

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306574

球面折反射成像的内螺纹螺距视觉测量系统^{*}

张诗婧 莫绪涛 董杨林 程莹 黄仙山
(安徽工业大学微电子与数据科学学院 马鞍山 243002)

摘 要:为了实现内螺纹参数的非接触、自动化在线测量,本文以通孔螺母和盲孔螺母为检测对象,提出了一种基于球面折反射全景成像原理的内螺纹螺距参数的机器视觉测量系统。系统采集经球面折反射得到的图像,随后分割出完整的内螺纹区域;采用对比度受限的自适应直方图均衡化算法提高图像对比度,并采用中值滤波与双边滤波的组合来保护螺纹边界信息;再使用 Zernike 矩边缘检测算法确定每条螺纹的亚像素边缘;最终,基于折反射成像理论计算得到内螺纹螺距尺寸。与计量用螺纹综合测量机的螺距测量值进行了对比,实验结果表明该系统的平均测量误差为 0.018 5 mm,满足工业生产中内螺纹螺距精度的要求,检测效率高,可用于内螺纹在线视觉检测。本研究为圆柱形内壁尺寸测量和缺陷检测提供了一种参考方案。

关键词: 机器视觉;内螺纹;球面折反射成像;边缘检测;亚像素

中图分类号: TG85 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Spherical catadioptric imaging visual measurement system for internal thread pitch

Zhang Shijing Mo Xutao Dong Yanglin Cheng Ying Huang Xianshan
(School of Microelectronics & Data Science, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China)

Abstract: In order to achieve contactless and automated online measurement of internal thread parameters, this paper proposes a machine vision measurement system for internal thread pitch based on the spherical catadioptric panoramic imaging principle, using through-hole nuts and blind-hole nuts as inspection objects. Firstly, the system acquires the image obtained by the spherical catadioptric system and segments the complete internal thread area. Secondly, contrast limited adaptive histogram equalization algorithm is used to enhance the image contrast, and a combination of median filtering and bilateral filtering is used to protect the thread boundary information. Then, a Zernike moment edge detection algorithm is used to determine the sub-pixel edges of each thread. Finally, the internal thread pitch dimensions are calculated based on the theory of spherical catadioptric imaging. The pitch measurement values were compared with those of a comprehensive thread measuring machine for metrology. It shows that the system has an average measurement error of 0.018 5 mm that meets the requirements for accuracy of internal thread pitch measurement in industrial production. The experiments proved that the system is highly effective in detecting and can be used for online visual inspection of internal threads. This study provides a reference solution for cylindrical internal wall dimension measurement and defect detection.

Keywords: machine vision; internal thread; spherical catadioptric imaging; edge detection; sub-pixel

0 引 言

螺纹联结起到紧固装备、串联设备关键零部件的作用,广泛应用于汽车、飞机及各类精密机电设备。因此,

螺纹的加工和安装质量对设备的正常运转至关重要,若螺纹的参数尺寸不满足加工精度要求,会严重影响螺纹连接的紧密性,轻则导致设备工作异常,重则产生严重的机械故障、人员伤亡事故。螺纹可分为外螺纹和内螺纹,外螺纹易于使用机器视觉技术检测,国内外对此研究较

多;而内螺纹处于内壁,不利于单次成像获取完整的内螺纹图像,因此当前主要以接触式测量、内窥式测量为主要的内螺纹检测方法。

常见的螺纹接触式检测方法有塞规、三坐标机和螺纹综合测量机检测等。利用塞规对螺纹进行人工抽样检测^[1],检测效率低、仅提供通止结果无具体测量尺寸、检测覆盖率低,极易导致不合格产品流入市场;三维坐标测量机可用于螺纹的精密测量,提供精确的测量数据,但三维坐标测量机也有不足之处:测头尺寸影响螺纹轮廓的精密测量,小于测头的孔径无法完成测量;测量速度较慢;测量装夹较为复杂;价格昂贵,不适合工业流水生产的现场检测^[2-3]。目前大型企业或专业计量机构,通常采用螺纹综合测量机对内螺纹进行测量。螺纹综合测量机利用扫描探针与被测螺纹表面进行轴向截面轮廓的接触扫描,由测量系统获得螺纹轴向轮廓的形貌,按螺纹参数的相关定义直接进行分析与计算,获得螺纹的综合几何参数^[4]。一次测量耗时约 2 min。螺纹综合测量机价格昂贵,且测量过程中检测工具与精密器件螺纹孔直接接触,有可能在检测过程对螺纹造成二次损伤,同时,由于测量速度慢,不适合生产中的实时快速检测。

