

文章编号 1004-924X(2012)05-1102-08

应用属性距离加权平均滤波提高 CCD 光斑的 亚像素定位精度

熊 刚, 丁天怀*, 王 鹏

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘要:针对现有滤波方法无法克服 CCD 光斑信号的噪声去除和特征保持之间的矛盾,由图像噪声引起的随机误差成为影响光斑定位精度主要因素的问题,提出了用属性距离加权平均(ADWA)方法对光斑图像进行滤波处理的方案。根据含噪信号的属性分离信号和噪声,通过增加属性的方式来进一步缓解噪声去除与信号特征保持之间的矛盾。实验结果表明,在基于位置、幅值的二元属性距离加权平均(2-ADWA/LV)的基础上,引入“梯度”属性构成 3-ADWA/LVG 后对光斑信号进行滤波处理,能将光斑定位精度提高 20% 以上,使定位结果标准差减小到 0.024 pixel。实验表明,用 ADWA 对光斑信号滤波,可通过挖掘和引入新的属性来进一步去除光斑信号噪声同时增强信号特征保持效果,从而为提高光斑的亚像素定位精度提供一条有效途径。

关键词:电荷耦合器件;亚像素定位;质心;属性距离;噪声去除;特征保持

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1102

Improvement of sub-pixel location accuracy of light-spot on CCD with ADWA filter

XIONG Gang, DING Tian-huai*, WANG Peng

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University,
Beijing 100084, China.)

* Corresponding author, E-mail: dlnj@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: As existing filtering methods could not overcome the contradiction between noise removal and feature preserving for the light-spot signals on a CCD, the random error resulted from image noises has become a key constraint on the location accuracy of the light-spot images. Therefore, a filtering method named Attribute Distance Weighted Average (ADWA) is proposed to denoise the light-spot images. The method separates signals and noises based on their attributes, and alleviates the contradiction between noise removal and feature preserving of the signals progressively through introducing new attributes. Experimental results show that as compared with the bivariate ADWA based on “location” and “value”(2-ADWA/LV), the sub-pixel location accuracy of light-spot has been improved by more than 20% and the standard deviation of location reduced to 0.024 pixel by introducing a 3-

收稿日期:2012-01-28;修订日期:2012-03-01.

基金项目:清华大学校企合作资助项目(No. 041514028)

ADWA/LVG formed by adding an attribute "gradient" to 2-ADWA/LV. It concludes that when the ADWA is used to denoise the light-spot image, the filtering performance can be further enhanced progressively in both noise removal and feature preserving through introducing new attributes. The ADWA gives a new effective way to further improve the sub-pixel location accuracy of the light-spot.

Key words: Charge Coupled Device (CCD); sub-pixel location; centroid; attribute distance; noise removal; feature preserving

1 引言

基于红外、激光的光学检测技术,很多都可归结为光斑位置的定位检测,通过检测目标光斑在 CCD 等成像器件上的像素位置来反映被测量的大小。由于 CCD 等成像器件的像素分辨率总是有限的,光斑位置的整像素定位精度常常满足不了科研和工程的需要,因此人们采取各种措施来实现光斑位置的亚像素定位检测。

现有的光斑亚像素定位检测方法包括硬件方法和软件方法两大类。硬件方法主要是通过对成像器件的像素移位脉冲计数、或者用多个成像器件在空间上错开排列来实现像素细分。由于硬件方法增加了系统成本和复杂性,其亚像素检测精度也只能达到零点几像素,故实际应用很少。

软件方法分为两类。一类是灰度质心法,用光斑图像的灰度重心所对应的像素位置坐标值作为光斑位置的定位结果。这类方法的研究重点是改进光斑与背景之间的分割方式以及提高灰度积分算法的精度。另一类是拟合形心法,将光斑灰度分布或边缘轮廓拟合为对称的函数或几何图形,以该函数或几何图形的对称中心作为光斑位置的定位结果,研究重点是改进拟合函数模型,用边缘检测算子^[1]、Hough 变换^[2]、Zernike 矩^[3]、分水岭^[4]、测地线主动轮廓模型^[5]等改善光斑边缘轮廓提取效果。软件方法能使光斑的定位误差减小到 0.1pixel 以内,实际应用较多,也是人们研究的主要方向。

