

基于天文观测的相机标定及姿态测量技术研究

戴东凯 王省书 胡春生 焦宏伟

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为利用相机进行天文观测以实现高精度的相机姿态测量, 必须先对相机参数进行精确标定。针对传统相机标定方法工作距离有限的问题, 提出了以恒星为控制点的相机标定方法, 根据球面天文学方法计算观测时刻控制点的世界坐标, 利用摄像测量原理建立了恒星观测模型, 求解相机的内外参数并分析了误差因素。实验结果表明, 该标定方法在不依赖于精密、复杂的外部设备情况下可达到较高精度, 并具有较强的抗噪声能力。将标定结果用于天文观测并求解相机姿态, 航向角和俯仰角的解算重复性优于 $10''$, 能够满足高精度姿态测量的需求。该方法可进一步推广应用于星敏感器的标定。

关键词 测量; 相机标定; 姿态测量; 恒星; 天文观测

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0312005

Camera Calibration and Attitude Measurement Technology Based on Astronomical Observation

Dai Dongkai Wang Xingshu Hu Chunsheng Jiao Hongwei

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract To realize high precision attitude measurement by means of astronomical observation with a camera, it is quite necessary to calibrate the parameters of the camera accurately. A camera calibration method is presented based on astronomical observation to solve the problem that the traditional calibration methods can only work effectively in a limited distance. The world coordinates of control points at the measuring time are calculated by using the spherical astronomy method. A star observation model is established according to the photogrammetric principle, both the external and intrinsic parameters of the camera are obtained, and the calibration precision is also analyzed. The experimental results indicate that the calibration method can achieve a good precision without the aid of precise and complex equipment, and the method performs also well when noise exists. Finally, the calibration result is adopted to work out the attitude of the camera, and the obtained repeatability accuracy of yaw and pitch angle is better than $10''$. This method can be applied to the calibration of star sensor.

Key words measurement; camera calibration; attitude measurement; star; astronomical observation

OCIS codes 120.4640; 150.0150; 150.1488; 120.4820; 350.4600

1 引 言

由恒星构成的惯性系统具有极高的精度和可靠性, 因此以恒星作为姿态基准也具有直接、可靠和精确的优点。通过摄像测量的方法可以实现对恒星姿态基准的映射, 但必须对相机的参数进行精确标定。相机标定方法大致可分为 3 类^[1]: 传统标定方法、自

标定方法^[2]和基于主动视觉的标定方法^[3]。传统的相机标定技术又可分为以下几类: 直接非线性优化法、直接线性变换解法以及使用较为广泛的两步法^[4,5]。传统标定方法一般都需要构造空间坐标精确已知的控制点或控制线^[6,7], 且只能针对有限的工作距离进行标定, 难以满足天文观测的需求。文

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-10-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项基金(20104307110021)资助课题。

作者简介: 戴东凯(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电仪器与测控等方面的研究。E-mail: rocktotheteeth@126.com

导师简介: 王省书(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器与测控技术、光学工程等方面的研究。

E-mail: gfkdwxs@yahoo.com

献[8]提出利用高精度二轴转台和平行光管标定航空相机的精密测角法,但是该方法对实验室的设备要求较高。文献[9]通过天顶观测的方法进行星敏感器标定,其标定的方法是对恒星的地球坐标和图像坐标的映射关系做曲面拟合,并没有建立精确的物理模型。针对以上问题,本文以恒星为标定控制点,建立恒星的观测模型,提出用天文观测进行相机标定的方法,并将标定后的相机用于姿态测量。

2 观测模型

摄像测量法映射恒星姿态基准的原理为:首先计算观测时刻的恒星观测位置,再通过摄像测量的成像模型得到恒星在相机坐标系下的坐标,由恒星在这两个坐标系下的坐标,就可解算得到两个坐标系之间的姿态转换矩阵,进而得到相机的姿态信息。