将机器视觉技术引入螺纹参数检测,改变了传统测量技术效率低、耗时长等缺点,既能避免测量过程中的人为误差,也可实现连续快速的测量,保证生产制造过程的自动化^[5-7]。江涛等^[8]针对螺纹参数测量问题提出一种基于轮廓角点检测的视觉测量方法,通过对轮廓进行分段拟合,提取出螺纹牙顶和牙底的角点,实现螺纹参数的高精度测量。但其角点检测算法的阈值需人为设定,且目前仅适用于外螺纹的参数测量。内螺纹相关的视觉检测文献较少,仅有的研究成果仍需借助于 X 光扫描、激光扫描进行三维重建或通过内窥镜采集内螺纹图像。Kosarevsky 等^[9]提出利用 X-ray 对工件进行断层扫描,重建待测螺母的三维特征,能够实现对螺母的各项特征进行检测,但是缺陷也很明显,CT 设备的扫描速度慢,扫描单个工件需要 1 h,成本极高、效率却低。Lin 等^[10]提出了一种利用激光三角法实时测量螺母内螺纹螺距,当螺距为 1.5 mm 时,误差为 0.1 mm。该方法可以得到螺牙的起伏形貌,但是每次采集的仅为一条激光投影线,不能够得到整个螺母的所有螺牙信息。王蕴哲等^[11]利用内窥镜采集内螺纹图像,然后运用腐蚀和膨胀算法对图像进行处理,得到图像的骨架,完成螺纹螺距的检测,相对误差为 1.7%。但是该方法存在以下问题,一方面由于内窥镜尺寸限制,不适用于尺寸较小的螺母检测;另一方面,内窥镜每次成像仅采集螺母内壁部分图像,若想得到完整图像需要多次旋转内窥镜或者工件才能得到完整螺牙信息。因此可以考虑通过反射成像的方式来解决此类问题。Li 等^[12]提出了一种基于单镜头多镜面反射的激

光立体视觉的内螺纹几何参数测量系统,该系统通过完全再现内螺纹的三维齿形,可以一次测量 3 个参数,视觉测量时间为 0.5 s,缺点是当通过增加棱镜反射面数量来获取更多的截面数据时,会给棱镜的设计和制造带来困难。此外,Li 等^[13]还提出了一种基于双镜像结构光的内螺纹几何参数视觉测量系统,与以前的方法相比,允许在一次设置中进行多参数测量。但双镜需要定制设计,需要有运动结构深入螺纹内部,系统结构相对复杂,不利于工业现场的批量检测。上述方法在内螺纹检测方面取得了不错的检测效果,但当应用场景是工业批量生产的线上实时检测时,如何以较高的性价比实现螺母参数测量仍是一个值得研究的问题。

本文以螺母的螺距作为待测尺寸,提出了一种基于球面折反射成像的机器视觉检测方法和系统,对内螺纹进行非接触测量。相较于接触式测量、插入式内窥测量,提高了内螺纹螺距参数的检测速度,显著降低了检测成本,精度达到了工业现场检测要求,为工业现场的内壁尺寸及缺陷检测提供了一种参考方案。

1 测量系统的构成及工作原理

1.1 待测螺母

选取普通六角螺母作为通孔螺母实验对象、轮毂螺帽作为盲孔螺母实验对象,实物与二维结构如图 1 所示,视觉系统的目标是测量螺母螺距的准确数值,即计算图 1(c)中标准的 a 与 b 之间的几何垂直距离 P 。

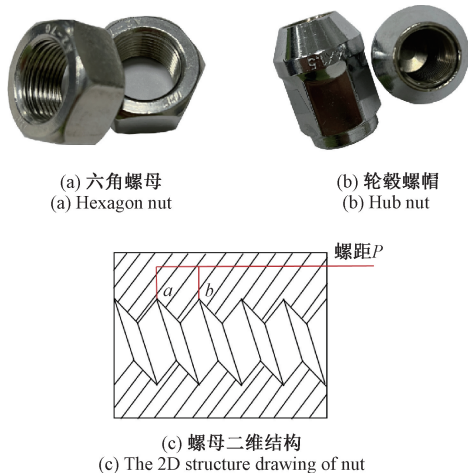


图 1 螺母实物图及二维结构

Fig. 1 Physical drawing and 2D structure of the nut

1.2 测量系统的构成和工作原理

本文搭建的测量系统如图 2 所示。

在 30°低角度环形 LED 光源提供照明下,反射球面反射照明光线,为螺母内壁(即内螺纹)提供合适照明。

内螺纹先经过反射球面反射成像,随后被装配物方远心镜头的工业相机成像。得到经球面反射的内螺纹的全景图像。文中将反射球面和成像物镜组成的成像系统称作球面折反射成像系统。之后,对内螺纹全景图像进行预处理与亚像素边缘检测,并根据球面折反射理论将图像距离转换为实际距离,得到内螺纹工件的螺距测量值。

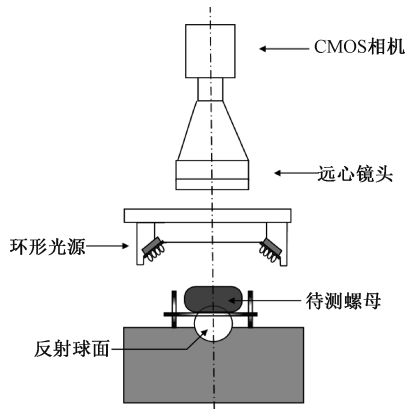


图 2 球面折反射内螺纹尺寸测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spherical catadioptric internal thread dimensioning system

相较于双曲面、圆锥面折反射成像系统,球面折反射成像系统垂直视场最大、能够覆盖到反射镜以上的所有场景、符合平行投影模型、装置设计加工简单,更适合于本文的检测任务。对于球面折反射全景成像系统^[14-16]而言,空间 360°范围内的场景成像于像平面上,建立像平面坐标系同柱面坐标系之间的映射关系就成为立体全景图像恢复的关键。坐标对应关系如图 3(a)、(b)所示。

