

基于内窥图像畸变校正的孔内表面尺寸测量方法

盛强^{1,2**}, 郑建明^{1*}, 陈婷¹, 杨秀秀³, 高羨明²¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710021;³西安理工大学经济与管理学院, 陕西 西安 710054

摘要 针对孔内表面缺陷尺寸测量难的问题,提出一种内窥图像校正方法以实现孔内表面尺寸测量。根据内窥成像原理,在考虑应用场景几何约束的情况下,将图像畸变分解为周向畸变和轴向畸变,将校正模型中的参数简化为图像中心坐标和一个非线性增长函数,进而提高了内窥镜图像边缘区域的校正精度。采用Hough变换和图像像素标定的方法得到相关参数,为克服轴向校正对标定结果的依赖,采用神经网络算法拟合包含像素相对位置和孔径的轴向校正函数。实验结果表明,基于像素标定的6组实验的平均测量误差为1.95%,准确度高。对于不具备标定条件的孔内表面缺陷,采用轴向校正函数进行校正和测量,3组实验的平均测量误差为6.75%,结果较为理想。所提出的校正方法通用性好、准确率高,可用于孔类零件及管道的自动化检测和智能检测。

关键词 测量; 畸变校正; 内窥图像; 尺寸测量; 孔内表面; 图像处理

中图分类号 TP391 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221502

1 引言

孔是各类机械加工及生产制造中最为常见的结构,长期以来针对孔内表面缺陷的检测尤其是缺陷尺寸的测量一直是困扰企业的难题^[1]。孔内表面缺陷如裂纹、划痕、锈蚀等具有较好的隐蔽性,其位置及尺寸直接影响孔的质量,若未被及时发现,易引发严重后果,如:应力不均导致的磨损、变形甚至结构坍塌;可燃及有害气体或液体的泄漏等。内窥镜具有延伸视野、拓展可视范围的优势,已广泛应用于医疗检测^[2-3]和工业检测领域^[4-5]。内窥镜镜头是典型的短焦距镜头,最大景深一般小于80 mm,最小景深受视场角和孔径影响,一般在5~15 mm之间,景深范围内的物体才可清晰成像于相平面^[6]。

采用内窥镜检测孔内表面缺陷时,真实的孔内表面与镜头主光轴平行,在成像平面上呈圆环状散射分布,这不利于识别缺陷的尺寸及大小。内窥成像系统的结构导致内窥图像中不同位置的像素存在不同程度的畸变,孔内表面尺寸测量的核心是对内窥图像进行畸变校正。内窥图像校正方法根据原理可分为基于标定的校正和基于投影的校正两类。基于标定的校正方法通过设置标定板(如棋盘格或点阵)获取镜头参数并对成像结果进行校正。Zhang^[7]基于同一目标的多张

不同角度图像,结合成像原理反求出相机参数并实现图像校正;Hartley等^[8]提出一种非迭代的方法,通过多张图像可同时获得畸变函数和相机参数。但工业应用中无法保证标定环境与测量环境的一致性,因此无法得到准确的校正及测量结果。

投影变换的校正方法是根据透视投影原理建立数学模型以反映成像过程,Smith等^[9]建立了多项式数学模型,用于反映内窥图像的非线性失真,在此基础上Vijayan等^[10]采用最小二乘法得到多项式模型的参数,Ahmed等^[11]利用非线性搜索技术并通过迭代得到模型参数。上述文献都以多项式反映内窥图像畸变,校正效果较为理想,但模型复杂,求解的资源消耗大。Mundhenk等^[12]将内窥图像失真近似表示为经纬模型,在保证经线上各像素点纵坐标不变的情况下,将横坐标均匀映射到校正后位置;Wang等^[13]将内窥图像畸变分解为径向畸变和理想像平面到传感器阵列平面的刚性变换两部分,将校正模型中的参数简化为两个角参数和两个线性参数;陈文艺等^[14]采用深度学习方法实现单张图像的畸变校正。上述研究采用不同方式实现了模型简化,在减少资源消耗的同时取得了较为理想的校正效果,但随着像素远离图像中心,算法的误差快速增大,而孔内表面的成像区域主要位于图像边缘区域,因此无法满足孔内表面缺陷检测需求。

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-08-12; 录用日期: 2022-08-29; 网络首发日期: 2022-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51905328)

通信作者: *zjm@xaut.edu.cn; **shengqiang@sust.edu.cn

为实现孔内表面尺寸的准确测量,本文将内窥镜图像畸变分解为周向畸变和轴向畸变,采用圆心检测和差值展开实现周向校正,采用轴向距离增长函数拟合和图像非线性拉伸实现轴向校正。针对不具备标定条件的孔内表面,采用神经网络算法拟合得到包含像素相对位置和孔径的轴向校正函数,克服了轴向校正对轴向距离增长函数的依赖,在提高内窥镜图像边缘区域校正精度的情况下实现孔内表面尺寸测量。

