

文章编号 1004-924X(2013)04-0849-09

星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿

魏新国*, 徐 佳, 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 由于 S 曲线误差是星敏感器质心定位系统误差的重要成分, 本文结合质心定位的物理过程及仿真对 S 曲线误差来源进行了分析。研究了各项误差来源产生的影响, 并采用频域分析法得出了 S 曲线误差的理论解析式。用星敏感器产品进行了实验, 采集视场中心 S 曲线误差并用正弦模型进行补偿, 分析了同一补偿模型对全视场 S 曲线误差的补偿效果, 并对标定数据进行了 S 曲线误差补偿。实验结果表明: 视场中心 S 曲线误差的标准差为 0.048 pixel, 补偿后标准差为 0.027 pixel, 质心定位精度提高了 43.8%; 进一步采用视场中心正弦补偿模型对全视场 S 曲线误差进行补偿后, 全视场质心定位精度提高了 35.7% 以上, 全视场标定精度提高了 31.7%。由实验结果可知: S 曲线误差是星敏感器的一项重要误差源, 采用正弦模型对 S 曲线误差进行补偿能够取得显著的补偿效果。

关键词: 星敏感器; 质心定位; S 曲线误差; 频域分析; 误差补偿

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0849

S-curve error compensation of centroiding location for star sensors

WEI Xin-guo*, XU Jia, ZHANG Guang-jun

(Key Laboratory of Precision Opto-mechanics Technology of the Ministry of Education, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: wxg@buaa.edu.cn

Abstract: As the S-curve errors are important parts of centroid location errors for star sensors, this paper explored the sources of S-curve errors combining with the physical process of centroid location and a simulation. The specific effect of each error source was analyzed and an analytical expression of S-curve errors was calculated by a frequency domain method. The experiments using a star sensor were performed and the S-curve error in the center of the Field of View (FOV) was collected and was compensated using a sine model. The compensation effects on the S-curve errors in the whole FOV were analyzed by the same compensation model and the calibration data were also compensated. Experimental results show that the standard deviation of S-curve error is 0.048 pixels in the center of the FOV, and 0.027 pixels after compensation, therefore the precision of centroid location is improved by 43.8%. Furthermore, after compensating with the same sine model in the center of the FOV for whole field-curve errors, the precision of centroid location in the whole FOV is improved by 35.7% at least and the precision of calibration is improved by 31.7%. It concludes that the S-curve errors are important errors of star sensors and they can be significantly compensated by using the sine model.

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2012-12-30.

基金项目: 教育部新世纪人才支持计划资助项目 (No. NCET-10-0037)

Key words: star sensor; centroid location; S-curve error; frequency domain analysis; error compensation

1 引言

星敏感器是一种高精度的空间姿态测量仪器,它通过观测恒星来确定航天器姿态,在航天领域应用非常广泛^[1]。其工作原理为:光学系统完成当前视场范围内星空的成像,由图像传感器获取星空图像;根据星点提取算法提取出恒星的位置坐标信息;通过星图识别算法在导航星库中找到观测星对应匹配的导航星;最后,利用这些匹配星对信息解算出三轴姿态。星点提取中的质心定位精度是星敏感器的重要精度指标,将直接影响姿态角的测量精度^[2]。

质心定位误差可分为算法本身存在的系统误差和噪声引起的随机误差。S 曲线误差是质心定位系统误差的重要组成部分,它表现为当像点能量中心在像素内均匀移动时,质心位置与像点能量中心之间的以像素为周期、类似正弦规律变化的误差^[2-3]。随机误差是由图像传感器的散粒噪声、暗电流噪声、复位噪声、量化噪声等引起的^[4],它会降低输出图像的信噪比和质心定位精度。随机误差可通过优化电路设计、选用噪声更小的图像传感器来减小。文献[3]分析了 S 曲线误差的形成原因,用像元几何中心代替能量中心进行质心计算,并建立了 S 曲线误差的数学模型,但文中未考虑其他因素对 S 曲线误差的影响;文献[5]采用频域分析法推导了平行光条成像中的系统误差解析式,但该方法对星敏感器点斑成像并不完全适用;文献[6]分析了像元非光敏区的能量损失对 S 曲线误差的影响,但未考虑光敏区的不同形状与位置的影响。

本文针对传统的质心法模型,分析了 S 曲线误差产生的原因,并结合仿真说明了每一项误差源的作用。然后,采用频域分析法推导了 S 曲线误差的解析式,并与仿真进行对比验证。最后,结合具体实验数据提出了 S 曲线误差的补偿方法,并对补偿效果进行了验证。