以像平面成像中心 M 点为坐标原点建立坐标系如图 3(b)所示。 A 为像平面上的任意一点, r'_p 为 A 点距中心点的距离(以像素数为单位)。

图 3(a)中 N 点为 N_1 点成像光路中对应的球面上的点, r 为反射球面的半径, R 为内螺纹小径,感光芯片的像元尺寸为 Δ (单位为 μm), α 为入射角,远心成像镜头的放大倍率为 β 。由几何关系可得目标高度 H_1 ,同理可以得到 H_2 。

$$r_p = r'_p \times \Delta / \beta \quad (1)$$

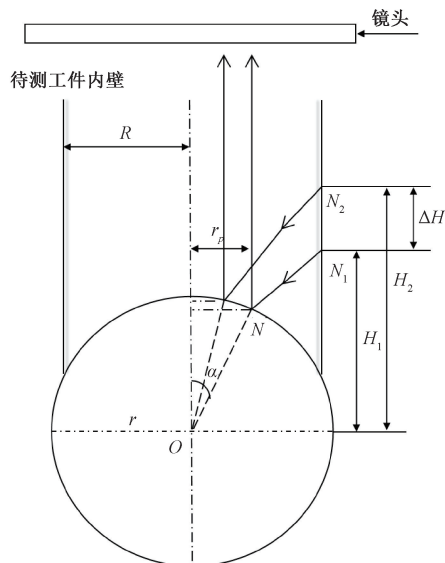
$$\alpha = \arcsin(r_p / r) \quad (2)$$

$$H_1 = r \cos \alpha + (R - r_p) \cot 2\alpha \quad (3)$$

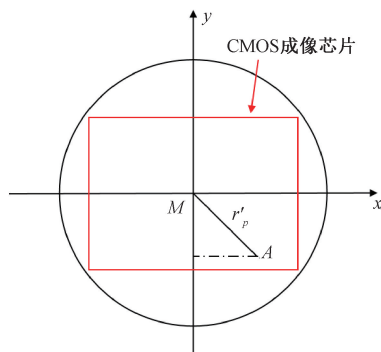
$$\Delta H = H_2 - H_1 \quad (4)$$

1.3 镜头选型和放大倍率测量

在镜头选取阶段,对内螺纹不同高度处的物点,经过球面折反射成像系统成像后,所对应的理想像距进行了计算,如图 4 所示。设待测内螺纹某一位置关于反射球面的物距为 x ,反射球面曲率半径 r 为 12.5 mm,定焦镜头焦距 f' 为 16 mm,经过成像物镜后的像距为 s_2' 。 h 为



(a) 内螺纹不同物点经球面折反射成像光路示意图
(a) Schematic diagram of the optical path of the different object points of the internal thread via spherical refraction



(b) 相机成像面坐标关系图
(b) Image plane coordinate relationship diagram

图 3 球面折反射成像原理

Fig. 3 Schematic diagram of spherical catadioptric imaging

透镜中心距反射球面顶点的距离。利用单球面反射的成像公式(5),可得经过球面反射成像后对应的像距 s_1' :

$$\frac{1}{s_1'} - \frac{1}{x} = \frac{2}{r} \quad (5)$$

以厚度为 10 mm 的内螺纹为例,内螺纹上下螺纹经过钢球反射成像后得到有 9.071 mm 的像距差。其次,由于螺牙经过球面成像后得到的像距不同,会导致再次镜头成像时,放大倍率不一致。针对上述问题,远心镜头具有景深较大的优点,当镜头偏离理想聚焦物面时,光学系统的放大倍率接近恒定。因此选用光圈可调的双远心镜头降低系统自身带来的误差对实验测量结果的影响,保证系统的成像要求。本文选用的远心镜头的参数如表 1 所示,镜头的景深范围为 18.1~21.4 mm,大于上述计算得到的 9.071 mm 的实际物距范围,保证了待测内螺纹均能清晰成像。

本文利用标准黑白棋盘格标定得到系统的放大倍

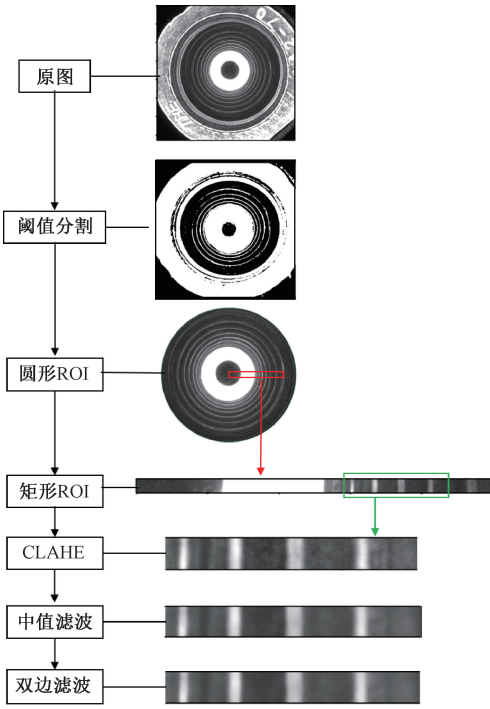


图 6 图像预处理流程

Fig. 6 Flow chart of image pre-processing

离, ϕ 为 l 和 x 轴的夹角。图 7(b) 是将图 7(a) 绕原点顺时针旋转 ϕ 角度。

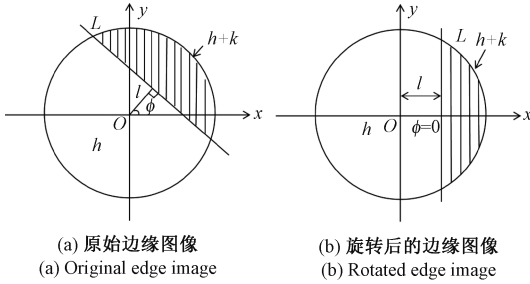


图 7 亚像素边缘检测理想模型

Fig. 7 Ideal model for sub-pixel edge detection

Zernike n 阶多项式定义为:

$$V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm} e^{im\theta} \quad (7)$$

