

文章编号:1004-4213(2010)07-1297-5

局部牛顿插值法提高多狭缝自准直仪准确度

刘爱敏^{1,2},高立民¹,吴易明¹,白建明¹,李研^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710119)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要:根据多狭缝自准直仪目标物形状特征及光电探测器成像特点,通过边缘检测算法确定经过高斯滤波处理的 CCD 图像的像元级边界.在此基础上应用局部牛顿插值法对 CCD 图像边缘位置附近进行亚像元细分,实现亚像元边缘检测;再结合最小二乘直线边缘拟合法进一步提高图像边缘检测准确度.经验证,该算法可达到 0.13" 的定位准确度.

关键词:多狭缝自准直仪;CCD 亚像元细分;局部牛顿插值法;直线边缘拟合

中图分类号:TP274

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103907.1297

0 引言

自准直仪是利用光学自准直成像原理来实现一定范围内测量物体角度变化量的一种精密测角仪器.广泛应用于直线度、平行度、平面度、位置不确定度、垂直度等测量领域. CCD 摄像器件具有高灵敏度、高分辨率、高速度、宽光谱响应及测量的非接触性等优点,是高准确度自准直仪中使用最多的光电探测器^[1]. CCD 自准直仪系统实质上是图像测量系统,通过检测目标物 CCD 数字图像边缘或者质心的位移量,来实现转角测量.影响系统准确度的因素主要有^[2]:1)照明系统;2)光学成像系统;3)CCD 摄像器件;4)信号处理电路;5)软件算法.1)~4)均为硬件方面的影响因素,考虑到当前的工艺和技术条件限制,硬件条件不能无限制提高,而利用软件来提高测量的准确度具有方法简单、有效的优点,因此,亚像素细分定位的软件算法越来越受到人们的重视.本文根据多狭缝自准直仪目标物形状特征及光电探测器成像特点,提出了基于局部牛顿插值法与最小二乘直线拟合的混合算法,可达到 0.13" 的定位准确度,各个转角定位准确度都比较高,且该算法的运算量小,重复性好.

1 光电自准直仪测角原理

一个被照亮的目标物置于准直透镜后焦面上,其像被投射到无穷远,经由反射镜反射,反射回来的光波再次经过自准直仪成像并由光电探测器接收,如图 1. 自准直仪光轴与反射镜之间微小的角度变

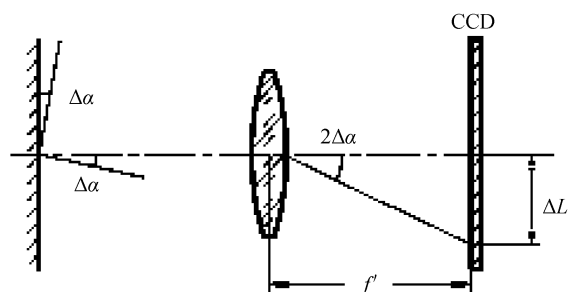


图 1 光电自准直仪测角原理

Fig. 1 Principle diagram of angle measurement of photo-electronic autocollimator

化量 $\Delta\alpha$ 转化为准直像的位移变化量 ΔL . 假设准直透镜的焦距为 f' , 反射镜转过小角度的计算公式为

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{\Delta L}{f'} \quad (1)$$

假设光电探测器的像元大小为 a , 位移变化量所覆盖的像元数为 n , 则式(1)可改写为

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{a \cdot n}{f'} \quad (2)$$

式(2)即为自准直仪基本测角公式.

2 算法选择与数据来源

2.1 算法选择

自准直仪中被测目标物通常为不同类型的狭缝,如十字丝、多个平行狭缝等,结合目标探测物及光电探测器成像的特点,多项式插值或者拟合是亚像素边缘检测中的基本算法之一^[3-5],其基本原理是以 CCD 输出信号的幅值作为对应像元中心点处的灰度值,该像元内其它位置的灰度值经插值或者拟合获得.可选用的插值算法有牛顿插值法、三次样条插值法;拟合算法主要是最小二乘多项式拟合.三次

