

基于星点像重采样的星敏传感器高精度质心算法

曹阳^{1,2*}, 李保权^{1,2}, 李海涛¹, 桑鹏^{1,2}

¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 传统的质心算法面临着光学像差和随机噪声对质心位置提取精度影响很难减小的问题。为了解决这一问题,对星敏传感器所成星点像进行分析,结合星敏传感器光学系统的调制传递函数和图像传感器像素频率响应特性,提出了一种基于星点像重采样的星敏传感器质心定位算法。根据夫琅禾费衍射理论计算出离焦光学系统的点扩展函数,并对重采样质心算法的系统误差分布进行仿真,结果显示,该算法在不同像差条件下的系统误差均方根都小于 0.01 pixel。用星敏传感器产品进行了质心提取系统误差测量实验,重采样质心算法的系统误差为 0.008 pixel,相比传统正弦曲线补偿方法的精度提高了 66%。仿真和实验结果表明:基于星点像重采样的质心算法精度高,受光学系统像差的影响小,是提高星敏传感器测量精度的一种有效方法。

关键词 测量; 星敏传感器; 质心定位; 星点像重采样; 频域分析

中图分类号 V241.62+3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0712003

High-Accuracy Star Sensor Centroid Algorithm Based on Star Image Resampling

Cao Yang^{1,2*}, Li Baoquan^{1,2}, Li Haitao¹, Sang Peng^{1,2}

¹National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Reducing the impact of optical aberrations and random noise on the accuracy of star centroid location extractions is difficult using traditional centroid algorithms. To solve this problem, the star image of a star sensor is analyzed herein and a star sensor centroid localization algorithm based on star image resampling is proposed. The algorithm employs the modulation transfer function of the star sensor optical system and pixel frequency response characteristics of the image sensor. The point spread function of the defocused optical system is calculated based on the Fraunhofer diffraction theory, and the systematic error of the resampling-based centroid algorithm is simulated. Simulation results show that the root mean squares of the systematic errors under different aberration conditions are <0.01 pixel. Results of the error-measurement experiments of centroid extraction system performed on a star sensor show that the systematic error of the resampling-based centroid algorithm is 0.008 pixel, which is 66% lower than that of the traditional sinusoidal curve compensation method. The proposed algorithm has high precision and is not affected by the aberrations of the optical system; therefore, it is an effective method for improving the accuracy of star sensors.

Key words measurement; star sensor; centroid location; star image resampling; frequency-domain analysis

OCIS codes 120.6085; 120.4640; 280.4788

1 引 言

星敏传感器是一种以恒星为参照物进行姿态测量的设备,具有精度高、绝对姿态测量等优势,广泛应用于航空航天领域。近些年来,对地观测、深空观测

等对航天姿态测量精度提出了越来越高的要求,提高星敏传感器的整体精度具有重要意义。星点质心定位精度是星敏传感器的重要指标,它直接影响星敏传感器的整体精度,因此提升星点质心定位精度是提高星敏传感器整体精度的基础^[1]。

收稿日期: 2019-01-25; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41604152)

* E-mail: caoyang113@mails.ucas.ac.cn

传统质心算法具有算法简单、稳健性强的优点,在星敏传感器领域中最常见的质心定位算法。传统质心算法最主要的缺点是它的系统误差相比其他质心算法更大。近年来,人们对传统质心算法的系统误差进行了大量分析,并根据分析提出了许多不同的补偿系统误差的方法^[2-8]。但是这些分析大多都假设星敏传感器光学系统点扩展函数(PSF)服从二维 Gauss 函数模型,以及像素的响应函数在光敏区域内是均匀的。但实际上,星敏传感器光学系统的像差无法消除,而且会影响点扩展函数的分布,各种不同的光学像差会对传统质心算法系统误差产生不同形式的影响^[9-11];而对图像传感器像素响应函数的实测结果也表明像素的响应函数在光敏区域内的响应非但不均匀,而且并不对称^[12-13],这也会对传统质心算法系统误差产生影响^[2,14]。另外,质心窗边缘的像素探测到的光子数量非常少,而传统质心算法却给予它们更高的权重,从而导致传统质心算法的抗噪声能力比较差。

除了传统质心算法外,常见的质心定位算法还有高斯曲面拟合法^[15]、亚像元相关法^[16]等。这些算法的抗噪声能力比传统质心算法要强,但是它们同样对星敏传感器光学系统 PSF 和图像传感器像素响应函数有很强的假设,而且这两种算法相比传统质心算法更加依赖于这些假设,因此这两种算法的稳健性较差。

为了解决上述问题,减小光学系统像差和随机噪声的影响,本文对星敏传感器所成星点像进行了分析,结合星敏传感器光学系统的调制传递函数和图像传感器像素频率响应特性,提出了一种基于星点像重采样的新的星敏传感器质心定位算法(简称“重采样质心算法”),并对该算法在不同光学像差条件下的质心定位系统误差进行了仿真。最后,针对自主研发的星敏传感器产品,通过实验得到了该算法的质心定位精度,并将其传统正弦曲线补偿方法进行了比较,验证了该算法的可行性和有效性。