摄像测量^[1]中一般采用右手坐标系。图1定义了几种常用的坐标系:世界坐标系 W - XYZ (东北天)、相机坐标系 C - $X_cY_cZ_c$ 、图像像素坐标系 I - xy 。

世界坐标系和相机坐标系间的坐标变换可以用

旋转矩阵和平移向量来描述:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{r} + \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_0 & r_1 & r_2 \\ r_3 & r_4 & r_5 \\ r_6 & r_7 & r_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R} 是旋转矩阵, \mathbf{T} 是世界坐标系原点在相机坐标系中的坐标,称为平移向量。

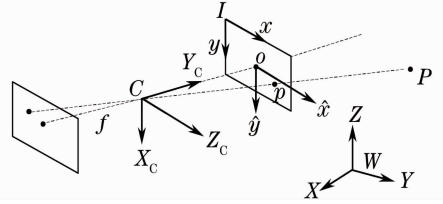


图1 摄像测量中常用的坐标系

Fig. 1 Coordinate systems used in photogrammetry

为了得到更为直观、简单的姿态信息,采用欧拉角作为姿态参数。定义欧拉旋转的顺序依次为 Z - X - Y 轴,绕 Z 轴的旋转角称为航向角,记作 ψ ;绕 X 轴的旋转角称为俯仰角,记作 φ ;绕 Y 轴的旋转角称为横滚角,记作 θ 。旋转矩阵 \mathbf{R} 可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi - \sin \theta \sin \varphi \sin \psi & \cos \theta \sin \psi + \sin \theta \sin \varphi \cos \psi & -\sin \theta \cos \varphi \\ -\sin \psi \cos \varphi & \cos \varphi \cos \psi & \sin \varphi \\ \sin \theta \cos \psi + \cos \theta \sin \varphi \sin \psi & \sin \theta \sin \psi - \cos \theta \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

恒星的位置在天球坐标系中可描述为

$$\mathbf{r} = \rho \mathbf{r}' \quad (3)$$

式中 ρ 为天体到观测点的距离, \mathbf{r}' 为单位方位矢量,用天顶距 z 和方位角 A 可表示为

$$\mathbf{r}' = [\sin z \cos A, \sin z \sin A, \cos z]^T. \quad (4)$$

将(3)式代入(1)式得到

$$\mathbf{r}_c = \rho(\mathbf{R}\mathbf{r}' + \mathbf{T}/\rho). \quad (5)$$

恒星到观测点的距离可以认为是无穷远,因此 $\mathbf{T}/\rho \approx 0$, (5)式可以化简为

$$\mathbf{r}_c = \rho \mathbf{R}\mathbf{r}'. \quad (6)$$

图1中像点 p 的图像坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) (单位: pixel) 与物点在相机坐标系下的坐标 $P_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 之间的变换关系由相机的中心投影模型可得到

$$\begin{cases} \frac{Z_c}{Y_c} = \frac{\tilde{x} - C_x}{F_x} \\ \frac{X_c}{Y_c} = \frac{\tilde{y} - C_y}{F_y} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 (C_x, C_y) 为相机的主点, F_x, F_y 为等效焦距。令

$$[X'_c, Y'_c, Z'_c]^T = \rho \mathbf{r}', \quad (8)$$

式中 $\mathbf{r}'_c = [X'_c, Y'_c, Z'_c]^T$ 为单位方位矢量,即

$\|\mathbf{r}'_c\| = 1$ 。由(7), (8)式即可求解得到单位矢量 \mathbf{r}'_c 。

将(8)式代入(6)式,消去 ρ 后可得

$$\mathbf{r}'_c = \mathbf{R}\mathbf{r}'. \quad (9)$$

3 标定算法

标定前首先需要获得控制点在世界坐标系下的单位方位矢量 \mathbf{r}' 及其在 CCD 像面上的图像坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) 。给定相机的主点、像元大小和焦距的标称值为初始值,由(7), (8)式可计算得到控制点在相机坐标系下的单位方位矢量 $[X'_c, Y'_c, Z'_c]^T$ 。用最小二乘法求解(9)式得到旋转矩阵 \mathbf{R} , 求解该方程至少需要知道 3 个控制点的世界坐标和图像坐标。

