

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.016

基于数字图像处理的经纬仪对心测量方法

刘春桐, 王东波, 何祯鑫, 蔡可
(第二炮兵工程学院 202 室 西安 710025)

摘要: 以经纬仪对心为研究对象, 使用 CCD 传感器采集位置图像并经图像处理测量出经纬仪对心偏差, 驱动二维高精度电控位移台移动来实现自动对心。对经纬仪原光学对心镜系统进行了改造, 研究了图像处理的方法, 包括图像预处理和圆标记中心定位算法, 采用了混合滤波和 Sobel-Zernike 亚像素边缘检测方法。仿真实验表明: 基于图像处理的经纬仪对心测量方法弥补了对心需要反复操作的缺点, 大大缩短了测量时间, 测量精度也可以达到 $5.5\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 经纬仪; 对心测量; 数字图像处理; 亚像素边缘检测

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A

Centering Measurement of Theodolite Based on Digital Image Processing

Liu Chun tong, Wang Dong bo, He Zhen xin, Cai Ke
(No. 202 Staff Room, Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025)

Abstract: Taking the centering of theodolite as study object, the images of station point are processed by the technology of digital image processing after being collected by CCD sensor. The centering deviation is a driving signal for high precision motorized positioning systems to achieve the automatic centering of theodolite. The original optics centering is transformed. The method of digital image processing is studied including image preprocessing and circle target center location algorithm. Hybrid filter and subpixel edge detection is adopted on this paper. The simulation result shows that the theodolite centering measurement method based on digital image processing can make up for the shortage of more repeat procedures. The measuring time is also shortened greatly, and the precision of the measuring method reaches the error scope value of $5.5\ \mu\text{m}$ as expected.

Keywords: theodolite; centering measurement; digital image processing; sub-pixel edge detection

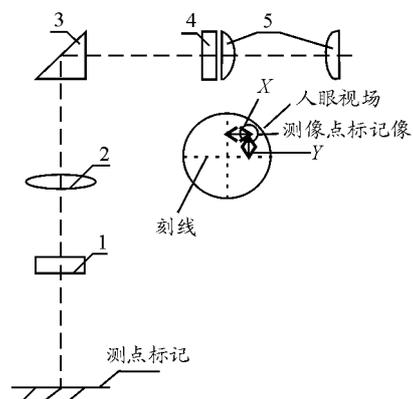
0 引言

随着计算机技术、图像处理技术以及运动控制系统的发展, 基于图像处理的高精密测量系统因具有非接触性、实时性、精确性等优点被广泛应用。

经纬仪是一种通用的高精度角度测量仪器, 广泛应用于军事、建设等诸多行业, 国内外对于经纬仪的操作自动化和提高测量精度等方面进行了很多研究。其中文献[1]实现了光电经纬仪的自动调焦控制; 文献[2]实现了便携式经纬仪测量系统的自动水平调整; 文献[3]提出了基于目标脱靶量与编码器位置信息的数据配准方法并用于提高光电经纬仪的测量精度; 文献[4]建立了一种基于视觉引导的新型激光经纬仪自动测量系统以实现目标自动识别和自动测量。目前, 经纬仪对心操作自动化方面研究比较少, 而传统对心方法存在自动化程度低、操作时间长、精度受人为因素影响大等问题, 鉴于此, 提出自动对心的思路。笔者对 J2 经纬仪原光学对心镜系统进行改造, 加装面阵 CCD, 对测站标记图像进行数字图像处理, 得到经纬仪对心偏差并以此驱动二维高精度电控位移台移动来实现自动对心。

1 对心镜光学系统改造方案

为了测量经纬仪对心偏差, 利用面阵 CCD^[5]进行敏感。以经纬仪原对心镜系统为设计基础, 取消目镜, 加装 CCD 组件, 设计专用接口, 将目镜换成 CCD 转接口并接上 CCD。在整个自动对心过程中, 三脚架是定高的, 光学系统是固定焦距的, 因此, 无需采用调焦系统。改造前和改造后光学系统分别如图 1 和图 2。