2 基于星点像重采样的质心算法

2.1 有效点扩展函数的重构

传统质心算法是最常见的星敏传感器质心算法,但在存在像差的条件下,传统质心算法的系统误差较大且难以补偿,抗噪声能力也比较差,而基于点扩展函数拟合的算法则不存在这两个问题。基于点扩展函数拟合的算法面临的最大挑战是光学系统的点扩展函数很难精确知道。用衍射模型来计算点扩展

函数通常是不可行的,因为这需要对光学系统及其波前像差有非常精确的了解。二维高斯函数经常被用来近似点扩展函数,但只适用于对质心定位精度要求比较低的情况。在重采样质心算法中,首先对像素的输出信号进行分析,然后利用离散星点像对点扩展函数进行重构。

根据傅里叶光学,光学系统的点扩展函数是光瞳函数傅里叶变换模的平方。由于透镜的孔径总是有限的,所以光学系统的点扩展函数是带限信号,其信号截止频率满足

$$|k_{\text{cutoff}}| = 2\pi D / (\lambda f), \quad (1)$$

式中: D 为透镜的直径; f 为透镜的焦距; λ 为入射光的波长。

因此根据采样定理,只要对采样频率大于奈奎斯特频率,即采样间隔小于 $\lambda f / (2D)$,就可以对星敏传感器的点扩展函数进行精确重构。

考虑图像传感器的成像原理,像素的输出值实际上并不是点扩展函数的精确采样,落到像素感光区域内的光子都会对像素输出值有影响,并且感光区域内的量子效率可能不是均匀的。通常假设所有像素的响应函数是相同的,则像素输出值可以表示为

$$g_{mn}(x_c, y_c) = \iint f_{\text{PS}}(x - x_c, y - y_c) \times Q(x - ma, y - na) dx dy = f_{\text{ePS}}(ma, na), \quad (2)$$

式中: $f_{\text{PS}}(x, y)$ 为光学系统的点扩展函数; (x_c, y_c) 为点扩展函数的质心; $Q(x, y)$ 为像素响应函数; $g_{mn}(x_c, y_c)$ 为点扩展函数中心在 (x_c, y_c) 处时第 m 行第 n 列像素的输出值; a 为像元尺寸; $f_{\text{ePS}}(x, y)$ 为点扩展函数中心在 (x_c, y_c) 处时的有效点扩展函数(一些人称其为像元接收能量函数^[3]),定义见(3)式,它是点扩展函数和像素响应函数的卷积。

$$f_{\text{ePS}}(u, v) = \iint f_{\text{PS}}(x - x_c, y - y_c) \times Q(x - u, y - v) dx dy. \quad (3)$$

由(2)式可以知道星点像是有效点扩展函数的离散化采样,星敏传感器对星点成像的过程如图1所示。而由傅里叶变换的性质易知,有效点扩展函数和点扩展函数一样是带限信号。所以通过星点像可以重构的函数实际上是有效点扩展函数,但这不影响重采样质心算法。

要重构像元接收能量函数,采样频率必须要超过奈奎斯特频率,以 F 数为 1.2 的星敏传感器为例进行计算,其对应的最大采样间隔为 360 nm,这通常

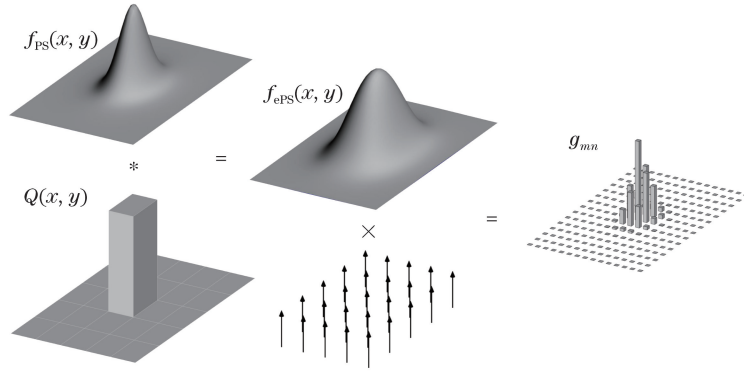


图 1 星点采样流程图

Fig. 1 Flow chart of star image sampling process

远小于星点像的采样间隔,也就是像元尺寸 a 。为解决这个问题,利用高精度转台使星点像(即点扩展函数)在探测器平面沿 x 轴和 y 轴以 a/M 为步长进行移动,使移动范围覆盖 1 pixel,每个位置采集一幅星点像,其中 M 为沿每个方向移动的步数。这样可以得到 $M \times M$ 幅图像,将其进行重新组合就可以得到一幅采样间隔为 a/M 的参考星点像。参考星点像的具体重新组合方式如下,

$$g_{(i+mM-M)(j+nM-M)}^{\text{ref}} = g_{mn}^{(ij)}, \quad (4)$$

式中: $g_{mn}^{(ij)}$ 为 x 轴移动 i 步、 y 轴移动 j 步采集的星点像。由(2)、(4)式可得

$$g_{mn}^{\text{ref}} = f_{\text{EPS}}\left(m \frac{a}{M}, n \frac{a}{M}\right). \quad (5)$$