这里所求得的旋转矩阵 \mathbf{R} 并没有加入正定限制,由于观测噪声和其他误差因素的影响, \mathbf{R} 一般不满足正交性,需要对其做正交化处理,以求得最佳旋转矩阵,可以通过对 \mathbf{R} 进行奇异值分解(SVD)得到: 设 $[\mathbf{U}, \mathbf{D}, \mathbf{V}] = f_{\text{SDV}}(\mathbf{R})$, 其中 \mathbf{U}, \mathbf{V} 为酉矩阵, \mathbf{D} 为对角阵, 令 $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{V}^T$, 即为最佳旋转矩阵^[4]。

求得 \mathbf{R} 后,通过(2)式就可得到相机的姿态角。以所求的姿态角及标称的相机参数为初值,设定优化目标函数,采用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法可进一步对相机的内外参数进行优化。优化目标函数为

$$f = \sum_i \|m_i - \hat{m}_i(\varphi, \theta, \psi, C_x, C_y, F_x, F_y)\|^2. \quad (10)$$

上述求解过程没有考虑镜头畸变的影响,需选用图像中心附近畸变较小的像点求解,提高解算的稳定性和精度。下面引入相机的畸变模型,并采用全部数据点进行标定。

本文所采用的镜头畸变模型是 Brown^[10] 校正模型,该模型可以描述为

$$\begin{cases} x_d - x_u = x_u(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [2k_3 x_u y_u + k_4(r^2 + 2x_u^2)] \\ y_d - y_u = y_u(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + [k_3(r^2 + 2y_u^2) + 2k_4 x_u y_u] \end{cases}, \quad (11)$$

式中 (x_d, y_d) 和 (x_u, y_u) 分别表示实际和理想的归一化图像坐标, $r = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$, $\mathbf{k}_c = [k_1, k_2, k_3, k_4, k_5]^T$ 为镜头的畸变系数,将(11)式改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_u(x_u^2 + y_u^2) & x_u(x_u^2 + y_u^2)^2 & 2x_u y_u & 3x_u^2 + y_u^2 & x_u(x_u^2 + y_u^2)^6 \\ y_u(x_u^2 + y_u^2) & y_u(x_u^2 + y_u^2)^2 & x_u^2 + 3y_u^2 & 2x_u y_u & y_u(x_u^2 + y_u^2)^6 \end{bmatrix} \mathbf{k}_c = \begin{bmatrix} x_d - x_u \\ y_d - y_u \end{bmatrix}. \quad (12)$$

对于 n 个图像坐标点,由(12)式可以得到 $2n$ 个方程,立后得到矩阵方程为 $\mathbf{D}\mathbf{k}_c = \mathbf{d}$,其最小二乘解为

$$\mathbf{k}_c = (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T \mathbf{d}. \quad (13)$$

通过以上求解过程可以得到相机的全部内部参数值,以这些参数为初值,再次利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法对目标函数进行全局优化,以求得各个参数的最优解,目标函数为

$$f = \sum_i \|m_i - \hat{m}_i(\varphi, \theta, \psi, C_x, C_y, F_x, F_y, \mathbf{k}_c)\|^2. \quad (14)$$

4 实验结果及分析

实验所用的相机和镜头参数如下:CCD 相机分辨率为 $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $6.45 \mu\text{m} \times 6.45 \mu\text{m}$,镜头焦距为 75 mm ,相机视场角为 $6.69^\circ \times 5.03^\circ$,像元对应的角分辨率为 $17.7 (")/\text{pixel}$,曝光时间为 0.3 s 。