1 保护玻璃; 2 物镜组; 3 直角棱镜;
4 分划板; 5 目镜组。

图 1 改造前对心镜光学系统

收稿日期: 2011-03-21; 修回日期: 2011-04-28

作者简介: 刘春桐(1972—), 男, 安徽人, 博士, 副教授, 从事武器系统检测与故障诊断研究。

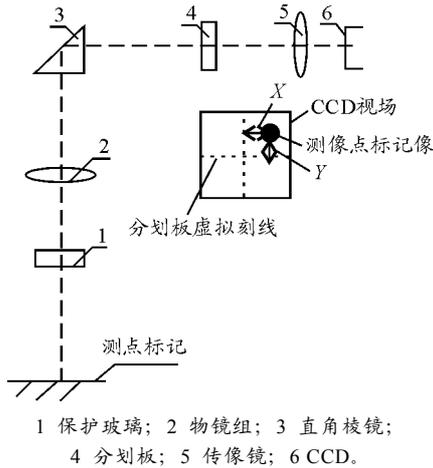


图 2 改造后对心镜光学系统

本测量系统的测量范围是 $50\text{ mm}^2 \times 50\text{ mm}^2$, 测站标记物的分辨率为 $10\text{ }\mu\text{m}$, 物像比恒定为 11, 所以要求测站点标记在 CCD 的投影大小至少为 $4.55\text{ mm}^2 \times 4.55\text{ mm}^2$, 结合面阵 CCD 的品质和各项特征参数, 选用了 SONY 公司的面阵 CCD ICX409AK^[6], 有效像素为 $752(\text{H}) \times 582(\text{V})$, 像素单元尺寸为 $6.25\text{ }\mu\text{m} \times 6.25\text{ }\mu\text{m}$ 。为了满足测量精度要求的同时减低硬件成本, 可以采取软件细分的方法进行测站中心定位。

2 测站点点的数字图像处理

面阵 CCD 对心测距是利用数字图像处理方法^[7], 对采集到的测站点图像中心进行精确定位, 计算出其偏离 CCD 成像面中心的像素数, 再转换成经纬仪对心偏差, 并以此作为电控位移台移动的

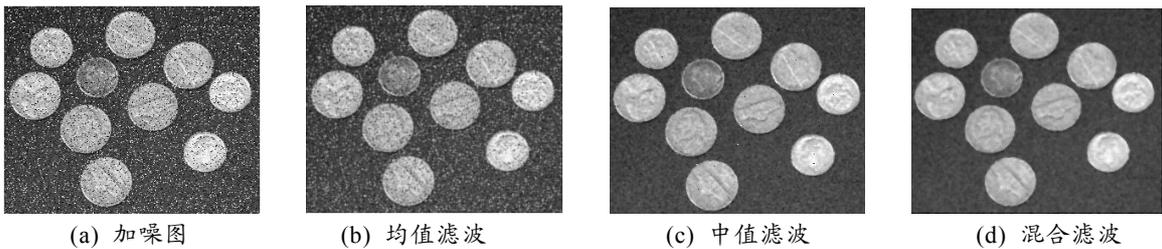


图 3 滤波效果示意图

计算结果显示 Coins 标准图像试验中均值滤波, 中值滤波和混合滤波三者的信噪比 (PSNR) 分别为 1.029 7, 1.206 5 和 1.256 5, 其中混合滤波器的最优阈值为 15。可以看出, 均值滤波的效果比较差, 而中值滤波图像的边缘比混合滤波模糊, 经混合滤波器后的边缘信息得到了很好的保留, 且运算速度介于均值滤波和中值滤波之间。混合算法对于含有椒盐噪声和脉冲噪声的图像具有良好的去噪特性和速度特性, 对于本系统具有很好的适用性。

