

·信号与信息处理·

一种基于高斯滤波的二维自准直仪目标中心的精确定位算法

董彦维¹, 罗晓春², 贺永喜¹, 卫 瑞¹, 刘希强¹

(1. 北京航天发射技术研究所, 北京 100076; 2. 第二炮兵装备研究院 北京 100085)

摘要:为满足高精度线阵 CCD 二维自准直仪动态高精度测量, 提出一种基于高斯滤波的二维自准直仪目标中心的精确定位算法。首先采用高斯滤波对 CCD 图像进行平滑处理, 在抑制噪声的同时生成带有高斯加权的 CCD 图像, 然后采用线性插值重心法对加权图像进行目标中心亚像素定位。实验结果表明, 该定位方法稳定性好, 定位精度高且实时性强, 在原理样机上, 应用该方法实现了单次二维角度测量时间小于 0.2 s, 测量范围 $\pm 900''$, 精度优于 $\pm 0.5''$, 具备一定工程应用价值。

关键词:高精度线阵 CCD; 二维自准直仪; 高斯滤波; 线性插值重心法; 亚像素定位

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-05-0054-05

Precise Center Location Algorithm Based on Gaussian Filtering for 2-Axis Autocollimator

DONG Yan-wei¹, LUO Xiao-chun², HE Yong-xi¹, WEI Rui¹, LIU Xi-qiang¹

(1. Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing 100076, China;

2. Second Artillery Equipment Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: To meet the requirements for measuring accuracy and real-time performance of linear CCD 2-axis autocollimator, a precise center location algorithm based on Gaussian filtering for high-accuracy linear CCD autocollimator is proposed. Firstly, the influences of the noises in images are diminished by using Gauss-filter pretreatment. Then, the sub-pixel location of the target is acquired accurately by using barycenter method based on linear polynomial interpolation method. Experimental results show that the proposed method is fast, stable and accurate, the measure scope is $\pm 900''$ and the measuring accuracy is $\pm 0.5''$ in 0.2 s (a single measurement process) using the proposed method. The proposed method can efficiently fulfill the requirements in engineering systems.

Key words: high-accuracy linear CCD; 2-axis autocollimators; Gauss-filter; barycenter method based on linear polynomial interpolation; sub-pixel location

光电自准直仪作为一种高精度瞄准及小角度测量仪器, 在航天发射地面瞄准和定位等方面有着不可替代的作用^[1]。光电自准直仪具有较高的测量精度和稳定性^[2], CCD 自准直仪是其典型代表。高精度线阵 CCD 二维自准直仪是以高精度线阵 CCD 作为光电传感器实现二维小角度的动态高精度测量。常用的亚像素定位方法有重心定位法^[3]和线性插值质心法^[4]等, 但都有自己的局限性: 只能处理特

定目标中心图像, 并且易受噪声干扰和运算量大等问题。因此, 针对高精度线阵 CCD 二维自准直仪的研制, 迫切需要寻找一种快速高精度线阵 CCD 四狭缝目标中心定位方法。考虑到线阵 CCD 成像系统中存在的量化噪声近似服从高斯分布^[5], 采用高斯滤波能对图像噪声很好的抑制。为了实现二维小角度快速高精度地测量, 文中提出一种基于高斯滤波的二维自准直仪目标中心的精确定位算法。首

先采用高斯滤波对 CCD 图像进行平滑滤波处理,在抑制噪声的同时生成带有高斯加权的 CCD 图像,然后采用线性插值重心法对加权图像进行目标中心亚像素定位。

1 高精度线阵 CCD 二维自准直仪测量原理

自准直仪是以自准直原理为基础^[6],用测微系统对被测件进行角位移精密测定。如图 1 所示。当激光光源发送光束照亮位于物镜焦平面上的分光镜狭缝,通过分光镜和准直物镜后形成一束平行光射向被测反射镜,当反射镜面垂直于光轴时,光束仍然原路返回,由准直物镜汇聚,经分光镜成像于线阵 CCD 上。当被测反射镜发生小角度变化时,透光狭缝在线阵 CCD 上所成的像将产生线位移,由此可以计算相应的小角度变化。反射镜发生小角度变化 θ ,则在线阵 CCD 上成像产生位移 Δd ,根据几何光学原理,有: $\Delta d = f \cdot \tan 2\theta$ 。式中, f 为物镜焦距。当被测角 θ 很小,约在 $15'$ 以内时,测量公式近似为: $\Delta d = f \cdot 2\theta$,则

$$\theta = \Delta d / 2f \tag{1}$$

由式(1)可知,只要能精确测量线阵 CCD 的像位移 Δd ,即可精确测量小角度 θ 。为了实现测量反射镜的二维角度变化,需要增加一激光光源、一块分光棱镜和一片线阵 CCD。通过控制光源切换和信号采集,来实现二维角度测量。

