

Application of Differential Operator and Linear Fitting in Crosshair Center Pinpoint

Bochao Liu, Jian Zhao

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin
Email: liubochao@ciomp.ac.cn

Received: Jun. 19th, 2015; accepted: Jun. 22nd, 2015; published: Jun. 26th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to satisfy the requirement of crosshair center pinpoint for lens decentration measurement, a crosshair center pinpoint method based on differential operator and linear fitting is proposed. First, the edges of crosshair in both X and Y directions can be obtained by using differential operator to compute the difference in both X and Y directions. Then, two linear equations in both X and Y directions are fitted with orthogonal least square method using the edges obtained. Finally, the intersection point of the two linear equations is used as the crosshair center. Experimental results indicate that the precision of the crosshair center pinpoint is less than one pixel in the images grabbed by the CCD whose resolution is 1292×964 pixel and pixel size is $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ and the precision of pinpoint is less than $2 \mu\text{m}$ in lens decentration measurement. It can satisfy the system requirements of non-contact, online, real time, higher precision and rapid speed, as well as strong anti-jamming and stabilization.

Keywords

Crosshair Center, Differential Operator, Linear Fitting, Sub-Pixel

微分算子和直线拟合在十字丝中心定位中的应用

刘博超, 赵建

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春
Email: liubochao@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015年6月19日; 录用日期: 2015年6月22日; 发布日期: 2015年6月26日

摘要

为了满足镜头中心偏差测量中十字丝中心精确定位的要求, 本文提出了一种基于微分算子和直线拟合的十字丝中心定位方法。根据十字丝成像的特殊性, 首先, 使用微分算子分别在X方向和Y方向求差分得到十字丝X方向和Y方向的边缘。接着, 采用正交最小二乘法将刚刚得到的X方向和Y方向的边缘分别拟合为X方向和Y方向上的两条直线方程。最后, 计算两条拟合直线的交点作为十字丝的中心。实验结果表明: 在分辨率为 1292×964 像元为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 的CCD采集到的图像中十字丝中心的定位精度小于1个像素, 在镜头中心偏差测量过程中其定位精度小于 $2 \mu\text{m}$ 。基本满足镜头中心偏差测量对十字丝中心定位精度高、抗干扰能力强、重复性好等要求。

关键词

十字丝中心, 微分算子, 直线拟合, 亚像素

1. 引言

图像测量[1]技术是近年来在测量领域中新兴的一种高性能测量技术。它以光学技术为基础, 将光电学、计算机技术、激光技术、图像处理技术等多种现代科学技术融合为一体, 构成光、机、电、算综合体的测量系统。所谓的图像测量, 就是把测量对象图像当作检测和传递信息的手段或载体加以利用的精确测量技术, 是一种结合视频图像和计算机识别的图像处理技术, 是测量被测对象时把图像当作检测和传递的手段或载体加以利用的测量方法, 其目的是从图像中提取有用的信号。它通过对于获得的二维图像进行处理和分析, 得到需要的三维场景的信息, 最终实现测量的目的。目前视频图像的测量理论还没有通用的方法和算法, 针对不同测量对象和条件, 要研究不同的实用方法和算法。图像测量技术广泛应用于智能交通、安防、工业产品质量检测等各个领域, 并且随着计算机技术和信息技术的发展, 其实现方法和手段也将日新月异。

由于十字丝[2]成像的特殊性, 其经常被作为传递信息的载体用于图像测量技术之中。基于反射式的光学镜头中心偏差测量系统[3]是一种光学镜头辅助装调设备[4], 其工作过程为: 将光源产生的十字丝聚焦在被测镜面的球心相对于其上所有镜面成像的像点上, 通过反射成像在 CCD 上, 旋转转台记录十字丝在 CCD 上成像的运动轨迹, 将运动轨迹的零点位置和由运动轨迹拟合出的圆的直径作为两个重要参数代入光学公式中进行计算。因此, 是否能够准确地定位十字丝中心的位置对整个光学镜头中心偏差测量系统的精度有着重要的影响。