驱动信号, 实现自动对心。对测站图像处理的关键是中心点精确定位, 其基本流程为图像去噪, 边缘检测和中心定位。

2.1 图像去噪

本系统中, 影响图像质量的噪声主要是椒盐噪声和脉冲噪声。在滤波中, 首先要考虑保护图像的边缘, 由于测站标记在图像中的像素宽度较少, 直接滤波会造成边缘模糊。研究中比较了均值滤波和中值滤波, 设计了一种结合 2 种滤波优点的混合滤波方法。

算法描述: 设原始图像为 I , 图像大小为 $M \times N$ (M 为行数, N 为列数)。 $f(x, y)$ 表示图像信号灰度, 将图像表示为 $f(x, y)_{M \times N}$, 其中 x, y 表示图像坐标, 添加噪声后的图像为 $f_n(x, y)_{M \times N}$, 经过滤波预处理后输出图像表示为 $\hat{f}(x, y)_{M \times N}$ 。混合滤波的实现步骤如下:

- 1) 以噪声图像中所要处理的像素 $f_n(x, y)$ 为中心选取像素数为 $L \times L$ 的窗口 (这里取 3×3), 然后求窗口内像素值的方差 $\sigma^2(x, y)$ 。
- 2) 将所求得的方差 $\sigma^2(x, y)$ 与预先给定的阈值 T 相比较, 若所求得的方差小于 T , 则使用平均值算法, 否则使用中值滤波算法。

选取 Coins 标准图像做实验, 在标准图像中加入 0.1 的椒盐噪声, 并且加入均方差为 3 的高斯噪声。图像经过均值滤波、中值滤波、混合滤波后的效果如图 3。

2.2 图像边缘检测

边缘算子的检测精度与运行时间直接关系到经纬仪对心测量的快速性、准确性, 在保证检测精度的前提下, 减少了算法的运行时间。笔者提出的边缘检测方法, 结合了像素级、亚像素级边缘检测方法。

1) 像素级算子粗略定位边缘

常见的像素级边缘检测算子有 Canny 算子、Log 算子、Prewitt 算子、Roberts 算子和 Sobel 算子。

以白纸上的圆图像代表采集到的测站地标标记图像,如图 4,经过DMM 21AU04-ML 相机采集作为

测试图(a),而图(b)、图(c)、图(d)、图(e)、图(f)分别为选用上文的边缘检测算子对比仿真结果。

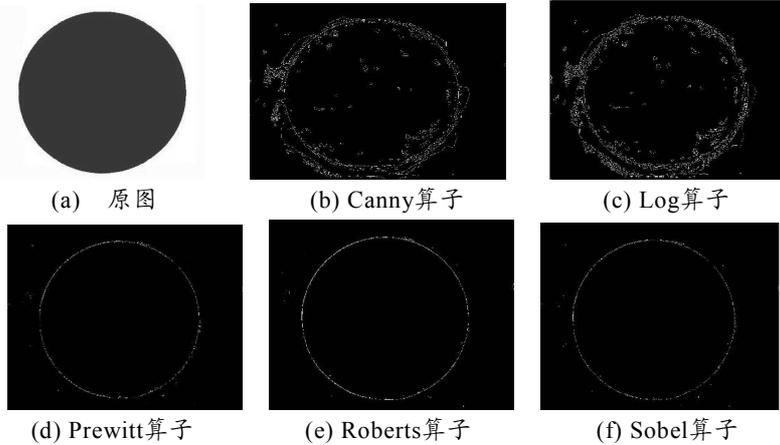


图 4 测站地标标记图像常见边缘检测算法仿真结果比较

从理论和实验结果来看, Sobel 算法更符合图像本身的纹理特征,更好地反映边缘信息。同时,该算法抑制噪声的能力也较传统算法要强。因此,在像素级边缘提取中采用 Sobel 算子。