式中: m, n 属于整数并满足条件: $n \geq 0, n - |m|$ 为偶数且 $|m| \leq n, i$ 为虚数单位, 实值多项式 R_{nm} 由式(8)给出:

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \quad (8)$$

首先, 综合考虑检测精度和运算时间后, 选取了大小为 7×7 的 Zernike 模板^[18], 利用式(9)计算 $\{M00, M11R, M11I, M20, M31R, M31I, M40\}$ 7 个 Zernike 模板。用 7×7 的均匀网格分割单位圆, 记第 i 行第 j 列正方形区域为

$S_{i,j}, C$ 为单位圆区域, 则该正方形区域对应的模板系数 $M_{n,m}(i, j)$ 为:

$$M_{n,m}(i, j) = \iint_{S_{i,j} \cap C} V_{n,m}^* dx dy \quad (9)$$

第 2 步对待检测图像进行预处理, 将预处理后图像的每一个像素点跟 7 个 Zernike 矩模板分别进行卷积运算, 得到 7 个 Zernike 矩 $\{Z00, Z11R, Z11I, Z20, Z31R, Z31I, Z40\}$ 。

第 3 步是利用 Zernike 矩的旋转不变性, 如式(10)所示:

$$Z'_{n,m} = Z_{n,m} \exp(-jm\phi) \quad (10)$$

其中, $Z'_{n,m}$ 为图像绕坐标原点顺时针旋转 ϕ 角度后得到的 Zernike 矩。将 Zernike 矩乘上角度矫正系数。取一像素点, 根据式(11)计算边缘角度 ϕ , 该角度方向垂直直线边缘。并根据式(12)和(13)计算距离参数 l 和灰度参数 k , 根据 l 和 k 判断该点是否为边缘点。

$$\phi = \arctan\left(\frac{\text{Im}[Z_{31}]}{\text{Re}[Z_{31}]}\right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{\frac{5Z'_{40} + 3Z'_{20}}{8Z'_{20}}} \\ l_2 = \sqrt{\frac{5Z'_{31} + 3Z'_{11}}{6Z'_{11}}} \\ l = \frac{l_1 + l_2}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1 - l^2)^{3/2}} \quad (13)$$

确定了图像参数 l, k, ϕ 后, 考虑模板放大效应, 由图 7 可推导出亚像素边缘检测公式为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2} \cdot l \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, N 为模板大小, (x', y') 是边缘的亚像素坐标, (x, y) 表示亚像素边缘检测模型的原点坐标。

如图 8 所示, 为通孔螺母和盲孔螺母亚像素边缘检测后的效果图。

2.3 螺距测量流程

内螺纹螺距的测量流程如图 9 所示。首先, 分割出球面折反射系统得到的内螺纹圆形区域, 得到圆心坐标。接着, 在此区域内分别选取上下左右 4 个方向的矩形感兴趣区域(ROI), 放大螺纹细节, 便于对该区域进行后续的预处理操作。其次, 对图像进行亚像素边缘检测, 准确找到螺纹边界点。最后, 根据球面折反射原理, 将图像像素尺寸转换为实际尺寸, 将其与设定的阈值进行比较, 有助于剔除错误的螺纹边界点, 提高测量精度, 实现内螺纹的螺距测量。