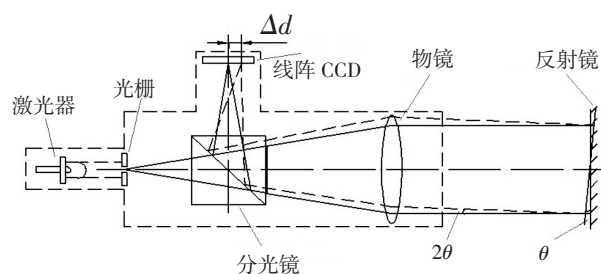


图1 自准直仪测量原理

2 关键技术与实现方法

目前最常用的中心定位亚像素算法是重心法。其算法简单且定位精度较高,但是它只能处理目标面积区域适中的图像,并且受噪声干扰较大,当图像信噪比较小时,它的定位误差会变得很大^[7]。线阵 CCD 成像过程中的随机噪声近似服从高斯分布。

高斯滤波对服从高斯分布的噪声有很好的滤波效果的同时能保留图像细节。因此,为了降低噪声对算法精度的影响,提高系统精度,首先采用高斯滤波进行预处理,生成带有高斯加权的 CCD 图像,然后采用线性插值高斯加权重心算法对高斯加权的 CCD 目标图像中心进行亚像素定位。

2.1 二维高斯滤波算法

图像滤波是通过原始输入图像 $f(x,y)$ 与脉冲响应 $h(x,y)$ 的卷积来实现^[8],即

$$g(x,y) = f(x,y) \otimes h(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x',y')h(x-x',y-y')dx'dy' \tag{2}$$

式中, \otimes 是卷积运算符; $g(x,y)$ 是经过滤波后的输出图像。式(2)的离散形式为

$$g[i,j] = f[i,j] \otimes h[i,j] = \sum_{k=-n}^n \sum_{l=-m}^m f[i-k,j-l]h[k,l] \tag{3}$$

因此,卷积就变成了对像素点的加权计算,脉冲响应 $h[i,j]$ 就是一个卷积模板, $2m+1$ 和 $2n+1$ 是卷积模板的两维宽度。对图像中的每一个像素 $[i,j]$,输出响应 $g[i,j]$ 是通过平移卷积模板到每个像素点 $[i,j]$ 处,计算模板与像素点 $[i,j]$ 邻域加权得到的。其中各加权值对应卷积模板的各对应值。

高斯卷积模板是一种线性模板,可直接从二维零均值离散高斯函数计算模板权值^[9]。二维零均值离散高斯函数表达式为

$$h[i,j] = e^{-\frac{(i^2+j^2)}{2\sigma^2}} \tag{4}$$

式中, σ 是高斯函数的均方差,它控制着平滑效果。 σ 值越大,平滑程度越好,但同时也造成图像特征过分模糊(图像细节的丢失),一般选取 $\sigma = 1 \sim 10$ 。例如,取 $\sigma = 1$,为了减少实际运算量,卷积模板的两维宽度取 3×3 ,由式(4)可以产生图 2 所示的高斯卷积模板。

0.367 9	0.606 5	0.367 9
0.606 5	1.000 0	0.606 5
0.367 9	0.606 5	0.367 9

图2 3×3 二维高斯卷积模板

为了计算方便,一般将模板权值取整。其过程是取模板最小权值(在模板的角点处),选择系数 k 使得最小权值为1。如上例中

$$k = \frac{1}{h[-1,-1]} = \frac{1}{0.3679} = 2.7181 \quad (5)$$

对 k 取整为3。这样,用 k 值乘以模板所有权值,并取整得到图3所示的整数值高斯卷积模板。

1	2	1
2	3	2
1	2	1

图3 3×3 整数值二维高斯卷积模板

图3所示的高斯卷积模板的权值之和并不等于1,这就意味着高斯卷积处理提高了整幅图像的灰度,并改变了图像直方图。所以,在进行图像平滑时,像素点的输出值必须用模板的权值来归一化处理。在上例中