通过选择合适的移动步数 M 就可以得到过采样的参考星点像,从而可以对有效点扩展函数进行重构。但是如果严格按照采样定理的要求,移动步数 M 可能很大,这样会大幅增加实验的复杂度,算法消耗的资源也比较大。因此,对有效点扩展函数做进一步分析,由傅里叶变换的性质很容易得到

$$\tilde{f}_{\text{EPS}}(k_x, k_y) = \tilde{f}_{\text{PS}}(k_x, k_y) \tilde{Q}(k_x, k_y), \quad (6)$$

式中: (k_x, k_y) 为空间频率; $\tilde{f}_{\text{EPS}}(k_x, k_y)$ 、 $\tilde{f}_{\text{PS}}(k_x, k_y)$ 和 $\tilde{Q}(k_x, k_y)$ 分别为 $f_{\text{EPS}}(x, y)$ 、 $f_{\text{PS}}(x, y)$ 和 $Q(x, y)$ 的傅里叶变换。

一方面,对星敏感器而言,出于提高质心定位精度的考虑,往往采用离焦的光学系统,离焦光学系统的点扩展函数的高频分量会大幅降低;另一方面,像素光敏区的形状尺寸和像素响应函数的实测结果都说明像素本身对信号高频分量的响应是非常小的^[12]。因此,结合(6)式可知,有效点扩展函数的高频分量也非常低。所以并不需要过采样的星点像,即移动步数 M 不需要很大,对有效点扩展函数的重构精度就可以达到要求。具体的移动步数选择应当

结合器件参数,由仿真或实验结果给出。

2.2 星点像重采样

当星敏感器姿态发生变化时,点扩展函数在探测器平面移动,这时图像传感器的输出为

$$g_{mn}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c) = \iint f_{\text{PS}}(x - x_c - \Delta x_c, y - y_c - \Delta y_c) \times Q(x - ma, y - na) dx dy, \quad (7)$$

式中: $(\Delta x_c, \Delta y_c)$ 为点扩展函数在探测器平面移动的距离。这与对探测器进行反方向移动得到的图像传感器的输出是等价的,结合(7)式和(2)式,可以得到

$$g_{mn}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c) = \iint f_{\text{PS}}(x - x_c - \Delta x_c, y - y_c - \Delta y_c) \times Q(x - ma, y - na) dx dy = \iint f_{\text{PS}}(x - x_c, y - y_c) \times Q(x + \Delta x_c - ma, y + \Delta y_c - na) dx dy = f_{\text{EPS}}(ma - \Delta x_c, na - \Delta y_c). \quad (8)$$

(8)式说明点扩展函数质心位置改变后的星点像是点扩展函数位置改变前像素能量接收函数在特定位置的离散化采样。因此,可以利用上一节得到的参考星点像,在特定位置进行二维插值得到质心位置改变的星点像。根据采样定理,使用 sinc 函数进行插值可以完美地恢复信号,具体的插值算法如下:

$$g_{mn}^{\text{resampling}}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c) = f_{\text{EPS}}(ma - \Delta x_c, na - \Delta y_c) = \sum_{i,j} g_{ij}^{\text{ref}}(x_c, y_c) \times \text{sinc}\left(\frac{ma - \Delta x_c - ia/M}{a/M}\right) \times \text{sinc}\left(\frac{na - \Delta y_c - ja/M}{a/M}\right). \quad (9)$$

这样就得到了相对于参考星点像质心偏移了 $(\Delta x_c, \Delta y_c)$ 的星点像。由于 sinc 函数在空间域上不是有限的,因此需要对参考星点像用窗口函数进行限制。对于窗口大小的选择,如果过大就会影响计算速度;而如果过小,则会由于截断而产生误差。为了计算方便,取参考星点像的限制窗口尺寸比质心算法的质心窗尺寸大 2 pixel。

另外,注意(9)式中, x 和 y 两个维度上的 sinc 函数是分开的,因此通过合适的算法,可以高效地进行星点像的重采样^[17]。

2.3 质心计算

当对一幅新的星点像进行质心计算时,首先要对参考星点像的质心 $(x_c^{\text{ref}}, y_c^{\text{ref}})$ 进行计算,然后再利用星点像重采样计算新星点像与参考星点像之间的质心偏移 $(\Delta x_c, \Delta y_c)$,最后将两者结合就可以得到新的星点像的质心。

参考星点像的质心很容易获取,最简单的方法就是直接用传统质心算法进行计算,

$$\begin{cases} \hat{x}_c^{\text{ref}} = \frac{\sum_{m,n} \frac{ma}{M} g_{mn}^{\text{ref}}}{\sum_{m,n} g_{mn}^{\text{ref}}} \\ \hat{y}_c^{\text{ref}} = \frac{\sum_{m,n} \frac{na}{M} g_{mn}^{\text{ref}}}{\sum_{m,n} g_{mn}^{\text{ref}}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $(\hat{x}_c^{\text{ref}}, \hat{y}_c^{\text{ref}})$ 为参考星点像的质心估计值。

由于参考星点像是在实验室中采集的,可以通过采集多帧图像进行平均来消除随机噪声的影响,这样得到的质心可以忽略随机误差的影响。由于参考星点像的采样频率很高,而且不受噪声的限制,可以取较大的质心窗进行计算,所以用传统质心算法得到的质心的系统误差也非常小,可以忽略不计。