2 S 曲线误差理论分析

2.1 S 曲线误差来源分析

常用的质心定位算法包括传统质心法、平方加权质心法、高斯曲面拟合法等。这些算法都是在数值计算的层面上分析如何更有效地利用像元灰度信息去提高星点质心的提取精度,但是并没有分析算法自身带来的误差^[7]。由于传统质心法计算简单、具有很好的鲁棒性,目前大部分星敏感器都采用传统质心法进行星点质心定位。因此,本文针对传统质心法展开研究。

首先,结合质心定位的物理过程分析了 S 曲线误差的主要来源。

2.1.1 像元离散化采样

光学系统的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)为连续函数,如图 1(a)所示。成像时,图像传感器的像元将对入射光能进行离散化采样,如图 1(b)所示。通常以像元几何中心代替能量中心进行质心计算,因此会产生质心定位误差^[3,8]。

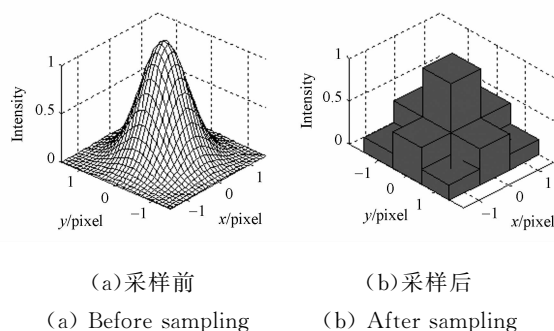


图 1 归一化星点点扩散函数

Fig. 1 Normalized star PSFs

2.1.2 像元非光敏区的能量损失

像元包含光敏区和非光敏区。光敏区接收光能,非光敏会造成入射光能的损失,从而产生质心定位误差。常见的光敏区的形状包括正方形、矩形、L 形^[9],如图 2 所示,其中阴影区域为光敏区。填充因子定义为光敏区面积与像元面积的比值,以填充因子作为光敏区大小的数值指标。

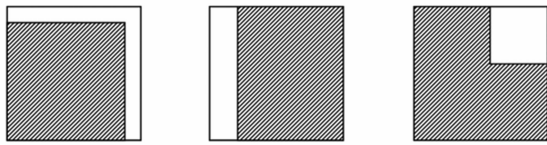
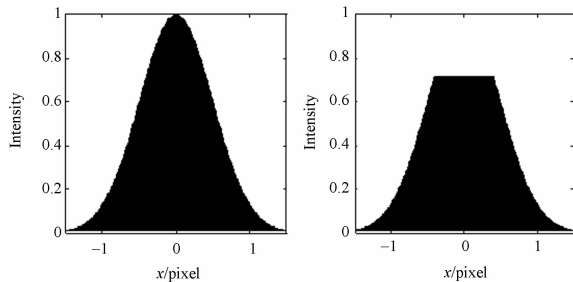


图 2 像元光敏区形状示意图

Fig. 2 Shapes of light-sensitive areas in pixels

2.1.3 星点中心像元电荷饱和

图像传感器具有固定的满势阱电荷数,当入射光强较大,光电转换产生的电荷数达到满势阱电荷数后,即使入射光强继续增大,也不会发生光电转换,因此会造成能量损失,并产生质心定位误差。这相当于星点的点扩散函数中心被截断,如图 3 所示。



(a) 未饱和

(b) 饱和

(a) Unsaturation

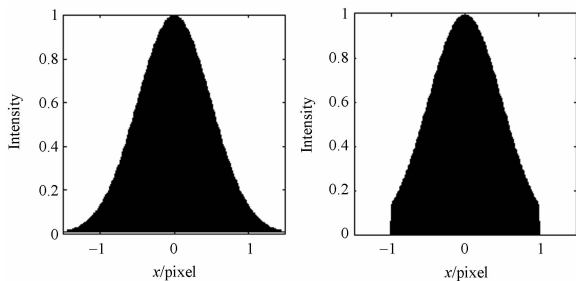
(b) Saturation

图 3 归一化星点点扩散函数

Fig. 3 Normalized star PSFs

2.1.4 灰度阈值

由于暗电流噪声、背景偏置等的影响,会使图像传感器上无星光入射的像元灰度不为零,因此需设定灰度阈值,以区分星点信号和背景信息。但在滤除背景信息的过程中,不可避免的将灰度



(a) 灰度阈值为 0

(b) 灰度阈值不为 0

(a) With detection threshold of 0

(b) With detection threshold of non-zero

图 4 归一化星点点扩散函数

Fig. 4 Normalized star PSFs

较小的星点信号滤除,如图 4 所示,因此会产生质心定位误差。

2.2 S 曲线误差频域分析

星敏感器在进行姿态计算时,优先选用未饱和的星点,为便于数学表达,在频域分析中仅对前两个误差来源进行研究。由于沿图像传感器坐标系 x, y 方向的成像过程相互独立,可将成像过程简化为一维情况进行研究。