样条插值函数是由一段段三次多项式拼接而成,在节点处,函数、一阶导数、二阶导数是连续的,但三阶导数是不连续的.它的优点是多节点插值,避免出现高次多项式,缺点是函数不充分光滑,影响像边缘定位准确度.牛顿插值函数在插值区间充分光滑,具有高阶导数,缺点是出现高次多项式^[4].针对亚像元边缘检测的要求,插值区间节点数目较少,要求插值函数充分光滑,采用局部牛顿插值函数是合适的.文献[5]提出全局三次样条插值方法,定位准确度较高,但该算法运算量大,硬件实现难度大.最小二乘多项式拟合中最小二乘的直线拟合算法,由于其计算量小、容易实现且算法的准确度也较高,也是经常采用的算法^[6-7].多狭缝目标物成像以后,灰度区域被分割为周期性不连续区域,有多个边缘点.本文针对此特点,且兼顾运算量,以及硬件上实现的难易程度,设计了基于局部牛顿插值法与最小二乘直线拟合的混合算法.

2.2 数据来源

文献[5]采用德国 MOLLER 公司生产的 ELCOMAT 3000 型自准直仪(采用多狭缝,测量范围任意 20"内具有 $\pm 0.01''$ 的准确度)、高速电视,以及多齿分度台(准确度为:0.1")进行了一个自准直仪的原理实验^[5],将自准直仪放在多齿分度台上,调节两者之间的位置,调节高速电视的焦距,使自准直仪发出的平行光成像在高速电视的面阵 CCD 上.这相当于自准直仪发出的平行光未经平面镜反射,直接进入另一自准直仪的 CCD 上;然后通过检测拍摄到狭缝数字图像边缘的相对位置来检测转角.假设其中一幅为零位,此后相对零位分别转动了 0.1", 2", 2.9", 得到四组图像(如图 2).并对实验过程中, a/f' 的值进行了标定,标定值为: 3.7×10^{-6} .本文中算法,均采用这几幅图像和该标定值进行处理.此外,由于在该实验中并未使用反射镜装置,因

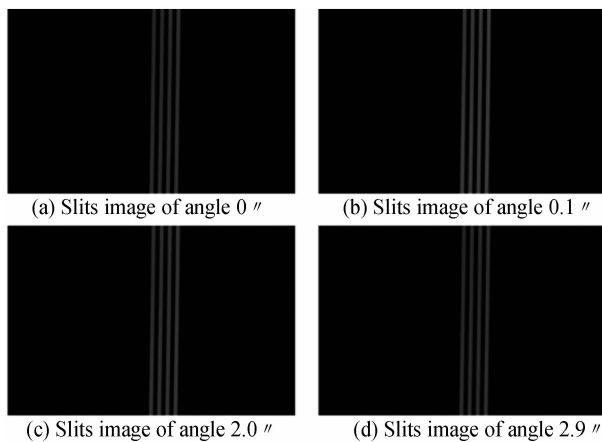


图 2 四幅待处理数字图像

Fig. 2 Four unprocessed digital images

此,式(2)演变为

$$\Delta\alpha = \arctan \frac{a \cdot n}{f'} \quad (3)$$

3 算法具体实现过程及描述

3.1 算法设计的基本思路

先对图像进行预处理;将处理后的灰度图像分割为不同区域;运用具体算法进行处理,获得多狭缝图像亚像元定位结果.所有算法均通过 MATLAB 编程实现.

3.2 局部牛顿插值法与最小二乘直线拟合的混合算法实现步骤

局部牛顿插值法与最小二乘直线拟合的混合算法实现的基本步骤分为:步骤 I \rightarrow II \rightarrow III \rightarrow A₁ \rightarrow A₂; 首先,对各步骤进行简要说明.

步骤 I(预处理):取二维数字图像 FF 其中一行 F ,经过高斯滤波运算,后得 G .

步骤 II(对 G 进行灰度区域分割):设定阈值 $T_1, T_2 (T_1 < T_2)$,依据为 T_1, T_2 将 G 划分为背景区域、目标区域及边缘过渡区域(各 8 个).

步骤 III:在边缘过渡区域 S_2 (8 个)进行梯度运算,并求得梯度最大值点(8 个).

步骤 A₁:在 S_2 中选定插值向量,进行牛顿插值,再进行梯度运算,求取最大值即为亚像素边缘点(8 个).

步骤 A₂:在 G 中,以亚像素边缘点为中心,两边各取两点进行五点直线拟合,最后得到亚像素边缘点(8 个).