2 基本原理

2.1 内窥镜成像原理

工业内窥镜成像系统一般由一个镜头和多个点光

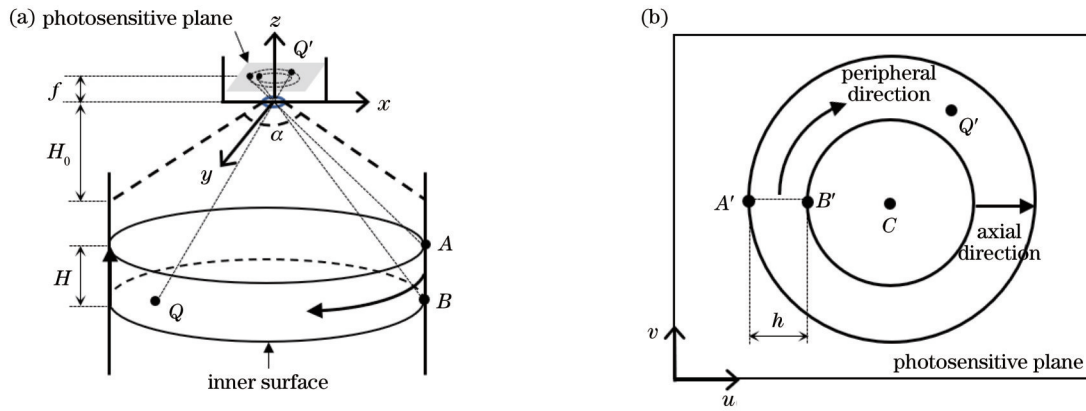


图 1 内窥镜成像原理。(a)空间坐标系;(b)相平面坐标系

Fig. 1 Endoscopic imaging principle. (a) Spatial coordinate system; (b) phase plane coordinate system

图 1(a)中 A 、 B 、 Q 为孔内表面上的点, AB 平行于孔轴线, H 为 AB 两点的轴向距离, f 为内窥镜焦距, α 为内窥镜视场角, H_0 为最小景深。图 1(b)中 A' 、 B' 、 Q' 是 A 、 B 、 Q 的像点, C 为镜头中心在相平面的投影, 亦可理解为图像中心, h 为孔内表面轴向距离 H 在相平面上对应的像素圆环宽度, 箭头分别表示孔的周向和轴向。

设 Q 点的空间坐标为 (x, y, z) , 其像点的空间坐标为 $Q'(x, y, f)$ 。根据小孔成像原理, 像点在相平面坐标系下的位置 $Q'(u, v)$ 可表示为

$$\begin{cases} u = f_x x / z + u_c \\ v = f_y y / z + v_c \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $f_x = f/dx$, $f_y = f/dy$, dx 和 dy 分别为图像中每个像素点在相平面 u 轴、 v 轴方向上的物理尺寸, 单位为 mm/pixel ; $C(u_c, v_c)$ 为图像中心坐标。根据三角函数关系, 孔内表面各点在空间坐标系下的 z 轴坐标与其像点在图像中的位置关系可表示为

$$z = \frac{fR}{\delta \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}}, \quad (2)$$

式中: R 为孔径; δ 为每像素代表的轴向距离, 可将 δ 理解为是由像素到图像中心的距离 $d = \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}$ 决定的非线性增长函数, 即轴

源组成, 当镜头主光轴与孔轴线完全重合时, 设内窥镜镜头中心为空间坐标原点。多个点光源对称分布于镜头外围 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 处, 由于点光源与镜头距离远小于内窥镜景深和孔径, 因此可近似认为光源与镜头位置重合。内窥镜光源以固定发光强度照射孔内表面某一点 Q , 当接收到光照后内表面对能量进行反射, 其中镜面反射部分无法进入内窥镜镜头, 只有朝向镜头方向的漫反射部分在感光平面上成像为点 Q' , 通过光电传感器将其转换为数字图像亮度信息^[15]。内窥镜图像校正的本质是寻找空间坐标系中物点 Q 与相平面坐标系中相点 Q' 间的映射关系。具体成像原理如图 1 所示, 其中图 1(a) 为空间坐标系 xyz , 图 1(b) 为相平面坐标系 uv 。

向距离增长函数 $\delta(d)$ 。

2.2 内窥镜图像校正原理

内窥镜图像畸变导致孔内表面缺陷轮廓变形, 无法客观反映缺陷信息。为实现内表面缺陷的准确测量, 需要建立相平面与孔内表面展开后的位置映射关系, 将畸变图像还原为符合人类视觉习惯的投影图像^[16]。本文根据内窥镜成像原理将图像中的畸变分为周向畸变和轴向畸变, 其中周向畸变体现为孔内表面不同高度的两段等长圆弧在内窥镜图像中长度不一致, 轴向畸变体现为孔内表面相同长度的母线在内窥镜图像中长度不相等。由于周向畸变和轴向畸变正交, 因此采用不同方法分别校正时, 不存在校正方法和校正效果间的相互干扰。假设校正后图像所在的平面为校正后坐标系 mn , 如图 2 所示。

图 2 中 A'' 、 B'' 、 Q'' 分别是图 1(b) 中 A' 、 B' 、 Q' 的校正后位置, 箭头同样代表孔的轴向和周向方向。内窥镜图像畸变校正的核心就是找到相平面坐标系 uv 中相点 Q' 与校正后坐标系 mn 中的像点 Q'' 间的映射关系。

根据成像过程, 孔内表面同一轴向位置度的点在校正后平面上应具有相同的 n 轴坐标, 因此周向校正的目标是将内窥镜图像中以图像中心 $C(u_c, v_c)$ 为圆心的像素圆环校正为 mn 坐标系中的一条水平直线。设校正后图像中 Q'' 的坐标为 (m, n) , 根据位置映射关系,

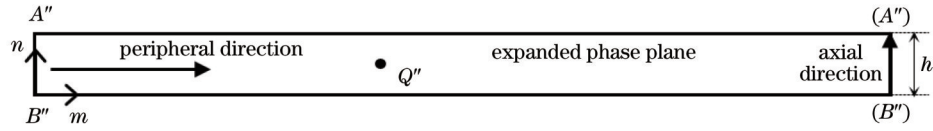


图 2 内窥镜图像校正后坐标系

Fig. 2 Coordinate system of corrected endoscopic image

可得

$$\begin{cases} u = (m - U_{A'}) \cos \varphi + u_c \\ v = (n - V_{A'}) \sin \varphi + v_c \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\varphi = \arctan \frac{2\pi \sqrt{(u - u_c)^2 + (v - v_c)^2}}{u_c - u_{A'}}$ ； $(U_{A'}, V_{A'})$