现有这些光斑亚像素定位方法研究的主要焦点是努力减小定位方法本身的有偏性,对光斑图像噪声的影响考虑不多,因此从如何有效地去除光斑图像噪声的角度来提高定位精度的研究很

少。鉴于此,本文从光斑图像的噪声去除着手,从减小光斑定位随机误差的角度来研究提高光斑亚像素定位精度的方法。首先,通过分析指出制约亚像素定位精度的关键性因素是图像滤波,接着提出用属性距离加权平均(ADWA)滤波方法来克服该关键性制约因素,最后由实验证明用 ADWA 方法进一步提高光斑亚像素定位精度的有效性。

2 光斑亚像素定位精度制约因素分析

光斑的亚像素定位误差由系统误差和随机误差构成^[6-8]。要提高光斑的亚像素定位精度,必须从减小系统误差和随机误差两方面来解决。

系统误差主要由成像器件光电转换的非线性、像素尺寸的非均匀性、定位算法的有偏性、光点图像的欠采样等因素造成。Jia Hui^[6]、陈运锦^[7]等的研究表明,光斑质心估计的系统误差与光斑的真实亚像素位置之间在任何整像素前后的 0.5 个像素范围内为图 1 所示的准正弦关系(图中 σ 表示光斑的高斯宽度)。系统误差是确定

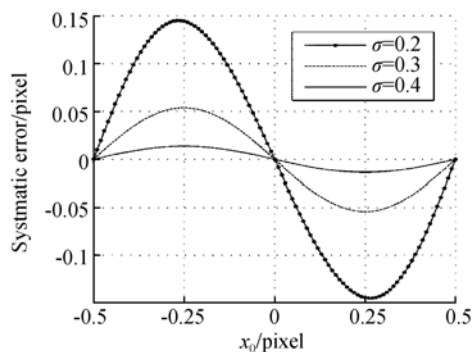


图 1 光斑质心估计算法的系统误差

Fig. 1 Systematic error of Center of Mass CoM algorithm

的,因此可通过标定来检测,通过补偿来消除。陈运锦等^[7]建立了如何测量系统误差和随机误差的实验方法和系统;Nathan Hagen 等^[9]对冲激采样模型造成的高斯型光斑质心估计有偏性及其补偿问题进行了研究;Jia Hui 等^[6]提出了补偿质心法(CCoM)来消除系统误差,且满足最小方差和无偏条件;杨君等^[8]也用最小二乘拟合法设计了补偿模板,对不同宽度光斑的定位系统误差进行了补偿。因此,如何消除系统误差的问题,在目前已经不是难题。

随机误差主要由图像噪声引起,包括光子入射噪声、背景噪声、暗电流噪声、读出噪声等。Jia Hui^[6]、Nathan Hagen^[9]、应家驹^[10]等研究了噪声对光斑质心估计性能影响的数学模型,其中 Nathan Hagen 等^[9]给出了在均匀分布噪声情况下,高斯型光斑质心的极大似然估计值的方差为:

$$\text{var}(\hat{x}) \approx \frac{2\sigma^2\omega}{A^2\delta_x\sqrt{\pi}}, \quad (1)$$

式中 σ 为噪声标准差, ω 为光斑的高斯宽度, A 为光斑幅度, δ_x 为像素宽度。该式定量地表示了随机噪声与光斑质心估计精度之间的关系。

Jia Hui^[6] 及 Chen Hongli 等^[11] 还从统计理论的角度,推导了在光子入射噪声情况下质心估计均方根误差的 Cramér-Rao 下界为:

$$\delta_{\text{CRLB}} = \left[\int_{-0.5}^{0.5} \text{var}(\hat{x}_0) dx_0 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

式中 x_0 是光斑质心的真实位置, $\text{var}(\hat{x}_0)$ 是由随机噪声导致的质心估计值的方差。该 Cramér-Rao 下界直接表明了随机噪声对光斑质心估计精度的制约作用。