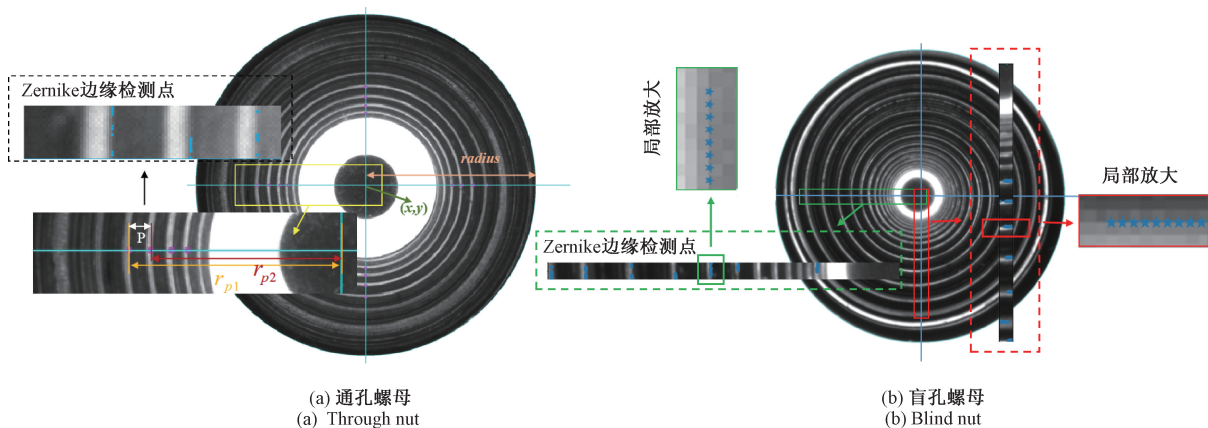


图 8 内螺纹螺牙 Zernike 矩亚像素检测

Fig. 8 Zernike moment sub-pixel inspections of internal thread

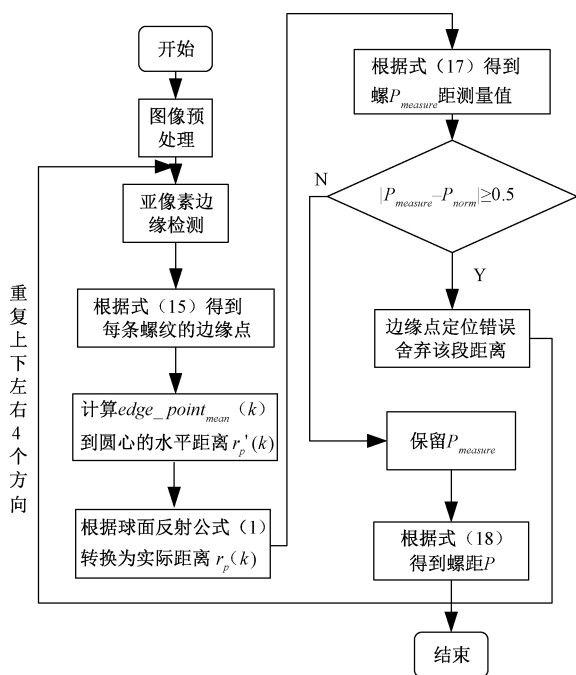


图 9 内螺纹螺距测量流程

Fig. 9 Flow chart for measuring the pitch of internal threads

$$edge_point_{mean}(k) = \frac{\sum_{i=1}^N edge_point_k(i)}{N} \quad (15)$$

$$r_p'(k) = edge_point_{mean}(k) - x \quad (16)$$

$$P_{measure} = r_p(k) - r_p(k+1) \quad (17)$$

$$P = \frac{\sum_{j=1}^k P_{measure}}{k} \quad (18)$$

式中: $edge_point_k$ 为亚像素边缘检测出的螺纹边缘点, N 为边缘点总的个数, $edge_point_{mean}$ 为对边缘点的坐标位置求得的平均值。 (x, y) 为圆心坐标, r_p' 为边缘点到圆心的水平距离, k 是检测到的螺纹条数, 并根据式(1), 将

其转换为实际距离 r_p 。当对螺纹左右两侧计算 r_p' 时, 式(16)不变; 当对螺纹上下两侧计算 r_p' 时, 式(16)中的 x 改为 y , 即亚像素边缘点的纵坐标与圆心纵坐标相减。

3 系统搭建和实验结果

3.1 测量系统搭建

测量系统硬件由工控机、工业相机(大恒图像 MER-500-7UM, 分辨率 2592×1944 , 像素尺寸 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$), 远心镜头(大恒光电, GCO-232105)、环形光源、反射球面(材质为 100CR6 的 G3 级钢球表面)、螺母定位支架及实验架等构成, 如图 10 所示。

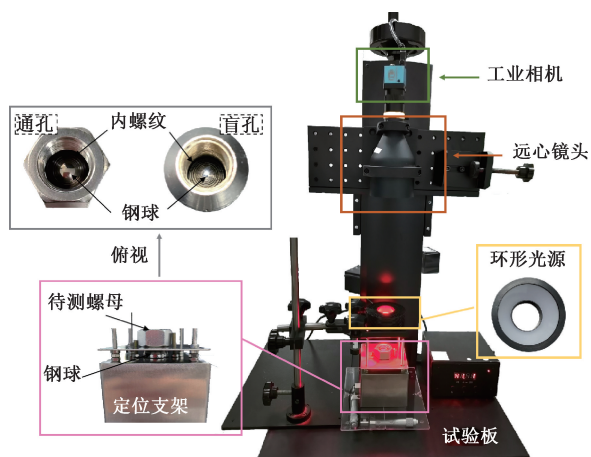


图 10 球面折反射内螺纹测量系统实物图

Fig. 10 The hardware composition of the machine vision measurement system

螺母定位支架通过机械结构保证螺母旋转中心和钢球圆心处于同一直线, 通过图像对装置的同轴性进行了验证, 如图 11 所示。红色环形光源均匀照射待测工件,

以便减少外部光照的影响,获取低噪声的清晰图像。相机采集到的图像通过 USB 接口传输给中控机。在实际系统搭建时还应注意,测量不同公称直径的螺母时应选取恰当大小的钢球,通孔螺母的公称直径应略小于钢球直径,如测量 M20 的通孔螺母时使用直径为 25 mm 的钢球;盲孔螺母的公称直径应略大于钢球直径,如测量 M14 的盲孔螺母时使用直径为 12 mm 的钢球。

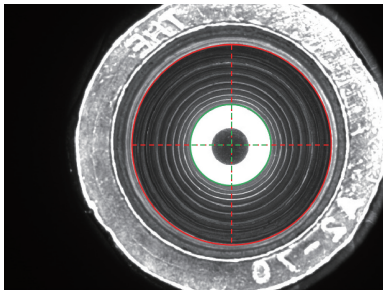


图 11 装置同轴性验证
Fig. 11 Device coaxiality verification

测量系统软件环境采用 Windows 10 64 bit 操作系统;测量应用软件为 Python 语言开发,支持库采用计算机视觉库 OpenCV3.7。

3.2 测量结果及分析

试验螺母的规格和尺寸公差如表 2 所示。为了更好地证明系统的准确性,委托计量所采用中图仪器公司研制的 SJ5200 螺纹综合测量机出具测量报告,检测的技术依据为 GB/T 3934-2003《普通螺纹量规技术条件》,测量器具的参数如表 3 所示。由于螺距偏差对螺纹互换性的