为像平面中最左侧 A' 点的坐标。校正后图像的高度为 h ，宽度为 $2\pi(u_c - u_{A'})$ 。内窥镜图像中心 (u_c, v_c) 可通

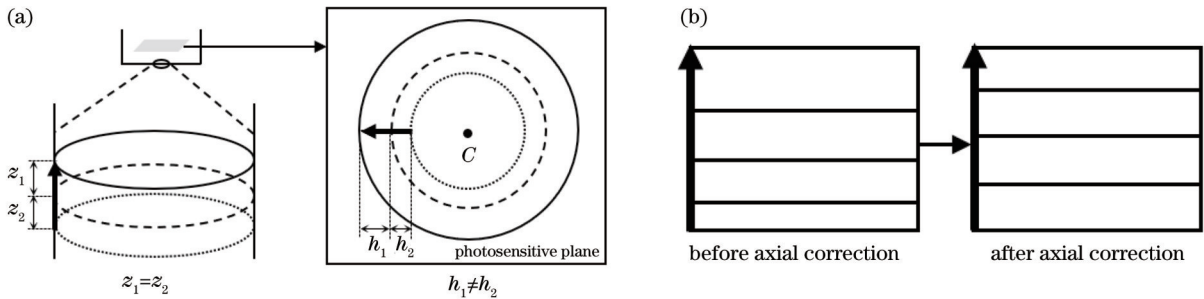


图 3 轴向校正原理。(a)畸变效果；(b)校正过程

Fig. 3 Principle of axial correction. (a) Distortion effect; (b) correction process

轴向校正的具体方法是对周向校正后的图像在垂直方向进行非线性拉伸,其核心是确定轴向距离增长函数 $\delta(d)$,具体函数可通过对已知尺寸的孔内表面像素标定得到。

3 实验与分析

3.1 周向校正

采用卡尔史托斯 SP100 内窥镜拍摄 $\Phi 20$ 孔零件内表面,拍摄方案如图 4(a)所示。内窥镜探头外径为 6 mm,内窥镜镜头位于探头前端面中心,镜头视场角为 80° ,镜头最大景深为 50 mm。拍摄目标是紧贴于孔内壁且已知尺寸的透明标定板,如图 4(b)所示。为保证镜头主光轴始终与孔轴线重合,自制外径为 19.5 mm 的内窥镜探头套筒以保证主光轴与孔轴线重合,如图 4(c)所示。拍摄结果如图 4(d)所示。

校正前需对采集到的孔内表面图像进行预处理^[17],包括灰度转换、中值滤波和拉普拉斯锐化。考虑到在孔的加工过程中刀具运行轨迹为圆弧的特点,采用 Hough 变换^[18]方法检测内窥镜图像中背景纹理的圆心,并将其视为图像中心 $C(u_c, v_c)$ 。首先根据图像灰度值的不连续性检测内窥镜图像边缘信息,然后利用

过 Hough 圆心检测方法获得。

根据内窥镜成像原理,孔内表面任意母线在内窥镜图像中应该与从图像中心发出的射线重合,如图 3(a)所示,孔内表面等距的圆环($z_1 = z_2$)在内窥镜图像中的距离不相等($h_1 \neq h_2$),在任意一条从图像中心发出的射线上,越靠近图像中心的像素代表的实际轴向距离越大。因此轴向校正的目标是使得各像素代表的轴向距离相等,如图 3(b)所示,图中箭头代表孔的轴向。

Hough 变换算法检测具有圆弧特征的边缘,通过查找参数空间中最大圆心重合值得到最符合圆弧特征的轮廓和其圆心坐标,并将圆心视为图像中心。图像预处理及圆心检测结果如图 5 所示,其中图 5(a)为预处理结果,图 5(b)为边缘检测结果,图 5(c)为圆心检测结果。

以图像中心坐标为基础,根据式(3)并采用差值展开算法得到周向校正结果,如图 6 所示。

通过图 6 可以发现,校正后图像中的黑色标定块已由内窥镜图像中的梯形校正为近似矩形,统计校正后图像中每行 6 个标定块的宽度均值,并基于 9 组均值计算组间标准差,以此来反映图像不同位置处的校正效果差异,统计结果如表 1 所示。通过表 1 可以看出:宽度的组间标准差仅为 0.351,经不同孔径的多次实验后发现宽度标准差主要分布于 0.3~0.8,单张图像不同位置的校正结果相差均小于 1 pixel,说明基于图像中心的差值展开能够有效校正内窥镜图像的周向畸变,校正精度主要依赖于图像中心坐标的准确度。校正后图像中每像素代表的周向弧长 i 由孔径尺寸 R 和相平面最大圆半径 r_{\max} 决定,即 $i = R/r_{\max}$ 。由表 1 可得,标定块宽度平均值为 37.96 pixel,标准差为 0.351 pixel。