为了降低光斑信号的噪声,减小光斑定位随机误差,人们尝试过用 Lee 滤波^[12]、形态学滤波^[13]、中值滤波^[14]、Kalman 滤波^[15]等方法对光斑图像进行去噪处理,取得了一定的效果。但由于现有这些滤波方法都存在噪声去除和信号特征保持之间的矛盾,在滤除噪声的同时,也会导致光斑信号的幅度衰减、边缘变缓等问题,而这些问题又会导致光斑定位精度的降低,因此现有滤波方法在降低光斑定位随机误差中的贡献是非常有限的。由此可见,如何尽量彻底有效地滤除图像噪声,减小随机误差成了目前制约光斑亚像素定位

精度的关键性因素;而造成这种情况的原因就是现有滤波方法无法解决光斑信号的噪声去除和特征保持之间的矛盾。本文采用 ADWA 滤波方法来缓解该矛盾,从而进一步提高光斑的亚像素定位精度。

3 ADWA 滤波算法

对基本加权滑动平均方法的权函数做改进,可构成属性距离加权平均(Attribute Distance Weighted Average: ADWA)。对于一维信号来说,ADWA 的算法表示为:

$$\bar{V}_i = \frac{\sum_{k=-N}^N \omega_k V_{i+k}}{\sum_{k=-N}^N \omega_k} = \frac{\sum_{k=-N}^N f(D_k) \cdot V_{i+k}}{\sum_{k=-N}^N f(D_k)}, \quad (3)$$

其中 V_{i+k} 为采样信号值, \bar{V}_i 为对应于 V_i 的滤波结果, $\omega_k = f(D_k)$ 为采样点 V_{i+k} 的权系数, D_k 为多元属性距离。记第 i 个采样点的第 m 个属性为 $A_{m \cdot i}$, 则第 $(i+k)$ 采样点和第 i 采样点之间的 M 元属性距离表示为:

$$D_k = \sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{d_{mrk}^2}{\sigma_m^2}} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \left(\frac{|A_{m \cdot (i+k)} - A_{m \cdot i}|}{\sigma_m} \right)^2}, \quad (4)$$

其中 d_m 为属性基距离, σ_m 为属性 A_m 的正规化系数,用于调节相应属性在滤波过程中的作用力度。属性距离反映了采样数据点之间(实质上反映了信号和噪声之间)在多个属性上的差异,因此 ADWA 是从多属性角度来分离噪声和信号,克服了其他滤波方法只局限于信号个别属性的缺点。

采样信号的属性,能够反映采样数据点的任何独特特征,并可用来描述不同采样点之间,或者是信号和噪声之间的任何差异性 or 区分性的任何变量,它的数量是无穷的。时间信号的采样时间及图像信号的像素位置(统称为 Location)、幅值(Value)、梯度(Gradient)、方差、曲率、分形特征、混沌或秩序的状态等等都是信号的属性。如果利用位置、幅值和梯度这 3 个属性实施 ADWA 滤波,就构成了基于位置、幅值、梯度的三元属性距离加权平均,记为 3-ADWA/LVG。第 $(i+k)$ 采样点和第 i 采样点之间的基

于位置、幅值、梯度的三元正规化属性距离(简称为 $3_NAD/LVG$)为:

$$D_{LVG \cdot k} = \sqrt{\frac{d_{L \cdot k}^2}{\sigma_L^2} + \frac{d_{V \cdot k}^2}{\sigma_V^2} + \frac{d_{G \cdot k}^2}{\sigma_G^2}} = \sqrt{\left(\frac{L_{i+k} - L_i}{\sigma_L}\right)^2 + \left(\frac{V_{i+k} - V_i}{\sigma_V}\right)^2 + \left(\frac{G_{i+k} - G_i}{\sigma_G}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{(i+k) - i}{\sigma_L}\right)^2 + \left(\frac{V_{i+k} - V_i}{\sigma_V}\right)^2 + \left(\frac{(\partial V/\partial L)|_{i+k} - (\partial V/\partial L)|_i}{\sigma_L}\right)^2} \quad (5)$$