3.3 混合算法中各算法的具体实现

3.3.1 混合算法中步骤 I \sim III 的算法实现

步骤 I:预处理中的高斯滤波算法

高斯滤波器是一类根据高斯函数的形状来选择权值的线性平滑滤波器,在空间域及频率域都是十分有效的低通滤波器,对抑制噪音的同时,能较好地保持边缘的信息.对原始图像中的行灰度向量 F ,进行高斯滤波处理后的灰度向量为 G ,且设滤波前后对应像素的灰度值为: $F(i), G(i)$;

$$G(i) = [F(i-1) + 2F(i) + F(i+1)]/4 \quad (4)$$

步骤 II:(对 $G(i)$ 进行灰度区域分割)

多狭缝目标物成像以后,灰度区域被分割为周期性不连续区域,有多个特征点(边缘点或灰度质心).因此,有必要进行灰度区域分割才有可能获得多个特征点对应的像素位置信息,为后继定位算法做准备.设定阈值 $T_1, T_2 (T_1 < T_2)$, $G < T_1$ 为背景区域,记为 S_0 ; $G > T_2$ 为目标区域,记为 S_1 (4 个); $T_1 < G < T_2$ 为边缘过渡区域记为 S_2 (8 个).参考俞

巧云等人针对一维边缘检测提出的一种直线拟合窗口的选取方法^[7],设灰度向量 G 中最大值为 G_{\max} , 最小值为 G_{\min} , 则 T_1, T_2 的值为

$$\begin{aligned} T_1 &= G_{\min} + 0.25(G_{\max} - G_{\min}) \\ T_2 &= G_{\min} + 0.75(G_{\max} - G_{\min}) \end{aligned} \quad (5)$$

灰度分割示意图如图 3, 在灰度向量 G 中, 下标由小到大逐个搜索, 设定一个标志位 $t=0$, 找到第一个大于 T_1 的点 $E_1(1)$, 则令标志位 $t=1$ 且记录像素下标位置 $b_1(1)$, 继续搜索, 找到第一个小于 T_1 的点 $E_1(2)$, 则令标志位 $t=0$ 且记录像素下标位置 $b_1(2)$; 之后继续搜索, 就能找到 8 个与 T_1 相关的灰度值 $E_1(i) (i=1 \sim 8)$ 及下标位置 $b_1(i) (i=1 \sim 8)$; 类似地, 也能找到 8 个与 T_2 相关的灰度值 $E_2(i) (i=1 \sim 8)$ 及下标位置 $b_2(i) (i=1 \sim 8)$. 那么, 位于 $b_2(2i-1) \sim b_2(2i) (i=1 \sim 4)$ 之间区域为目标区域 S_1 ; 位于 $b_1(2i-1) \sim b_2(2i-1)$ 、 $b_2(2i) \sim b_1(2i) (i=1 \sim 4)$ 之间的区域即为边缘过渡区域 S_2 ; 其余为背景区域 S_0 .

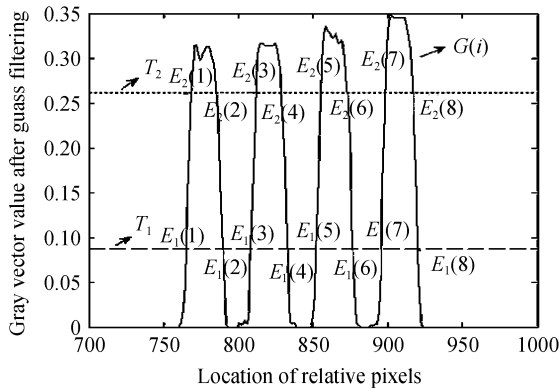


图 3 灰度分割示意图

Fig. 3 Schematic diagram of division of gray area

步骤 III: 求梯度算法

对于图像的阶跃边缘, 其边缘点在灰度梯度最大的地方^[8]; 因此, 梯度运算是边缘检测的基础, 对求 G 梯度, 用差分算子替代微分算子近似求得其一维梯度图像 R , 且设对应像素的灰度值、梯度值分别为: $G(i), R(i)$;

$$R(i) = |G(i-1) - G(i+1)| / 2 \quad (6)$$

在边缘过渡区域内 S_2 (8 个) 内, 当某一像素对应的梯度值满足条件

$$\begin{cases} R(i) \geq R(i-1) > R(i-2) \\ R(i) \geq R(i+1) > R(i+2) \end{cases} \quad (7)$$

