

文章编号 1004-924X(2009)04-0849-05

# 太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵的标定

魏新国,张广军,樊巧云,江 洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

**摘要:**提出一种太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵的标定方法。该方法首先利用太阳模拟器和两轴转台对太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系进行标定;然后,利用光阑接受屏和 CCD 图像瞄准定位系统,对立方镜坐标系和转台坐标系进行标定;最后,以转台坐标系作为中间坐标系计算出所述两坐标系的转换矩阵,从而将太阳敏感器测量的太阳视线方向间接转换到立方镜坐标系。实验结果表明,两坐标系转换矩阵的标定精度优于  $4''(1\sigma)$ ,满足太阳敏感器测量精度要求。该方法不需要精准的加工和安装工艺,同时对两坐标系转换矩阵的标定也不需要太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系保持一致,易于实现,具有实用价值。

**关键词:**太阳敏感器;立方镜;转换矩阵;标定

**中图分类号:**V448.222 **文献标识码:**A

## Calibration of transform matrix between sun sensor measurement and cubic prism coordinate systems

WEI Xin-guo, ZHANG Guang-jun, FAN Qiao-yun, JIANG Jie

(School of Instrument Science and Photoelectric Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A method to calibrate the transform matrix between the sun sensor coordinate system and the cubic prism coordinate system was proposed. Firstly, the sun sensor coordinate system and a 2D rotator coordinate system were calibrated with a sun simulator and a high-accuracy 2D rotator. Then, the cubic prism coordinate system and the 2D rotator coordinate system were calibrated with a diaphragm screen and a CCD image-collimate system. Finally, the transform matrix between the sun sensor coordinate system and the cubic prism coordinate system was derived by taking the 2D rotator as a medial coordinate system. Thereby, the sun vector measured by the sun sensor was indirectly transferred to the cubic prism coordinate system. Experiment results show that the calibration precision is better than  $4''(1\sigma)$ , which can meet the requirement of sun sensor measurements. Proposed method can relax the demands for precise machining and installation, and the sun sensor and 2D rotator coordinate systems shouldn't be in coincidence when calibration. It shows that the method is easy to carry out and worth to use.

**Key words:** sun sensor; cubic prism; transform matrix; calibration

收稿日期:2008-07-10;修订日期:2008-08-07.

基金项目:民用航天预研项目

## 1 引言

太阳敏感器是测量太阳视线与卫星等航天器某一体轴或坐标平面之间夹角的一种姿态敏感器,是卫星、航天器等重要的姿态测量部件。太阳敏感器直接测量到的太阳视线是在太阳敏感器测量坐标系下定义的,为了在实际使用中能够将直接测量到的太阳视线转换到航天器等运动载体坐标系上,需要将直接测量的太阳视线首先转换到太阳敏感器机壳上的立方镜可观测坐标系<sup>[1-2]</sup>上。现有的方法是靠精准的加工和安装工艺,使太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系保持一致来实现直接转换的。本论文提出了一种通过对太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系转换矩阵进行标定,间接实现转换的方法。类似的方法有利用平行光管、经纬仪和 2 轴转台对测绘相机测量坐标系与立方镜坐标系进行标定实现的间接转换<sup>[3]</sup>,其标定中要求测量坐标系与转台坐标系保持一致。由于太阳敏感器的测量坐标系不可见,所以难以实现其与转台坐标系保持一致。本文提出的方法不需要精准的加工和安装工艺,对两坐标系转换矩阵的标定也不需要太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系保持一致,因此易于实现,具有实用价值。

## 2 坐标系定义

定义太阳敏感器测量坐标系  $S_{\text{sun}}$  以图像传感器成像面的行列分别为  $X''$ 、 $Y''$  轴,成像面的像素原点为坐标原点。两轴转台坐标系  $S_{\text{rot}}$  分别以外框和内框转轴为  $X'$ 、 $Y'$  轴,两转轴交点为坐标原点。立方镜坐标系  $S_{\text{pm}}$  以立方镜的一个角点为坐标原点,过原点的 3 个反射面分别为  $XY$ 、 $XZ$ 、 $YZ$  面,3 个坐标系同为右手系。

## 3 标定装置

图 1 是标定装置示意图,其由高精度两轴转台、太阳模拟器、光阑接收屏、CCD 图像瞄准定位系统、处理计算机和大理石平台组成。转台角位置精度为内框  $\pm 0.4''$ 、外框  $\pm 0.3''$ 。太阳模拟器