星点成像过程可分解为 3 个步骤^[10],如图 5 所示:

- (1) 星点点扩散函数 $I(x, x_0)$ 与单个像元响应函数 $p(x)$ 卷积,得到像元接收能量函数 $f(x)$;
- (2) 像元采样函数 $s(x)$ 对 $f(x)$ 进行采样,得到 $f_s(x)$;
- (3) 窗口函数 $r(x)$ 对 $f_s(x)$ 进行采样,得到窗口像元采样函数 $g(x)$ 。

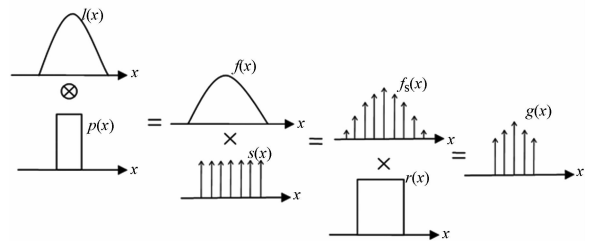


图 5 星点成像过程示意图

Fig. 5 Process of star imaging

所以有:

$$g(x) = [I(x, x_0) \otimes p(x)] \times s(x) \times r(x) \quad (1)$$

实际成像中,像点能量主要集中在 3×3 到 5×5 的窗口范围内,所以可忽略窗口函数 $r(x)$ 的作用,即:

$$g(x) = [I(x, x_0) \otimes p(x)] \times s(x) \quad (2)$$

采用传统质心法进行质心计算,并根据傅里叶变换的定义和性质,可得质心坐标的估计值为^[5]:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=-\infty}^{\infty} x_i g_i}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} g_i} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x g(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} g(x) dx} = -\frac{G'(0)}{2\pi j G(0)} \quad (3)$$

其中: g_i 为第 i 个像元所对应的 $g(x)$ 值, $G(\omega)$ 为 $g(x)$ 的傅里叶变换, $G'(\omega)$ 为 $G(\omega)$ 的一阶导数。

对公式(2)进行傅里叶变换,可得:

$$G(\omega) = [I(\omega) \times P(\omega)] \otimes S(\omega) \quad (4)$$

其中: $I(\omega)$ 为 $I(x, x_0)$ 的傅里叶变换, $P(\omega)$ 为

$p(x)$ 的傅里叶变换, $S(\omega)$ 为 $s(x)$ 的傅里叶变换。

已知:

$$I(x, x_0) = \frac{I_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

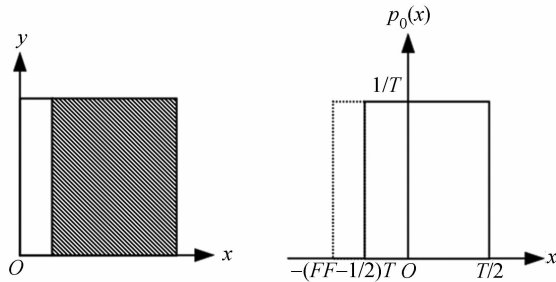
其中: I_0 为星点总能量, x_0 为星点能量中心, σ 为星点高斯半径。则有:

$$I(\omega) = I_0 \exp(-2(\pi\sigma\omega)^2) \exp(-j2\pi\omega x_0). \quad (6)$$

像元采样函数 $s(x)$ 为梳状函数 $\text{comb}(x/T)$, T 为像元长度。经傅里叶变换后得:

$$S(\omega) = T \text{comb}(T\omega), \quad (7)$$

设像元光敏区为矩形, 位于像元右侧, 如图 6(a), 填充因子为 FF 。以像元 x 方向几何中心为原点建立坐标系, 则像元响应函数 $p_0(x)$ 类似于矩形函数, 如图 6(b) 所示。



(a) 像元光敏区分布 (b) 像元响应函数

(a) Light-sensitive area distribution (b) Pixel sensitivity profile

图 6 像元光敏区分布及像元响应函数

Fig. 6 Light-sensitive area distribution and pixel sensitivity profile

根据成像的物理意义可知, 该像元所接收的能量为:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, x_0) p_0(x) dx. \quad (8)$$

根据公式(2), 按卷积定义计算得到像元接收能量函数:

$$f(x) = I(x, x_0) \otimes p(x) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t, x_0) p(x-t) dt. \quad (9)$$

