

文章编号: 0258-7025(2007)01-0118-07

互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元 细分精度实验研究

刘 智^{1,2}, 翟林培², 郝志航²

(¹ 长春理工大学电信工程学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学研究部, 吉林 长春 130022)

摘要 通过图像处理方法,用软件的方式(亚像元细分)对目标进行定位是一个可有效提高测量精度的途径。主要对互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器亚像元细分精度的测试方法和测试结果进行研讨。利用压电陶瓷(PZT)精密快扫振镜(FSM)和基于互补金属氧化物半导体图像传感器 OV7620 的数字相机构建了实验系统,对该互补金属氧化物半导体图像传感器 OV7620 的亚像元细分精度进行了实验研究。结果表明,OV7620 的质心定位精度达到 0.17 pixel,即能够实现六细分,互补金属氧化物半导体图像传感器具有实现亚像元细分的能力,能够应用于以光斑质心检测为手段的测量系统中。

关键词 成像系统;互补金属氧化物半导体图像传感器;亚像元细分;细分精度;填充率

中图分类号 TP 212.14 **文献标识码** A

Sub-Pixel Measurement Accuracy Experiment of Complementary Metal Oxide Semiconductor Imager

LIU Zhi^{1,2}, ZHAI Lin-pei², HAO Zhi-hang²

¹ Institute of Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Department of Aerospace Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The sub-pixel measurement technique based on image processing technique and software design technique, is a good choice for the improving of measurement precision. The measuring technique and results of sub-pixel measurement accuracy of complementary metal oxide semiconductor (CMOS) imager are researched in this paper in order to give references for correlative systems. A test system based on high precision piezoelectric translator (PZT) fast-steening mirror (FSM) and OV7620 CMOS imager based digital camera is constructed, several sub-pixel measurement accuracy experiments for the CMOS imager are taken. The results indicate that sub-pixel measurement accuracy is about 0.17 pixel, it is of great importance to consider the influence of the fill-factor on sub-pixel measurement accuracy. According to the results above, CMOS imager has the capability to achieve sub-pixel measurement accuracy, and can be widely used in many measuring systems which count on facula centroid sub-pixel interpolation.

Key words imaging systems; complementary metal oxide semiconductor imager; sub-pixel subdivision; subdivision accuracy; fill factor

1 引 言

近年来得到快速发展的互补金属氧化物半导体

(CMOS)图像传感器与 CCD 一样都属于固态成像器件。相对于 CCD 而言,互补金属氧化物半导体图像传感器将图像传感部分和控制电路高度集成在同

收稿日期:2006-03-01;收到修改稿日期:2006-07-19

作者简介:刘 智(1971—),副教授,博士研究生,研究方向为固态成像器件及其应用技术。E-mail:liuzhi@cust.edu.cn

导师简介:郝志航(1942—),男,研究员,博士生导师,目前研究方向为空间成像技术、三维图像处理。

E-mail:hzh@ciomp.ac.cn

一芯片里, 体积明显缩小, 功耗大大降低, 具有重量轻、高可靠、高集成、低成本、宽动态范围、抗辐射和没有拖影等优点, 克服了 CCD 器件的固有缺点, 充分满足了各种微小型成像检测系统对图像敏感器件的要求。如各种空间激光通信系统中的捕获、瞄准和跟踪 (APT) 系统、高帧频成像系统、机器视觉测量系统等, 因此具有巨大的应用潜力。在各种跟踪系统中, 如星敏感器、激光通信系统中的捕获对准和跟踪系统等, 都涉及到利用固态图像传感器, 采用光斑细分方法的目标定位技术。受光学系统和图像传感器制造工艺的限制, 图像的分辨率不可能无限制地提高, 因此通过提高图像传感器的分辨率来提高光斑定位精度的方法就受到了局限。而通过图像处理方法, 用软件的方式 (内插细分) 对目标进行定位则是一个有效的途径。对于 CCD 传感器, 一般都能够达到亚像元 ($1/10 \sim 1/100$ pixel 甚至更高) 精度^[1]。与 CCD 相比, 互补金属氧化物半导体图像传感器的像元填充率较低 ($20\% \sim 60\%$), 受此影响, 它所能达到的亚像元细分精度比 CCD 的要差。