本文针对十字丝成像正交性的特点, 提出了一种结合微分算子[5]和直线拟合[6]定位十字丝中心的方法, 即首先使用微分算子分别在 X 方向和 Y 方向求差分得到十字丝 X 方向和 Y 方向的边缘, 然后采用正交最小二乘法将得到的 X 方向和 Y 方向的边缘拟合为 X 方向和 Y 方向上的两条直线方程, 最后计算两条拟合直线的交点作为十字丝的中心坐标。实验结果表明, 该方法具有良好的重复性, 定位精度可以达到亚像素级[7], 基本满足镜头中心偏差测量对十字丝中心定位[8]精度高的要求。

2. 微分算子提取垂直边缘和水平边缘

对于离散的数字图像来说，一元函数 $f(x)$ 一阶微分可以定义为差分形式：

$$\frac{\partial f}{\partial x} = f(x+1) - f(x)$$

而对于一幅二维数字图像而言，X 方向和 Y 方向上的一阶微分可以分别定义为：

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x+1, y) - f(x, y)$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = f(x, y+1) - f(x, y)$$

参照常用的 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子[9]等边缘检测[10]算子的定义，我们可以定义如图 1 所示的垂直算子和水平算子用于提取十字丝的垂直边缘和水平边缘。

在光学镜头中心偏差测量系统中使用的分辨率为 1292×964 的 CCD 采集到的实时显示的十字丝图像如图 2 所示。

的十字丝垂直边缘和水平边缘如图 3 所示。图 3 仅为中间输出结果的示意图，在实际应用的过程中只需保存垂直方向结果的 x 、 y 坐标以及水平方向结果的 x 、 y 坐标用于接下来的直线拟合即可。

