

文章编号:1007-1180(2011)05-0032-06

# 基于面阵 CCD 图像检测的 光电影像测量系统

张馥生<sup>1</sup>, 陈琦<sup>1</sup>, 陈玉宽<sup>1</sup>, 刘铁军<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春工业大学, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 图像检测技术可应用于零件微小间隙的测量。本文依据远心光学成像, 将被测零件单元光学成像至面阵 CCD 相机靶面, 对图像进行去滤波除噪、图像增强, 将 Sobel 运算应用于基于梯度算法的图像边缘检测, 并用修正实测标定系数的方法提高实测精度, 能够胜任生产中不同环境下的微小间隙测量。实验结果表明, 测量精度为  $6\mu\text{m}$ , 基本满足自动影像测量稳定可靠、精度高等要求。

**关键词:** 图像测量; 间隙; 中值滤波; 边缘检测; Sobel

中图分类号: TB96T

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112805.0032

## Photoelectric Image Measurement System based on Area CCD Detection

ZHANG Fu-sheng<sup>1</sup>, CHEN Qi<sup>1</sup>, CHEN Yu-kuan<sup>1</sup>, LIU Tie-jun<sup>2</sup>(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,**Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*2. *Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)*

**Abstract:** It makes use of image detection technology in measuring minuteness aperture between accessories. According to telecentric optics imaging, the measured accessory is imaged to the target of area CCD camera. Meanwhile the image is denoised by filter and enhanced. The Sobel operation is applied to image edge detection based on gradient algorithm, and the actual measurement precision is increased by modifying calibration coefficient. The advanced method in this paper is competent for measuring minuteness aperture in different

\* 基金项目: 国家自然科学基金资金项目 (No. 07252SP070)

environments. The experimental results indicate that the precision of measurement is  $6\ \mu\text{m}$ . It can satisfy the system requirements of non-contact, online, real time, higher precision and rapid speed, as well as stabilization.

**Keywords:** image measurement; aperture; median filter; edge detection; Sobel operation

## 1 引言

CCD (Charge coupled devices, 电荷耦合器件) 是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体集成光电器件<sup>[1]</sup>。

CCD 图像测量技术是测量、图像传感、图像处理等技术的有机融合, 由于它在检测时具有非接触性、高精度、在线动态检测、测量速度快及检测智能化的特点, 能适应诸多特殊测试场合。近年来, 在工业测试和自动化领域的应用越来越广, 甚至开始应用于航空航天和精密测试领域。以 CCD 为图像传感器的测量方法具有非接触、高速度、信息量丰富等诸多优点, 易于与数字设备连接, 便于图像处理。因此, 基于 CCD 的图像测量技术得到了广泛应用。在 CCD 二维图像测量方面, 文献 [2] 介绍了它在微型齿轮测量中的应用, 实测精度达到了  $6\ \mu\text{m}$  以内。文献 [3] 将该技术与数控技术结合, 在曲面加工中表面精度的在线测量中得到了很好的应用。

本文提出的检测方法是基于面阵 CCD 成像、应用影像测量软件进行图像处理的一种先进的非接触式测量方法, 本系统应用于小孔 ( $\varphi 0.3\sim 0.5\ \text{mm}$ ) 的直径、间距尺寸及其位置精度的光电视频在线检测。

## 2 测量系统设计

### 2.1 系统工作原理

测量系统主要包括光学视像技术、光电信号转换技术、图像数据处理技术及几何参数评价软件等, 其测量原理流程如图 1 所示。

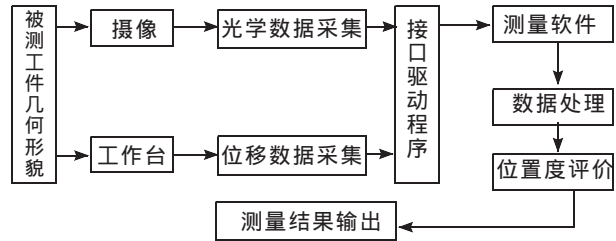


图1 影像测量系统原理图

### 2.2 影像检测系统的工作原理

该系统依据远心光学成像原理, 将被测单元光学成像至面阵 CCD 相机靶面, 然后对图像进行处理, 由影像测量软件对图像中需要测量的几何图元进行图像滤波除噪、图像增强、图像边缘粗定位、边缘精确定位 (根据检测精度进行亚像素定位等)、特征点的定位、图元拟合、对要测量的具体图元进行计算, 并结合工作台光栅尺实现对被测物体的非接触测量。