对比公式(8)和(9), 根据卷积的几何意义可知:

$$p(x) = p_0(-x). \quad (10)$$

则有:

$$p(\omega) = \frac{\sin(\pi\omega TFF)}{\pi\omega T} \exp(j2\pi\omega d_0), \quad (11)$$

其中: $d_0 = (1-FF)T/2$ 。

将公式(6)、(7)、(11)带入公式(3), 并进行化

简, 近似可得^[5]:

$$\hat{x} = x_0 - d_0 + \frac{H'(1/T) \sin(2\pi(x_0 - d_0)/T)}{\pi H(0)}, \quad (12)$$

其中:

$$H(\omega) = I_0 \exp(-2(\pi\sigma\omega)^2) \sin(\pi\omega TFF) / (\pi\omega T),$$

$H'(\omega)$ 为 $H(\omega)$ 的一阶导数。

S 曲线误差 δ 为估计值 \hat{x} 与实际光强分布中心位置 x_0 的差值:

$$\delta = \hat{x} - x_0 = -\frac{1}{2} T(1-FF) + \frac{H'(1/T) \sin(2\pi(x_0 - \frac{1}{2} T(1-FF))/T)}{\pi H(0)}. \quad (13)$$

根据以上分析可知, 传统质心法的 S 曲线误差是以像元为周期的正弦曲线, 不妨以正弦模型来表示:

$$\delta = A \sin(2\pi x_0 + \phi) + B. \quad (14)$$

则幅值 $A = H'(1/T) / (\pi H(0))$, 相位 $\Phi = -\pi(1-FF)$, 曲线中心线与 x 轴偏移量 $B = -T(1-FF)/2$ 。根据以上分析可知, 幅值 A 由 σ 和 FF 决定, 与 I_0 无关; 相位 Φ 由 FF 唯一决定; 偏移量 B 由 FF 和 T 决定。因此, 选用像元长度较小、填充因子较大的图像传感器, 有利于减小 S 曲线误差。

3 S 曲线误差仿真分析

图 7 为实验采集的视场中心星点灰度分布柱状图。由图可知, 星点能量分布接近二维高斯函数, 且能量集中在 3×3 的像素范围内, 所以不妨认为光学系统的高斯半径 $\sigma = 0.50$ pixel。星敏感器光学系统和 CMOS 图像传感器仿真参数如表 1 所示。

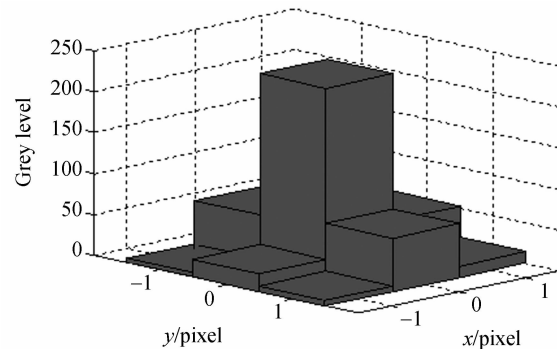


图 7 星点灰度分布柱状图

Fig. 7 Bar graph of star grey level

表 1 星敏感器仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of star sensor

参数	值	参数	值
光学透过率	0.94	像元尺寸	15.0 μm×15.0 μm
有效口径	40.0 mm	CMOS 分辨率	1 024×1 024
量子效率	0.3~0.5	星光谱段	红光 0.56~0.82 μm
积分时间	140.0 ms	星等	4.0 mv
增益	2.47 倍	视场	20.0°×20.0°
高斯半径	0.50 pixel	光敏区形状位置	矩形,位于像元右侧,填充因子 FF=0.80

3.1 仿真结果与频域分析结果对比

当星点能量中心为 $x_0 = 0.02 \cdot i, y_0 = 0, (i = 0, 1, \dots, 50)$ 时,根据公式(5)、(8)、(3),按照成像的物理过程计算可得能量中心 x_0 对应的质心估计值 \hat{x} 。由 S 曲线误差 $\sigma = \hat{x} - x$ 可得 S 曲线误差的仿真结果如图 8 所示。同时,在图 8 中绘出由公式(13)计算所得的误差曲线,将两者进行对比。