高准直太阳模拟器。利用太阳模拟器和高精度两轴转台,完成太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系关系的标定。在此基础上,利用光阑接受屏和 CCD 图像瞄准定位系统,完成转台坐标系与立方镜坐标系关系的标定。最后,以转台坐标系为中间坐标系计算出太阳敏感器测量坐标系与立方镜坐标系之间的转换矩阵。

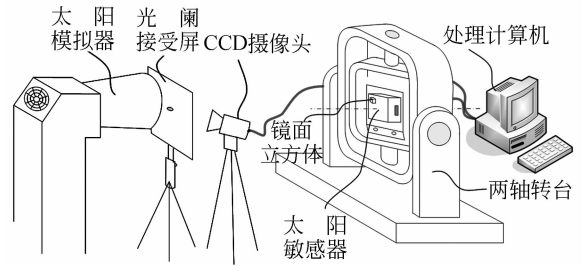


图 1 标定装置示意图

Fig. 1 Sketch of calibration set-up

## 4 标定方法

具体标定步骤如下。

步骤 1: 将太阳敏感器安装在高精度两轴转台内框上,使太阳模拟光线通过太阳敏感器的光学系统照射在其图像传感器上。转动转台到不同位置获取标定点数据,依据标定点数据完成太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系转换矩阵  $R_{\text{sr}}$  的标定,具体标定方法见本课题组公布的专利<sup>[4]</sup>。

步骤 2: 保持上述标定装置固定不动,将光阑接收屏固定在摄像机三角架上,并架设在太阳模拟器正前方约 2 cm 处,其上设置有直径为 2.5 mm 的光阑孔。应用中由于光学立方镜安装在太阳敏感器的背面,所以首先将转台外框旋转到零位,将内框旋转  $180^\circ$ ,使太阳模拟光线经光阑孔照射到立方镜的  $XY$  反射面上。利用 CCD 图像瞄准定位系统的摄像头,拍摄光阑接受屏上的光阑孔和反射光斑,由图像处理软件判断两者是否同心,依此来判断太阳模拟光线是否与该反射面法向重合,如果不同心,微调转台,使两者同心时记录转台绕  $X'$ 、 $Y'$  轴旋转的角度  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 。

步骤 3: 重新将外框旋转到零位,将内框旋转  $90^\circ$ ,使太阳模拟光线经光阑孔照射到立方镜的  $YZ$  反射面。重复步骤 2,记录太阳模拟光线与立方镜  $YZ$  反射面法向重合时,转台绕  $X'$ 、 $Y'$  轴旋

转的角度  $\theta_3, \theta_4$ 。

步骤 4: 依据  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ , 采用双矢量定姿方法计算出转台坐标系到立方镜坐标系的转换矩阵  $\mathbf{R}_{pr}$ 。

以上述两反射面法线方向作为观测矢量, 定义其在立方镜坐标系下的方向矢量为  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ , 在转台坐标系下的方向矢量为  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 。以这两个观测矢量建立参考坐标系  $S_m$ ,  $S_m$  在立方镜坐标系  $S_{prm}$  下的正交基为:

$$\mathbf{a} = \mathbf{n}_1, \mathbf{b} = \frac{\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2}{|\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2|}, \mathbf{c} = \mathbf{a} \times \mathbf{b}, \quad (1)$$

则  $S_m$  到  $S_{prm}$  的转换矩阵  $\mathbf{R}_{pm}$  为:

$$\mathbf{R}_{pm} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^T \\ \mathbf{b}^T \\ \mathbf{c}^T \end{pmatrix}. \quad (2)$$

同理,  $S_m$  在  $S_{rot}$  坐标系下的正交坐标基为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{r}_1, \mathbf{B} = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|}, \mathbf{C} = \mathbf{A} \times \mathbf{B}, \quad (3)$$

$S_m$  到  $S_{rot}$  的转换矩阵  $\mathbf{R}_{rm}$  为:

$$\mathbf{R}_{rm} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}^T \\ \mathbf{B}^T \\ \mathbf{C}^T \end{pmatrix}. \quad (4)$$

由上可知, 转台坐标系  $S_{rot}$  到立方镜坐标系  $S_{prm}$  的转换矩阵  $\mathbf{R}_{pr}$  为:

$$\mathbf{R}_{pr} = \mathbf{R}_{pm} \times \mathbf{R}_{rm}^{-1}, \quad (5)$$

由步骤 2、3 可知:

$$\mathbf{n}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \mathbf{n}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{r}_1 = \mathbf{Rot}(Y', \theta_2)^{-1} \times \mathbf{Rot}(X' \times \theta_1)^{-1} \times \mathbf{n}_1, \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{Rot}(Y', \theta_4)^{-1} \times \mathbf{Rot}(X' \times \theta_3)^{-1} \times \mathbf{n}_2, \quad (8)$$