$$\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 h[i,j] = 15 \quad (6)$$

所以,经高斯卷积平滑滤波后的输出图像为

$$g[i,j] = \frac{1}{15} (f[i,j] \otimes g[i,j]) \quad (7)$$

二维高斯模板的数学表达式为

$$g(x,y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

它可以分解成两个一维的高斯函数,对应于一个二维高斯模板,可以将其分解成两个一维高斯模板的卷积,如图4所示。

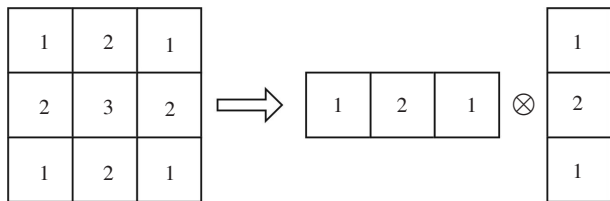


图4 高斯模板分解示意图

在高精度线阵 CCD 二维自准直仪原理样机上实际采用的一维高斯模板如图5所示。

1	2	1
---	---	---

图5 实际应用的1×3 高斯模板

实验中,一个线阵 CCD 采集到的四狭缝目标图像减去固定阈值后的图像如图6所示。从图中可以看到,由于系统噪声的影响而使图像的边缘不平滑。采用图5所示的一维高斯模板平滑滤波后的图像如图7所示。从滤波结果可以看到,经过高斯平滑滤波后的图像边缘非常平滑,对系统噪声起到了很好的抑制作用。采用1×3 高斯模板,运算量小,实时性强。

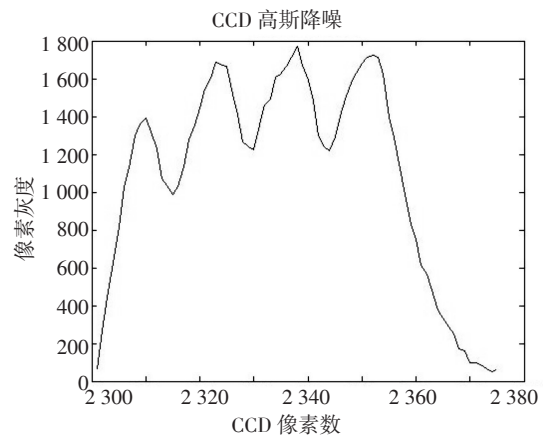


图6 采集到原始 CCD 图像

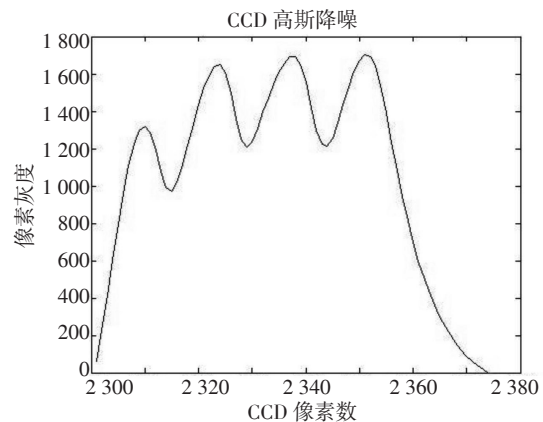


图7 经过 Gauss 滤波后的 CCD 图像

2.2 线性插值高斯加权重心算法

利用1×3 高斯模板可以快速有效地对高精度线阵 CCD 图像抑制噪声的同时保留图像的细节,为了进一步提高二维自准直仪的定位精度,兼顾定位算法的实时性,采用线性插值高斯加权重心算法对四狭缝目标中心进行快速亚像素定位。

为了减少数据处理量,提高处理速度,对四狭缝目标图像减去固定阈值后的 CCD 图像进行中心定位,用传统重心算法求目标中心可表示为^[10]

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i f(x_i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} f(x_i)} + n_1 \quad (9)$$

式中, \bar{x} 为质心的像元序号; x_i 为像元序号; $f(x_i)$ 为像元在 i 点处的灰度值; n_1, n_2 是线阵 CCD 上起始和终止的像元的序号数, 在 n_1 和 n_2 之间的像元需要进行数据处理。

在重心定位过程中, 噪声对定位精度有很大的影响, 因此采用高斯加权的重心定位具有很高的去噪声能力^[8]。在重心定位中不采用原图像像素灰度值而是采用高斯滤波后的灰度值进行计算。故由式(9)可以得到高斯加权重心算法可以表示为