影响均可以折算成中径当量,并与中径尺寸偏差形成作用中径。因此仅规定一项中径公差,用以控制螺距偏差。螺纹综合测量机在实际测量螺距时会将多次测量值取平均作为实测值,本文将其作为内螺纹实际尺寸进行对比。

表 2 试验螺母的规格和尺寸公差
Table 2 Specifications and dimensional

tolerance of the test nuts					(mm)
工件类型	公称直径	大径 D	中径 D_2	小径 D_1	螺距 P
通孔螺母	M20	20	$19.026^{+0.190}$	$18.376^{+0.300}$	1.5
通孔螺母	M20	20	$18.376^{+0.224}$	$17.294^{+0.450}$	2.5
盲孔螺母	M14	14	$13.026^{+0.190}$	$12.376^{+0.300}$	1.5

表 3 计量所检测所使用的主要计量器具
Table 3 Main measurement standard used in the test

名称	测量范围/mm	不确定度/准确度等级/最大允许误差 MPE/ μm
螺纹综合 测量机	1~160	螺纹塞规中径: MPE: $\pm(2.5+L/200)$
		螺纹环规中径: MPE: $\pm(2.5+L/200)$

将通孔螺母和盲孔螺母分别放在实验装置上旋转 10 次,每旋转一次对螺母测量一次。将螺距每次测量值与实际尺寸作差后取平均值,得到平均测量误差。与 SJ5200 螺纹综合测量机测得的实际尺寸对比,得到测量结果如表 4 所示,测量误差如图 12 所示。实验结果表明,通孔内螺纹的螺距平均测量误差为 0.018 5 mm,盲孔内螺纹的螺距平均测量误差为 0.009 9 mm,满足工业现场的检测精度需求,可以用于非接触式在线检测。

表 4 对同一螺母螺距的 10 次测量结果

Table 4 Ten measurement results of the parameters of the same nut										(mm)
通孔螺母(规格:M20,螺距实际尺寸:1.492)										
测量结果	1.473	1.471	1.473	1.478	1.461	1.479	1.467	1.499	1.477	1.471
平均测量误差	0.018 5									
盲孔螺母(规格:M14,螺距实际尺寸:1.495)										
测量结果	1.485	1.489	1.498	1.503	1.484	1.510	1.499	1.512	1.512	1.487
平均测量误差	0.009 9									

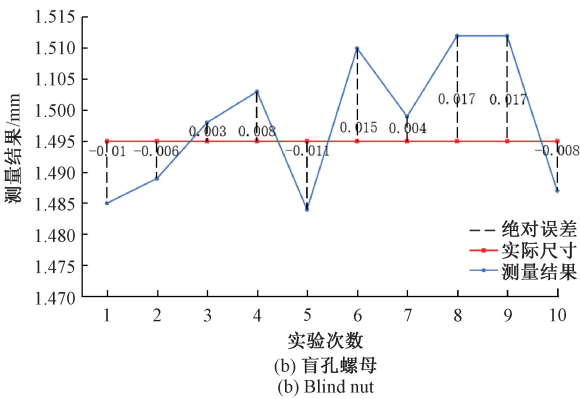
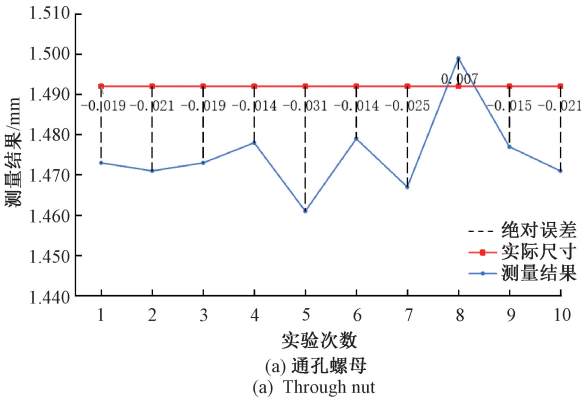


图 12 测量结果
Fig. 12 Measurement results

为了验证视觉测量系统的稳定性和可靠性,实验还选取了螺距规格分别为 1.5 和 2.5 mm 的通孔螺母进行了大量测量实验,螺距的测量值如图 13 所示。将测量结果与螺母规格标定的螺距进行数据对比,绝对误差值如图 14 所示。结果表明,本文提出的亚像素级螺距测量的绝对误差小于 0.03 mm。亚像素级的平均测量误差分别为 0.015 7 mm ($P=1.5$ mm)、0.011 7 mm ($P=2.5$ mm),均满足检测误差。螺距的平均检测时间小于 0.5 s,符合工业实时检测要求。