图 2 给出了一个含噪高斯型信号中两点 B_F' 和 B 之间的三元属性距离 $|B_F' B|$ 的示意图,同时也给出了采样信号曲线和 ADWA 的权函数在正规化属性空间中的形状。图 2 表明,在高维正规化属性空间中,权函数变成了球形,信号曲线也实现了自动的伸缩和扭曲调整,使其本来很弯曲的局部区域(比如图 2 的 $L/\sigma_L - V/\sigma_V$ 平面内 B 点附近区域)也在属性空间中变得更平直了,从而使球形滤波窗口所覆盖的局部信号段更加平直,即局部平稳性得到了提高,因此 ADWA 对信号有自寻平稳的能力。若利用的属性越多,其自寻平稳的能力也越强,因此 ADWA 能通过增加属性的方式来持续地提升噪声去除和信号特征保持两方面的效果,从而克服其他滤波方法无法克服的矛盾。

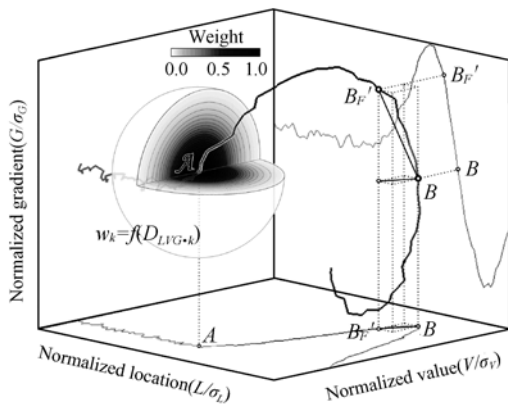


图 2 正规化 L-V-G 空间中的采样信号及球形权函数

Fig. 2 Sampled signal and spherical weight function in normalized L-V-G space

ADWA 用人类区分事物的思维模式来分离信号和噪声,就像我们要从一群人中区分出一个目标人物一样,当仅仅依靠身高等个别属性不能识别出目标人物的时候,就再加入相貌、体态,甚至个性、能力之类的属性来区分。据此特点,为方

便,可简称 ADWA 为“爱多娃”(喜欢用多种属性解决问题的小孩)。本文就具体以 2-ADWA/LV 和 3-ADWA/LVG 用于 CCD 光斑图像的滤波为例,从减小随机误差的角度来说明用 ADWA 方法提高光斑亚像素定位精度的有效性。

4 实验及结果分析

4.1 实验系统及方法

实验以图 3 所示的汽车四轮定位仪中线阵 CCD 光斑图像的亚像素定位为例,由柱面镜和线阵 CCD 构成线阵相机,红外二极管发出的光经柱面镜汇聚成垂直方向的线光与 CCD 相交,从而形成图中左上方所示的一维光斑图像,以该光斑的像素位置来检测红外二极管相对于线阵相机的方位角度。线阵 CCD 采用 TCD1304AP,将其中心像素的位置坐标定义为 0,则其像素位置坐标为 $-1\ 823 \sim 1\ 824$ 。

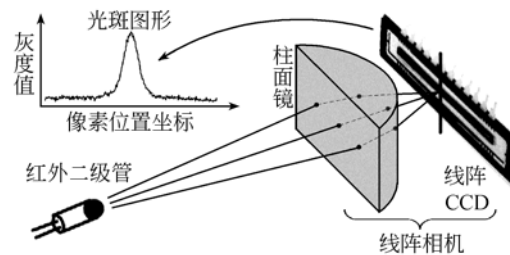


图 3 汽车车轮定位仪中光斑信号的产生

Fig. 3 Generation of light-spot in wheel aligner

在红外二极管与线阵相机间保持某一固定方位角的情况下,连续采集 CCD 图像 50 次作为含噪光斑图像样本 $f_i (i=1 \sim 50)$,并将样本的均值作为不含噪声的真实光斑信号 f_s ,即

$$f_s = \sum_{i=1}^{50} f_i / 50 \quad (i = 1 \sim 50), \quad (6)$$

单次采样图像的噪声 n_i 由下式求得:

$$n_i = f_i - f_s \quad (i=1 \sim 50), \quad (7)$$

对 n_i 乘上不同系数 a_j , 再加上 f_s , 可得到不同噪声级别的光斑图像采样信号 f_i^j , 即

$$f_i^j = f_s + a_j \times n_i \quad (i=1 \sim 50), \quad (8)$$

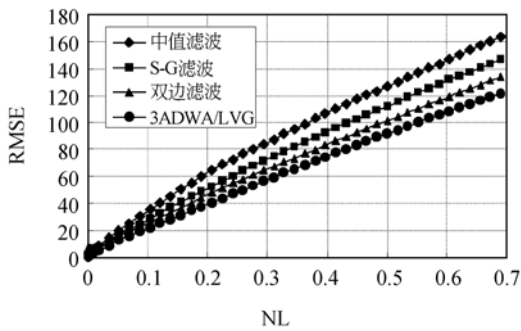
其中 j 表示噪声水平编号, 对应的噪声水平 NL_j 定义为 50 次采样信号中噪声标准差的均值与真实光斑信号标准差之比, 即