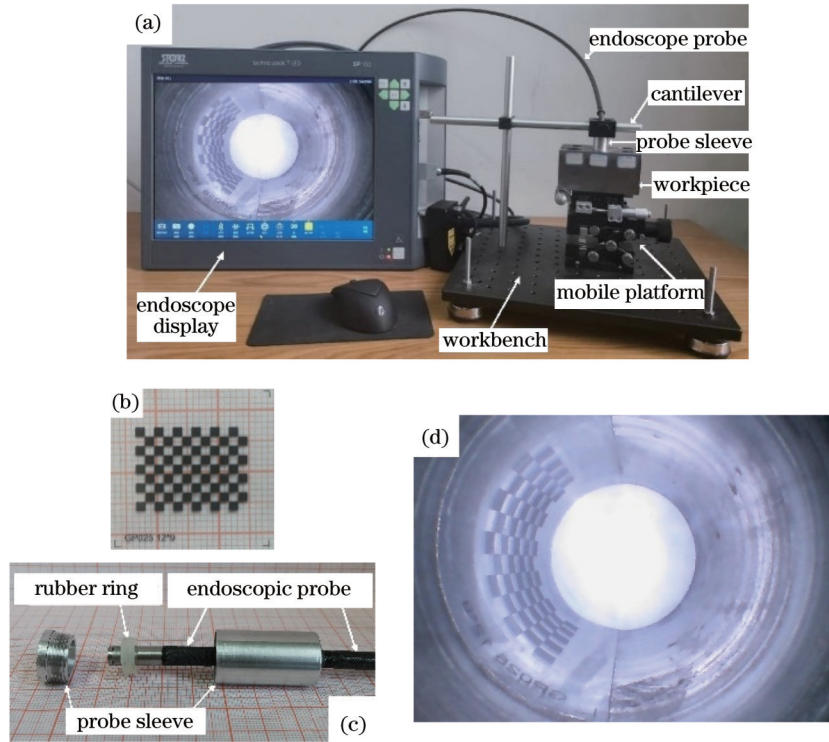


图 4 测量方案及设备。(a)测量方案;(b)标定板;(c)内窥镜探头套筒;(d)内窥图像

Fig. 4 Measurement scheme and equipment. (a) Measurement scheme; (b) calibration board; (c) endoscopic probe sleeve; (d) endoscopic image



图 5 预处理及圆心检测结果。(a)预处理结果;(b)边缘检测结果;(c)圆心检测结果

Fig. 5 Preprocessing and center detection results. (a) Preprocessed result; (b) edge detection result; (c) center detection result

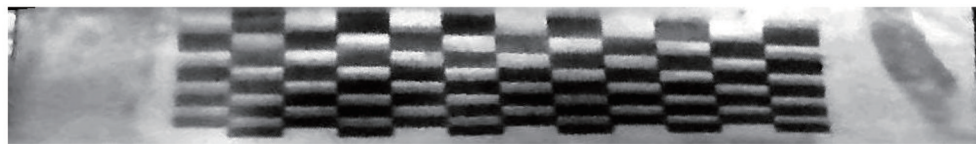


图 6 周向校正结果

Fig. 6 Circumferential correction result

表 1 标定块宽度统计

Table 1 Calibration block width statistics

unit: pixel

Line number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
After circumferential correction	37.33	37.67	37.83	38.17	38.17	38.33	38.33	38.17	37.67

3.2 轴向校正

轴向校正的目标是使得图 6 中的标定块具有相同高度,核心是确定轴向距离增长函数。当孔径 R 固定时,根据已知尺寸的背景信息及像素到镜头的真实轴

向距离进行函数拟合,并根据拟合结果对图像进行非线性拉伸。

拟合时首先确定内窥图像最大圆半径 r_{max} ,利用镜头视场角 α 和孔径 R 确定最大圆上各像素对应的孔内

表面到镜头的垂直距离,即最小景深 $H_0 = R \cot(\alpha/2)$,以此为基准根据已知尺寸的孔内背景进行标定。以图 6 为例的拟合结果为 $\delta(d) = 12820d^{-2.063} + 0.01692$,拟合优度 $R^2 = 0.981$,均方根

误差(RMSE)为 0.008,结果较为理想。以 $\delta(d)$ 为基础对周向校正后图像进行非线性拉伸,结果如图 7 所示。

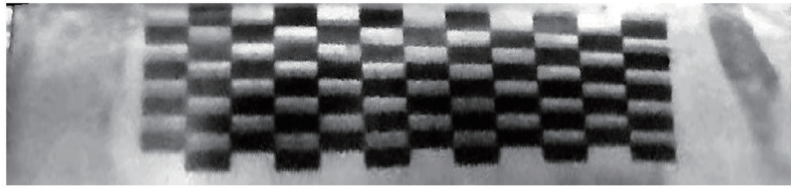


图 7 轴向校正结果

Fig. 7 Axial correction result

通过图 7 可以看出,校正后图像中的黑色标定块已基本具有相同高度,分别统计轴向校正前后图像中

各行标定块的高度均值并计算组间标准差,统计结果如表 2 所示。

表 2 标定块高度统计

Table 2 Calibration block height statistics

unit: pixel

Correction method	Height									Mean value	Standard deviation
	Line number	Line number	Line number	Line number	Line number	Line number	Line number	Line number	Line number		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Before axial correction	21.33	18.50	16.00	13.50	11.83	10.67	10.17	9.47	9.16	13.40	4.322
After axial correction	21.25	20.96	20.81	20.37	20.75	20.92	21.57	21.35	21.67	21.07	0.421

通过表 2 可以发现,周向校正后标定块高度的标准差由 4.322 pixel 下降到 0.421 pixel,说明基于轴向距离增长函数的非线性拉伸能够取得较好的轴向校正效果,校正精度主要依赖于轴向距离增长函数拟合误差的大小。校正后图像每像素代表的轴向距离 j 由标定物的真实高度和其展开图像中的垂直像素数决定。