其中,  $\mathbf{Rot}(X', \theta_1), \mathbf{Rot}(Y', \theta_2), \mathbf{Rot}(X', \theta_3), \mathbf{Rot}(Y', \theta_4)$  分别是步骤 2、3 中转台绕  $X', Y'$  轴旋转  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  所对应的旋转矩阵。转台绕  $X', Y'$  轴旋转  $\theta$  所对应的旋转矩阵表达式如下:

$$\mathbf{Rot}(X', \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{Rot}(Y', \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (10)$$

将表达式(9)和(10)代入方程(7)和(8), 按照上述转换公式求出转台坐标系  $S_{rot}$  到立方镜

坐标系  $S_{prm}$  的转换矩阵  $\mathbf{R}_{pr}$ ;

步骤 5: 将步骤 1 和步骤 4 中得到的  $\mathbf{R}_{rs}$  和  $\mathbf{R}_{pr}$  代入下式, 计算出立方镜坐标系到太阳敏感器坐标系的转换矩阵  $\mathbf{R}_{sp}$  为:

$$\mathbf{R}_{sp} = \mathbf{R}_{rs}^{-1} \times \mathbf{R}_{pr}. \quad (11)$$

这样, 太阳敏感器坐标系下直接测量得到太阳光线矢量  $\mathbf{v}$ , 转换到立方镜坐标系下的矢量方向  $\mathbf{v}_{prm}$  就为:

$$\mathbf{v}_{prm} = \mathbf{R}_{sp} \times \mathbf{v}. \quad (12)$$

## 5 实验结果及精度分析

图 2~图 4 为 CCD 图像瞄准定位系统摄像头实际所拍摄的光阑孔(图2)和反射光斑(图3)



图 2 拍摄的光阑孔

Fig. 2 Captured image of diaphragm

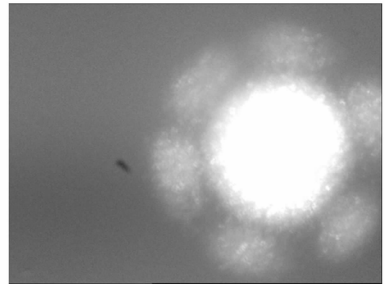


图 3 反射光斑图像

Fig. 3 Reflected facula

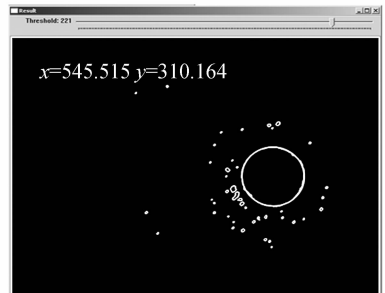


图 4 中心拟合结果

Fig. 4 Calculated center result

图像,以及图像处理软件对反射光斑中心拟合的结果(图 4),同样的方法可以拟合光阑孔的中心<sup>[6]</sup>。由于反射的光斑光强和光阑孔出射光光强基本一样,不好同时拟合两者的中心,所以,在实际操作中首先遮挡掉反射光斑,拟合出光阑孔的中心,然后保持位置不变,使反射光斑反射在光阑接受屏上,再拟合出反射光斑的中心位置,依据拟合结果判断两者是否同心。表 1 是使太阳模拟光线分别与立方镜 XY、YZ 反射面法向重合时,转台分别绕两轴转过的角度值。

从表 1 可以看到,转台内框和外框分别旋转(181.398°,0.528°)和(91.386°,−0.048°)时,光

阑孔和反射光斑中心偏差<1 pixel。

由于光阑孔距太阳敏感器的距离约为 65 cm,应用的图像传感器像元尺寸为 15 μm×15 μm,所以 1 pixel 引起的立方镜反射面法向与入射光线之间的角度误差 σ<sub>1</sub> 应为:

$$\sigma_1 = \arctan(15/65000)/2 \approx 2.34'' \quad (13)$$

转台垂直度误差 σ<sub>2</sub> 为 ±2'', CCD 图像定位瞄准系统中摄像头安装引起的误差 σ<sub>3</sub> 约为 ±2'', 转台的测角误差 σ<sub>4</sub> 为 ±0.4'', 所以最终的标定误差 σ<sup>[7]</sup> 约为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = 3.69'' \quad (14)$$