国外在对基于互补金属氧化物半导体图像传感器的探测系统研究过程中, 已经考虑过像元填充率对亚像元细分精度的影响, 并对亚像元细分精度进行了实验测试, 得到互补金属氧化物半导体图像传感器的亚像元细分精度可以达到 $1/10$ pixel^[1]。国内对于亚像元细分技术的研究报道较多^[2~7], 但均以目前常用的面阵或线阵 CCD 图像传感器为对象, 尚没有对互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度进行测试和研究的报道。为此本文主要对互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度的测试方法和测试结果进行研究和探讨, 为其在相关系统中的应用提供参考。

2 实验系统组成及测试方案

互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元内插细分精度测试实验系统主要由光源、光束准直系统、精密可调反射镜及其控制器、互补金属氧化物半导体实验相机和计算机等组成^[8]。

互补金属氧化物半导体实验相机中采用的是 OmniVision 公司生产的互补金属氧化物半导体图像传感器 OV7620, 采用 USB 接口采集图像数据, 配有 Computar 的 25 mm 焦距镜头 (相对孔径 1:1.4), 其外观如图 1 所示。

实验测试系统方案中采用焦距为 550 mm, 口径

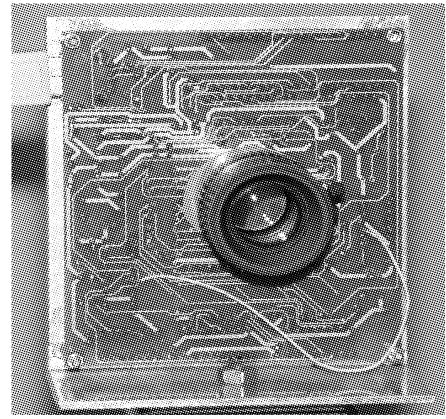


图 1 实验用互补金属氧化物半导体数字相机外观
Fig. 1 Outlook of test CMOS digital camera

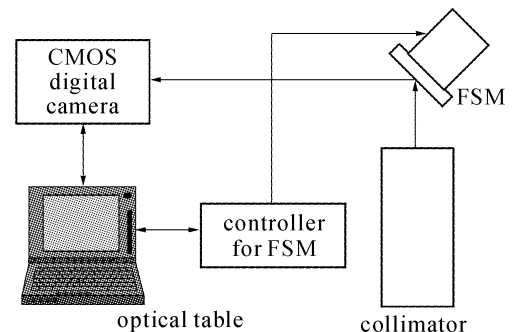


图 2 测试方案示意图

Fig. 2 Illustration of the test scheme

50 mm 的平行光管作为光源模拟无穷远点目标, 测试系统中的精密可调反射镜采用的是高精度压电陶瓷 (PZT) 振镜 (德国 PI 公司, 型号 S330) 作为光束角度位移基准控制装置, 利用其高精度角度控制能力, 实现对光束偏转角度的精确控制, 如图 2 所示。

该 PI330 振镜能够在两个正交轴 (x 轴和 y 轴) 方向实现亚微弧度级分辨率 (分辨率优于 $0.1 \mu\text{rad}$) 的角度调整, 其偏转控制范围可达 $\pm 1 \text{ mrad}$, 专门定做的甚至可以达到 $\pm 5 \text{ mrad}$ 的调整范围。PI330 的内部集成有微型高精度应变传感器, 可对振镜的偏转角度进行精确测量, 从而实现角度偏转的闭环控制, 其闭环控制线性度优于 $\pm 0.2\%$, 全程的重复性为 $\pm 0.2 \mu\text{rad}$ 。

3 测试方法

测试方法如图 3 所示。设光斑 ($3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$) 移动前后计算得到的光斑质心位置分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 单位为像元间距, 如图 4 所示, o 点为像平面中心, 则有

$$\begin{aligned} l_1 &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \cdot d, \\ l_2 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cdot d, \\ l &= \sqrt{f^2 + (x_1^2 + y_1^2) \cdot d^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 d 为相邻像元的横向或纵向中心间距, f 为光学系统焦距。