代表的轴向距离 j ,影响尺寸测量的轴向准确度。

通过上述实验可以发现,轴向距离增长函数 $\delta(d)$ 的标定过程需要借助已知尺寸的缺陷背景信息,这限制了其在工业现场的应用。为克服轴向校正对 $\delta(d)$ 的依赖,通过实验获得不同孔径下轴向距离增长函数拟合数据,采用神经网络模型建立包括孔径 R 和像素到图像中心距离 d 的映射关系,即 $\delta^*(d, R)$,其中: R 决定了校正后图像中单位像素代表的周向弧长 i ,影响尺寸测量的周向准确度; d 决定校正后图像中单位像素

在标准网格纸上打印固定尺寸的正五角星模拟内表面缺陷,分别放入 $\Phi 12$ 、 $\Phi 16$ 、 $\Phi 21$ 、 $\Phi 25$ 、 $\Phi 28$ 和 $\Phi 32$ 的孔中进行拍摄,以网格纸上的交点位置为依据进行轴向距离增长函数拟合,并以此为基础进行畸变校正。由于周向和轴向校正相对独立,校正后图像每像素代表的周向弧长 i 和轴向距离 j 不一致,校正结束后需对图像横纵比进行调整,具体方法是在图像垂直方向进行等比例拉伸,拉伸倍数为 i/j ,此时单位像素代表的真实孔内表面尺寸为 i^2 ,校正结果如表 3 所示。通过表 3 可以看出校正后的模拟缺陷均已恢复为正五角星,校正效果理想,说明本文提出的校正方法具有较好的通用性,可用于不同孔径的孔内表面图像校正。

基于上述实验结果拟合包含孔径 R 和像素相对位

表 3 不同孔径实验结果

Table 3 Experimental results of different apertures

Image	$\Phi 12$	$\Phi 16$	$\Phi 21$	$\Phi 25$	$\Phi 28$	$\Phi 32$
Original images						
Corrected image						

置 d 的轴向校正函数 $\delta^*(d, R)$ 。由于该问题为非线性最小二乘问题,采用 MATLAB 神经网络拟合工具箱进行拟合,模型的输入为 72 组包含孔径 R 和像素相对位置 d 的二元数组,输出为相应条件下单位像素代表的孔内表面轴向距离,训练函数选用 Levenberg-Marquardt 的 `trainlm` 函数,设置 20 个神经元,误差函数为均方误差 (MSE),经多次训练后得到拟合结果的最小误差为 4.1574×10^{-5} ,此时的迭代次数为 11 次,结果如图 8 所示。三维曲面拟合结果如图 9 所示,拟合效果理想。根据拟合结果,在已知图像中心坐标和孔径的情况下,周向校正结果的非线性拉伸得以实现,克服了轴向校正对 $\delta(d)$ 标定结果的依赖。

3.3 分析与讨论

为评价基于轴向距离增长函数 $\delta(d)$ 的孔内表面

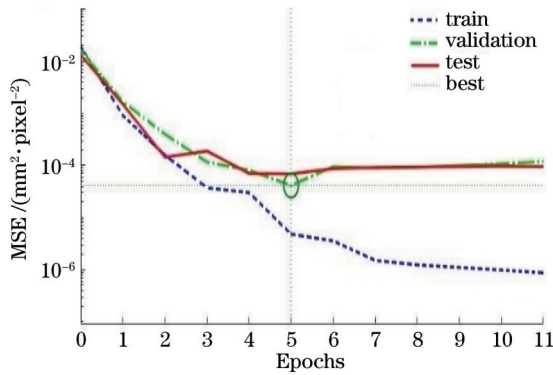


图 8 网络模型的 MSE
Fig. 8 MSE of network model

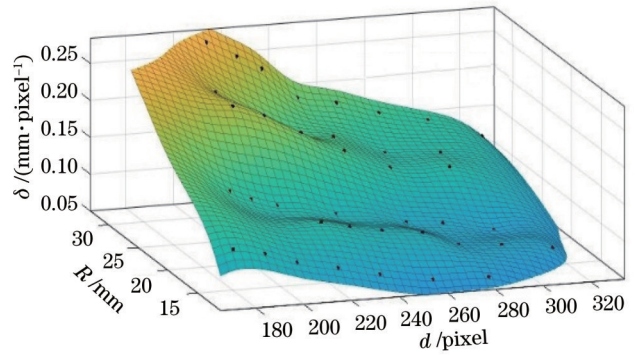


图 9 三维曲面拟合结果
Fig. 9 3D surface fitting result

尺寸测量的准确度,读取表 3 中不同孔径校正结果的五角星顶点坐标并计算校正后图像中五角星边长,基于单位像素代表的真实孔内面积 i^2 确定测量误差,结果如表 4 所示。

表 4 中的每一行代表 1 组不同孔径的校正及测量实验,每组实验的校正误差都是基于 5 条边的平均长度确定,研究过程中本课题组针对每个孔径均完成了至少 3 次的实验,其测量误差均小于 5%。以表 4 所示的 6 组实验为基础,得到基于轴向距离增长函数标定的平均测量误差仅为 1.95%,准确度高,但像素距离标准差均值为 9.07,说明不同方向的校正效果仍存在较大差异,其主要原因是:图像中心检测准确度不够高,导致环形图像展开时部分位置的像素坐标映射出现偏差,另外 $\delta(d)$ 函数拟合过程中不可避免地存在误