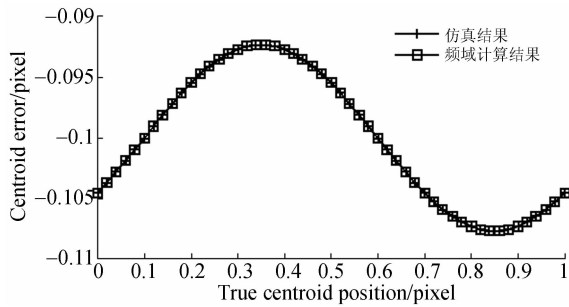


图 8 仿真误差曲线与频域分析误差曲线

Fig. 8 S-curve errors by simulation and frequency domain analysis

由图 8 可知,在误差范围内仿真误差曲线与频域分析误差曲线重合。当改变填充因子和高斯半径时,仿真误差曲线与频域分析误差曲线仍重合,这里不再赘述。由此可知,仿真结果与频域分析结果一致,验证了以上分析的正确性。

由于误差曲线偏移量 B 由填充因子决定,而同一图像传感器的填充因子相同,即偏移量 B 相等,因此可将偏移量等效为主点位置误差。由于主点位置误差对质心定位精度的影响较小,因此在后续讨论中将不再考虑偏移量的作用,即有 S 曲线误差:

$$\delta = \frac{H'(1/T)}{\pi H(0)} \sin(2\pi(x_0 - \frac{1}{2}T(1-FF))/T). \quad (15)$$

3.2 各误差来源作用下的仿真分析

3.2.1 像元离散化采样

设定高斯半径为 0.45, 0.50, 0.55 pixel, 仅考虑离散化采样作用进行仿真,得质心误差曲线如图 9 所示。由图可知,离散化采样的作用是形成以像素为周期的正弦误差,且高斯半径越大,误差曲线幅值越小。这是由于高斯半径越大,像点能量越分散,像元采样中损失的能量越小,所以误差越小。

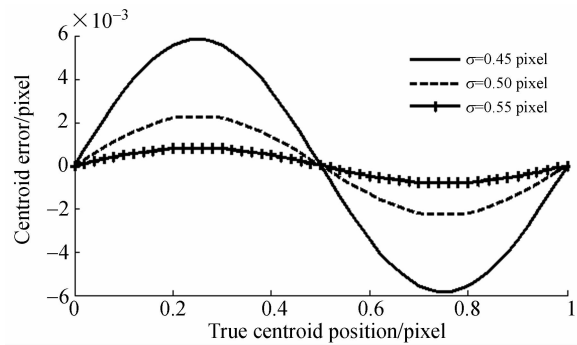


图 9 离散化作用下的质心误差曲线

Fig. 9 Centroid errors under discretization

由于离散化采样不可避免,因此在后续分析中均考虑离散化采样的作用,以高斯半径为 0.50 pixel 为例进行分析。

3.2.2 像元非光敏区的能量损失

设定填充因子为 1.0, 0.80, 0.60 进行仿真,得质心误差曲线如图 10 所示。由图可知,在填充因子的作用下,误差曲线仍保持正弦形态,但幅值、相位会发生变化,相应的幅值、相位可根据公式(15)进行计算。在后续仿真中,以填充因子为 1.0 为例进行分析。

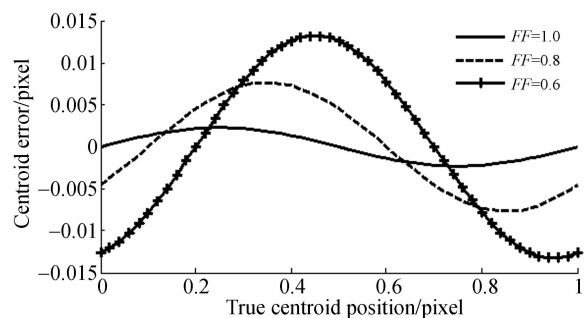


图 10 填充因子作用下的质心误差曲线

Fig. 10 Centroid errors under different fill factors

3.2.3 中心像元能量饱和

改变星等在星点中心像元能量饱和时进行仿真。星等为 1.0, 2.0, 3.0 时, 所得的质心误差曲线如图 11 所示。由图可知, 饱和截断将误差曲线显著放大, 且曲线不再保持正弦形态, 近似锯齿形。在后续分析中, 仅考虑星点能量未饱和的情况。

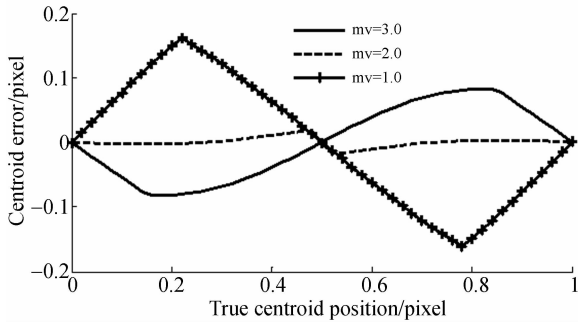


图 11 饱和作用下的质心误差曲线
Fig. 11 Centroid errors under saturation

3.2.4 灰度阈值

仿真中, 向像平面加入均值为 \bar{x} , 标准差为 δ (均为灰度, 下同) 的高斯噪声。根据常用的灰度阈值设定原则^[2], 设定灰度阈值为 $vth = \bar{x} + 5\delta$ (取整)。为减小噪声的作用, 取 $\bar{x} = 0.50, \delta = 0.20, vth = 2$ 进行仿真, 仿真结果如图 12 所示。