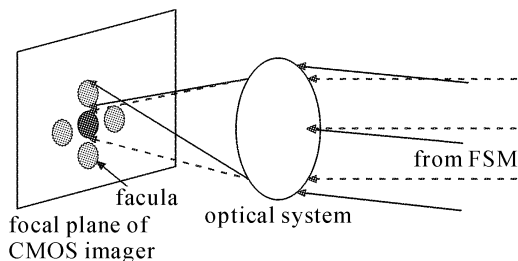


图 3 互补金属氧化物半导体图像传感器内插细分精度测试方法示意图

Fig. 3 Scheme illustration of sub-pixel precision measurement for CMOS imager

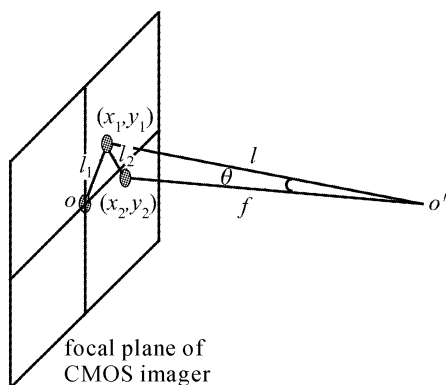


图 4 角位移计算方法示意图

Fig. 4 Illustration of the calculation of angle displacement

由于光线移动的角位移 θ 非常小(3~5 s), 因此

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{l_2}{l} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \cdot d}{\sqrt{(x_1^2 + y_1^2) \cdot d^2 + f^2}} \cdot \rho = \\ &= \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + (f/d)^2}} \cdot \rho, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 ρ 为弧度转换成角秒的变换系数, 等于 206265"/rad。

当光斑在图像中心的坐标原点附近(与角位移相比)移动时, 角位移可近似表述为

$$\theta = [\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} / (f/d)] \cdot \rho. \quad (3)$$

每次进行亚像元内插细分测试时, 按以下步骤进行:

1) 测试过程开始前, 仔细标定光学系统(平行光管和互补金属氧化物半导体相机光学系统)的实际焦距;

2) 调整光学系统像面、互补金属氧化物半导体图像传感器像平面和压电陶瓷振镜反射镜面, 使三者平行并保持与水平面垂直, 且互补金属氧化物半导体图像传感器的行扫描方向与水平面平行, 调整振镜的偏转方向, 使其与水平和垂直方向平行, 如图 5 所示;

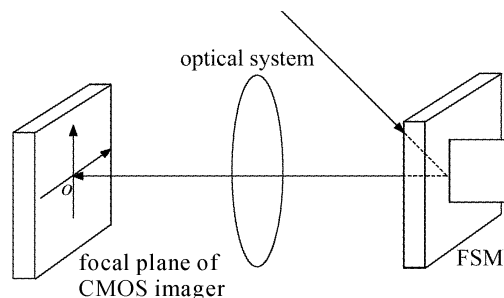


图 5 系统调整示意图

Fig. 5 Illustration of system adjustment

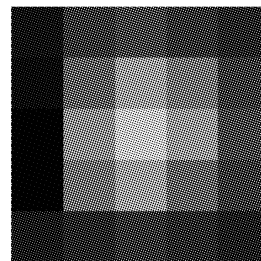


图 6 光斑调整结果示意图

Fig. 6 Illustration of end of adjustment of facula

3) 调整平行光管和互补金属氧化物半导体相机光学系统, 使目标光斑定位于图像传感器像元阵列中心的像面坐标系原点并适当离焦, 尽量使光斑呈对称分布, 大小恰好覆盖 3 pixel × 3 pixel, 如图 6 所示;

4) 连续等角距调整压电陶瓷振镜, 令光斑分别沿坐标系 x 轴(行扫描方向)和 y 轴(列线方向)等角距移动, 每调整一次角度即测量一次光斑的质心位置(连续测量 16 次, 测得一组数值, 去除其中的极大值和极小值后, 计算其移动平均值, 采用标准偏差来反映测量结果的精度情况), 并根据质心位置计算出角度偏转量;

5) 调整角距步长, 从 1" ~ 20", 重复进行第 4 步, 记录测量结果;

6) 由贝塞耳公式, 多次测量角位移的标准差为

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\sum(\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}}. \quad (4)$$

7) 令 x_1, x_2, y_1 和 y_2 的均方误差分别为 $\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_{y_1} = \sigma_{y_2} = \sigma$, 单位为 1 pixel 长度, 它表征了内插细分算法的定位精度。