$$NL_j = \left(\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \sqrt{\text{var}(a_j \times n_i)} \right) / \sqrt{\text{var}(f_s)}. \quad (9)$$

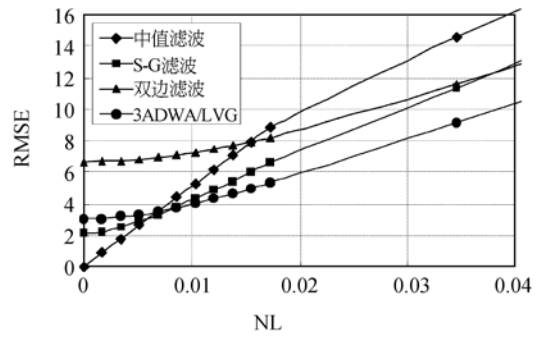
$NL_j=0$ 时, 表示光斑信号不含噪声; $NL_j=1$ 时, 噪声波动范围与光斑真实信号幅度相当, 光斑真实信号基本上完全淹没在噪声中。实验中, 设置 50 组不同的噪声级别, 当 $0 \leq j \leq 10$ 时取噪声缩放系数为 $a_j=0.05 \times j$, 对应的噪声水平为 $0 \sim 0.01726$; 当 $10 \leq j < 50$ 时取 $a_j=0.5 \times (j-9)$, 对应的噪声水平为 $0.01726 \sim 0.69044$ 。对上述不同噪声级别下的光斑信号, 先用中值滤波、Sacitzky-Golay 滤波、双边滤波(取高斯权函数时为 ADWA 的一个特例, 即 2-ADWA/LV)、3-ADWA/LVG 滤波 4 种方法进行滤波, 并优化各滤波器参数, 获得均方根误差(RMSE)最小的最优滤波结果, 再对各最优滤波结果用带阈值的灰度质心法求取光斑质心的亚像素定位结果, 最后根据 50 个定位结果的标准差来比较不同滤波方法对定位精度的贡献大小。

4.2 不同噪声水平下的光斑定位实验及分析

根据前述实验安排, 当光斑的像素位置坐标(由信号 f_s 定位计算得到)固定在 -1505.198 时, 不同滤波方法最优滤波结果对应的 RMSE 和噪声水平的关系如图 4 所示。在整个噪声水平范围内, 不同滤波方法最优滤波结果的 RMSE 与光



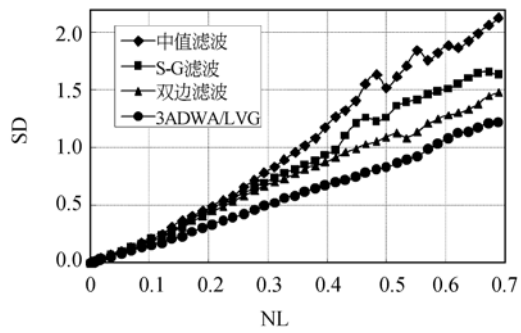
(a) 噪声水平为 $0 \sim 0.6904$
(a) $NL=0 \sim 0.6904$



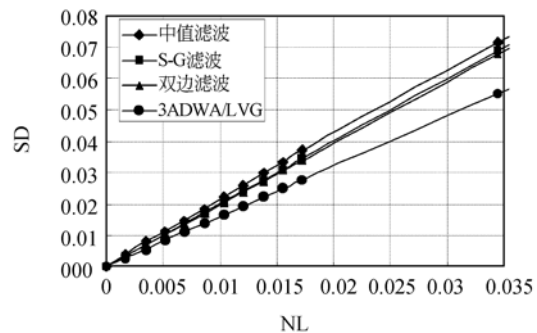
(b) 噪声水平为 $0 \sim 0.0345$
(b) $NL=0 \sim 0.0345$