为了获得较多的控制点,实验用相机对准所要拍摄的恒星(星座),固定姿态不变,在一组实验的时间(约 20 min)每隔约 40 s 保存一帧图像,并精确记录曝光的时间点。本文根据球面天文学^[11]的方法,利用 Hipparcos 星表编写了计算恒星视位置计算程序,该程序可以计算出任意时刻在观测点恒星的天球坐标(赤经、赤纬),其精度优于 $1''$,进而可换算为直角坐标 (X', Y', Z') 。为了提高标定精度,选用的目标恒星应尽量靠近天顶以减小蒙气差^[12]修正误差对恒星位置计算的影响。由于恒星在 CCD 像面

中所成的图像为弥散斑,可通过灰度质心法^[13]提取恒星的图像坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) ,该坐标的提取误差主要由大气湍流引起(约为 0.1 pixel),为进一步提高星点灰度中心提取精度,增强灰度质心法算法稳定性,还需考虑 CCD 像元灵敏度非均匀性^[14]的影响。

北京时间 2011 年 5 月 19 日,在长沙地区观测到双子座,星点的坐标提取结果如图 2 所示。图 3 为所拍摄到的星点在 CCD 像面上的分布情况。

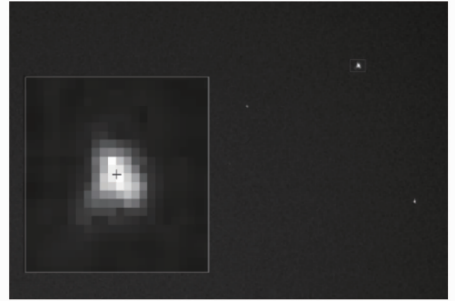


图 2 星点灰度质心的提取

Fig. 2 Gray centroid extraction of a star

图 3 中的星点数为 210,抽取 160 个数据点用于相机标定。将剩余星点的图像坐标与利用标定结果由相机成像模型重投影后相应的图像坐标之间的残差作为标定精度评估标准。标定结果如下:

$$C_x = 760.92, \quad C_y = 552.50,$$

$$F_x = 11142.10, \quad F_y = 11133.72,$$

$$\mathbf{k}_c = [5.88, 155.33, 0.026, 0.041, 0].$$

均方根误差为 $[0.26, 0.31]$ 。重投影误差分布如图 4 所示。

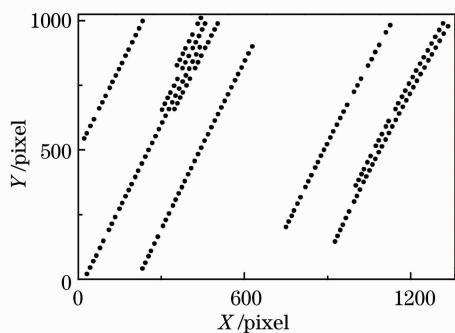


图 3 星点在 CCD 像面上的分布

Fig. 3 Distribution of the stars on CCD image plane

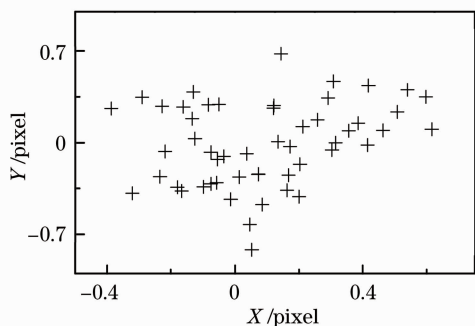


图 4 星点重投影误差分布

Fig. 4 Reconstruction error distribution of star points

标定过程中引入的最大的误差来自星点图像坐标的提取。受大气湍流影响,恒星在 CCD 像面中所成的图像并非理想高斯分布,而是呈现不规则的形状,随机波动较大,不宜采用高斯拟合,因此本文选用灰度质心方法提取星点。为考察该误差量对标定算法的影响,对所提取的星点图像坐标加入随机扰动,处理得到噪声对标定的重投影误差及相机内参数相对误差的影响如图 5~7 所示。

