

静态像点高斯灰度扩散模型参数估计方法

王海涌 周文睿* 林浩宇 王新龙

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

摘要 为了实现星敏感器高斯灰度扩散模型的参数估计,设计了平行光管成像标定实验及相关算法。基于高斯规律建立并求解了以高斯扩散半径和像点质心坐标偏差为变量的方程组,进一步求得灰度能量系数;在 3 个不同平行光源方位拍摄图像,利用图像灰度数据计算模型参数的系列测量值,分别取均值作为其估计值;建立实验验证方法,将 3 个估计参数代入模型模拟静态星像点,将模拟图像与存在噪声的实拍图像做相似度比较,3 pixel×3 pixel 窗口内相似度高于 0.97,5 pixel×5 pixel 窗口内高于 0.98,7 pixel×7 pixel 窗口内高于 0.98。结果表明,方程组求解得到的高斯扩散半径、像点质心偏差的值可信,推导公式正确。

关键词 图像处理;导航技术;参数估计;星图模拟;灰度扩散

中图分类号 V448.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0323004

Parameter Estimation of Gaussian Gray Diffusion Model of Static Image Spot

Wang Haiyong Zhou Wenrui Lin Haoyu Wang Xinlong

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In order to estimate the parameters in Gaussian gray diffusion model, experiments with collimator are carried out while the parameter calibration algorithm is proposed. Equations which take the Gaussian diffusion radius and the deviation values of the centroid coordinate as variables are established and solved, furthermore, the energy-gray coefficient is obtained. Then, series of photos are taken under the same condition in three different orientations, and parameters whose mean values are taken as their estimates are calculated respectively using these gray data of photos. Finally, all the estimated parameters are put into the simulating model, and a model-generated star image spot is therefore got, the similarity between which and real shot ones is calculated in three different windows under the condition that noise is bound to exist. The similarity is a value of more than 0.97 within the window of 3 pixel×3 pixel, more than 0.98 for a 5 pixel×5 pixel, and more than 0.98 for a 7 pixel×7 pixel. The experimental results show that the solution formulas about σ , A and the deviation Δx and Δy are right.

Key words image processing; navigation technique; parameter estimation; star-image simulation; gray proliferation

OCIS codes 230.0040; 100.2000; 100.2960; 230.2090

1 引 言

为了获得最合适的星像点大小,以利用图像处理算法提高质心定位的精度,星敏感器光学成像通常采用离焦技术^[1]。微调焦距,使像点尺寸加大并覆盖更多像素^[2]。文献[3~7]均指出,离焦处理后成像点的灰度分布近似符合二维高斯分布。故星像数据基于

高斯规律处理,在星图模拟中基于高斯规律建模,来模仿实际星敏感器的离焦效果,是合理的。

如何评价星敏感器产品的成像效果,高斯模型中的参数——能量灰度系数 A 和高斯弥散半径 σ 是两个非常关键的参数, σ 体现了调焦及镜头像差对成像点大小的综合影响, σ 值在星敏感器研制、调试

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-10-27

基金项目: 航空科学基金(2007ZC51027)资助课题。

作者简介: 王海涌(1969—),男,博士,讲师,主要从事天文导航及复合导航技术等方面的研究。

E-mail: why@buaa.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zwr101@126.com

及定型后,需要准确测定,但其具体测试方法,经调研还未发现有相关文献发表。高斯弥散半径 σ 表示点扩散函数的散焦程度,星点能量的 99.73% 集中在 3σ 范围内,视 3σ 为光斑半径^[2]。后续质心提取精度与 σ 的估计精度有着密切的关系^[8],对后续星图识别成功率和姿态确定精度也有很大影响。文献[7~12]中指出能量灰度系数 A 与恒星灰度有关,并且采用线性变换将星等变换为灰度。文献[11]指出灰度系数 A 与星等、光积分时间以及探测器性能指标等均相关,并针对不同大小的视场建立了星等到灰度的转换公式,但其前提是已知上下两个参考星等及其对应的灰度值。且当导航星映射坐标和整形像素坐标存在偏差时,偏差的求取以及达到亚像素级的质心定位方法也少有提到。结合静态高斯灰度扩散模型实现能量灰度系数的求解,也未有文献报道。本文就这两个重要参数的估计方法及标定实验进行了研究。