3. 最小二乘直线拟合

3.1. 经典的最小二乘直线拟合

经典的最小二乘直线拟合如图 4 所示，其基本过程为：

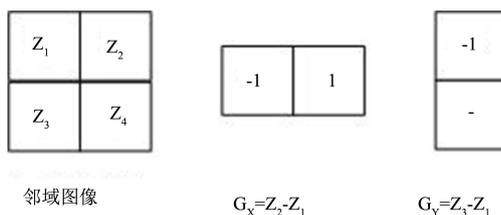


Figure 1. Vertical operator and horizontal operator
图 1. 垂直算子和水平算子

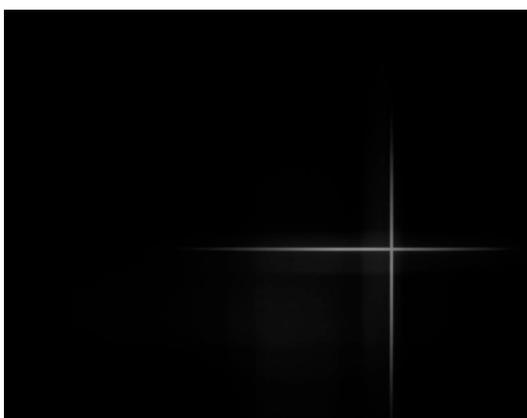


Figure 2. Real-time image of crosshair
图 2. 实时的十字丝图像

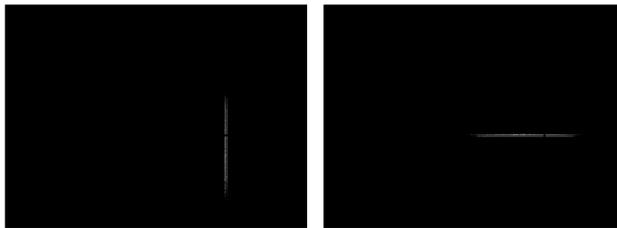


Figure 3. Schematic diagram of horizontal and vertical edge
图 3. 垂直和水平边缘示意图

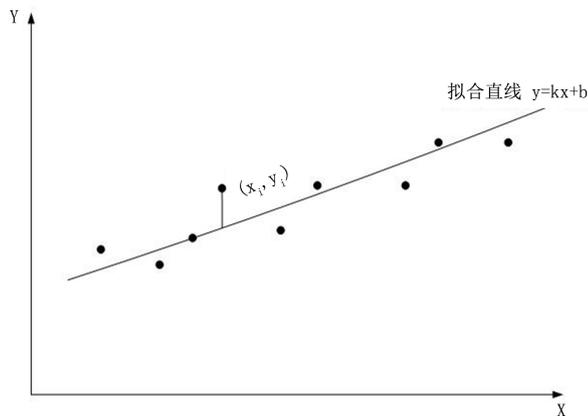


Figure 4. Classical least square linear fitting
图 4. 经典最小二乘直线拟合

- 1) 假设拟合后的直线方程为 $y = kx + b$ ，其中 k 为斜率， b 为截距，是最终要求的两个量；
- 2) 假定任意一点的 x 坐标 x_i 是准确的，求使得 $S = \sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2$ 取得最小值时的 k 和 b ；
- 3) 根据 2 中的要求，应有 $\frac{\partial S}{\partial k} = 0, \frac{\partial S}{\partial b} = 0$ 成立；
- 4) 解 3 中的方程可得：

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

3.2. 正交的最小二乘直线拟合

在经典的最小二乘直线拟合过程中假定任意一点的 x 坐标 x_i 是准确的，然而在系统中得到的十字丝边缘的 x 、 y 坐标都是随机的，因此我们考虑使用如图 5 所示的正交的最小二乘[11]直线拟合方法，以任意一点到拟合直线的距离为参考标准拟合 X 方向和 Y 方向的两条直线，其基本过程为：

- 1) 假设拟合后的直线方程为 $y = kx + b$ ，其中 k 为斜率， b 为截距，是最终要求的两个量；

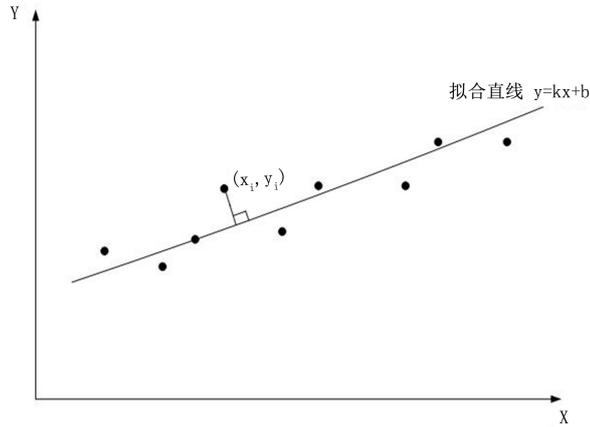


Figure 5. Orthogonal least square linear fitting
图 5. 正交最小二乘直线拟合

- 2) 计算任意一点 (x_i, y_i) 到直线 $y = kx + b$ 的距离 $S_i = \frac{|y_i - k \cdot x_i - b|}{\sqrt{1 + k^2}}$;
- 3) 求使得 $S = \sum_{i=1}^n S_i^2$ 取得最小值时的 k 和 b ;
- 4) 根据 3 中的要求同样应有 $\frac{\partial S}{\partial k} = 0, \frac{\partial S}{\partial b} = 0$ 成立, 即

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial k} &= -\sum_{i=1}^n x_i y_i + k \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i - k \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 + k^2 \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ &\quad - n k b^2 + 2 k b \cdot \sum_{i=1}^n y_i - k^2 b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= b n - \sum_{i=1}^n y_i + k \cdot \sum_{i=1}^n x_i = 0 \end{aligned}$$

- 5) 解 4 中的方程可得:

$$\begin{aligned} k &= \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \\ b &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i - k \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n} \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i \\ B &= \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 + n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 \\ C &= \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i - n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{aligned}$$