然后对新的星点像与参考星点像之间的质心偏移进行计算。2.2 节给出了用参考星点像获得质心偏移的重采样星点像的方法,这样通过最小化重采样星点像与新星点像之间残差的平方和,就可以对质心偏移进行估计,

$$(\Delta \hat{x}_c, \Delta \hat{y}_c) = \underset{\Delta x_c, \Delta y_c}{\operatorname{argmin}} \sum_{m,n} [g_{mn}^{\text{new}}(x_c^{\text{new}}, y_c^{\text{new}}) - g_{mn}^{\text{resampling}}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c)]^2, \quad (11)$$

式中: $(\Delta \hat{x}_c, \Delta \hat{y}_c)$ 为新的星点像与参考星点像之间的质心偏移的估计值; (m, n) 的取值范围是整个质心窗。

因为重采样质心算法中对星点像进行重采样的

方法没有对点扩展函数和像素响应函数进行任何假设,因此与高斯曲面拟合法以及对系统误差进行正弦补偿的传统质心算法不同,重采样质心算法对质心偏移的估计精度受像差、像素光敏区形状缺陷等因素的影响很小。另外,由于重采样质心算法是基于点扩展函数最小二乘拟合的,质心窗边缘和中心处像素的噪声对精度的影响相同,所以抗噪声能力比传统质心算法要高。重采样质心算法的一个缺陷是由于计算中需要对星点像进行多次重采样,所以计算速度相对传统质心算法会慢很多,但注意到(9)式,也就是星点像重采样的过程中包含了大量的重复计算,在实际应用中可以进行一定的优化。

最后将两者求和就可以得到新的星点像的质心估计:

$$(\hat{x}_c^{\text{new}}, \hat{y}_c^{\text{new}}) = (\hat{x}_c^{\text{ref}} + \Delta \hat{x}_c, \hat{y}_c^{\text{ref}} + \Delta \hat{y}_c). \quad (12)$$

2.4 总体流程

重采样质心算法的总体流程如下:

1) 在实验室中利用高精度转台使点扩展函数沿 x 轴和 y 轴以 a/M 为步长进行移动,使移动范围覆盖 1 个像素,采集得到 $M \times M$ 幅图像,对图像进行重新组合得到一幅采样间隔为 a/M 的参考星点像 $g_{mn}^{\text{ref}}(x_c, y_c)$,并采用传统质心算法计算参考星点像的质心 $(\hat{x}_c^{\text{ref}}, \hat{y}_c^{\text{ref}})$ 。

2) 星敏传感器在工作中得到拍摄星图,提取出新星点像 $g_{mn}^{\text{new}}(x_c^{\text{new}}, y_c^{\text{new}})$ 。

3) 用参考星点像 $g_{mn}^{\text{ref}}(x_c, y_c)$ 可以重采样得到质心偏移的星点像 $g_{mn}^{\text{resample}}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c)$,然后通过最小化新星点像 $g_{mn}^{\text{new}}(x_c^{\text{new}}, y_c^{\text{new}})$ 与重采样星点像 $g_{mn}^{\text{resample}}(x_c + \Delta x_c, y_c + \Delta y_c)$ 之间残差的平方和,得到质心偏移的估计 $(\Delta \hat{x}_c, \Delta \hat{y}_c)$ 。

4) 将参考星点像的质心 $(\hat{x}_c^{\text{ref}}, \hat{y}_c^{\text{ref}})$ 和质心偏移 $(\Delta \hat{x}_c, \Delta \hat{y}_c)$ 相加,得到新星点像的质心 $(\hat{x}_c^{\text{new}}, \hat{y}_c^{\text{new}}) = (\hat{x}_c^{\text{ref}} + \Delta \hat{x}_c, \hat{y}_c^{\text{ref}} + \Delta \hat{y}_c)$ 。

上述过程对应的流程图如图 2 所示。

3 质心定位误差的仿真分析

3.1 有效点扩展函数的仿真

根据夫琅禾费衍射理论,光学系统的点扩展函数是光瞳函数傅里叶变换模的平方,因此利用像差可以计算出光学系统的点扩展函数。为了方便分析,先仅考虑离焦像差,用 Zernike 多项式对其进行解析。

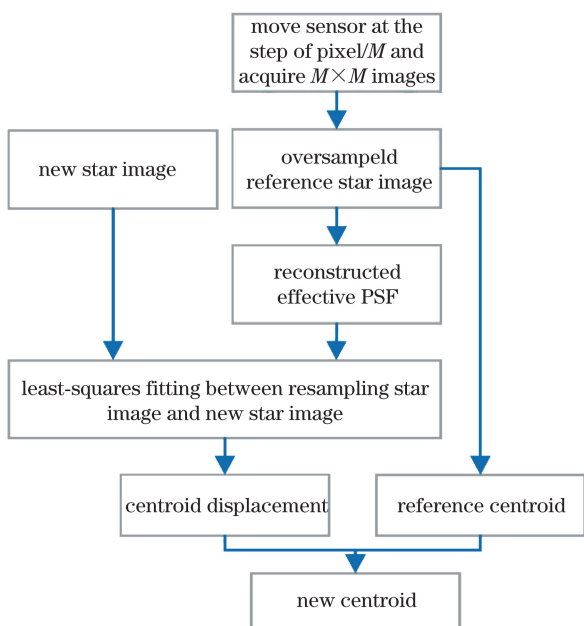


图 2 基于星点像重采样的质心算法流程图
Fig. 2 Flow chart of centroid algorithm based on star image resampling