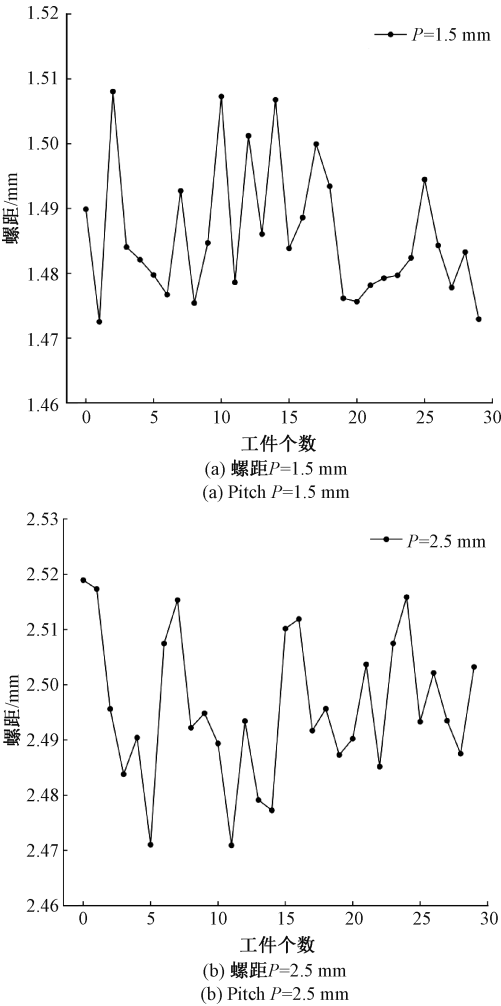


图 13 螺距测量值

Fig. 13 Measurement value of pitch

相较于传统的接触式检测方法,如使用节规测量螺距的传统方法的测量误差分别为 0.036 mm,测量耗时 60 s;使用螺母综合测量机的参考系统测量耗时 120 s。本文提出的视觉测量系统比传统方法快 120 倍,比参考系统方法快 240 倍,验证了本文所提视觉测量系统的精度高、效率高。

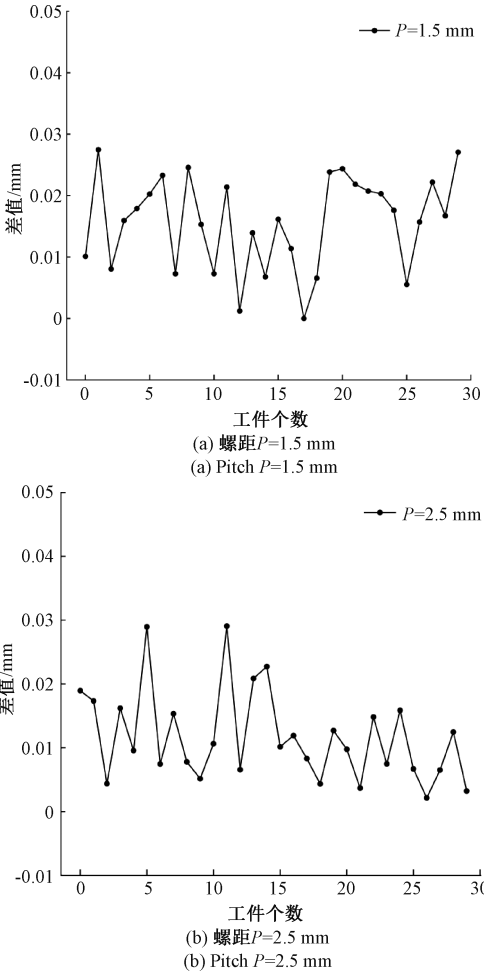


图 14 绝对误差值

Fig. 14 Absolute error

3.3 误差分析

本文所提内螺纹螺距视觉测量系统在机械结构上加了螺母定位支架,在一定程度上保证了系统的同轴性,但在实际测量中,螺母轴线与光轴的偏移量也是影响螺距精确度的重要参数。当给定螺母轴线与光轴的偏移量时,求解内螺纹螺距,与理想情况下螺母轴线与光轴无偏移时得到的螺距计算差值,结果如图 15 所示。可以看出当偏移量越大时,螺距差值越大,当偏移量达到 1 mm 时,螺距会产生近 0.25 mm 的误差。因此,在实际工业检测中应尽可能的保证螺母轴线与光轴相重合,系统的同轴性对螺距测量至关重要。

4 结 论

本文针对内螺纹工件的测量,提出了一种球面折射射机器视觉测量系统。该系统采用基于球面的折反射全

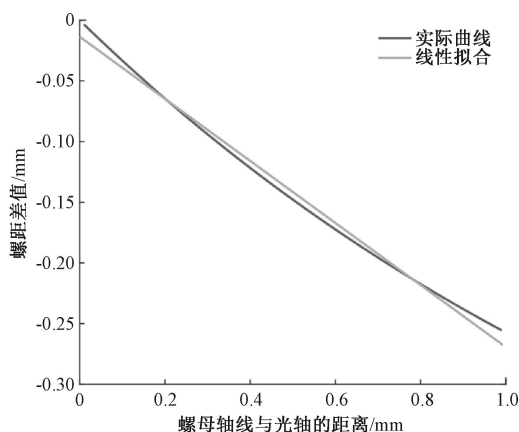


图 15 螺母轴线偏移误差曲线

Fig. 15 Nut axis deviation error curve

景成像技术,实现了对通孔螺母和盲孔螺母内螺纹螺距的非接触式测量。该系统可以实现工件内壁一次性成像全景观测,具有造价低、设计制作简单、易于部署到工业生产线等优点。

在图像处理方面,通过对采集得到的螺纹图像进行图像预处理、限制对比度的直方图均衡化处理、图像滤波、Zernike 矩亚像素边缘检测,成功提取到了螺纹的边界点。再利用球面折反射成像理论,将像素距离转换为实际距离,得到了内螺纹工件螺距的尺寸信息。实验证明了本文提出方案的可行性,平均测量误差为 0.018 5 mm,平均检测速度小于 0.5 s。能够满足螺纹参量高精度测量的要求,可以应用于工业现场的实际测量。此外,本文提出的球面折反射成像方案,也为其他圆柱形内壁工件的图像测量及缺陷检测提供了一种参考方案。