2 静态星像点灰度模型

恒星是一个理想的平行光源,当它聚焦在电荷耦合元件(CCD)像平面上时,成像光斑能量分布符合点扩展函数(PSF)。离焦技术再加上光学成像系统的固有像差,使星像点星光信号的典型能量分布近似符合二维高斯分布^[3~7]。因此为了能够更加准确地进行星图模拟,就必须考虑点扩展的问题。将模拟星像点按照高斯规律进行灰度扩散,模仿镜头像差和散焦的实际成像效果,如图 1 所示。

设像点的映射坐标为 (x_0, y_0) ,高斯扩散法中对应像点内像素 (x_i, y_j) 的灰度计算公式为

$$g(x_i, y_j) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 A 为能量灰度系数,与光敏面成像点总的光照度有关; σ 为高斯弥散半径,表示点扩展函数的散焦

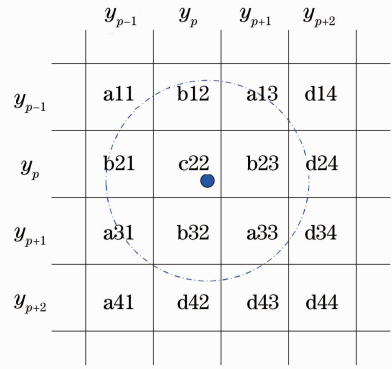


图 1 像点的高斯散焦光斑区域

Fig. 1 Gaussian defocusing spot of image point
程度, $g(x_i, y_j)$ 为任意像素的灰度。

3 参数标定数学模型

文献[6]中指出,对于图 1 所示高斯灰度扩散模型,当星像点映射坐标与像素坐标有偏差时,对导航星映射坐标 (x_0, y_0) 浮点型坐标值四舍五入取整得到散焦像点的中心像素坐标 (x_p, y_p) , 整形。则 $\Delta x = x_0 - x_p, \Delta y = y_0 - y_p$ 为映射坐标和像素坐标的偏差。

像点的灰度分布符合以映射坐标 (x_0, y_0) 为中心的二维高斯分布,那么,像素 (x_i, y_j) 的灰度计算公式为

$$g(x_i, y_j) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \times \exp\left[-\frac{(x_i - x_p - \Delta x)^2 + (y_j - y_p - \Delta y)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (2)$$

由(2)式可知,针对某一星敏感器型号产品,若能得到(2)式中的 A 和 σ ,模型参数完备后,即可进行星图模拟。

3.1 参数 σ 的估计方法

利用像点中心周围 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 范围内的 9 个灰度数据进行处理,如图 1 所示, c_{22} 为中心像素。则中心列灰度累加和表示为^[6]

$$\begin{aligned} \sum_{cc} &= g_{b12} + g_{c22} + g_{b32} = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(-1 - \Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] + \\ &\frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] + \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(1 - \Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] = \\ &\frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \left[\exp\left(-\frac{1 + 2\Delta x}{2\sigma^2}\right) + \exp(0) + \exp\left(-\frac{1 - 2\Delta x}{2\sigma^2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

同理,左侧列灰度累加和表示为

$$\sum_{cl} = g_{a11} + g_{b21} + g_{a31} = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2 + (-1 - \Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \left[\exp\left(-\frac{1 + 2\Delta x}{2\sigma^2}\right) + \exp(0) + \exp\left(-\frac{1 - 2\Delta x}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (4)$$

右侧列累加灰度和为

$$\sum_{cr} = g_{a13} + g_{b23} + g_{a33} = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2 + (1-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \left[\exp\left(-\frac{1+2\Delta x}{2\sigma^2}\right) + \exp(0) + \exp\left(-\frac{1-2\Delta x}{2\sigma^2}\right) \right], \quad (5)$$

中心列灰度累加与左侧列灰度的比值由(3)式和(4)可得

$$\frac{\sum_{cc}}{\sum_{cl}} = \exp\left(\frac{1+2\Delta y}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