由误差传递定律可得^[2]

$$\sigma_{\theta} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \theta}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial y_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2} =$$

$$\pm \sqrt{\frac{(x_1 - x_2)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \sigma_{x_1}^2 + \frac{(x_1 - x_2)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \sigma_{x_2}^2 + \frac{(y_1 - y_2)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \sigma_{y_1}^2 + \frac{(y_1 - y_2)^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \sigma_{y_2}^2} \cdot \frac{d}{f\rho} =$$

$$\pm \sqrt{2} \sigma d \rho / f, \quad (5)$$

所以
$$\sigma = f \sigma_{\theta} / (\sqrt{2} d \rho), \quad (6)$$

由(4)式计算出 σ_{θ} , 代入(6)式即可估计亚像元内插细分算法的定位精度。

4 实验及结果分析

针对实验方案, 按所述亚像元内插细分精度测试方案进行初步实验测试, 取光斑大小为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$, x 方向振镜偏转步进角为 $50 \mu\text{rad}$, 获得质心位置数据如表 1 所示。根据表中的光斑质心计算结果, 绘出光斑质心 y 坐标, x 坐标和两者合成曲线, 分别显示了光斑质心在 x 方向, y 方向和两个方向上的综合运动情况, 如图 7, 8 所示。可以看出, 质心 x 坐标和 y 坐标运动呈典型的 S 曲线形式; 质心 x 坐标的变化在 0.06 pixel 之内, 与 y 坐标近 5 pixel 的行程相差近两个数量级。因此, 光斑在 x 方向的

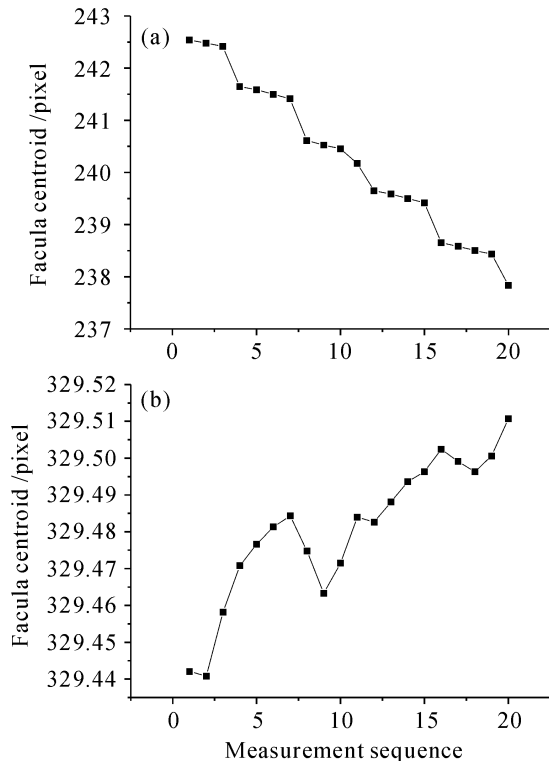


图 7 光斑质心运动曲线
(a) y 坐标; (b) x 坐标

Fig. 7 Moving curves of centroid of facula
(a) y coordinate; (b) x coordinate

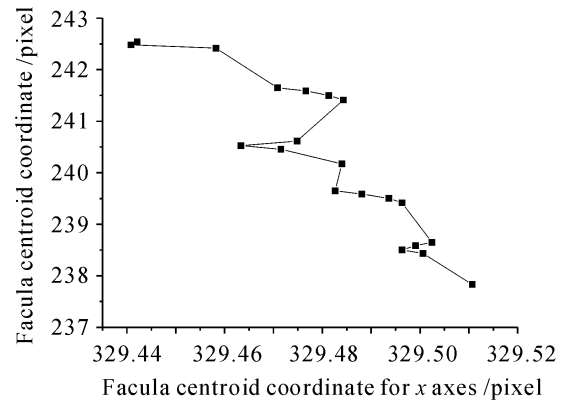


图 8 光斑质心 x 和 y 坐标合成运动曲线
Fig. 8 Synthesized moving curves of favula centroid both in x and y coordinate

表 1 质心位置(步进角 $50 \mu\text{rad}$)

Table 1 Measurement data of centroid of facula
($50 \mu\text{rad}$ step angle)

Number	x/pixel	y/pixel	Number	x/pixel	y/pixel
1	329.4421	242.5409	11	329.484	240.1703
2	329.4408	242.4807	12	329.4826	239.6499
3	329.4582	242.4165	13	329.4881	239.5866
4	329.4708	241.6460	14	329.4936	239.5009
5	329.4766	241.5881	15	329.4963	239.4171
6	329.4813	241.4987	16	329.5024	238.6499
7	329.4843	241.4130	17	329.4991	238.5830
8	329.4748	240.6143	18	329.4963	238.5050
9	329.4633	240.5257	19	329.5006	238.4338
10	329.4715	240.4561	20	329.5107	237.8339