图 4 不同方法滤波结果的均方根误差与噪声水平的关系

Fig. 4 Relationship between RMSE and NL under different filtering methods



(a) 噪声水平为 $0 \sim 0.6904$
(a) $NL=0 \sim 0.6904$



(b) 噪声水平为 $0 \sim 0.0345$
(b) $NL=0 \sim 0.0345$

图 5 不同滤波方法和不同噪声水平下的光斑定位结果标准差

Fig. 5 Standard deviation of location under different NLs and filtering methods

斑信号的噪声水平都成近似线性的单调递增关系;总体上中值滤波结果的 RMSE 最大,3ADWA/LVG 滤波结果的 RMSE 最小,即各滤波方法在去除噪声和信号特征保持两方面的综合能力强弱顺序依次为:3-ADWA/LVG > 双边滤波 > Sacitzky-Golay 滤波 > 中值滤波。

各滤波方法对光斑定位精度的贡献见图 5。从图 5 可以看出,对所用的 4 种滤波方法,光斑定位结果的标准差与噪声水平都呈单调递增关系:噪声水平越高,定位结果标准差越大,定位精度越小,这充分证明了噪声对定位精度的制约作用。同时,在不同噪声水平,使用 3-ADWA/LVG 滤波时,光斑定位结果标准差都最小,定位精度最高,而使用中值滤波时定位结果标准差最大。

对比图 4 和图 5 可知,若滤波结果的 RMSE 越小,则光斑定位结果标准差也越小,定位精度越高。由此可见,如何选择优异的滤波方法来尽量降低光斑图像的 RMSE,对提高光斑定位精度具有关键性的作用。

4.3 光斑位于 CCD 不同位置时的定位实验及分析

实验中,在水平面内转动线阵相机,从而改变光斑在 CCD 上的位置。在固定 NL=0.034 5(本实验的实际噪声水平)的情况下,用前述 4 种滤波方法对不同位置的光斑图像滤波后进行定位计算,所得实验结果如图 6 和图 7 所示。

图 6 表明,4 种方法最优滤波结果的 RMSE 与光斑的像素位置都呈近似的水平直线关系,即光斑在 CCD 上的位置变化对滤波性能基本上没

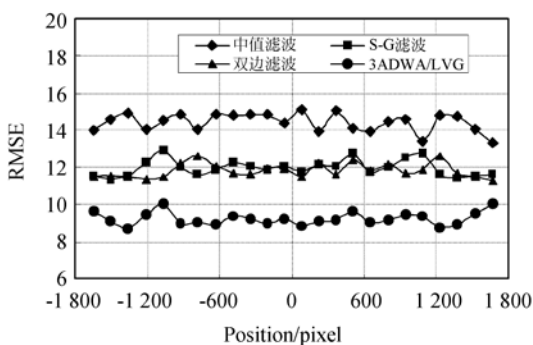


图 6 各滤波方法对应的滤波结果的 RMSE
Fig. 6 RMSE of filtered results

有影响;同时,各滤波方法对不同位置下光斑图像的滤波性能优劣次序为:3-ADWA/LVG > 双边滤波及 Sacitzky-Golay 滤波 > 中值滤波,这与它们在光斑图像的不同噪声水平下所表现性能优劣顺序一致,3-ADWA/LVG 获得了最好的滤波效果。

而图 7 表明,在 CCD 的整个像素位置坐标范围内,光斑图像经 3-ADWA/LVG 滤波后的定位结果标准差最小,定位精度最高;光斑图像经中值滤波后,定位精度最低。同时,随着光斑从 CCD 的中部向两端移动时,定位结果标准差呈近似指数的关系递增,这主要是由于在本实验系统中,越靠近 CCD 端部,光线的弥散作用导致光斑图像越宽、越不对称,从而导致光斑定位精度越差^[11]。