右侧列灰度与左侧列灰度的比值由(4)式和(5)式可得

$$\frac{\sum_{cr}}{\sum_{cl}} = \exp\left(\frac{2\Delta y}{\sigma^2}\right), \quad (7)$$

针对行也做同样的处理,分别表示为

$$\frac{\sum_{rc}}{\sum_{ru}} = \exp\left(\frac{1+2\Delta x}{2\sigma^2}\right), \quad (8)$$

$$\frac{\sum_{rd}}{\sum_{ru}} = \exp\left(\frac{2\Delta x}{\sigma^2}\right). \quad (9)$$

这里, \sum_{rc} 表示中心行灰度累加和, \sum_{ru} 表示紧邻上行的灰度累加和, \sum_{rd} 紧邻下行的灰度累加和。

对于一幅实拍图像,则联立(6)、(7)或(8)、(9)式可以解算出实拍像点参数 σ 为

$$\sigma = \left[2\ln\left(\frac{\sum_{cc}}{\sum_{cl}}\right) - \ln\left(\frac{\sum_{cr}}{\sum_{cl}}\right) \right]^{1/2} = \left[2\ln\left(\frac{\sum_{rc}}{\sum_{ru}}\right) - \ln\left(\frac{\sum_{rd}}{\sum_{ru}}\right) \right]^{1/2}, \quad (10)$$

同时,还可以解出该成像点质心与整型像素坐标的偏差为

$$\Delta y = \frac{1}{2}\sigma^2 \ln\left(\frac{\sum_{cr}}{\sum_{cl}}\right), \quad (11)$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}\sigma^2 \ln\left(\frac{\sum_{rc}}{\sum_{ru}}\right). \quad (12)$$

其实,可取任意一列(或一行)分别与其他两列(或两行)来计算灰度累加和之比,参照如上推导过程组成方程组,求解 σ 和 Δy (或 Δx)。但考虑到信噪比,往往取中心行与上(或下)行,或者中心列与左(或右)列的组合形式。对同样条件下拍摄的多个像点求解 σ ,取均值作为高斯半径的估值。对于某具体像点,可以根据不同行列组合求解得到多个 Δx 和 Δy ,结果求均值作为偏差的估值。 σ 、 Δx 和 Δy 的估

值参数,是下一部分参数 A 求解的前提条件。

3.2 能量灰度系数 A 的求解方法

文献[7~12]中指出参数 A 与恒星星等有关,建立了 A 与星等的线性公式。恒星星等作为已知条件,通过多颗星的多个解算值 A 可以标定得到线性公式的参数值。本文利用平行光管成像,光强固定不变,模仿单颗星,仅提供一个求解 A 的数学方法,作为标定工作的一个准备步骤。

任取星像点 $n \times n$ 像元中任意像元 P_{ij} ,由(2)式和(10)~(12)式可求解参数能量灰度系数 A 。以图1为例,有

$$g_{c22} = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (13)$$

g_{c22} 为中心像素的灰度值, σ 、 Δx 和 Δy 的估值在上一节中已给出,因此有

$$A = 2\pi\sigma^2 g_{c22} \exp\left[\frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (14)$$

(13)式中像元可在 $n \times n$ 范围内任取。同样,若对多幅同样条件下拍摄图像的成像点进行计算求均值,可得到能量灰度系数 A 的估计值。

至此,通过前面所给方法,便可由平行光管实拍图像求解出参数 A 和 σ 的估值,可用于星图模拟中。

4 参数估计可信性的验证

参数估计的精确性需要验证。估计参数的解算值,来源于平行光管的平行光成像数据,把参数估计值代入高斯灰度扩散模型,进行星像点的计算机模拟仿真,并与真实平行光管成像像点进行对比,采用文献[13]中提出的求解图像相似性的方法计算仿真模拟星像与实拍像点的相似度,从而判定参数估计的可信性。