2) Zernike 矩算子精确定位边缘

Zernike 矩算子^[8]的基本思想是通过计算每个像素点的 4 个参数,来判断该点是否为边缘点。像素点的 4 个参数为: k 为灰度阶跃高度, h 为背景灰度, l 为中心点到边缘的距离, φ 为中心点到边缘垂线与 x 轴的夹角,各参数具体物理意义见图 5。

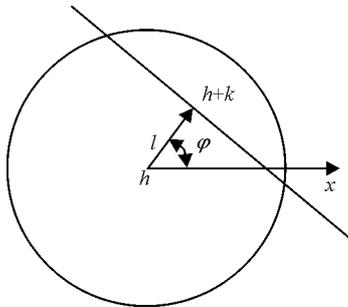


图 5 理想的二维边界模型

离散图像中某一点 $f(x, y)$ 的 Zenike 矩定义为:

$$A_{nm} = \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad x^2 + y^2 \leq 1 \quad (1)$$

式 (1) 表明,为计算一幅给定图像的 Zenike 矩,须将图像中心移到坐标原点,将图像像素点映射到单位圆内。利用 Zenike 矩进行边缘定位时,用到 3 个不同阶次的 Zenike 矩,分别为 A_{00} , A_{11} , A_{20} , 对应积分核函数为 $V_{00}=1$, $V_{11}=x+jy$, $V_{20}''=2x^2+2y^2-1$ 。对应的原始图像 Zenike 矩与旋转后图像的 Zenike 矩的关系为:

$$A'_{00} = A_{00}, A'_1 = A_{11} e^{j\varphi}, A'_{20} = A_{20}$$

特征参数的公式为:

$$\begin{cases} \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[A_{11}]}{\text{Re}[A_{11}]} \right) \\ l = \frac{A_{20}}{A_{11}} \\ k = 3 A'_{11} / [2(1-l^2)^{3/2}] \end{cases} \quad (2)$$

图像边缘的亚像素位置为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + l \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此,可由 Zernike 矩 A_{00} , A_{11} , A_{20} 定位边缘到亚像素级。

Sobel-Zernike 矩亚像素边缘检测步骤有:

- Step1: 利用 Sobel 算子的卷积核 G_x , G_y 计算出像素点沿 x, y 方向的偏导数 M_x , M_y ;
- Step2: 计算幅值 $M = \max\{M_x, M_y\}$, 设阈值为 T , 若 $T > M$, 则可判定像素点为边缘点,并记录坐标;
- Step3: 计算矩 A_{11} , A_{20} ;
- Step4: 计算像素点参数 φ , l , k ;
- Step5: 设定阈值 T_1 , T_2 , 若 $k > T_1$ 且 $l < T_2$, 则该点即为要求的亚像素边缘点,点的坐标记为 $[i, j]$;
- Step6: 重复以上步骤,直到将符合条件的 N 个亚像素边缘点检测出来,坐标为 $\{(x_i, y_i) / i=1, 2, \dots, N\}$ 。

2.3 最小二乘法中心定位算法

测站圆形标记中心定位算法的精度和速度直接影响了测量的精度及速度。传统的定位算法主要有:重心法、Hough 变换法、基于最小二乘原理的圆拟合的中心检测算法等^[9]。其中重心法定位一般运用

在像素级边缘, 测量精度不能达到要求; 而 Hough 变换法会出现无效计算的问题, 耗时较长。在此, 采用最小二乘法原理对圆形标记进行拟合, 得到圆中心位置坐标。

Sobel-Zernike 算子检测出来的 N 个亚像素点利用最小二乘法对测站标记圆进行拟合。最小二乘法通过最小化残差的平方和来获得待定系数的估计。测站点圆形标记中心坐标 (x_0, y_0) 满足式 (4):

$$\begin{bmatrix} C & D \\ D & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

$$C = 2 \left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right]; \quad D = 2 \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^N y_j \right);$$

$$E = 2 \left(\sum_{j=1}^N y_j^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^N y_j \right);$$

$$F = \sum_{i=1}^N x_i^3 + \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \sum_{j=1}^N x_j;$$

$$G = \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^N y_i^3 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) \sum_{j=1}^N x_j \circ$$