## 3 系统组成

### 3.1 光学照明

CCD 非接触式直径及不规则度测量系统以光电器件 CCD 作为接收器, 属于光电能量转换系统。因此, 光学照明是本系统中的重要部分。照明方案的选择对成像质量起着关键作用, 良好的照明环境可以使物体成像平面的界限清晰、对比明显、亮度均匀, 从而提高图像边缘检测的精度。本文中的光学照明系统平分为 4 个象限, 对立两个象限为一组 ( 、 为一组; 、 为一组)。每个象限有 2 个灯头, 光源中心轴线与光学系统光轴成  $45^\circ$  角, 每个灯头内有 12 个高亮红光 LED, 工作时可启动一组或两

组。采用高亮度的红色 LED 环形光源, 以低角度暗视场<sup>[4]</sup>的方式对目标进行均匀照射, 这样做有利于强调表面高度的改变, 提亮散射表面, 使安装孔的形状和间距得到加强。照明具有象限 LED 环形辅助光照明系统, 可以根据检测需要控制、选择和调节不同象限光的照明及光线强度, 提高工件边缘位置的照明效果 (如图 2)。

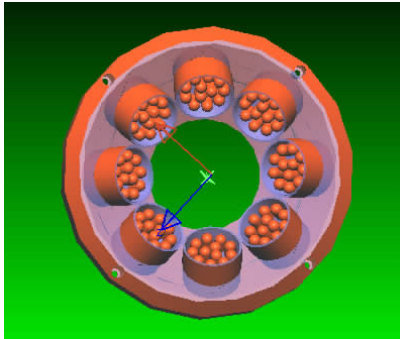


图 2 影像测量系统光学照明示意图

### 3.2 光学镜头

为保证工作过程中测量精度不受离焦的影响, 系统采用远心光路的方案。采用两套光学镜头, 一套倍率为 1 倍, 用于精度较高的测量, 测量角度为 45° 以下的气膜孔; 一套倍率为 0.5 倍, 用于精度较低的测量, 测量角度可以达到 75°。两套镜头齐焦, 可以实现方便互换。

电视测量是一种光电式非接触测量, 光电图像传感器是电视测量系统的关键部件。CMOS 图像传感器具有无几何失真、无惰性、使用方便、可靠性好、体积小、重量轻、抗冲击振动等许多优点, 是目前电视测量系统中比较理想的光电传感器。为增加电视系统对微弱信号的探测能力, 保证电视系统测量精度, 采用高灵敏度、高分辨率、低噪声 1/2" CMOS 摄像机, 该摄像机不仅灵敏度高、噪声小, 而且分辨率也很高, 有利于微弱信号的探测以及提高测量精度。

### 3.3 图像处理系统软件

图像处理软件是基于 Windows 的机器视觉开发软件, 操作简单方便, 是开发机器视觉应用的理想

软件, 已被广泛采用。图像处理软件具有专用算法及更复杂的图像处理能力。

图像处理软件具有相同界面, 采用图形界面, 无需要编写新代码, 只要通过一些简单的点击操作即可完成各种应用系统的检测。

图像处理软件采用高性能的机器视觉算法, 灵活的界面允许根据用户的系统要求制作相应的操作界面, 实现各种机器视觉检测系统。

图像处理软件可提取直线、圆环、圆弧、长方形、点等要处理的区域, 并对提取的区域进行图像处理, 包括与、或、异或等逻辑操作, 加、减、放大、缩小、投影等数学运算, 卷积、Sobel 运算等图像滤波, 图像折叠、旋转、变焦等处理<sup>[5]</sup>, 并将图像保存和存储。对线性、非线性、透视和畸变失真进行校准<sup>[6]</sup>, 根据摄像机或真实坐标校准, 还可自动再校正。软件可对图像进行边缘和点分析, 进行搜索或定位等模式识别, 测量和计量距离、角度、直径和周长, 对图像确认和反馈, 可输入输出数字和模拟信号。

### 3.4 图像的预处理

图像的预处理主要包括图像的二值化和形态学处理。

图像如图 3 所示: 被测件的表面纹理清晰, 不能直接采用边缘检测来获取圆孔的边缘, 故对图像首先进行阈值变换转化为二值图像, 此处为自适应阈值算法; 由于所有图像的光照是相同的, 因此, 根据图像的特点选取合适的阈值, 在处理后面的图像时阈值不变。