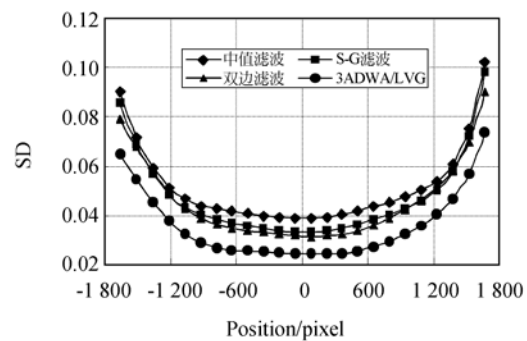


图 7 各滤波方法对应的定位结果标准差

Fig. 7 Standard deviation of location under different filtering methods

对比图 6 和图 7 可知,不论光斑位于 CCD 上什么位置,光斑图像滤波结果的 RMSE 越小时,光斑的定位结果标准差也越小,定位精度越高。不同像素位置条件下的光斑定位结果再次证明了光斑图像的滤波性能对提高光斑定位精度具有决定性的作用。

4.4 实验小结

图 4~图 7 所示的实验结果都表明,光斑图像滤波结果的 RMSE 直接决定了光斑定位结果的精确度;在本实验所用滤波方法中,3-ADWA/LVG 不但获得了最小的 RMSE 及最高的光斑定位精确度,而且,相对于 2-ADWA/LV(即双边滤波),3-ADWA/LVG 在增加了“梯度”属性后,明显进一步地降低了滤波结果的 RMSE 及定位结

果标准差。图 5(b) 就表明在本实验的实际噪声水平 $NL=0.0345$ 时,使用 3-ADWA/LVG 所获得的定位标准差为 0.055 pixel ,比用双边滤波时的定位标准差 0.068 pixel 降低了 $(0.068 - 0.054)/0.068=20.6\%$;图 7 也表明,当光斑位于 CCD 中部时,3-ADWA/LVG 将定位标准差由双边滤波的 0.032 pixel 降到 0.024 pixel ,定位误差降低了 $(0.032 - 0.024)/0.032=25\%$ 。上述结果表明,用 ADWA 对光斑图像进行滤波处理,通过增加属性来提高滤波性能并以此进一步提高光斑定位精度是可行的。

在算法的实时性方面,在本实验所用的硬件处理平台(单片机 ATmega64L,时钟信号 16 MHz)上,用不同滤波方法完成一次光斑图像的滤波操作和定位计算所需时间分别为:中值滤波耗时 118 ms ,Sacitzky-Golay 滤波耗时 144 ms ,双边滤波(2-ADWA/LV)耗时 137 ms ,3-ADWA/LVG 耗时 179 ms 。3-ADWA/LVG 的耗时比 2-ADWA/LV 的耗时增加了 $(179 - 137)/137=30.6\%$,实时性有所降低,这主要是由于 3-ADWA/LVG 需要计算“梯度”所致。在 ADWA 中,随着属性数量的增加,算法的实时性必然会有所降低,实际使用中需要在算法实时性和光斑定位精度两方面作一个折中选择。

参考文献:

- [1] WANG X J, GAO J, WANG L. A survey of sub-pixel object localization for image measurement [C]. *IEEE International Conference on Information Acquisition*, 2004: 398-401.
- [2] CUI J W, TAN J B, AO L, *et al.*. Optimized algorithm of laser spot center location in strong noise [C]. *Journal of Physics: Conference Series* 13, 2005: 312-315.
- [3] LIANG B, DONG M L, WANG J. Sub-pixel location of center of target based on Zernike moment [J]. *SPIE*, 2010, 7544: 75443A-1-75443A-6.
- [4] HOU B K, DING X M. Image segmentation algorithm for location of laser spots during aircraft relative attitude determination [C]. *SPIE*, 2010, 7544: 754415-1-754415-6.

5 结 论

光斑的亚像素定位误差包括系统误差和随机误差。系统误差可以通过标定和补偿来消除,而要减小光斑图像噪声引起的随机误差,最重要的途径就是提高光斑图像的滤波性能。现有滤波方法都具有不可克服的噪声去除和信号特征保持之间的矛盾,因而用这些方法对光斑图像滤波,在提高光斑定位精度方面的成效非常有限。ADWA 方法利用含噪信号的多种属性来分离信号和噪声,随着属性的增加,ADWA 能持续地缓解噪声去除和信号特征保持之间的矛盾,不断弱化图像噪声对光斑亚像素定位精度的制约作用。实验证明,用 ADWA 对光斑图像滤波,在 2-ADWA/LV 的基础上增加“梯度”属性后,光斑的亚像素定位精度即可提高 20% 以上;随着新属性的挖掘和引入,ADWA 在对光斑图像进行滤波处理时将获得更好的去噪性能,光斑定位精度也将得到进一步的提高。ADWA 方法不但可用于一维的光斑灰度图像的去噪处理,也可扩展应用于二维的或彩色的光斑图像的去噪处理。因此,用 ADWA 方法对光斑图像进行滤波处理,为减小光斑定位随机误差并提高光斑亚像素定位精度提供了一条有效途径。