3 实验结果与误差分析

实验中使用的是 SONYC12 笔记本电脑, 采用了 Intel Core 2 Duo T5500 处理器, 主频为 1.66 GHz。采用上述图像处理方法对如图 6 计算机生成的 194×194 标准圆 (圆心为 (95, 98), 半径为 75) 进行圆轮廓的定位, 采用最小二乘法拟合结果如图 7, 多次计算结果如表 1。

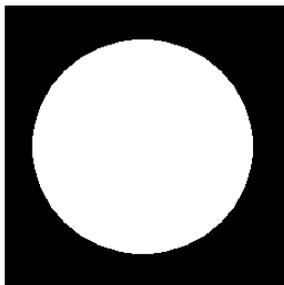


图 6 194×194标准圆

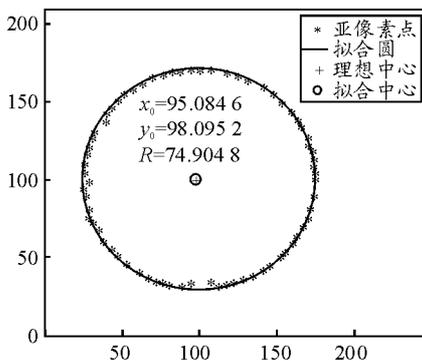


图 7 标准圆亚像素点最小二乘法拟合定位

表 1 标准图像轮廓亚像素定位结果

理论计算值	Sobel-Zernike定位值	像素
55.704, 198.296	55.781, 198.347	0.077
125.000, 227.000	125.075, 226.931	0.075
194.296, 198.296	194.247, 198.306	0.049
223.000, 129.000	222.915, 129.037	0.085
194.296, 59.704	194.351, 59.762	0.058
125.000, 31.000	125.023, 31.041	0.041
55.704, 59.704	55.786, 59.672	0.082
27.000, 129.000	27.036, 128.958	0.042

从仿真计算和实验的结果可见, 采用上述算法, 定位分辨率可达 0.1 像素, 定位不确定度优于 ±0.1 像素, 实现了边缘的亚像素级定位。由对心测量原理可知对心测量误差约 $0.08 \times 68.75 = 5.50 \mu\text{m}$ 。为了得到 Sobel-Zernike 算法时间, 取对心 CCD 采集的一幅图像进行算法时间测试, 结果表明: Zernike 算法时间为 5.532 s, Sobel-Zernike 算法时间为 0.799 s, 可见, 本算法较 Zernike 算法节约了很长时间, 这对于经纬仪的快速测角是非常有意义和价值的。

4 结论

笔者对经纬仪对心测量进行研究, 采用图像处理的方法, 重点分析了混合滤波、Sobel-Zernike 亚像素边缘检测方法以及利用最小二乘法中心定位算法。经仿真实验结果分析, 取得了较高的精度和缩短了对心测量时间, 很好地满足了武器系统和工程上的应用。

参考文献:

- [1] 林兆华, 刘鑫, 王岚, 等. 采用 MSP430 单片机的自动调焦控制系统在经纬仪上的应用[J]. 电光与控制, 2011, 18(1): 48-52.
- [2] 陈洪财. 经纬仪测量系统自动水平调整设计[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2005, 23(2): 191-194.
- [3] 王宗友, 付承毓, 王芳. 基于数据配准提高光电经纬仪的测量精度[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 586-590.
- [4] 张滋黎, 郝继贵, 周虎, 等. 一种基于视觉引导的激光经纬仪自动测量系统[J]. 电子·激光, 2011, 22(1): 115-119.
- [5] 王庆友, 孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [6] 闫敬文. 数字图像处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [7] 客观澳. 计算机图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [8] 崔继文, 谭久彬. 基于 Sobel 矩的亚像素边缘定位算法[J]. 光子技术, 2005, 31(5): 779-785.
- [9] 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.