解得的竖直方向和水平方向直线方程各有两组解, 在拟合竖直方向直线方程时取 k 的绝对值较大的一组解, 在拟合水平方向直线方程时取 k 的绝对值较小的一组解。

4. 测量实验与结果

为了验证本文提出方法的精度和重复性,我们将被测镜头固定后在光学镜头中心偏差测量系统上进行了实验,相机采用分辨率为 1292×964 、像元尺寸为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 的 CCD。表 1 为将 CCD 曝光时间设置为 25 ms,每隔 10 帧采集一次,用本文提出的方法计算 10 次十字丝中心位置得到的测量结果。

从表 1 列出的实验结果可以看出,在同一位置计算得到的十字丝中心最大位置和最小位置间的距离小于 1 个像素,能够达到亚像素级[12],多次测量的结果之间小于 $2 \mu\text{m}$,具有较高的重复定位精度。

为了验证本文提出方法对光照的抗干扰能力,我们将被测镜头固定后分别在不同的曝光时间下采集到的图像如图 6 所示,表 2 为在不同曝光时间下计算得到的十字丝中心位置。

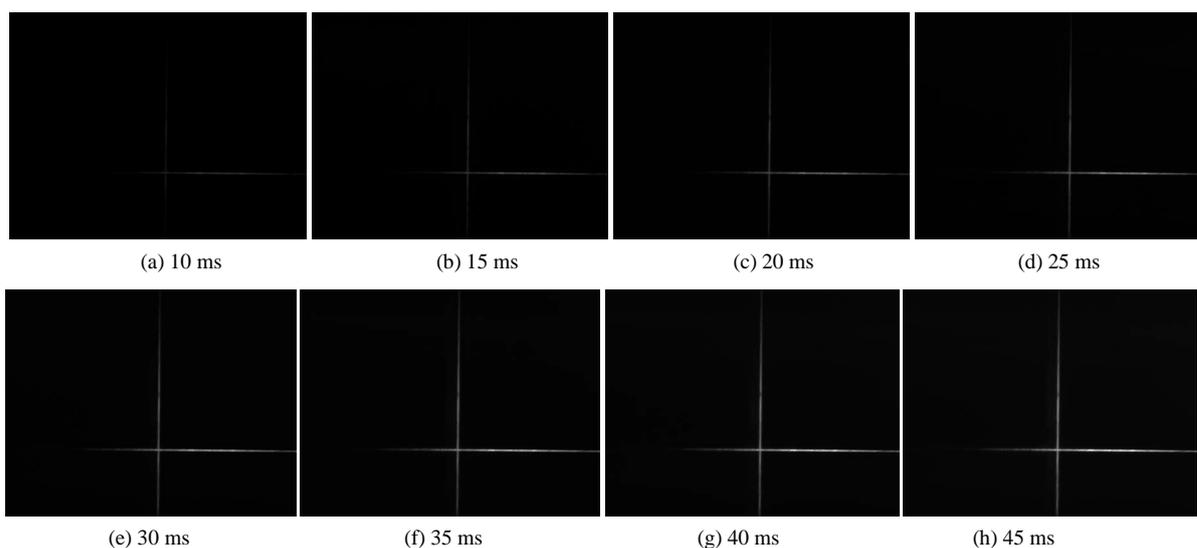


Figure 6. Images of different exposure time
图 6. 不同曝光时间图像

Table 1. Measurement Results
表 1. 测量结果

测量次数	X 图像位置(pixel)	Y 图像位置(pixel)	X 实际位置(μm)	Y 实际位置(μm)
1	680.15863	681.59857	2550.59473	2555.99463
2	680.22156	681.67889	2550.83081	2556.29590
3	680.34992	681.57111	2551.31201	2555.89160
4	680.27301	681.70746	2551.02368	2556.40308
5	680.42780	681.65851	2551.60425	2556.21948
6	680.21527	681.69531	2550.80713	2556.35742
7	680.39099	681.58215	2551.46631	2555.93311
8	680.25781	681.41876	2550.96680	2555.32056
9	680.18817	681.53333	2550.70557	2555.74976
10	680.20648	681.46826	2550.77417	2555.50586
平均值	680.26892	681.59126	2551.00855	2555.96719
方差	0.07455	0.08531	1.04861	1.19985
标准差	0.27303	0.29209	1.02401	1.09537