- [5] XU T F, ZHAO P. Precise center location for light spot contour images of light emitting diode control points in light-pen vision coordinate measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 47(12): 123602 (1-9).
- [6] JIA H, YANG J K, LI X J. Minimum variance unbiased subpixel centroid estimation of point image limited by photon shot noise [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, 27(9): 2038-2045.
- [7] 陈运锦,冯莹,魏立安,等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究[J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 80-84. CHEN Y J, FENG Y, WEI L A, *et al.*. Experiment research on subpixel location error of the facula centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(2): 80-84. (in Chinese)
- [8] 杨君,张涛,宋靖雁,等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4):

- 1002-1010.
- YANG J, ZHANG T, SONG J Y, *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 1002-1010. (in Chinese)
- [9] HAGEN N, KUPINSKI M, DERENIAK E L. Gaussian profile estimation in one dimension [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5374-5383.
- [10] 应家驹,王永仲,何永强,等. 成像激光告警的光斑定位误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 431-436.
- YING J J, WANG Y ZH, HE Y Q, *et al.*. Location error analysis of laser spot in imaging laser warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 431-436. (in Chinese)
- [11] CHEN H L, RAO CH H. Accuracy analysis on centroid estimation algorithm limited by photon noise for point object [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(8): 1526-1530.
- [12] 苗世迪,乔佩利,林克正,等. 基于线阵 CCD 的精确测量方法研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2006, 11(2): 1-3.
- MIAO SH D, QIAO P L, LIN K ZH, *et al.*. Research of method in the precise measurement based on line scan CCD [J]. *J. Harbin Univ. of Science and Technology*, 2006, 11(2): 1-3. (in Chinese)
- [13] 王志乾,刘兆蓉,赵雁,等. 变形测量系统中激光光斑中心精确定位算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(6): 485-489.
- WANG ZH Q, LIU ZH R, ZHAO Y, *et al.*. Precise center location algorithm for laser spot in distortion measuring system [J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(6): 485-489. (in Chinese)
- [11] 张奔牛,万红明,毛成林. 基于差分光斑中心定位算法的位移传感技术研究[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(2): 215-219.
- ZHANG B N, WAN H M, MAO CH L. Study on Displacement Sensor Based on Difference Operation Spot Center Location Algorithm [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2011, 24(2): 215-219. (in Chinese)
- [15] LIU H B, YANG J K, WANG J Q, *et al.*. Star spot location estimation using Kalman filter for star tracker [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(12): 1735-1744.

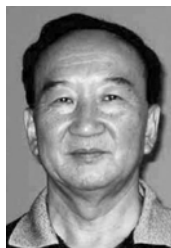
作者简介:



熊刚(1973—),男,重庆武隆人,博士研究生,讲师,2003年于解放军后勤工程学院获得硕士学位,主要从事测控技术、信号处理、嵌入式系统方面的研究。E-mail: xiongg07@mails.tsinghua.edu.cn.



王鹏(1977—),男,辽宁盘锦人,副教授,硕士生导师,1999年、2001年和2005年分别于清华大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事传感技术与智能仪器方面的研究。E-mail: peng@mail.tsinghua.edu.cn



丁天怀(1945—),男,江苏大丰人,教授,博士生导师,1970年毕业于清华大学精密仪器专业,1984~1986年在德国慕尼黑工业大学作访问学者,现兼任教育部高等学校仪器仪表学科课程指导委员会副主任,中国仪器仪表行业协会理事,主要从事传感器与智能仪器、光电检测和计算机视觉方面的研究。E-mail: dlunj@mail.tsinghua.edu.cn