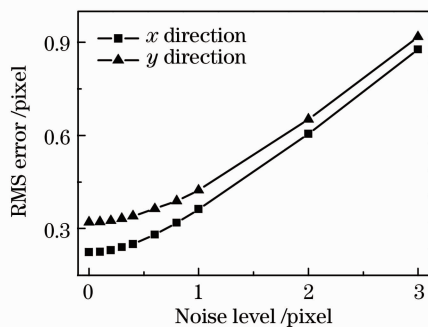


图 5 噪声对重投影误差的影响

Fig. 5 Sensitivity of reconstruction error with respect to noise level

由图 5~7 可看出噪声水平在 0.5 pixel 内时,标定算法能够获得较稳定的标定精度,且 y 方向上的标定误差明显大于 x 方向。产生这一结果的主

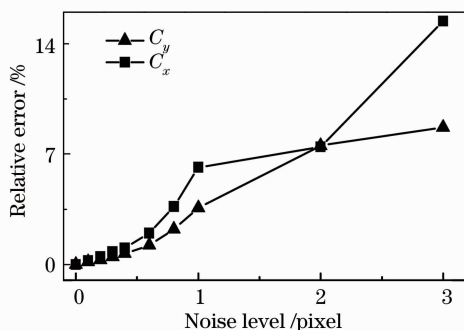


图 6 噪声对主点相对误差的影响

Fig. 6 Sensitivity of principal point error with respect to noise level

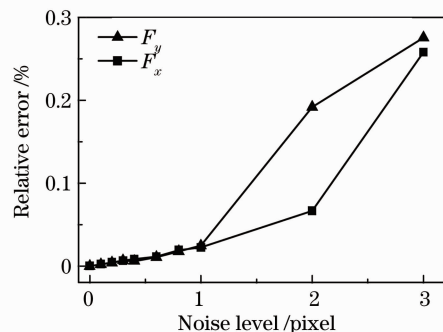


图 7 噪声对等效焦距的影响

Fig. 7 Sensitivity of scale factor error with respect to noise level

要原因是没有对地球自转引起的运动模糊进行精确修正:地球自转导致恒星在天球上绕北天极作圆周视运动,实验拍摄的恒星视运动角速度约为 $13''/s$,换算为 y 方向上的视运动速度约为 $11.6''/s$,实验的曝光时间为 0.3 s,在该时间内恒星角位移约为 $3.5''$,相当于 0.2 pixel,而 x 方向上的角位移量较小(约为 $1.7''$)。另外,蒙气差修正的残差也会在 y 方向上引入一定的误差,由此造成 y 方向上星点位置提取的误差较大。

将标定得到的相机内参数代入由(7),(9),(11)式所描述的测量模型以求解相机姿态,通过实验验证姿态测量的重复精度:将相机对准所要拍摄的星空区域,固定相机姿态不变拍摄恒星(星座),每拍摄一帧图像即可根据已标定的测量模型求得一组相机姿态角。由于恒星在 CCD 像面上运动,在 20 min 内约每隔 40 s 拍摄一帧图像,可得到 34 帧星点分布位置不同的图像,利用这些图像分别解算相机姿态,解算结果的统计分析如表 1 所示。由表 1 可以看出,横滚角的误差要远大于航向角和俯仰角,这是因为横滚角误差与像点位置提取误差和图像物理坐标(最大值为 8.77 mm)的比值有关,航向角、俯仰

角的误差与像点位置提取误差和焦距 $f(75\text{ mm})$ 的比值有关,而 f 远大于图像物理坐标值,所以像点位置提取误差对横滚角的影响较大;另外,俯仰角的误差大于航向角的误差,这一差异主要也是由于 y 方向星点位置提取误差较大引起的。

表 1 姿态解算结果

Table 1 Result of attitude angles determination

	Pitch angle	Roll angle	Yaw angle
Average value / ($^{\circ}$)	30.0251	98.8208	69.3477
Mean square error / ($''$)	5.76	26.28	2.50