即可认为该点为边缘点, 对应像素的灰度值为 $G(m(i))$, 实现边缘点的像素级定位。

3.3.2 流程图中步骤 $A_1 \sim A_2$ 的算法实现

步骤 A_1 : 局部牛顿插值算法

在获取边缘点的像素级定位点的位置以后, 在灰度向量 G 中, 以该点为中心, 两边各取两点, 共五点, 作为插值向量 (8 个), 设这五点对应插值向量为 $P(i)$, 且对应像素的下标向量为: $PI(i)$, 其中, $(i=1 \sim 8)$

$$\begin{cases} P(i) = [G(m(i)-2)G(m(i)-1)G(m(i)) \cdot \\ G(m(i)+1)G(m(i)+2)] \\ PI(i) = [m(i)-2m(i)-1m(i)m(i)+ \\ 1m(i)+2] \end{cases} \quad (8)$$

在基点 $B(i) = m(i) - 2$ 处, 向前 4 阶差分值为^[9]

$$\begin{cases} \Delta_1 G(m(i)-2) = G(m(i)-1) - G(m(i)-2) \\ \Delta_2 G(m(i)-2) = G(m(i)) - 2G(m(i)-1) + \\ G(m(i)-2) \\ \Delta_3 G(m(i)-2) = G(m(i)+1) - 3G(m(i)) + \\ 3G(m(i)-1) - G(m(i)-2) \\ \Delta_4 G(m(i)-2) = G(m(i)+2) - 4G(m(i)+1) + \\ 6G(m(i)) - 4G(m(i)-1) + G(m(i)-2) \end{cases} \quad (9)$$

设 t 在区间 $[0, 4]$, 四阶牛顿向前插值函数为

$$\begin{aligned} P(t, i) &= G(m(i)-2) + t\Delta_1 G(m(i)-2) + \\ &t(t-1)\Delta_2 G(m(i)-2)/2 + t(t-1)(t-2) \cdot \\ &\Delta_3 G(m(i)-2)/6 + t(t-1)(t-2)(t-3) \cdot \\ &\Delta_4 G(m(i)-2)/24 \end{aligned} \quad (10)$$

获得插值函数 $P(t, i)$, 之后再次进行差分运算, 求得梯度最大值点的位置 $t(M(i))$ (在区间 $[0, 4]$, 共 8 个), 以及对应灰度值 $P(M(i))$; $PE(i) = t(M(i)) + B(i)$, 即得到亚像素级边缘点定位。

步骤 A_2 : 利用最小二乘直线拟合获得更高的定位准确度

利用最小二乘直线拟合获得更高的定位准确度, 其定位思想实质为微位移测量方法. 将拟合所得的直线与灰度值为某一恒值的水平线相交的点作为边缘点的参考点, 检测该点的位置变化, 从而推断出边缘点的微位移. 在边缘过渡区域内 S_2 (8 个) 内进行直线拟合, $n(i)$ 为边缘过渡区长度, 且 j 在区间 $[1, n(i)] (i=1 \sim 8)$ 内, 设直线方程为

$$y(i, j) = a(i)x(i, j) + b(i) \quad (11)$$

设

$$\varphi(i) = \sum_{j=1}^{n(i)} (y(i, j) - Y(i, j))^2 = \sum_{j=1}^{n(i)} (a(i)x(i, j) + b(i) - Y(i, j))^2 \quad (12)$$

当 $\frac{\partial \varphi(i)}{\partial a(i)} = 0, \frac{\partial \varphi(i)}{\partial b(i)} = 0$ 时, 有

$$\begin{cases} a(i) = \frac{\sum_{j=1}^{n(i)} x(i,j)Y(i,j) - \frac{1}{n(i)} \sum_{j=1}^{n(i)} Y(i,j) \sum_{j=1}^{n(i)} x(i,j)}{\sum_{j=1}^{n(i)} x(i,j)^2 - \frac{1}{n(i)} (\sum_{j=1}^{n(i)} x(i,j))^2} \\ b(i) = \frac{1}{n(i)} (\sum_{j=1}^{n(i)} Y(i,j) - a \sum_{j=1}^{n(i)} x(i,j)) \end{cases} \quad (13)$$