仿真中,假设像元尺寸为 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$,光敏区的形状是正方形,边长为 $0.9\ \text{pixel}$,即填充因子为 0.81 ,位于像元的中心。波长设为 $600\ \text{nm}$,镜头的 F 数为 1.2 ,离焦像差的均方根(RMS)值取 0.6λ 。为了与高斯函数的半径联系起来,按照 1σ 覆盖光斑 68.27% 的能量进行计算,此时点扩展函数的半径为 $0.45\ \text{pixel}$ 。仿真得到的点扩展函数、有效点扩展函数及其对应的空间频谱如图 3~4 所示。

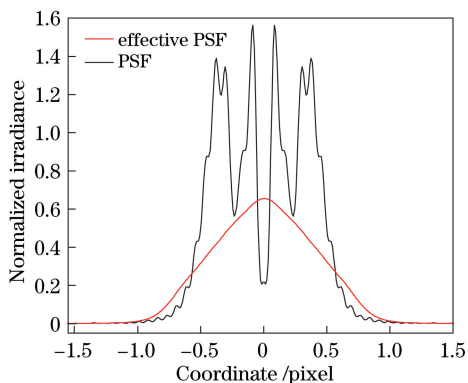


图 3 离焦光学系统点扩展函数和有效点扩展函数
Fig. 3 PSF and effective PSF in defocused optical system

从图 3 中可以看出,虽然离焦光学系统的点扩展函数与高斯函数差别很大,但考虑了像元采样的有效点扩展函数与高斯函数十分相似。因此,利用高斯点扩展函数模型对系统误差进行分析可以在一定程度上提升质心定位的精度。

从图 4 中可以看出,有效点扩展函数的空间频

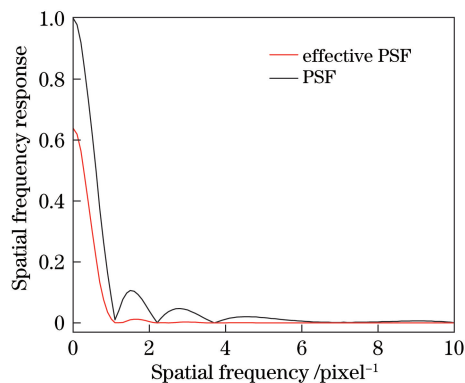


图 4 离焦光学系统点扩展函数和有效点扩展函数的频谱
Fig. 4 Frequency spectra of PSF and effective PSF in defocused optical system

谱在空间频率大于 $4\ \text{pixel}^{-1}$ 时基本为 0,甚至大于 $2\ \text{pixel}^{-1}$ 的分量就很小了,远小于光学系统的截止频率 $1/(\lambda f/D) = 13.89\ \text{pixel}^{-1}$,因此在重采样质心算法中,采集参考星点像时移动步数 M 不需要很大。

3.2 算法的系统误差

在仿真中,点扩展函数和像元参数参照 3.1 节设置。计算质心时选择 $5\ \text{pixel} \times 5\ \text{pixel}$ 窗口。采集参考星点像时移动步数 $M=4$,移动步长为 $a/M=0.25\ \text{pixel}$,移动坐标值在 $[-0.5\ \text{pixel}, 0.25\ \text{pixel}]$ 区间内,得到 16 幅星点像。对这 16 幅星点像进行重新组合,加上尺寸为 $7\ \text{pixel}$ 的限制窗口,得到最终的参考星点像,它的采样间隔为 $0.25\ \text{pixel}$,采样点数为 28×28 。

接下来对算法的系统误差进行仿真。使星点像在一个像元范围内进行移动(移动范围为 $[-0.5, 0.5]$),移动步长设为 $0.05\ \text{pixel}$ 。为了进行对比,采用重采样质心算法和传统质心算法计算了星点像的质心。这两种算法的横坐标系统误差分布如图 5 所示,采用传统质心算法时,质心位置误差的均方根为 $0.040\ \text{pixel}$,而采用重采样质心算法时,质心位置误差的均方根为 $0.006\ \text{pixel}$ 。

从图 5 中可以看出,一方面,传统质心算法的横坐标系统误差沿 x 轴呈 S 曲线变化,这与用高斯点扩展函数分析得到的结果比较相似^[3],但图中 S 曲线的形状和正弦曲线有一定差异,而且 S 曲线的幅值随着 y 轴坐标得改变而发生变化。这些差异既与采用离焦点扩展函数有关,还与像元的填充因子不为 1 有关。若要对传统质心算法的系统误差进行准确的补偿,既需要针对具体的光学系统和图像传感器进行分析,还需要准确、足够多的系统误差样本数据。而重采样质心算法在采集参考星点像时移动