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i I(x_i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} I(x_i)} + n_1 \quad (10)$$

其中, $I(x) = \sum_{i=-k/2}^{k/2} f(x+i)g(i)$ (11)

式中, \bar{x}_0 为求得质心的像元序号坐标; k 为高斯模板的大小; $g(i)$ 为一维高斯模板; $I(x)$ 表示经过高斯滤波后的图像数据。

目标中心的定位精度与目标图像灰度的轮廓和信噪比有很大关系, 因此可以通过插值的方法在目标成像区域增加一些可利用的点, 来提高质心定位的精度。由于 Lagrange 多项式得到的线性插值最为简单, 实用性强, 对噪声的抑制、图像质量的提高效果都比较好^[10]。因此, 文中选用 Lagrange 线性插值。根据线性插值理论, 设点 x_i, x_{i+1} 的带高斯加权的灰度值为 $I(x_i), I(x_{i+1})$, 插值点为 v , 则

$$I(v) = I(x_i) + l[I(x_{i+1}) - I(x_i)] \quad (12)$$

其中, $l = \frac{(x_v - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)}$ (13)

经过插值运算后, 目标图像的中心可由下式计算

$$\bar{x}_0 = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i I(x_i) + \sum_{i=m_1}^{m_2} x_v I(x_v)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} I(x_i) + \sum_{i=m_1}^{m_2} I(x_v)} + n_1 \quad (14)$$

式中, \bar{x}_0 为求得目标中心坐标; m_1 和 m_2 为插值 CCD 像元的序号数; x_v 为插值单元坐标。

3 实验结果及数据分析

采用文中提出的定位算法, 在高精度线阵 CCD 二维自准直仪原理样机上已成功实现了快速精确亚像素定位。为了验证该定位方法的精度和速度, 选用德国穆勒公司的 ELCOMAT3000 型自准直仪进行对比。ELCOMAT 3000 在全量程 ($\pm 1\ 000''$) 范围内示值误差不超过 $0.25''$, 在任意 $20''$ 内示值误差不超过 $0.10''$ 。比较结果非常接近, 测得原理样机 X 轴和 Y 轴测量范围 $\pm 900''$, 相对于进口 ELCOMAT3000 示值误差优于 $\pm 0.5''$, 单次二维角度测量时间小于 0.2 s , 实现了快速高精度二维角度测量。在 $\pm 300''$ 范围内, X 轴和 Y 轴测量的对比结果与误差见图 8 和图 9。