表 4 像素位置及测量误差统计
Table 4 Pixel position and measurement error statistics

Parameter	Vertex coordinate	Edge length pixel distance / pixel	Mean value / pixel	Standard deviation	Unit pixel size / (mm × mm)	Measuring result /mm	Real size / mm	Error /%
Φ12	(1569,46), (1910,287),	665.04, 667.82,	665.45	2.05	0.0182 × 0.0182	12.11	12	0.92
	(1776,678), (1373,684),	664.83, 667.43,						
	(1248,274)	662.13						
Φ16	(1596,15), (1836,197),	498.78, 478.87,	485.61	10.20	0.0250 × 0.0250	12.14	12	1.17
	(1728,496), (1458,491),	471.62, 495.60,						
	(1353,210)	483.17						
Φ21	(1557,237), (1904,518),	768.57, 734.20,	748.44	19.10	0.0328 × 0.0328	24.55	25	1.80
	(1761,978), (1327,972),	748.14, 770.15,						
	(1183,503)	721.16						
Φ25	(1619,51), (1970,295),	696.66, 699.10,	697.59	3.39	0.0368 × 0.0368	25.67	25	2.68
	(1836,713), (1418,724),	697.80, 702.37,						
	(1278,294)	692.00						
Φ28	(1614,23), (1927,208),	593.63, 605.35,	600.84	12.04	0.0424 × 0.0424	25.48	25	1.92
	(1822,579), (1451,582),	617.87, 582.28,						
	(1322,216)	605.05						
Φ32	(1653,19), (1914,205),	530.96, 524.76,	523.72	7.64	0.0462 × 0.0462	24.20	25	3.20
	(1817,524), (1502,530),	513.59, 532.84,						
	(1398,227)	516.47						

差。若希望进一步提高准确度,可以考虑增加标定背景,从而提高圆心检测准确度和 $\delta(d)$ 拟合精度。

为验证基于轴向校正函数 $\delta^*(d, R)$ 的孔内表面尺寸测量的准确度,设计以下 3 组实验:第 1 组实验拍摄 $\Phi 18$ 孔内表面,其内部对称分布 4 个宽度约 1 mm 的线槽,如图 10(a)所示,测量校正后图像中的线槽间距以验证校正算法的周向校正能力;第 2 组实验拍摄 M18 螺纹孔的内表面,如图 10(b)所示,以其中径近似代替孔径,即 $R \approx 16.376$ mm,测量校正后图像中的明暗亮带宽度以验证校正算法的轴向校正能力;第 3 组实验采用线切割方法切开 $\Phi 18$ 孔侧壁,用碳素笔在切出的孔内表面点出圆形斑点以模拟因氧化产生的锈点,然后将切出的侧壁放回切割前位置并保持对齐后拍摄,

通过测量校正后图像圆形斑点直径验证校正算法的综合校正能力。实验过程及结果如图 10 所示,其中图 10(a)为实验 1 的拍摄结果,图 10(b)为实验 2 的拍摄结果,图 10(c)为带有模拟缺陷的 $\Phi 18$ 孔零件,图 10(d)为模拟缺陷,图 10(e)为实验 3 的拍摄结果。

完成校正后利用边缘检测算法^[19]提取校正后图像的轮廓用于像素距离读取,校正结果及边缘检测结果如图 11 所示,其中图 11(a)为实验 1 的校正结果,图 11(b)为实验 1 的轮廓信息,图 11(c)为实验 2 的校正结果,图 11(d)为实验 2 的轮廓信息,图 11(e)为实验 3 的模拟缺陷局部放大图,图 11(f)为实验 3 的校正结果,图 11(g)为实验 3 的轮廓信息,白色箭头代表尺寸测量的位置。

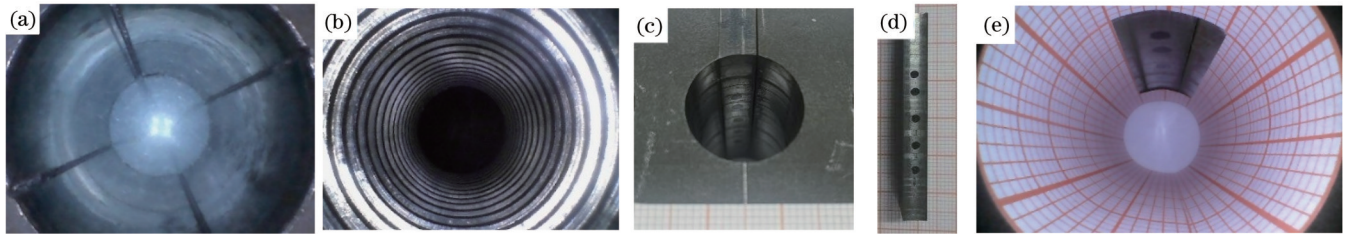


图 10 实验过程及拍摄结果。(a)带线槽的 $\Phi 18$ 孔内窥图像;(b) M18 螺纹孔内窥图像;(c) $\Phi 18$ 孔;(d)模拟缺陷;(e) $\Phi 18$ 孔内窥图像

Fig. 10 Experimental process and shooting results. (a) Endoscopic image of $\Phi 18$ hole with trunking; (b) endoscope image of M18 thread hole; (c) $\Phi 18$ hole; (d) simulated defect; (e) endoscopic image of $\Phi 18$ hole

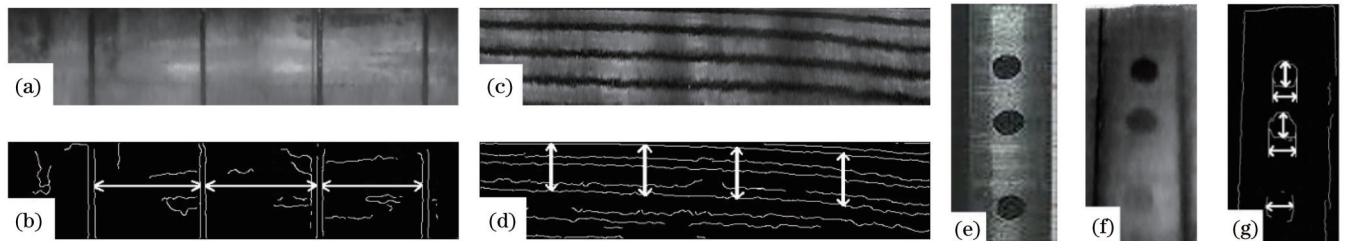


图 11 校正及边缘检测结果。(a)实验 1 的校正结果;(b)实验 1 的轮廓信息;(c)实验 2 的校正结果;(d)实验 2 的轮廓信息;(e)实验 3 的缺陷局部放大;(f)实验 3 的校正结果;(g)实验 3 的轮廓信息