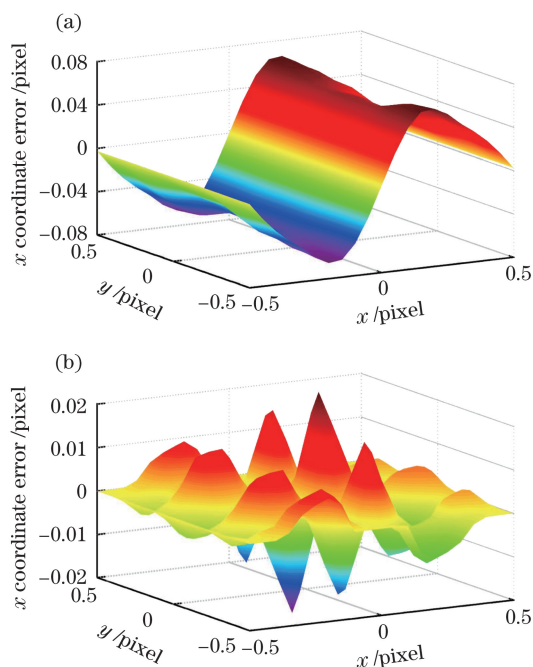


图5 系统只含离焦像差时,不同算法得到的横坐标误差的仿真结果。(a)传统质心算法;(b)重采样质心算法

Fig. 5 Simulation results of horizontal coordinate errors obtained by different algorithms when system only has defocus aberrations. (a) Traditional centroid algorithm; (b) resampling-based centroid algorithm

步长只需要 0.25 pixel,就可以获得 0.006 pixel 的质心定位精度,相比之下,重采样质心算法采集参考星点像的过程要比传统质心算法采集补偿样本数据的过程简单有效很多。

上面的仿真只考虑了离焦像差,为了验证重采样质心算法不受光学系统的影响,在上述仿真的基础上,除了均方根为 0.6λ 的离焦像差外,又额外引入了均方根为 0.05λ 的 x 轴彗差,然后进行参考星点像采集和系统误差仿真,仿真结果如图 6 所示。采用传统质心算法时,质心位置误差的均方根为 0.054 pixel,而采用重采样质心算法时,质心位置误差的均方根为 0.008 pixel。可以看出:加入彗差后点扩展函数的不对称性,使得采用传统质心算法的系统误差增大很多,并且沿 x 轴不再呈正弦曲线形状变化,难以对其进行补偿;而重采样质心算法的质心位置误差依然很小,这能够证明重采样质心算法受光学系统像差的影响很小。

除此之外,在同等条件下,两种算法在运算时间上亦有所不同:传统质心算法计算简单,平均计算时间为 0.23 ms,而重采样质心算法相对复杂,平均计算时间为 3.83 ms,约为传统质心算法计算时间的 16.7 倍。

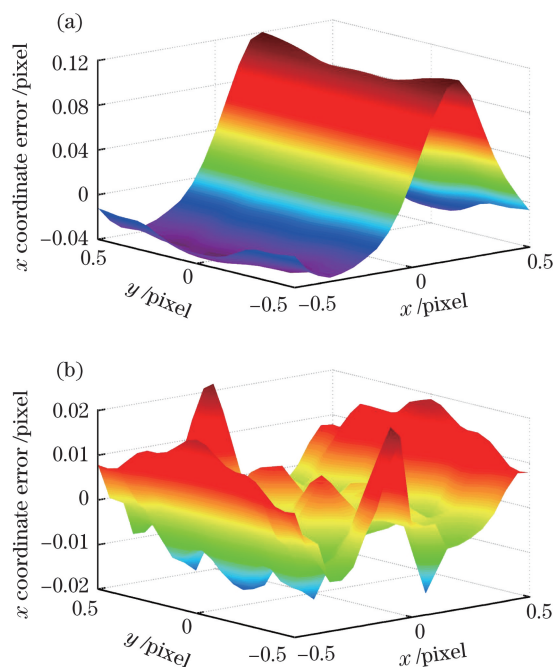


图6 系统包含离焦和彗差时,不同算法得到的横坐标误差的仿真结果。(a)传统质心算法;(b)重采样质心算法

Fig. 6 Simulation results of horizontal coordinate errors obtained by different algorithms when system has defocus aberrations and comas. (a) Traditional centroid algorithm; (b) resampling-based centroid algorithm

4 实验与结果分析

实验使用的质心误差标定测试系统包括平行光管、白光光源、高精度六自由度转台(位移绝对精度为 $0.06\ \mu\text{m}$)、计算机、隔震平台等,装置实物图如图 7 所示。星敏感器图像传感器固定于六自由度转台上,光学系统固定在隔震平台上。六自由度转台的 y 轴和 z 轴对应图像传感器的 x 轴和 y 轴,测试质心误差时移动转台的相应轴,使弥散斑在传感器平面上产生相对移动。实验使用的星敏感器 CMOS 图像传感器的像元尺寸为 $3.75\ \mu\text{m} \times 3.75\ \mu\text{m}$,镜头 F 数为 1.2。

首先,调节平行光管与星敏感器镜头的光轴平行。通过调节六自由度台 x 轴的位置进行调焦,使星点像大小合适,然后采集参考星点像。将图像传感器移动到一个随机位置作为起始位置,然后调节六自由度转台,使点扩展函数在图像传感器平面分别沿 x 轴、 y 轴方向移动,移动步长为 $0.25\ \text{pixel} = 0.9375\ \mu\text{m}$,两个方向的移动距离都为 0.75 pixel,共计移动 16 个位置。在每个位置采集 20 幅星点像进行平均,以减小随机噪声的影响。这样 16 个位置得