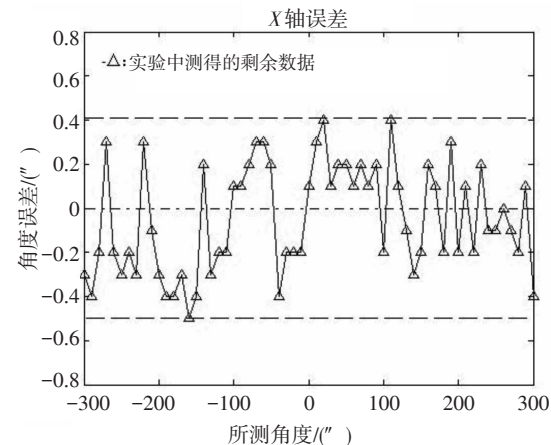
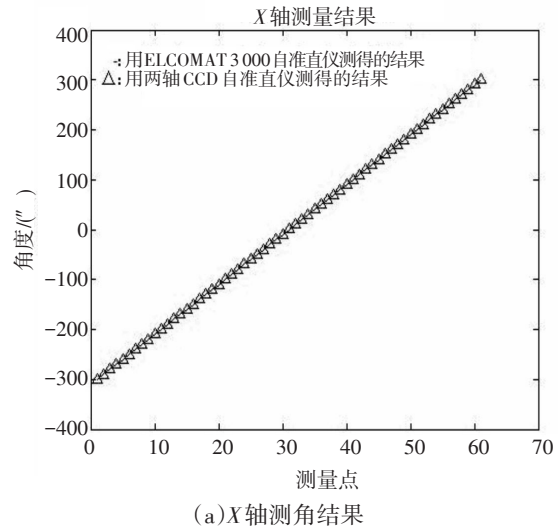
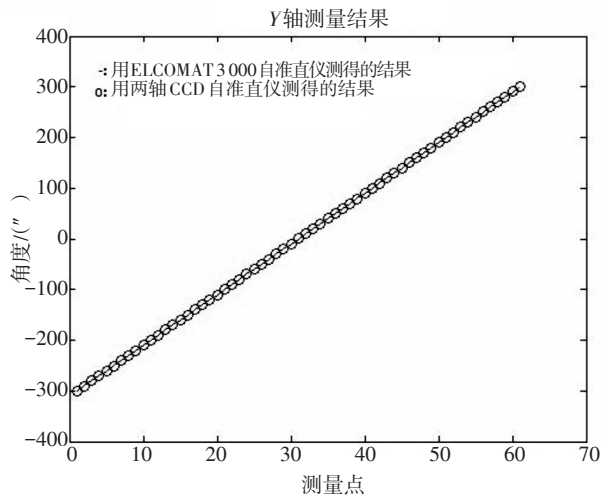
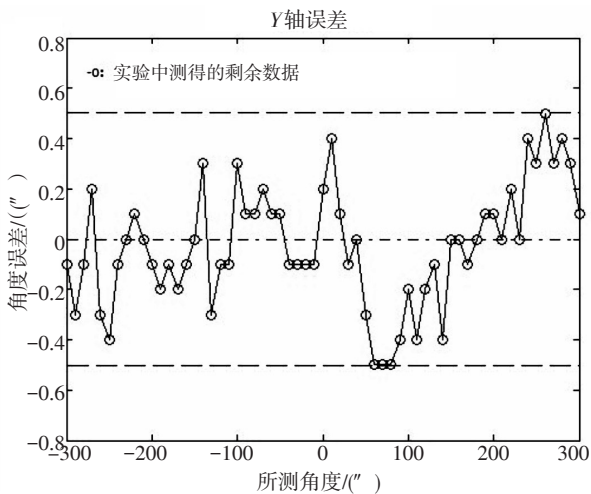


图 8 X 轴测角结果与测角误差



(a) Y轴测角结果



(b) Y轴测角误差

图9 Y轴测角结果与测角误差

4 结论

提出了一种基于高斯滤波的二维自准直仪目

标中心的亚像素定位算法。首先采用高斯滤波对 CCD 图像进行平滑处理,在抑制噪声的同时生成带有高斯加权的 CCD 图像,然后采用线性插值重心法对加权图像进行目标中心亚像素定位。在原理样机上,应用该方法实现了单次二维角度测量时间小于 0.2 s,测量范围 $\pm 900''$,精度优于 $\pm 0.5''$ 。实验结果表明,该定位方法稳定性好,定位精度高且实时性强,具备工程应用价值。

参考文献

- [1] 敖磊,谭久彬,崔继文,等.一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. 光学学报,2007,27(2):253-254.
- [2] 张明丽,刘立人,万玲玉,等.CCD 扫描检测光束准直度[J]. 光学学报,2005,25(8):1067-1071.
- [3] JIE Y, LONG X. CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 1362-1365.
- [4] 贺俊吉,张广军.结构光三维视觉检测中光条图像处理研究方法研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(7):593-597.
- [5] 丁晓华,李由,于起峰,等.CCD 噪声标定及其在边缘定位中的应用[J]. 光学学报,2008,28(1):99-104.
- [6] 欧同庚,陈志高,杨博雄,等.CCD 光电自准仪工作原理及误差源分析[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(S1):98-100.
- [7] 刘兆蓉,王志乾,刘绍锦,等.激光光斑中心精确定位算法研究[J]. 2011,28(5): 399-400.
- [8] 张广军.视觉测量[M].北京:科学出版社,2008,44-46.
- [9] Kohl T R. Vision tutor lab guide[M]. Massachusetts: Amerinex Artificial Intelligence, Inc.,1992.
- [10] 尚学军,何明一,王军良.基于线阵 CCD 的光斑定位算法研究[J]. 激光与红外,2008,38(7):730-731.

声明

近期发现有假冒《光电技术应用》期刊的投稿代理机构非法进行投稿代理,对此,《光电技术应用》编辑部正式声明,本刊自成立以来没有设立任何投稿代理机构且尚未开通在线投稿,一直使用的、唯一的投稿邮箱为 nloe@vip.163.com,编辑部电话:0416-2835782。请作者按此邮箱投稿,如有疑问请直接通过电话或邮件与编辑部联系咨询。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部