记 U 为实拍像点, V 为模拟星像。其中 $U = \{U_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $V = \{V_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 是图像对应的像素点灰度值的集合,其中 N 为图像像素数。那么两幅图的相似度函数为

$$Q = \frac{\sigma_{UV}}{\sigma_U \sigma_V} \frac{2\bar{U}\bar{V}}{(\bar{U})^2 + (\bar{V})^2} \frac{2\sigma_U \sigma_V}{\sigma_U^2 + \sigma_V^2}, \quad (15)$$

式中 $\bar{U} = E\{U_i\}$ 和 $\bar{V} = E\{V_i\}$ 为两幅图像的平均灰

度, $\sigma_U^2 = E\{(U_i - \bar{U})^2\}$ 和 $\sigma_V^2 = E\{(V_i - \bar{V})^2\}$ 分别为两幅图像灰度的方差, $\sigma_{UV} = E\{(U_i - \bar{U})(V_i - \bar{V})\}$ 为协方差。(15)式中第一项表示两幅图像灰度的相关系数,取值范围为 $[-1, +1]$;第二项描述了两幅图像均值的相似性,取值范围为 $(0, 1)$;第三项是两幅图像方差的相似性,图像方差在一定程度上反映了图像的整体对比度,取值范围为 $(0, 1]$ 。故 Q 的取值范围为 $[-1, +1]$ 。(15)式所示的度量从两幅图像像素灰度的均值相似性、对比度相似性和相关系数的角度很好地刻画了两幅图像的相似性。

需比较成像点与模拟像点的相似度,而图像大部分是无用背景,故需选择一个对比窗口。成像点能量分布主要集中在像点光斑半径为 3σ 范围内^[14,15],因此只需取窗口 $\text{ceil}(6\sigma)$,向上取整。

5 参数标定求解的实验仿真

5.1 实验环境和实验设备及其参数

实验主要设备包括:工业相机型号:FL2-1433M-C, Canada;镜头型号:TAMRON 177D, Japan;平行光管型号:F550型;转台:三轴速率转台。

相机焦距为 35 mm,实拍图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。

如图 2 所示,将工业相机安置在三轴速率转台上,镜头视轴指向转台的中轴负方向,架起平行光管,发出的平行光模拟星光,两视轴相交为适当角度。

设定光积分时间为 100.15 ms,帧频取 9.51 Hz,



图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental devices

调整光圈位置与增益,使静态星像点的中心像素的灰度达到 200 左右,具体灰度值由实验后取得图像读取,确定增益为 1.55 dB;然后分别在 $(12^\circ, 5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(17^\circ, 5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(14^\circ, 5^\circ, 2^\circ)$ 三个位置下各取连续 5 frame 图像,共 15 frame,在全暗环境下实施拍摄。变换角度是为了改变成像点位置,提供一组新的观测测量,此角度可以随机选取。

5.2 实验结果

将 3 次实验的 15 frame 图像分别进行处理,为了减小噪声影响,每序列内的 5 幅图像进行灰度累加再取平均,得到三幅平均后新图像,分别重新命名,以第一组为例,命名为 Mean_ONE.bmp,其余两组类比。不失一般性,取第三组实验的新图像 (Mean_THREE.bmp) 及其中像点的局部放大图如图 3 所示,图 3(a)标示圈内为成像像点,图 3(b)为其放大图像。其灰度数据矩阵分布图如表 1 所示,其中纵坐标表示灰度行,横坐标表示灰度列。

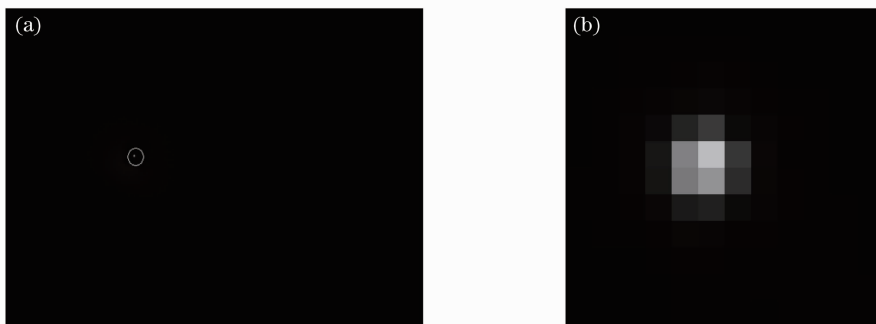


图 3 拍摄图像 Mean_THREE.bmp。(a)整幅图像;(b)其局部放大图像

Fig. 3 Image Mean_THREE.bmp. (a) Whole image; (b) local amplification of image (a)