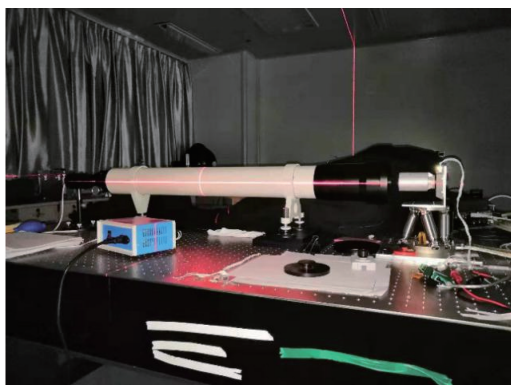


图 7 星点质心误差测量设备

Fig. 7 Equipment for star centroid error measurement

到 16 幅星点像。对这 16 幅星点像进行组合处理, 就可以得到最终的参考星点像。图 8 是直接采集到的星点像与参考星点像的对比。

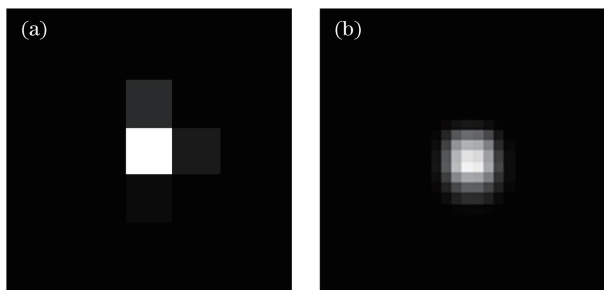


图 8 单幅星点像与参考星点像的对比。

(a) 单幅星点像; (b) 参考星点像

Fig. 8 Comparison between single star image and reference star image. (a) Single star image; (b) reference star image

接下来对质心定位系统误差进行测量。重新将图像传感器移动到一个随机位置作为起始位置, 然后调节六自由度台使图像传感器分别沿 x 轴和 y 轴移动, 移动步长为 $0.1 \text{ pixel} = 0.375 \mu\text{m}$, x 轴移动距离为 $2 \text{ pixel} = 7.5 \mu\text{m}$, y 轴移动距离为 $1 \text{ pixel} = 3.75 \mu\text{m}$, 共计移动了 $11 \times 21 = 231$ 个位置。同样, 为了减小随机噪声的影响, 在每个位置采集 20 幅星点像进行平均。对每个位置上得到的星点像进行质心计算, 减去质心数据的相对位置增量就可以得到质心定位系统误差。除了使用重采样质心算法计算质心外, 还采用传统质心算法计算质心, 并将两者的结果进行对比, 如图 9 所示。

采用传统质心算法时, 质心位置误差的均方根为 0.148 pixel , 而采用重采样质心算法得到的质心位置误差的均方根为 0.008 pixel 。从图 9 中可以看出, 不同于仿真结果, 当采用传统质心算法时, S 曲线的形状和幅值随着 y 轴坐标的改变未发生明显

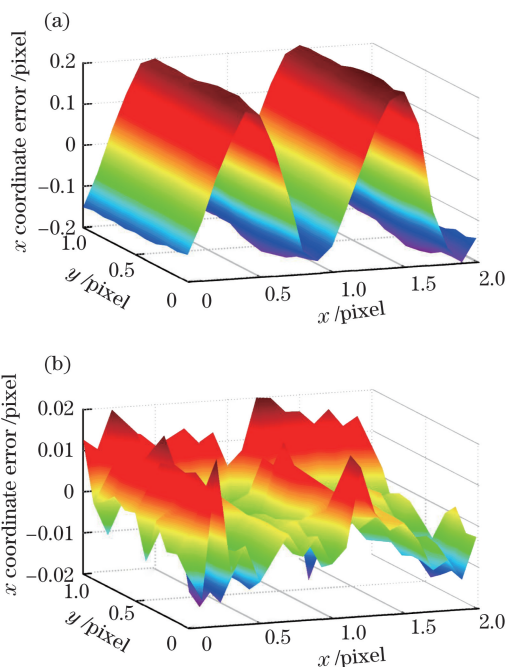


图 9 不同算法得到的横坐标系统误差的实验结果。

(a) 传统质心算法; (b) 重采样质心算法

Fig. 9 Experimental results of horizontal coordinate systematic errors obtained by different algorithms. (a) Traditional centroid algorithm; (b) resampling-based centroid algorithm

变化, 产生这种差异的原因可能是光斑大小、像元填充因子与仿真设置有一定差异。在这种条件下, 可以尝试用正弦曲线对系统误差进行补偿^[2-3], 补偿后的质心误差如图 10 所示。经过补偿后, 质心误差的均方根为 0.024 pixel 。

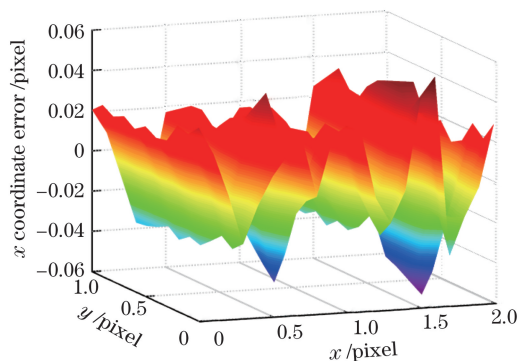


图 10 传统质心算法补偿系统后的横坐标系统误差实验结果

Fig. 10 Experimental results of horizontal coordinate systematic errors obtained by traditional centroid algorithm after compensation