位移相对于 y 方向可忽略不计。

由于求得的光斑质心坐标的运动轨迹在多种因素的影响下并不是一条理想的直线, 如图 7 显示的曲线, 说明在观测值中存在着多种误差。因此对光斑质心的 x 和 y 坐标的运动轨迹进行最小二乘法拟合, 得到的曲线如图 9 所示。对应的残差曲线如图 10 所示。

图 11 给出了残差与光斑质心在像元内坐标之间的关系曲线。可以看出, 残差随着光斑质心在像

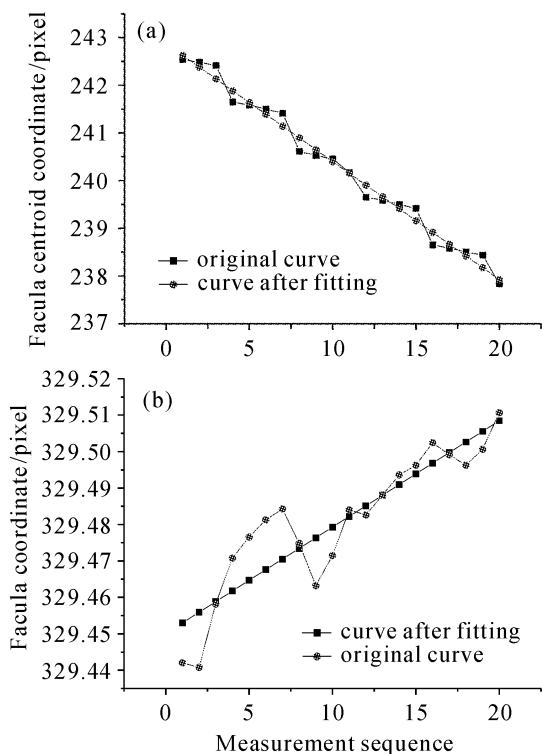


图 9 光斑质心最小二乘法拟合曲线
(a) y 坐标; (b) x 坐标

Fig. 9 Least square method fitting curves for facula centroid

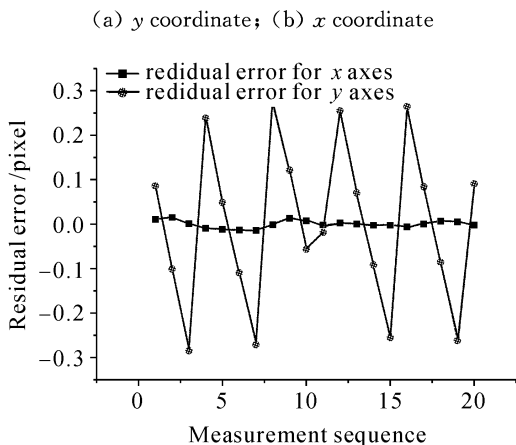


图 10 最小二乘法拟合后光斑质心 x 和 y 坐标残差曲线
Fig. 10 Residual error curves after least square method fitting for facula centroid coordinate

元内的位置不同而变化,在 0.1 pixel, 0.5 pixel 和 0.9 pixel 处残差较小,并且随着质心位置的偏移变化,残差也逐渐增大,但偏移范围也只限于 ± 0.1 pixel,除此之外光斑质心并没有在其他位置出现,这与光斑质心位置的周期性跳跃相对应,而且调整步进角后这种趋势保持不变。

在测量过程中,除振镜的偏折角度能够精确控制且可随时读出外,其他如振镜的偏转方向、振镜反射面与互补金属氧化物半导体相机光学系统主面和

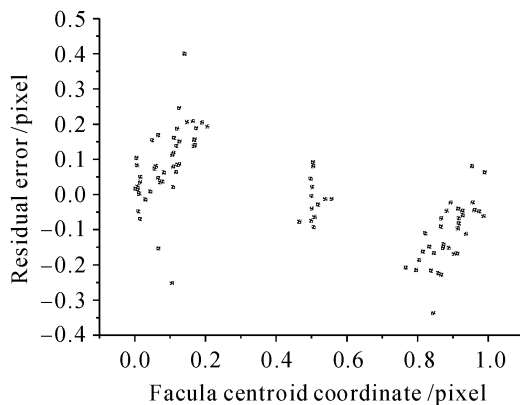


图 11 残差与质心坐标关系

Fig. 11 Relation of residual error and facula centroid coordinate

互补金属氧化物半导体图像传感器像面之间的平行性等都未做精确调整,因此得到的光斑质心坐标中包含了多种误差因素的影响。

对光斑步进角 $45 \mu\text{rad}$ 时获得的数据进行分析,得到表 2 所示的光束偏转角度数据。

表 2 光束偏转角度数据

Table 2 Deflexion angle data of beam ($50 \mu\text{rad}$ step angle)