考虑到像点质心坐标与像素整型坐标有偏差,对一帧图,针对中心列、左侧列和右侧列灰度累加和不同两两组合,利用公式分别得到多个 σ 值,针对行的情形同理也可得到多个 σ 的计算值,其平均值 $\bar{\sigma}$ 作为 σ 的估计,将 $\bar{\sigma}$ 代入(11)式和(12)式中则可求解

每一像点的 Δx 、 Δy 。最后将 $\bar{\sigma}$ 、 Δx 和 Δy 代入(14)式求解 A 。

三组序列图像分别取平均后得到新图像,利用每幅新图的像点数据可以计算出两个 σ 的测量值,共 6 个 σ 的测量数据,取平均得到 $\bar{\sigma} = 0.8485$, $\bar{A} =$

1010,质心偏差为

Mean_ONE. bmp: $(\Delta x, \Delta y)$ 为 $(0.0769, -0.0466)$;

Mean_TWO. bmp: $(\Delta x, \Delta y)$ 为 $(0.1751, -0.3370)$;

Mean_THREE. bmp: $(\Delta x, \Delta y)$ 为 $(0.3431, -0.3158)$ 。

表 1 图像 Mean_THREE 像素灰度值矩阵分布

Table 1 Gray matrix of image Mean_THREE. bmp

x	y					
	195	196	197	198	199	200
220	2	3	5	6	4	2
221	3	9	36	58	12	3
222	4	22	129	197	54	6
223	4	21	120	149	43	5
224	2	6	25	30	11	4
225	1	2	5	4	2	2

5.3 星图模拟及验证

由 5.2 节标定获得的估计参数代入高斯灰度扩散模型进行静态星图模拟,得到模拟星像点的灰度分布图如图 4 所示。

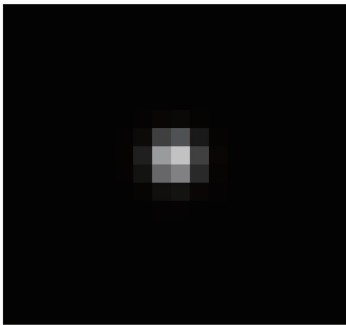


图 4 基于估计参数的模拟像点放大图

Fig. 4 Local amplification of simulated image point based on estimated parameters

表 2 为其灰度值矩阵分布。采用第 4 节中所给图像相似度计算方法,分别计算 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 、 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 、 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 窗口内拍摄图像与模拟图像的相似性。计算结果如表 3 所示。

表 2 静态星像点仿真图像像素灰度值矩阵分布

Table 2 Gray matrix of static simulated star image

x	y					
	195	196	197	198	199	200
220	0	1	3	4	1	0
221	0	9	45	59	19	2
222	1	28	147	192	62	5
223	1	23	120	156	51	4
224	0	5	24	32	10	1
225	0	0	1	2	1	0

表 3 仿真图与实拍图相似度

Table 3 similarity of simulated and practical images

Window /pixel	3×3	5×5	7×7
Mean_ONE. bmp	0.9795	0.9907	0.9926
Mean_TWO. bmp	0.9849	0.9932	0.9943
Mean_THREE. bmp	0.9937	0.9952	0.9958

由表 3 可以看出,在实拍图像存在噪声和镜头畸变的情况下,仿真图像与实拍图像在峰值近似相等的情况下存在着极好的相似性,从而可以证明,参数估值 σ 和 A 以及高斯灰度扩散模型是可信的。

6 结 论

针对星敏传感器成像像点的两个重要参数高斯弥散半径 σ 和能量灰度系数 A ,推导出了估计公式,设计了验证准则,并进行了转台成像实验。

利用实际成像点图像数据,将估计公式得到的 σ 、 A 和像点质心偏差 $(\Delta x, \Delta y)$,作为高斯灰度扩散模型的输入参数,进行静态星像点的模拟。在实拍图像存在噪声的情形下,围绕像点质心的 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 窗口内二者相似度高于 0.97, $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 窗口内两者相似度高于 0.99, $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 窗口内两者相似度高于 0.99。实验结果表明利用估计公式得到 σ 和 A 的估值以及高斯灰度扩散模型都是可信的。