Table 2. Measurement results
表 2. 测量结果

曝光时间(ms)	X 图像位置(pixel)	Y 图像位置(pixel)	X 实际位置(μm)	Y 实际位置(μm)
10	679.87457	681.45491	2549.52954	2555.45581
15	679.95636	681.76788	2549.83643	2556.62964
20	679.99896	681.51349	2549.99609	2555.67554
25	680.15820	681.41388	2550.59326	2555.30200
30	680.24719	681.69016	2550.92700	2556.33814
35	680.33637	681.34298	2551.26148	2555.03613
40	680.31522	681.44219	2551.18213	2555.40820
45	680.26746	681.51128	2551.00293	2555.66724
平均值	680.14435	681.51709	2550.54102	2555.68897
方差	0.22126	0.14336	3.11163	2.01606
标准差	0.47038	0.37863	1.76398	1.41988

从表 2 列出的实验结果可以看出, 在同一位置不同曝光时间下计算得到的十字丝中心最大位置和最小位置间的距离也小于 1 个像素, 同样能够达到亚像素级, 多次测量的结果之间小于 $2 \mu\text{m}$, 对光照强度的变化具有较高的抗干扰能力。

5. 结论

本文根据光学镜头中心偏差测量系统检测精度高的要求并针对十字丝成像的特点, 提出了一种结合微分算子和直线拟合定位十字丝中心的方法, 并将该方法应用于光学镜头中心偏差测量系统中。首先提取垂直和水平方向的边缘, 然后拟合两个方向的直线方程, 最后计算两条直线方程的交点作为十字丝中心位置。实验结果证明: 在光学镜头中心偏差测量系统中采用的分辨率为 1292×964 像元为 $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$ 的 CCD 采集到的图像中, 十字丝中心的定位精度小于 1 个像素, 在镜头中心偏差测量过程中其定位精度小于 $2 \mu\text{m}$ 。基本满足镜头中心偏差测量对十字丝中心定位精度高、抗干扰能力强、重复性好的要求。

参考文献 (References)

- [1] 陶李, 王珏, 邹永宁 (2012) 改进的 Zernike 矩工业 CT 图像边缘检测. *中国光学*, **1**, 48-56.
- [2] 杜飞明, 廖兆曙, 张桂林 (2007) 一种十字丝中心坐标检测方法. *计算技术与自动化*, **3**, 81-85.
- [3] 郭帮辉 (2014) 基于镜面间隔和中心偏差测量的光学镜头辅助装调设备的研究. 博士学位论文, 中国科学院大学, 北京.
- [4] 赵阳, 巩岩 (2012) 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调. *中国光学*, **4**, 94-100.
- [5] 丁畅 (2014) 图像处理的偏微分方程方法研究. 硕士学位论文, 大连海事大学, 大连.
- [6] 姚宜斌, 黄书华, 孔建 (2014) 空间直线拟合的整体最小二乘算法. *武汉大学学报(信息科学版)*, **5**, 571-574.
- [7] 刘国栋, 刘炳国, 陈凤栋 (2009) 亚像素定位算法精度评价方法的研究. *光学学报*, **12**, 3446-3451.
- [8] 王林波, 王延杰, 邸男 (2014) 基于几何特征的圆形标志点亚像素中心定位. *液晶与显示*, **6**, 1003-1009.
- [9] Rafael, C.G., Richard, E.W., 著, 阮秋琦, 阮智宇, 译 (2005) *Digital image processing*. 2nd Edition, 电子工业出版社, 北京.
- [10] 赵慧, 刘建华, 梁俊杰 (2014) 5 种常见边缘检测方法的比较分析. *现代电子技术*, **6**, 89-92.

- [11] 刘道华, 张礼涛, 曾召霞 (2013) 基于正交最小二乘法的径向基神经网络模型. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, **3**, 428-431.
- [12] 陈阔, 冯华君, 徐之海 (2013) 亚像素精度的行星中心定位算法. *光学精密工程*, **7**, 1881-1890.