φ 在最小二乘意义下有最小值,亚像素边缘点位置为

$$EM(i) = \frac{P(M(i)) - b(i)}{a(i)} \quad (14)$$

式(14)中, $i = 1 \sim 8$, $P(M(i))$ 为局部牛顿插值法得到的亚像素级边缘点对应的灰度值,这里作为边缘点参考点的灰度值, $EM(i)$ 即为通过局部牛顿插值与直线拟合混合算法确定的亚像素边缘点的位置。

表 1 局部牛顿插值法与最小二乘直线拟合的混合算法的细分定位结果

Table 1 The result of combination of local Newton interpolation functions and least square beeline edge fitting

Line of image \ Angle(°)	0.1(Reference value)		2.0(Reference value)		2.9(Reference value)	
	The result	Difference	The result	Difference	The result	Difference
100	0.1092	0.009 2	2.466 8	0.466 8	2.952 8	0.052 8
200	0.016 9	-0.083 1	2.446 8	0.446 8	3.215 5	0.315 5
300	0.174 2	0.074 2	2.596 3	0.596 3	3.185 7	0.285 7
400	0.266 7	0.166 7	2.596 2	0.596 2	3.292 9	0.392 9
500	0.141 2	0.041 2	2.364 4	0.364 4	2.938 2	0.038 2
600	0.407 2	0.307 2	2.563 2	0.563 2	3.254 2	0.354 2
700	0.154 9	0.054 9	2.676	0.676 0	3.230 5	0.330 5
800	0.203 5	0.103 5	2.265 9	0.265 9	2.931 3	0.031 3
900	0.059 4	-0.040 6	2.527 5	0.527 5	3.369 6	0.469 6
1 000	0.181 3	0.081 3	2.782 2	0.782 2	3.788 1	0.888 1
Mean value	0.171 4		2.528 5		3.215 9	
RMS	0.125 8		0.547 4		0.398 1	

表 2 直线拟合算法单独作用的细分定位结果

Table 2 The result of least square beeline edge fitting

Line of image \ Angle(°)	0.1(Reference value)		2.0(Reference value)		2.9(Reference value)	
	The result	Difference	The result	Difference	The result	Difference
100	0.463 4	0.363 4	2.641 9	0.641 9	3.338 4	0.438 4
200	0.309 6	0.209 6	2.7068	0.706 8	3.186 9	0.286 9
300	0.270 2	0.170 2	2.612 2	0.612 2	3.079 2	0.179 2
400	0.170 1	0.070 1	2.659 2	0.659 2	3.409 4	0.509 4
500	0.437 8	0.337 8	2.692 3	0.692 3	3.516 3	0.616 3
600	0.458 0	0.358 0	2.564 2	0.564 2	3.338 3	0.438 3
700	0.318 3	0.218 3	2.476 1	0.476 1	3.259 9	0.359 9
800	0.304 0	0.204 0	2.490 8	0.490 8	3.259 3	0.359 3
900	0.446	0.346 0	2.839 7	0.839 7	3.159 9	0.259 9
1000	0.204 8	0.104 8	2.348 4	0.348 4	2.978 2	0.078 2
Mean value	0.338 2		2.603 2		3.252 6	
RMS	0.2593		0.6175		0.3834	

由表 1~表 2 的运算结果可知,两算法在 2.9'' 的准确度基本相同,均方根误差在 0.38''~0.40'' 左右;在 2.0'' 的准确度在 0.54''~0.62'' 之间;在 0.1'' 的准确度在 0.13''~0.26'' 之间。局部牛顿插值法与最小

4 算法实现结果及比较

为了确定算法细分定位的准确度,利用实验中获得几个不同转角值的图像,根据算法中亚像元定位的流程,比较两幅图像特征点(边缘点)的位置变化(由于目标物自身特性,有多个特征点,相对位置变化也有多个,在此取其平均值),然后利用式(3)计算出相对转角值,并与实际相对转角值比较,即得出该算法应用于多狭缝自准直仪中细分定位的准确度。其中,表 1 为本文设计算法的细分定位结果;表 2 为省略掉算法流程图中步骤 A₁,边缘点的参考点采用算法流程图步骤 III 中获得像素级边缘点(8 个)。

二乘直线拟合的混合算法比直线拟合的算法的准确度要高,在 0.1'' 时,达到 0.13'' 以内的定位准确度,各个转角定位准确度都比较高,且算法的运算量小,重复性好,有利于后期校正;再结合前述算法选择部