Number	Angular displacement / μrad	Number	Angular displacement / μrad
1	0	11	17.91
2	16.08	12	14.77
3	17.32	13	96.87
4	217.99	14	137.57
5	15.41	15	17.44
6	19.55	16	21.51
7	22.55	17	20.92
8	19.98	18	124.49
9	216.94	19	113.85
10	17.21	20	16.99

根据表 2 的数据,求出角位移的标准偏差为 0.00006941,根据已知的互补金属氧化物半导体图像传感器像元尺寸 $7.6 \times 10^{-6} \text{ m}$ 和 (6) 式,可得 $\sigma = f\sigma_\theta / (\sqrt{2}d\rho) = 0.0266 \times 0.00006941 / (\sqrt{2} \times 7.6 \times 10^{-6}) = 0.1718$ 。由此可知,基于 OV7620 的实验互补金属氧化物半导体相机亚像元内插细分精度可达 0.17 pixel,即可实现像元的 6 细分。

5 误差来源分析

由于每一个光斑质心坐标均为多次取样平均的结果,因此随机误差可以限制在较小的范围内,不会

对光斑质心造成如此大的影响。此外,本互补金属氧化物半导体实验相机的单点定位标准偏差远小于1%,故也可排除质心定位算法的影响。

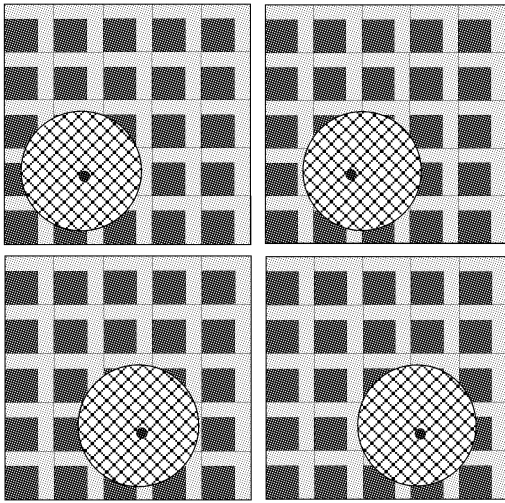


图 12 像元填充率对亚像元内插细分精度影响示意图
Fig. 12 Illustration of impact of fill factor on sub-pixel measurement precision

基于上述分析,初步认为测量过程中出现的质心坐标跳跃现象可能就是互补金属氧化物半导体图像传感器的填充率所造成的影响,一覆盖 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的光斑在沿行扫描方向移动过程中的光斑质心变动示意图如图 12 所示,方形区域代表 1 pixel ,其中黑色矩形为复位、行选通及列放大晶体管所占的区域,旁边的灰色部分为像元中的光敏区域。在光斑的移动过程中,每个受到光斑覆盖的像元光敏区域面积会发生非线性变化,这种变化在光斑处于某个特定的位置时有可能变得更加明显,因此这可能是导致光斑质心在移动过程中出现周期性跳变的主要原因,而且像元结构的不同、填充率的不同都会使周期性跳变的大小产生变化。

互补金属氧化物半导体图像传感器填充率一般在 $20\% \sim 40\%$,如果采用特殊技术,提高互补金属氧化物半导体图像传感器的填充率(目前可达 70% 以上^[9]),则可有效降低上述影响。测量过程中,严格意义上讲,应该使振镜的水平轴与垂直轴分别与互补金属氧化物半导体图像传感器的行扫描和列线方向平行,同时振镜反射面和互补金属氧化物半导体图像传感器的像面也需要保持平行。由于条件限制,在实验测试过程中没有经过精密调整,也会导致质心判读误差,该误差相对较小因此可忽略不计。