用于姿态解算的星点个数会影响姿态解算的稳定性,对星点坐标加入 1 pixel 的随机噪声误差,用不同星点数解算得到的姿态角标准差如图 8 所示,从图 8 可看出,通过增加用于姿态解算的星点个数可以有效地提高姿态解算的抗噪声能力。

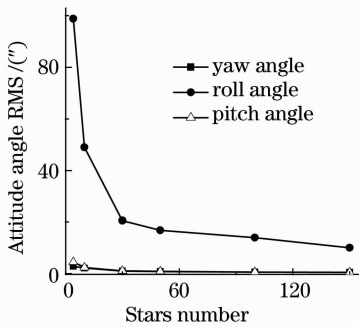


图 8 噪声对姿态解算的影响

Fig. 8 Sensitivity of attitude angles with respect to noise level

5 结 论

针对利用相机进行天文观测的需要,提出用天文观测的方法对相机参数进行标定,建立了从恒星的天球坐标到相机图像坐标转换的测量模型,然后介绍了该方法进行标定的基本原理及算法实现,最后给出标定结果并用于姿态解算,分析了影响相机标定和姿态解算精度的因素。实验结果表明,该方法只需要通过一个位置的天文观测就能实现相机的标定,方法简单易行,不依赖于其他精密、复杂的设备,标定的重投影误差为 $[0.26\ 0.31]$ 像素,用于姿态解算得到的俯仰角和航向角重复精度优于 $10''$,通过增加观测恒星的个数可以提高姿态解算的抗噪声能力。该方法可以推广应用于星敏感器的标定。

参 考 文 献

1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches [M]. Beijing: Science Press, 2009. 53~55

于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社, 2009. 53~55

2 Hu Peicheng, Li Ning, Zhou Jianjiang. Improved camera self-calibration method based on circular points[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 54~60

胡培成,黎宁,周建江. 一种改进的基于圆环点的摄像机自标定方法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(12): 54~60

3 Jiang Guangwen, Chao Zhichao, Fu Sihua *et al.*. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1308~1314

姜广文,晁志超,伏兴华等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308~1314

4 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [R]. Microsoft Corporation, NSR-TR-98-71, 1998

5 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344

6 Yang Zhen, Sun Junhua, Wu Ziyang *et al.*. A new camera calibration method based on two 2D targets [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, **21**(3): 411~414

杨珍,孙军华,吴子彦等. 基于二维靶标的摄像机标定方法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(3): 411~414

7 Zhang Lingfei, Chen Gang, Ye Dong *et al.*. Cameras calibration based on one-dimensional reference object and improved evolutionary strategy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3136~3142

张灵飞,陈刚,叶东等. 基于一维标定物和改进进化策略的相机标定[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3136~3142

8 Wu Guodong, Hang Bing, He Xu. Calibration of geometric parameters of line-array CCD camera based on exact measuring angle in lab [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10): 1628~1632

吴国栋,韩冰,何煦. 精密测角法的线阵 CCD 相机几何参数实验室标定方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(10): 1628~1632

9 Li Chunyan, Li Huaifeng, Sun Caihong. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 559~563

李春艳,李怀峰,孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 559~563

10 D. C. Brown. Close-range camera calibration [J]. *Photogrammetric Engineering*, 1971, **37**(8): 855~866

11 Yang Xiaodong, Zhao Lin. Introduction to Marine Navigation [M]. Beijing: Science Press, 2009. 72~97

杨晓东,赵琳. 舰船导航概论[M]. 北京:科学出版社, 2009. 72~97

12 Yan Haojian. Introduction to Modern Atmosphere Refraction [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2006. 43~57

严豪健. 现代大气折射引论[M]. 上海:上海科技教育出版社, 2006. 43~57

13 Liu Guodong, Liu Bingguo, Chen Fengdong *et al.*. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3446~3451

刘国栋,刘炳国,陈凤东等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3446~3451

14 Cheng Wansheng, Zhao Jie, Cai Hegao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 314~318

程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 314~318