参考文献

- [1] 刘峰. 螺纹检测的机器视觉方法研究[D]. 天津:天津大学,2006.
LIU F. The study on the machine vision method of screw measurement[D]. Tianjin :Tianjin University,2006.
- [2] 高国琴,尹小琴,马履中,等. 新型虚拟轴三维坐标测量机构及其运动控制[J]. 仪器仪表学报,2006(1): 49-53.
GAO G Q, YIN X Q, MA L ZH, et al. A novel virtual coordinate measuring machine and its motion control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006 (1): 49-53.
- [3] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚. 三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2020,34(5):43-50.
WEI SH H, ZHANG J Y, FENG X G. Dynamic error analysis and compensation of CMM high speed

- measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2020,34(5):43-50.
- [4] 欧协锋. 普通螺纹合格性判断原则与局限性探讨[J]. 中国计量, 2018(1):112-114.
OU X F. Discussion on the principle and limitation of qualification judgment of common thread [J]. China Metrology,2018(1):112-114.
- [5] 张喜民,余奇颖,张金博,等. 基于机器视觉的手机尾插件精密测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2019, 40(10):47-54.
ZHANG X M, YU Q Y, ZHANG J B, et al. Research on precise measurement method of mobile phone tail plug-in based on machine vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2019,40(10):47-54.
- [6] 张伟,韩宗旺,程祥,等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. 光学精密工程,2021,29(9): 2168-2177.
ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, et al. Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision[J]. Optics and Precision Engineering, 2021,29(9):2168-2177.
- [7] 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.
SONG SH SH, HUANG F, JIANG Y B. Research progress of geometric measurement technology based on machine vision[J]. Eletronic Measurement Technology, 2021,44(3):22-26.
- [8] 江涛,李媛,贺晨龙. 基于轮廓角点检测的螺纹关键参数视觉测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022, 36(7):54-61.
JIANG T, LI Y, HE CH L. Visual measurement method of thread key parameters base on contour corner detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(7):54-61.
- [9] KOSAREVSKY S, LATYPOV V. Detection of screw threads in computed tomography 3D density fields: Versita, 10.2478/msr-2013-0043[P]. 2013.
- [10] LIN C F, LIN S F, HWANG C H, et al. Real-time image-based defect inspection system of internal thread for nut[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(8):2830-2848.
- [11] 王蕴哲,岳晓峰. 内螺纹机器视觉检测系统[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2017,38(2):189-193.
WANG Y ZH, YUE X F. Internal thread detection system based on machine vision [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2017, 38 (2): 189-193.

- [12] LI X, LI W, XIN H, et al. Single-lens multi-mirror laser stereo vision-based system for measuring internal thread geometrical parameters [J]. *Optics Express*, 2022, 30: 47625-47646.
- [13] LI X, ZHOU J, XIN H, et al. Vision measurement system for geometric parameters of tubing internal thread based on double-mirrored structured light [J]. *Optics Express*, 2022, 30: 47701-47719.
- [14] 李曦琳, 王向军, 李红伟. 球面镜折反射全向视觉系统理论研究[J]. *宇航计测技术*, 2008, 28(4):16-18.
LI X L, WANG X J, LI H W. Research on catadioptric omnidirectional vision system for the spherical mirror[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2008, 28(4):16-18.
- [15] 张裕, 张越, 张宁, 等. 基于逆深度滤波的双目折反射全景相机动态 SLAM 系统[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(11):1282-1289.
ZHANG Y, ZHANG Y, ZHANG N, et al. Dynamic SLAM of binocular catadioptric panoramic camera based on inverse depth filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11):1282-1289.
- [16] 田晓东. 折反射全景成像系统分析与设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2006(4):48-50.
TIAN X D. Analysis and design of catadioptric panorama image system [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(4):48-50.
- [17] 王晓杰, 莫绪涛, 陶新宇, 等. 基于机器视觉的低对比度物体尺寸测量研究 [J]. *光学技术*, 2022, 48(1):27-33.
WANG X J, MO X T, TAO X Y, et al. Research on low-contrast object size measurement based on machine vision [J]. *Optical Technique*, 2022, 48(1):27-33.
- [18] JIAO S, LI X, LU X. An improved Ostu method for image segmentation [C]. *International Conference on Signal Processing*. IEEE, 2007.
- [19] 高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. *自动化学报*, 2008(9):1163-1168.
GAO SH Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008(9):1163-1168.
- [20] 张函力, 李海伟, 于国栋, 等. 基于改进 Zernike 矩的铆接孔径亚像素检测方法研究 [J]. *航空制造技术*, 2022, 65(18):98-104.
ZHANG H L, LI H W, YU G D, et al. Research on sub-pixel detection method of riveting aperture size based on improved Zernike moment [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(18):98-104.

作者简介



张诗婧, 2021 年于南京工程学院获得学士学位, 现为安徽工业大学在读研究生, 主要研究方向为机器视觉、数字图像处理。
E-mail: zsjzsj990821@163.com

Zhang Shijing received her B. Sc. degree from Nanjing Institute of Technology in 2021. Now she is a M. Sc. candidate in Anhui University of Technology. Her main research interests include machine vision and digital image processing.



莫绪涛 (通信作者), 1999 年于天津大学获得学士学位, 2008 年于天津大学获得博士学位, 现为安徽工业大学副教授, 主要研究方向为工业视觉检测和计算成像研究。
E-mail: moxutao@ahut.edu.cn

Mo Xutao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 1999, Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. Now he is an associate professor in Anhui University of Technology. His main research interests include industrial visual inspection and computational imaging.