Fig. 11 Correction and edge detection results. (a) Correction result of experiment 1; (b) contour information of experiment 1; (c) correction result of experiment 2; (d) contour information of experiment 2; (e) defect local amplification of experiment 3; (f) correction result of experiment 3; (g) contour information of experiment 3

通过观察可以看出图 11(a)中 4 个线槽的轮廓线相互平行且与图像底部垂直,间距几乎相等。图 11(c)中螺纹内部明暗亮带区分明显且均呈倾斜状分布,与螺纹内表面真实形貌一致。图 11(f)中三个模拟锈点的轮廓及相对位置与真实情况一致,说明校正效果较为理想。根据图像轮廓信息,测量像素距离并计算其所代表的真实孔内表面尺寸。实验 1 共提取出 297 组轮廓线间像素数距离,实验 2 共提取出 469 组轮廓线间像素距离,实验 3 直接读取 5 组反映模拟缺陷直径的像素距离,根据像素距离得到测量结果及真实值,结果如表 5 所示。

通过表 5 可以得出 3 组实验的平均测量误差约为 6.75%,相较于采用轴向距离增长函数 $\delta(d)$ 的平均测量误差 1.95%,采用轴向校正函数 $\delta^*(d, R)$ 的误差明显增加,其主要原因是实验对象的 18 mm 和 16.376 mm 孔径并不是神经网络拟合的数据源,因此校正及测量结果的误差有所增加。实验过程中存在一定的系统误差,内螺纹展开图像中一个明、暗亮带的宽度之和并非严格意义上的一个螺距宽度。但对于工业现场的实际需求而言,针对不具备标定条件的孔内表面,采用轴向校正函数 $\delta^*(d, R)$ 同样可以取得较理想的校正及测量结果,该方法具有较大的应用价值。

表 5 像素位置及误差统计
Table 5 Pixel position and error statistics

Experiment	Sample size	Mean value of pixel distance / pixel	Standard deviation of pixel distance	Unit pixel size / (mm×mm)	Measuring result /mm	Real size / mm	Error / %
Experiment 1	268	111.51	4.92	0.1095×0.1095	12.21	13.14	7.08
Experiment 2	479	48.43	2.42	0.1095×0.1095	5.30	5.00	6.06
Experiment 3	5	60.40	5.46	0.0323×0.0323	1.95	2.10	7.10

4 结 论

提出基于内窥成像原理的孔内图像畸变校正及测量方法,采用周向校正加轴向校正的方法将内窥图像还原为符合视觉习惯的正投影图像并进行尺寸测量,通过实验验证了所提方法的可行性和准确度。具体结论包括:1)本文提出的方法能够有效实现内窥图像校正并实现孔内表面尺寸测量,在孔内表面具备标定条件时,6组实验的结果平均测量误差为1.95%,在不具备标定条件的情况下,采用基于神经网络的轴向校正函数得到的3组实验的平均测量误差约为6.75%,准确度较高;2)校正及测量方法对孔径不敏感,测量准确度不受检测对象的影响,具有较好的适用性;3)图像中心的坐标和轴向距离增长函数是影响图像校正和缺陷测量准确度的关键参数,为进一步提高检测精度,检测时可在孔内表面放入带有纹理的标定纸以提高圆心检测和轴向距离增长函数拟合的精度。本文提出的内窥图像畸变校正及缺陷测量方法能够快速准确测量孔内表面缺陷,未来可应用于孔类零件及管道的自动化检测和智能检测领域。

参 考 文 献

- [1] Shang H X, Gao J X. Theories and industrial applications of optical interferometric NDT techniques: a review[J]. *Insight*, 2009, 51(5): 240-251.
- [2] 钟向红, 张包铮, 林美荣, 等. 血管内窥镜图像畸变的分析和校正[J]. *中国激光*, 2003, 30(4): 377-379.
Zhong X H, Zhang B Z, Lin M R, et al. Analysis and correction of angioscope image distortion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(4): 377-379.
- [3] Kaur M, Lane P M, Menon C. Scanning and actuation techniques for cantilever-based fiber optic endoscopic scanners: a review[J]. *Sensors*, 2021, 21(1): 251.
- [4] Martelli S, Mazzei L, Canali C, et al. Deep endoscope: intelligent duct inspection for the avionic industry[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(4): 1701-1711.
- [5] Iyer S, Sinha S K. A robust approach for automatic detection and segmentation of cracks in underground pipeline images[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(10): 921-933.
- [6] Chen H S, Lin Y H. An endoscopic system adopting a liquid crystal lens with an electrically tunable depth-of-field[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18079-18088.
- [7] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [8] Hartley R, Kang S B. Parameter-free radial distortion correction

with center of distortion estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(8): 1309-1321.