参 考 文 献

- 1 C. C. Liebe. Accuracy performance of star trackers-a tutorial [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems*, 2002, **38**(2): 587~599
- 2 Yang Jun, Zhang Tao, Song Jingyan *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 1002~1009
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): 1002~1009
- 3 B. Hancock, R. Stirbl, T. Cunningham *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/imager position accuracy[C]. *SPIE*, 2001, **4284**: 43~53
- 4 Dong Ying, Xing Fei, You Zheng. Determination of the optical system parameters for a CMOS APS based star sensor[J]. *J. Astronautics*, 2004, **25**(6): 663~668
董 瑛, 邢 飞, 尤 政. 基于 CMOS APS 的星敏传感器光学系统参数确定[J]. *宇航学报*, 2004, **25**(6): 663~668
- 5 Xie Lunzhi, Bian Honglin, Wang Zhenhua. Study of the subpixel interpolation of image spots with matrix detectors[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2003, **2**(1): 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, **2**(1): 51~56
- 6 Wang Haiyong, Fei Zhenghong, Wang Xinlong. Precise simulation of star spots and centroid calculation based on Gaussian distribution[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1672~1677
王海涌, 费峥红, 王新龙. 基于高斯分布的星像点精确模拟及质心计算[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(7): 1672~1677

- 7 Zhang Hui, Zhong Jianyong, Yuan Jiahu *et al.*. Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 1052~1056
张 辉, 钟建勇, 袁家虎等. 电路噪声对星敏传感器星点定位精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 1052~1056
- 8 Jia Hui, Yang Jiankun, Li Xiujian *et al.*. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star tracker [J]. *Sci. China Technol. Sci.*, 2010, **53**(11): 3145~3152
- 9 Peng Huafeng, Chen Jing, Zhang Bin. Imaging simulation for space target on space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(10): 14~17
彭华峰, 陈 鲸, 张 彬. 天基光电望远镜对空间目标成像的模拟[J]. *光电工程*, 2005, **32**(10): 14~17
- 10 Gao Yuan, Lin Zaiping, Li Jun *et al.*. Imaging simulation algorithm for star field based on CCD PSF and space target's striation characteristic [J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2008, **23**(2): 58~62
高 源, 林再平, 李 骏等. 基于 CCD 点扩散和拖尾特性的星空模拟方法研究[J]. *电子信息对抗技术*, 2008, **23**(2): 58~62
- 11 Li Yuming. Study on the Attitude Determination of Spacecraft Based on Strap-Down Star Sensor [D]. Beijing: Beihang University, 2010
李玉明. 基于捷联星敏传感器的飞行器姿态确定技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2010
- 12 Guo He, Deng Nianmao, Luo Changzhou. Effect of dynamic factor on measuring star by star sensor[J]. *Areospace Control*, 2008, **26**(6): 38~41
郭 贺, 邓年茂, 罗长洲. 动态因素对星敏传感器测量影响分析[J]. *航天控制*, 2008, **26**(6): 38~41
- 13 Wang Chao, Ye Zhongfu. Similarity-based objective measure for performance of image fusion[J]. *J. Software*, 2006, **17**(7): 1580~1587
王 超, 叶中付. 基于相似性的图像融合质量的客观评估方法[J]. *软件学报*, 2006, **17**(7): 1580~1587
- 14 Li Yufeng, Hao Zhihang. Research of hyper accuracy subpixel subdivision location algorithm for star image [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 666~668
李玉峰, 郝志航. 星点图像超精度亚像素细分定位算法的研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 666~668
- 15 Pan Bo, Yang Gengqing, Liu Yong. Study on optimization threshold of centroid algorithm [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1788~1792
潘 波, 杨根庆, 刘 勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1788~1792

栏目编辑: 何卓铭