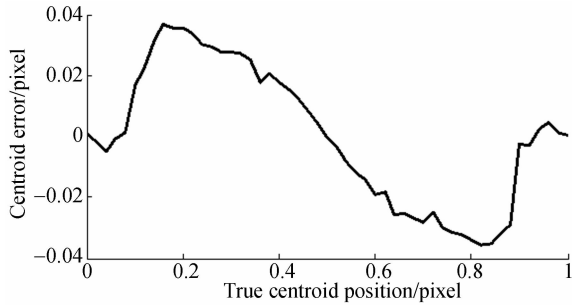


图 12 灰度阈值作用下的质心误差曲线
Fig. 12 Centroid errors under detection threshold

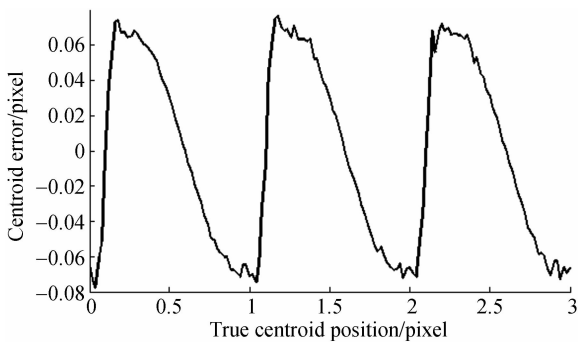


图 13 仿真 S 曲线误差
Fig. 13 S-curve errors by simulation

对比图 9 可知, 误差被放大约一个数量级, 但仍保持类似正弦的变化规律。

综合以上 4 个因素, 按照表 1 参数进行仿真, 得到的 S 曲线误差如图 13 所示。

4 实验与结果分析

星敏传感器校准与测试系统包括星光模拟器、高精度两轴转台、计算机、稳定平台等, 如图 14 所示。高精度两轴转台有外框和内框两个方向的自由度, 外框带动内框转动, 内框精度为 $-0.45 \sim +0.34''$ (峰峰值), 外框精度为 $-0.37 \sim +0.08''$ (峰峰值)。星光模拟器由星光发生器和平行光管组成, 可以模拟无穷远处不同亮度和光谱的星光。星敏传感器安装在转台的内框上, 内框转动对应星敏传感器坐标系下 y 方向的移动, 外框转动对应 x 方向的移动。星敏传感器通过并口将星点数据输出到计算机上, 计算机负责数据处理。实验用星敏传感器 CMOS 图像传感器的填充因子约为 0.80, 但具体的光敏区形状、位置未给出, 星敏传感器其余的参数均与表 1 相同。

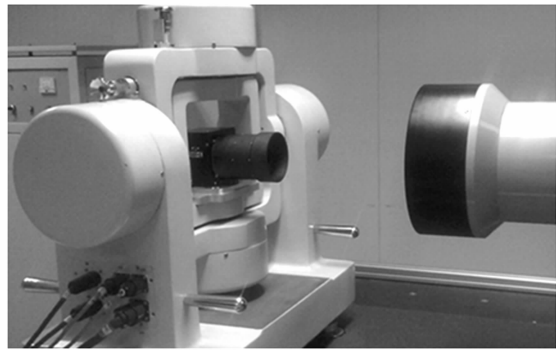


图 14 星敏传感器校准与测试系统
Fig. 14 Star sensor calibration and testing system

4.1 S 曲线误差采集与补偿

图 15 为星点位于不同视场位置时星敏传感器的实测图像。经统计, 星图灰度均值为 0.02, 标准差为 0.20, 因此设定灰度阈值为 2。



图 15 不同视场位置所拍星图
Fig. 15 Star images in various FOVs

在视场中随机选取 100 个位置,转台每转到一个位置,星敏感器读取星点质心 20 次,将各位置的质心数据标准差作为该采样位置的随机误差。经计算,100 个位置的平均随机误差为 0.003 6 pixel。通常,通过细分定位星敏感器的质心定位精度可达 0.05 pixel^[9]。由此可见,该测试条件下的随机误差较小,有利于 S 曲线误差的测量。