导致内插细分测量结果产生误差的主要原因还有光学系统的像差、算法误差、各种噪声造成的光斑

位置抖动等。实验过程中采用离焦的方法获取适当大小的星点弥散光斑,光学系统的非对称性像差,例如彗差、像散、畸变等都会造成光斑能量分布的不均匀,因而对于采用质心作为光斑位置特征点的方法,这是一个主要的误差源,但由于光斑的质心变化范围较小,这种误差可作为系统误差考虑。在进行亚像元内插细分技术时,一般假设互补金属氧化物半导体图像传感器的所有像元光电性能相同,响应度在整个光敏面上是均匀的。但实际上,互补金属氧化物半导体图像传感器各像元的光电性能不可能完全一致,在相同光照情况下其输出是不均匀的。此外由于生产工艺的原因,暗电流大小因像元而异,也会造成暗电流的不均匀分布,并且主要作为背景存在于像元输出灰度数据中,这同样会给质心判别造成误差。位置抖动是光斑质心测量过程中会遇到的问题,一般由于噪声和算法造成的。由于测量过程中噪声的存在如光子散弹噪声、暗电流散弹噪声、暗电流、读出噪声等都会使得像元输出灰度数据值不确定,从而使得质心位置不确定,即信号中噪声的存在引起目标定位过程中的位置抖动,且抖动与噪声大小成正比。增加测量次数可以降低信号随机噪声的影响,但仍会存在残余噪声,因此提高精度的有效办法就是提高信噪比。

除此之外,测试环境温度的变化、冲击振动会使机械结构产生变形,同时导致光斑能量分布的改变,这些都将给光斑定位带来不确定性。

6 结 论

以基于互补金属氧化物半导体图像传感器 OV7620 的数字相机为对象,对其亚像元细分精度测试方法、实验系统原理及测试结果进行了详细分析和讨论,对影响互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度的原因进行了简要分析。结果表明,虽然受填充率较低、实验条件和环境较差等因素的影响,基于互补金属氧化物半导体图像传感器的实验数字相机亚像元内插细分精度仍然可以达到 $1/6 \text{ pixel}$,可以满足大多数成像测量系统对细分精度指标的要求。

由于时间和实验条件所限,各种影响互补金属氧化物半导体图像传感器亚像元细分精度因素的影响未能逐个进行定量分析,如像元结构、填充率、信噪比和像元响应不均匀性等对亚像元细分精度的影响程度,这些都将是未来研究工作所需要解决的重要内容。

参 考 文 献

- 1 Carl Christian Liebe, Edwin W. Dennison, Bruce Hancock *et al.*. Active pixel sensor (APS) based star tracker [C]. *IEEE Proc.*, 1998, **1**:119~127
- 2 Xie Lunzhi, Bian Honglin, Wang Zhenhua. Study of the subpixel interpolation of image spots with matrix detectors [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2003, **1**(2):51~56
谢伦治, 卞洪林, 王振华. 面阵探测器的像点亚像素定位研究[J]. *光学与光电技术*, 2003, **1**(2):51~56
- 3 Wang Yifan. Analysis of interpolation of CCD based on light energy [J]. *Engineering Cybernetics*, 1993, (4):11~13
王一凡. 根据光能量分布确定 CCD 内插求中心精度[J]. *控制工程*, 1993, (4):11~13
- 4 Wang Yifan. Star spot location technique [J]. *Engineering Cybernetics*, 1995, (2):13~16
王一凡. 用于星敏感器的星点提取算法[J]. *控制工程*, 1995, (2):13~16
- 5 Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **20**(9):812~815
魏新国, 张广军, 江 洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **20**(9):812~815
- 6 Chen Xiaodong, Li Weimin, Li Jing *et al.*. Error analysis of the center of gravity method when used to get the position of a facula [J]. *Opt. Technol.*, 2000, **26**(1):5~8
陈晓东, 李为民, 李 静 等. 利用重心法求光斑信号位置的误差分析[J]. *光学技术*, 2000, **26**(1):5~8
- 7 Chen Dengyun. Sub-pixel location technique in area CCD [D]. Master's Thesis of Chengdu Institute of Optics and Electronics, 1990
陈邓云. 面阵 CCD 亚像素定位[D]. 中国科学院成都光电技术研究所硕士学位论文, 1990
- 8 Liu Zhi. Research on application of CMOS imager in star tracker [D]. Doctoral Thesis of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Sciences, 2004
刘 智. CMOS 图像传感器在星敏感器中应用研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士学位论文, 2004
- 9 Bart Dierickx, Guy Meynants, Danny Scheffer. Near-100 % fill factor standard CMOS active pixel. <http://www.fifactory.com>, 2003