH. Optical non-contact measurement technology for 3-D surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(3):2-4. (in Chinese)
- [5] DRAVIDA S, WOODS J W, SHEN W C. A comparison of image filtering algorithms [C]. *Proceedings of the 1996 IEEE ICASSP Conference*, 2, 1996.
- [6] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995,41(3):613-627.
- [7] 李广泽, 刘全国, 郝志航. 基于双正交小波的星点细分定位方法研究[J]. *光学精密工程*, 2005,13:219-220.
LI G Z, LIU J G, HAO ZH H. Research of subpixel subdivision location algorithm for star image based on biorthogonal wavelet[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13:219-220. (in Chinese)

作者简介:吕东方(1974—),男,哈尔滨工业大学自动控制及测量专业博士研究生,从事激光测量技术,激光远程测距和激光跟踪瞄准技术的研究。E-mail:lvdfang@hit.edu.cn