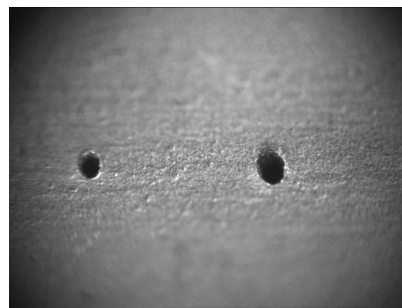


图 3 表面图像

为了去除噪声点的干扰, 二值化处理后对图像进行形态学处理。形态学图像处理以在图像中移动一个结构元素并进行一种类似卷积操作的方式进行。像卷积一样, 结构元素可以具有任意大小, 也可以包含任意的0与1的组合。在每个像素位置, 结构元素核与在它下面的二值图像之间进行一种特定的逻辑运算, 逻辑运算的二进制结果存在输出图像中对应于该像素的位置上。基本的形态学运算是腐蚀和膨胀, 简单的腐蚀运算是消除物体所有边界点的一种过程, 结果使剩下的物体沿其周边比原来的物体小一个像素; 简单的膨胀运算是将与某物体接触的所有边界点合并到该物体中的过程, 结果使物体的面积增大并增加了相应的像素点。在腐蚀和膨胀的基础上, 可以构造出形态学运算族, 其中两个最为重要的组合运算是开运算和闭运算, 开运算先腐蚀后膨胀, 它可以消除细小物体, 在纤细点处分离物体和平滑较大物体的边界时不明显改变其面积; 闭运算先膨胀后腐蚀, 它可以填充物体内的细小空洞、连接邻近物体、在不明显改变物体面积的情况下平滑其边界。为了不明显地改变目标的边界并可以去除较大的干扰点, 本方案采用开运算, 结构元素采用3×3模板。

### 3.5 圆孔的确定

圆孔位置确定包括以下几个步骤: 确定两圆孔的位置范围, 初步确定两圆孔的位置, 轮廓提取, 精确确定两圆孔的位置。

#### 3.5.1 位置范围的确定

由图3可知, 光照不均匀, 图像的中心较亮, 而周边较暗, 且周边较圆孔的灰度相差无几, 故阈值变换后的图像并未将圆孔分离出来。通过机械装置的控制, 两圆孔每次位置相差不大, 故在第一幅图像中确定圆孔的范围, 并建立模板, 以后的图像在其附近匹配, 相似度达到满足一定条件则确定两圆的位置范围。

#### 3.5.2 确定圆孔位置

两圆孔的位置范围确定后, 用质心算法初步确定两圆的位置和圆孔的半径初值, 设圆孔的坐标为

$(x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_m, y_m)$ , 则质心坐标和半径初值为:

$$\text{圆孔的质心: } x_{\text{质}} = \frac{\sum_{i=0}^m x_i}{m}, y_{\text{质}} = \frac{\sum_{i=0}^m y_i}{m} \quad (1)$$

$$\text{半径的初值: } r = \sqrt{\frac{m}{\pi}} \quad (2)$$

#### 3.5.3 确定圆孔的位置

在确定圆孔的位置之前, 先对图像进行轮廓提取, 然后采用最小二乘原理确定圆孔的精确位置, 以下简要介绍最小二乘拟合的原理。

最小二乘法是依据残差平方和最小原理得出的, 设圆的方程为:

$$(x-a)^2+(y-b)^2=r^2 \quad (3)$$

残差为:

$$\varepsilon_i=(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2 \quad (4)$$

其中  $x_i, y_i$  为圆孔的边缘点。

残差平方和为:

$$Q=\sum_i \varepsilon_i^2=\sum_i [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2]^2 \quad (5)$$

根据残差平方和最小, 则圆心坐标及半径偏导值为零:

$$\frac{\partial Q}{\partial a}=\frac{\partial Q}{\partial b}=\frac{\partial Q}{\partial r}=0 \quad (6)$$

$$\text{即: } \begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a}=2 \sum_i [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2](-2)(x_i-a)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b}=2 \sum_i [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2](-2)(y_i-b)=0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial r}=2 \sum_i [(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2]=0$$