- [9] Smith W E, Vakil N, Maislin S A. Correction of distortion in endoscope images[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1992, 11(1): 117-122.
- [10] Vijayan A K, Kumar S, Radhakrishnan D. A new approach for nonlinear distortion correction in endoscopic images based on least squares estimation[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1999, 18(4): 345-354.
- [11] Ahmed M, Farag A. Nonmetric calibration of camera lens distortion: differential methods and robust estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(8): 1215-1230.
- [12] Mundhenk T N, Rivett M J, Liao X Q, et al. Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4197: 181-190.
- [13] Wang J H, Shi F H, Zhang J, et al. A new calibration model of camera lens distortion[J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41(2): 607-615.
- [14] 陈文艺, 许洁, 杨辉, 等. 基于深度学习的单张图像畸变校正[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(24): 241504.
Chen W Y, Xu J, Yang H, et al. Distortion correction of single image based on deep learning[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 241504.
- [15] Sheng Q, Zheng J M, Shi W C, et al. Measurement and modeling of reflection characteristics of hole inner surface based on endoscopic image[J]. *Measurement*, 2022, 190: 110742.
- [16] 景文博, 高雪峰, 黄炳坤, 等. 圆柱物体内壁的锥面折反射全景图像展开[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0311002.
Jing W B, Gao X F, Huang B K, et al. Expansion of conical catadioptric panoramic image of inner surface of cylindrical objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0311002.
- [17] 石照耀, 方一鸣, 王笑一. 齿轮视觉检测仪器与技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(14): 1415006.
Shi Z Y, Fang Y M, Wang X Y. Research progress in gear machine vision inspection instrument and technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(14): 1415006.
- [18] 孙丰荣, 刘积仁. 快速霍夫变换算法[J]. *计算机学报*, 2001, 24(10): 1102-1109.
Sun F R, Liu J R. Fast Hough transform algorithm[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(10): 1102-1109.
- [19] 梁晋欣, 张乐, 孟余耀, 等. 改进的玉米植株轮廓提取方法[EB/OL]. (2022-07-18) [2022-07-20]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CAPJ&dbname=CAPJLAST&filename=JGDJ202207130EU&uniplatform=NZKPT&v=cDi37wmKJEoXrBtF3jd1xpF2H_2LvxLxRoQSQpzKQHJyLnruusSw6MzIoHqONxn.

Measurement Method of Inner Surface Size of Hole Based on Distortion Correction of Endoscopic Image

Sheng Qiang^{1,2**}, Zheng Jianming^{1*}, Chen Ting¹, Yang Xiuxiu³, Gao Xianming²

¹*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, Shaanxi, China;*

²*College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, 710021, Shaanxi, China;*

³*School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Holes are the most common form of parts in machining and manufacturing. Enterprises have been long suffered from the inner surface defect detection of holes, especially the measurement of inner surface size. With the development of image processing technology and miniaturization of imaging elements, inner surface defect detection based on endoscopic images has been widely used in mechanical manufacturing, aerospace, and other fields. When endoscopes are applied to detect the inner surface defects, the real inner surface is parallel to the main optical axis of the lens and exhibits a circular scattering distribution on the imaging plane, which is not conducive to identifying the contour and size of the defects. Aiming at the difficulty in measuring the inner surface defect size of the hole, this paper proposes an endoscope image correction method to realize the inner surface size measurement.

Methods According to the mapping relationship between spatial coordinates and phase plane coordinates in the endoscopic imaging system, the endoscopic image distortion is divided into circumferential distortion and axial distortion. In the case of adding geometric constraints in the application scene, the parameters in the correction model are simplified to a central coordinate and a nonlinear parameter, which improves the correction accuracy of the edge region of the endoscope image. The Hough transform and difference expansion are adopted to process the endoscopic image to realize the circumferential correction, and the axial correction is performed by pixel calibration and nonlinear stretching of the circumferential corrected image. The paper utilizes the neural network algorithm to fit the axial correction function including the relative positions of pixels and apertures based on the calibration experiments of different apertures, thus overcoming the dependence of the axial correction on the calibration results. Additionally, the measurement of inner surface defects of holes without calibration conditions is obtained.

Results and Discussions When the inner surface of holes is qualified for calibration, the distortion correction of six kinds of endoscope images with different apertures is carried out with the regular pentagram of known size as the experimental object. The average measurement error of six groups of experiments is 1.95%, and the measurement accuracy is high. In the experimental group, the average standard deviation of the side length of the pentagram after correction is 9.07, which indicates that there is still a large difference in the correction effect in different directions. The main reason is that the accuracy of image center detection is not high enough. It shows that the proposed correction method has good universality. When the inner surface of the hole does not meet the calibration conditions, the simulated defects of the slot hole, the threaded hole, and the inner surface are taken as experimental objects, and the images are corrected. The average measurement error of the experiment is about 6.75%, which is higher than that of the hole with calibration conditions, but it still has great application value for the actual needs of the industrial field.

Conclusions In this paper, a method for distortion correction and measurement of in-hole images based on the endoscopic imaging principle is proposed. The method of circumferential correction and axial correction is adopted to restore the endoscopic image to an orthographic image that conforms to the visual habit and measure the size. The feasibility of the method is verified by experiments and the factors affecting the detection accuracy are discussed. The specific conclusions are as follows. 1) The method based on image processing can effectively realize the endoscopic image correction and the defect measurement, and the accuracy is high. 2) The measurement method is not sensitive to the aperture, and the measurement accuracy is not affected by the test object, so the method has good applicability. 3) The coordinates of the image center and the axial distance growth function are the key parameters that affect the accuracy of image correction and defect measurement. For further improvement of detection accuracy, a textured calibration paper can be placed on the inner surface of the hole during the detection to improve the accuracy of circle center detection and axial distance growth

function fitting. As the proposed correction method has good versatility and high accuracy, it can be used for automatic detection and intelligent detection of holes and pipelines.

Key words measurement; distortion correction; endoscopic images; size measurement; inner surface of hole; image processing