分(2.1节)的分析,应用于多狭缝自准直仪,局部牛顿插值法结合最小二乘直线拟混合算法是较为合适的算法。

5 结论

本文根据多狭缝的成像特点,设计了牛顿插值法结合最小二乘直线拟混合算法,且应用于多狭缝自准直仪的细分定位,并分析比较它与直线拟合算法在自准直仪应用中的准确度,有一定的理论及实际应用价值。在具有相同 CCD 焦面定位误差、探测器噪声影响条件下,通过分析比较,选择出合适的算法。

参考文献

- [1] ZHANG Ji-you, FAN Tian-quan, CAO Xue-dong. Current research situation and prospects of photo-electronic autocollimator[J]. *Measurement Technique*, 2004, **7**:7-12.
张继友,范天泉,曹学东.光电自准直仪研究现状及展望[J]. 计量技术, 2004, **7**:7-12.
- [2] WANG Jian-Min, PU Zhao-Bang, LIU Guo-Dong. The research of sub-pixel algorithms of improving the accuracy of image measuring systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, **6**(4):44-49.
王建民,浦昭邦,刘国栋.提高图像测量系统准确度的细分算法[J]. 光学精密工程, 1998, **6**(4):44-49.
- [3] GU Lin, HU Xiao-dong, CHEN Liang-yi. SOC of measuring the sub-pixel edge of linear CCD based on FPGA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):617- 621.
谷林,胡晓东,陈良益,等.基于 FPGA 的线阵 CCD 亚像元边

- 缘检测片上系统[J]. 光子学报, 2004, **33**(5):617- 621.
- [4] ZHAO Ying, XU Bin. Numerical computation for the sub-pixel edge detection of CCD Array [J]. *Measurement Technique*, 1999, **11**:5-6.
赵英,续斌.面阵 CCD 亚像元边缘检测的数值计算[J]. 计量技术, 1999, **11**:5-6.
- [5] WU Wen-ming, GAO Li-min, WU Yi-ming. Improving precision of autocollimation with cubic spline interpolation functions[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8):1561-1564.
吴文明,高立民,吴易明,等.利用三次样条插值提高自准直仪的准确度[J]. 光子学报, 2007, **36**(8):1561-1564.
- [6] LI Jia-lie, DING Guo-qing, YAN Guo-zheng. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(3):281-284.
李佳列,丁国清,颜国正,等.采用 CCD 的非接触测量中提高准确度的方法[J]. 光学精密工程, 2002, **10**(3):281-284.
- [7] YU Qiao-yun, XING Xiao-zheng, HU Hong-zhuan. Application of straight line fitting method to the edge detection of one-dimension image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(6):56-58,65.
俞巧云,邢晓正,胡红专,等.直线拟合方法在一维图像边缘检测中的应用[J]. 光电工程, 2001, **28**(6):56-58,65.
- [8] WU Xiao-bo. Analyzing of the characteristic of image edge[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(1):59-63.
吴晓波.图像边缘特征分析[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(1):59-63.
- [9] LI Qing-yang, WANG Neng-chao, YI Da-yi. Numerical analysis [M]. 4rd ed. Wuhan: Huazhong University of Sciences and Technology Press, 2006:22-28.
李庆扬,王能超,易大义.数值分析[M]. 4 版,武汉:华中科技大学出版社, 2006:22-28.

Improving Precision of Multi-slits Autocollimator with Local Newton Interpolation Functions

LIU Ai-min^{1,2}, GAO Li-min¹, WU Yi-ming¹, BAI Jian-ming¹, LI Yan^{1,2}

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Utilizing the shape characteristics of object in multi-slits autocollimator and imaging characteristics of photo-electronic detector, the pixel edge of image filtered by gauss filter is detected by the algorithm which can be used to detect the edge of image. Based on it, local Newton interpolation functions are used to detect the sub-pixel edge of image. Furthermore, least square beeline edge fitting is used to improve detecting precision of the sub-pixel edges of image. After testing, 0.13 arc second precision is achieved by the algorithm.

Key words: Multi-slits autocollimator; CCD Sub-pixel algorithm; Local Newton interpolation Functions; Least square Beeline edge fitting



LIU Ai-min was born in 1984. In 2009, she received the M. S. degree from Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics (XIOPM), Chinese Academy of Sciences(CAS). Currently her research interests focus on optical engineering.



GAO Li-min was born in 1965. He received the Ph. D. degree in 2002. Currently he is a researcher, and his main research interests focus on optical engineering.