简化整理式(7)得:

$$\begin{cases} a^2-2\bar{x}a+b^2-2\bar{y}b-r^2+\bar{x}^2+\bar{y}^2=0 \\ \bar{x}a^2-2\bar{x}^2a+\bar{x}b^2-2\bar{x}\bar{y}b-\bar{x}r^2+\bar{x}^3+\bar{x}\bar{y}^2=0 \\ \bar{y}a^2-2\bar{x}\bar{y}a+\bar{y}b^2-2\bar{y}^2b-\bar{y}r^2+\bar{x}^2\bar{y}+\bar{y}^3=0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中的各参数可用式(9)表示:

$$\bar{x}^m \bar{y}^n = \sum_i \frac{x_i^m y_i^n}{\sum_i l} \quad (9)$$

对式(8)化简整理可得圆参数为:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{(\overline{x^2} \overline{x} + \overline{x} \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2} \overline{y} + \overline{y} \overline{y^2} - \overline{y^3} - \overline{x^2} \overline{y})(\overline{x} \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} + \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x} \overline{y} - \overline{xy})^2} \\
 b &= \frac{(\overline{x^2} \overline{y} + \overline{y} \overline{y^2} - \overline{y^3} - \overline{x^2} \overline{y})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2} \overline{x} + \overline{x} \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{x} \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} + \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x} \overline{y} - \overline{xy})^2} \\
 r &= \sqrt{a^2 - 2\overline{xa} + b^2 - 2\overline{yb} + \overline{x^2} + \overline{y^2}}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

为了提高精度，通过该方法求得拟合圆，然后计算边缘上的点到该圆的距离，将距离大的伪边缘点除去，再进行一次拟合。

#### 4 测量实验与结果

在对工件上圆孔的检测中，主要采用了两种方法：质心检测和最小二乘法拟合。结果见表1。

表1 拟合结果

分类	阈值	左圆圆心	左圆半径	右圆圆心	右圆半径	两圆间距
质心检测	92	(152.63, 272.09)	21.92	(500.19, 269.52)	28.23	347.56
	86	(153.18, 271.85)	21.21	(500.39, 269.03)	27.78	347.20
	74	(153.63, 272.09)	19.93	(500.81, 268.26)	26.84	346.91
一次拟合	92	(145.26, 264.77)	25.76	(499.95, 270.24)	28.32	354.25
	86	(153.38, 271.84)	20.52	(500.20, 269.55)	27.74	346.83
	74	(154.03, 270.91)	19.29	(500.56, 268.28)	26.52	346.54
二次拟合	92	(152.82, 272.63)	21.30	(499.96, 270.33)	26.97	347.15
	86	(153.54, 271.81)	20.10	(500.17, 269.65)	26.58	346.64
	74	(153.99, 271.29)	18.72	(500.70, 268.69)	25.84	346.71

#### 4.1 阈值的影响

图像的阈值对图像半径的测量影响较大，阈值选取低，目标与背景分开较为明显，但测得的目标较小；阈值选取较高，目标与背景分开不明显，干扰点较多。目标与背景较难分开，容易产生错误点，造成测量错误，故应慎重选取阈值。

#### 4.2 质心检测与最小二乘比较

质心检测比较简单，消耗时间少，但原理上其精度不高，可以用于精度要求较低场合；最小二乘拟合算法精度较高，但所用时间比较长。

#### 4.3 二次拟合的必要性

表1中给出了一次拟合与二次拟合的结果，一次拟合是用图像中目标的所有边缘点参与运算得出的结果，二次拟合是以第一次拟合的结果，除去距离边界点较远的点，再重新拟合所得，此算法中以距离边界点超出最大距离边界点一半为依据去除，可以根据要求调整。从表1中可以看出，在阈值为92时，图像中存在干扰点，采用一次拟合所得的结果是错误的，所以采用最小二乘拟合时必须进行二