首先采集视场中心的 S 曲线误差。将转台内框、外框角度均置于零位(0.000 00°),调节星光模拟器角度,使星点在星敏感器视场中间附近成像。转台内框角度保持不变,外框每次转过 0.000 40°(对应约 0.02 pixel),连续旋转 150 次,即沿 x 方向对 3 个像元进行质心数据采集。将质心数据的相对位置增量减去,得到的 S 曲线误差如图 16 所示。

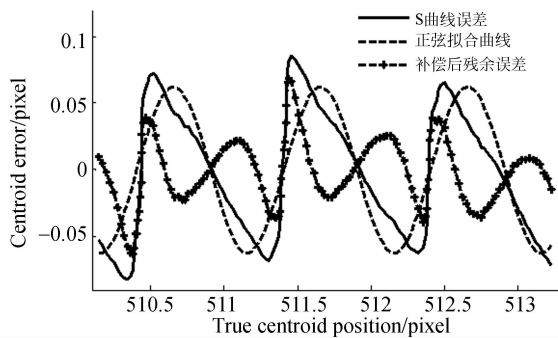


图 16 外框角度为 0.000 00°时,S 曲线误差及其正弦拟合曲线和补偿后的残余误差

Fig. 16 S-curve errors with external frame angle of 0.000 00°, its sine fitting curve and residual errors after compensation

对比图 16 和图 13 可知,实验曲线和仿真曲线都以像素为周期,类似正弦规律变化。两曲线幅值基本一致,约为 0.070 pixel;相位存在一定的偏移,这是由像元光敏区形状、位置等因素引起的。因此,采用正弦模型对 S 曲线误差进行补偿。

基于最小二乘法对图 16 中的 S 曲线误差进行正弦拟合,得:

$$\delta_{\sin} = 0.062 \sin(2\pi x_0 - 2.56). \quad (16)$$

将式(16)的正弦拟合曲线和补偿后的残余误差同时绘于图 16 中。经计算,补偿前 S 曲线误差的标准差为 0.048 pixel,补偿后标准差为 0.027 pixel,质心定位精度提高了 43.8%。

4.2 补偿效果验证

4.2.1 全视场 S 曲线误差重复性验证

转台内框角度为 0.000 00°,外框角度为 0.500 00°时,再次沿 x 方向对 3 个像素进行质心数据的采集和处理,得 S 曲线误差如图 17 所示。同时采用公式(16)进行补偿,正弦拟合曲线及补偿后残余误差如图 17 所示。

经计算,补偿前 S 曲线误差的标准差为 0.047 pixel,补偿后标准差为 0.027 pixel,质心定位精度提高了 42.6%。因此,在相近视场,S 曲线误差具有较好的重复性。

当星点位置由视场中心逐渐移动到视场边沿,内框角度保持不变,外框每转过 2.000 00°按照上述方法采集 S 曲线误差并采用公式(16)进行补偿,所得结果如表 2 所示。

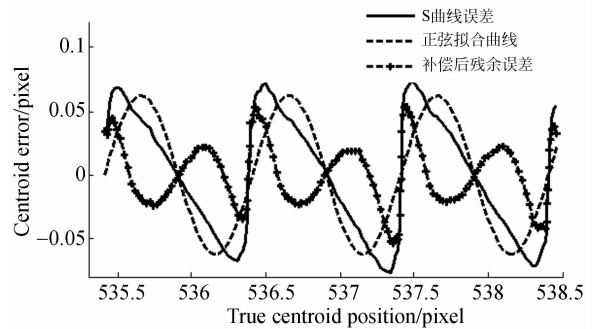


图 17 外框角度为 0.500 00°时 S 曲线误差及其正弦拟合曲线和补偿后残余误差

Fig. 17 S-curve errors with external frame angle of 0.500 00°, its sine fitting curve and residual error after compensation

表 2 不同视场位置 S 曲线误差补偿结果

Tab. 2 Effect of S-curve error compensation in various FOVs

外框角度 / (°)	补偿前标准差 / pixel	补偿后标准差 / pixel	精度提高 (%)
2.000 00	0.048	0.028	41.7
4.000 00	0.048	0.029	39.6
6.000 00	0.050	0.031	38.0
8.000 00	0.056	0.036	35.7

由表 2 可知,当星点由视场中心向视场边沿移动时,S 曲线误差逐渐增大,采用视场中心 S 曲线误差补偿模型进行补偿后,质心定位精度可提高到 35.7%以上。由此可知,在全视场范围内,S 曲线误差具有较好的重复性。采用同一正弦曲线对 S 曲线误差进行补偿能够取得显著的补偿效果。