采用重采样质心算法得到的质心位置误差的均方根为 0.008 pixel , 质心精度相比传统正弦拟合补偿算法提高了 67% 。

上述的实验验证了视场中心位置处算法的精

度。由于光学系统实际像差的影响,视场不同位置的点扩展函数分布可能会有所差别,因此一幅参考星点像可能无法适用于整个视场的重采样,这样的话就需要对视场进行细分。由于时间和实验条件的限制,本文没有对这一部分内容进行深入讨论,相关的实验和算法改进将会进一步研究。

5 结 论

对星敏传感器所成星点像进行分析,指出星点像是有效点扩展函数的离散化采样,而有效点扩展函数的高频分量很低,仿真结果显示只需要 0.25 pixel 的采样间隔就可以对有效点扩展函数进行高精度重构,从而可以对质心有一定偏移的星点像进行重采样,根据这一结果,提出了基于星点像重采样的星敏传感器质心算法。该算法具有抗噪声能力强、受光学系统像差影响小,以及不需要对光学像差和像素响应函数建模分析等优点。仿真结果显示,重采样质心算法在不同像差条件下的系统误差都小于 0.01 pixel。对某型星敏传感器进行的星点质心定位实验表明,重采样质心算法的系统误差为 0.008 pixel,相比传统正弦曲线补偿方法的精度提高了 66%。实验和仿真结果验证了重采样质心算法的可行性和有效性,为发展高精度星敏传感器提供了一种新的技术手段。

由于时间和实验条件的限制,本文没有对重采样质心算法在星敏传感器视场范围内的通用性进行验证,相关的实验和算法改进需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Wei X G, Zhang G J, Jiang J. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812-815.
魏新国, 张广军, 江洁. 星敏传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, 29(9): 812-815.
- [2] Wei X G, Xu J, Zhang G J. S-curve error compensation of centroiding location for star sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 849-857.
魏新国, 徐佳, 张广军. 星敏传感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 849-857.
- [3] 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]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(11): 3145-3152.
- [4] Tang S J, Guo X S, Zhou Z F, *et al.* Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(6): 1502-1507.
唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1502-1507.
- [5] Jiang L, Zhang L G, Zhang X X, *et al.* Compensation for star centroid systematic error of star trackers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0314001.
姜亮, 张立国, 张星祥, 等. 星敏传感器星点定位系统误差补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0314001.
- [6] Yang J, Zhang T, Song J Y, *et al.* High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 1002-1010.
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.
- [7] Hu X C, Mao X N, Wu Y K, *et al.* Pixel frequency error compensation method based on sub-pixel coordinates[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0717006.
胡雄超, 毛晓楠, 吴永康, 等. 基于亚像元坐标的像素频率误差补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0717006.
- [8] Liu N N, Xu S Y, Hu J, *et al.* Hyper accuracy star location algorithm based on nonsubsampled Contourlet transform and mapped least squares support vector machine[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0512001.
刘南南, 徐抒岩, 胡君, 等. 基于非下采样 Contourlet 变换和映射最小二乘支持向量机的高精度星点定位方法[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0512001.
- [9] Liu H B, Tan J C, Shen B J, *et al.* Aberrations effect on position accuracy of star sensor[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 471-473.
刘海波, 谭吉春, 沈本剑, 等. 像差对星敏传感器星点定位精度的影响[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 471-473.
- [10] Tan D, Zhang X, Wu Y X, *et al.* Analysis of effect of optical aberration on star centroid location error[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 0217004.
谭迪, 张新, 伍雁雄, 等. 光学像差对星点质心定位误差的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217004.
- [11] Jia R M, Ma X L, Hao Y C. Research on star subdivision location method based on skewed normal distribution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 051002.

- 贾瑞明, 马晓蕾, 郝云彩. 基于偏正态分布的星点细分定位方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 051002.
- [12] Ketchazo C, Viale T, Boulade O, *et al.* A new technique of characterization of intrapixel response dedicated to astronomical detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 787: 265-269.
- [13] Mahato S, de Ridder J, Meynants G, *et al.* A novel technique to characterize the spatial intra-pixel sensitivity variations in a CMOS image sensor[C]// 2017 15th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), June 25-28, 2017, Strasbourg, France. New York: IEEE, 2017: 361-364.
- [14] Wang H T, Luo C Z, Wang Y, *et al.* An improved centroid algorithm for star point[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(7): 55-59.
- 王洪涛, 罗长洲, 王渝, 等. 一种改进的星点质心算法[J]. 光电工程, 2009, 36(7): 55-59.
- [15] Wang M, Zhao J Y, Chen T. Center extraction method for star-map targets based on anisotropic Gaussian surface fitting[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515006.
- 王敏, 赵金宇, 陈涛. 基于各向异性高斯曲面拟合的星点质心提取算法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515006.
- [16] Li C Y, Xie H, Li H F, *et al.* Centroiding algorithm for high-accuracy star tracker[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(2): 41-44.
- 李春艳, 谢华, 李怀锋, 等. 高精度星敏感器星点光斑质心算法[J]. 光电工程, 2006, 33(2): 41-44.
- [17] Mighell K J. Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2005, 361(3): 861-878.