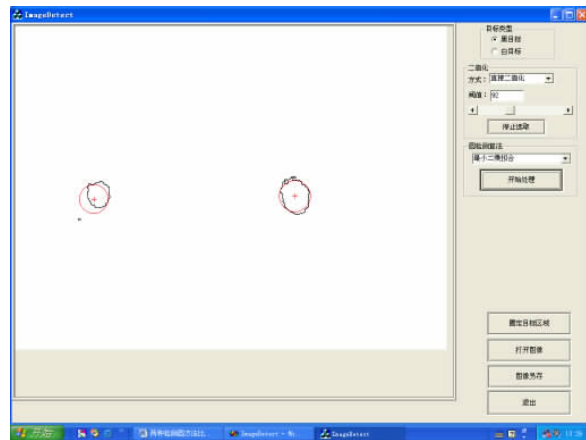


图4 拟合后的图像

次拟合（如图4所示）。

#### 4.4 光照的影响

由图5看出，照明灯放在检测台的右侧，故孔的左侧内壁较亮，当进行检测时，选用阈值低时会造成孔的左侧内壁有一部分被划入背景区域。因此，阈值偏低，检测到的孔心向右偏移。图6是光照影响拟合图，效果很好，满足检测的要求。

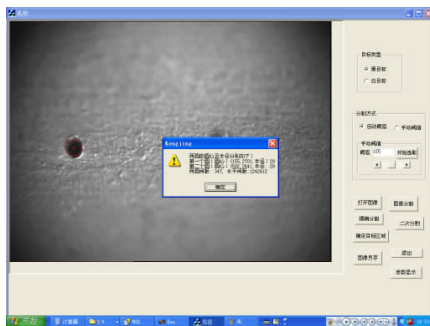


图5 光照影响

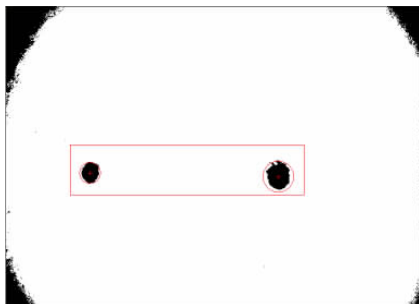


图6 光照影响拟合图

#### 4.5 系统误差分析

在检测过程中,主要存在以下几个方面的误差:

- (1) CCD引入的系统误差。CCD的光敏元间距限制了图像的抽样频率,间距越小,抽样频率越高,误差就越小。
- (2) 光照条件的影响。由于视场光强不可能绝对均匀,因而影响CCD的成像质量和边缘特征的提取。
- (3) 标定模板自身的尺寸误差,以及角

#### 参考文献

- [1] 刘微,吴庆彪.基于LMS自适应噪声抵消法的无位置传感器研究[J].现代电子技术,2008,31(3):137-139.
- [2] 陈白伟.图像测量技术在微型齿轮测量中的应用[D].半导体光电,2004,25(6):465-468.
- [3] Zhang Yonghong, Tang Huiqiang, Wang Lihua. Integration study of multi-axis coupled Non-linear control and online image measurement for curve grinding[C]. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006*: 21-23.
- [4] 李炳乾. LED环形光源研制[J].照明工程学报,2007,18(1):64-66.
- [5] 宫霄霖,毛瑞全,刘开华.基于边缘检测的邻域加窗图像去噪算法[J].光电工程,2009,36(11):112-117.
- [6] 王敏,张艳宁,孙瑾秋.基于线奇异性分析的图像边缘检测方法[J].光电工程,2009,36(10):129-134.

作者简介:张馥生(1978-),女,吉林长春人,在职研究生,助理研究员,主要从事光机检测方法和计量确认等方面的研究。

E-mail: zhmiaol593@163.com

点提取的随机误差。分析以上各项误差,在实际测量中积极修正,可使本检测系统达到 $6\mu\text{m}$ 的测量精度。图7为本影像检测系统。

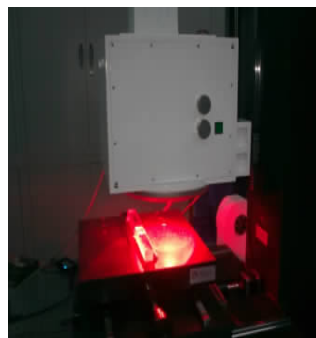


图7 影像检测系统

## 5 结论

本文设计了一个利用CCD影像技术的非接触式测量圆形物件直径及不规则度测量系统。该系统利用CCD影像技术实现对待测圆形工件直径和不规则度的实时、高精度、非接触式测量。该系统可以同时测量待测圆形工件的直径和不规则度,不仅有较高的精度,而且无需多次反复测量,一次测量即可得到一组数据,大大降低了测量成本。利用自行编制的软件系统进行图像处理,测量精度和测量参数可以方便调节。本系统测量结果直观,直接用图形和表格形式在显示器上表示出来,为圆形工件加工调整提供了方便。