4.2.2 S 曲线误差补偿前后标定结果对比

星敏感器的标定参数可分为内部参数和外部参数两部分。外部参数包括由安装偏差等形成的旋转矩阵,内部参数包括焦距、主点和畸变系数。根据星敏感器的工作原理利用内部参数和外部参数建立星敏感器的标定模型,并采用最小二乘法进行参数估计,完成星敏感器的标定。

在 $16^{\circ} \times 16^{\circ}$ 视场范围内进行标定数据采集,转台每转动 $2.000\ 00^{\circ}$ 为一个采集位置,即在 81 个位置进行采集。标定得该星敏感器 x 方向单星矢量的测量精度为 $3.1''(1\sigma)$, y 方向精度为 $2.7''(1\sigma)$,总精度为 $4.1''$ 。

在视场中心分别采集沿 x, y 方向的 S 曲线误差,拟合得到正弦补偿曲线,用于补偿全视场标定数据的 S 曲线误差。对标定数据进行补偿后,再次进行标定, x 方向精度为 $2.0''$, y 方向精度为 $1.9''$,总精度为 $2.8''$ 。补偿后, x 方向精度提高了 35.5%, y 方向精度提高了 29.6%,总精度提高了 31.7%,补偿效果很好。

参考文献:

- [1] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1995, 6:10-16.
- [2] LIEBE C C. Accuracy performance of star tracker—a tutorial [J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [3] RUFINO G, ACCARDO D. Enhancement of the centroiding algorithm for star tracker measure refinement [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53: 135-147.
- [4] 李云飞, 李敏杰, 司国良, 等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(8):1196-1202.
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1196-1202. (in Chinese)
- [5] ALEXANDER B F, NG K C. Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(9):1320-1331.
- [6] YING J J, HE Y Q, ZHOU Z L. Analysis on laser spot locating precision affected by CMOS sensor fill

5 结 论

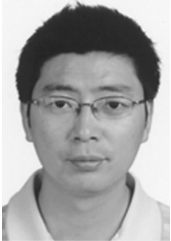
本文结合星敏感器星点提取的物理过程,对 S 曲线误差来源进行了分析,并结合仿真说明了每项误差来源的具体作用。采用频域分析法对 S 曲线误差进行了理论分析,得到高斯像点下 S 曲线误差的解析式,并通过仿真进行了验证,合理解释了质心定位中存在的类似正弦规律变化的误差。采用星敏感器校准与测试系统进行了实验,采集 S 曲线误差,并采用正弦模型进行补偿。视场中心补偿前, S 曲线误差的标准差为 0.048 pixel,补偿后标准差为 0.027 pixel,质心精度提高了 43.9%。同时,采用视场中心正弦补偿模型对全视场 S 曲线误差进行了补偿,并通过对标定数据进行 S 曲线误差补偿验证了补偿效果。实验结果表明: S 曲线误差是星敏感器的一项重要误差源,具有很强的规律性和重复性;采用正弦模型对 S 曲线误差进行补偿,能够取得显著的补偿效果。

- factor in laser warning system [C]. *IEEE, ICE-MI*, 2009: 202-206.
- [7] 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)
 - [8] 孙瑾秋, 周军, 张臻, 等. 基于能量累加的空间目标星像质心定位[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(12): 3043-3048.
SUN J Q, ZHOU J, ZHANG ZH, *et al.*. Centroid location for space targets based on energy accumulation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3043-3048. (in Chinese)
 - [9] 李杰. APS 星敏感器关键技术的研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
LI J. *Study the Key Technology of APS Star Tracker* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
 - [10] 贾辉, 杨建坤, 李修建, 等. 星敏感器高精度星点提取系统误差分析及补偿方法研究[J]. *中国科学*, 2011, 41(1): 69-76.

JIA H, YANG J K, LI X J, *et al.*. Systematic error analysis and compensation for high accuracy

star centroid estimation of star tracker [J]. *China Tech. Sci.*, 2011, 41(1): 69-76. (in Chinese)

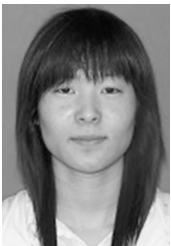
作者简介:



魏新国(1977—),男,湖北随州人,博士,副教授,2004年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为光电精密测量、天体敏感器及天文导航。E-mail: wxg@buaa.edu.cn



张广军(1965—),男,天津人,博士,教授,博士生导师,1991年于天津大学获得博士学位,主要研究方向为光电精密测量、机器视觉、光学传感与人工智能。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn



徐佳(1987—),女,河北承德人,硕士研究生,2010年于天津大学获得学士学位,主要从事星敏感器的研究。E-mail: xvjia_123@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)