表 1 转台绕两轴旋转角度

Tab. 1 Angle rotated around X' and Y' axes of rotator

	θ <sub>1</sub> (°)	θ <sub>2</sub> (°)	光阑孔和反射光斑中心偏差		θ <sub>3</sub> (°)	θ <sub>4</sub> (°)	光阑孔和反射光斑中心偏差	
			x 偏差(pixel)	y 偏差(pixel)			x 偏差(pixel)	y 偏差(pixel)
XY 面	181.400 0	0.550 0	4.912	19.429	91.400 0	−0.070 0	12.575	20.226
	181.390 0	0.540 0	5.282	12.243	91.380 0	−0.050 0	11.729	2.557
	181.390 0	0.532 0	6.307	5.181	91.385 0	−0.050 0	1.326	1.323
	181.395 0	0.531 0	2.385	3.558	91.386 0	−0.050 0	0.857	1.897
	181.398 0	0.530 0	0.034	2.404	91.386 0	−0.048 0	0.320	0.442
	181.398 0	0.528 0	0.057	0.771				
	181.398 0	0.528 0	0.057	0.771				

## 6 结 论

本论文提出一种利用太阳模拟器、两轴转台、光阑接受屏和 CCD 图像瞄准定位系统对太阳敏感器测量坐标系和立方镜坐标系转换矩阵标定,从而将测量的太阳视线间接转换到立方镜坐

标系的方法。转换矩阵的标定不需要太阳敏感器测量坐标系与转台坐标系保持一致,易于实现,标定精度优于 4''(1σ)。该方法已成功应用于太阳敏感器飞行正样产品,实验数据为产品验收时的现场测试数据。该方法对其它天体敏感器测量坐标系与立方镜坐标系的标定,具有很好的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 朱鸿泰. 高精度太阳敏感器的发展[J]. 红外, 2003(12):1-6.  
ZHU H T. Development of high accuracy sun sensor [J]. *Infrared*, 2003(12):1-6. (in Chinese)
- [2] MALCOIM D. A survey of attitude representation [J]. *Journal of Astronautics Science*, 1993, 41(4):493-517.
- [3] 吴国栋, 宋丹. 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11):1727-1730.

- WU G D, SONG D. Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1727-1730. (in Chinese)
- [4] 张广军, 郝雪涛, 江洁, 等. 一种星敏感器内外方元素校准方法[P]. 专利, 专利号:200510112553.7.  
ZHANG G J, HAO X T, JIANG J, et al.. Calibration for inner and outer parameter of star sensor [P]. *Patent Number*: 200510112553.7. (in Chinese)
- [5] CARL C L, SOHRAB M. MEMS based sun sensor [C]. *IEEE Proceedings of Aerospace Conference*, 2001(3):1565-1572.

[6] 季成年,王仲,陈明舟. 摄像机标定圆心亚像素自动定位算法的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2002(增):1077-1081.

JI CH N, WANG ZH, CHEN M ZH. Research on automatic algorithm for center of circle location in camera calibration [J]. *Basic Automation*, 2002 (Supp.):1077-1081. (in Chinese)

[7] 吴晓波,安问斗,杨钢. 图像测量系统中的误差分析即提高测量精度的途径[J]. 光学精密工程,1997,5(1):133-141.

WU X B, AN W D, YANG G. Error analyzing and approaches of improving measuring precision in image measuring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997,5(1):133-141. (in Chinese)

#### 作者简介:



魏新国(1977—),男,湖北随州人,讲师,2004年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事光电测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: wxg@buaa.edu.cn



樊巧云(1978—),女,山西黎城人,讲师,2008年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事图像处理、光电测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: fqy2003@aspe.buaa.edu.cn



张广军(1965—),男,天津人,长江学者,教授,博士生导师,1991年于天津大学获博士学位,主要从事机器视觉、光电精密测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: gjzhang@buaa.edu.cn



江洁(1973—),女,福建古田人,教授,2000年于天津大学获博士学位,主要从事光电测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。E-mail: jiangjie@buaa.edu.cn

(本栏目编辑:李树军)

#### ●下期预告

## 线结构光条纹中心全分辨率精确提取方法

熊会元,宗志坚,陈承鹤

(中山大学 工学院 现代设计技术中心,广州广东 510275)

激光条纹中心的提取是线结构光坐标测量系统的关键技术之一,本文对条纹中心的高分辨率精确提取进行了研究。首先,基于阈值法全分辨率提取条纹初值中心。然后,在条纹初值中心域应用灰度梯度与 Bazen 方法计算光条纹法向,最后在法线方向精确获取光条纹能量中心。采用分辨率为  $768 \times 576$  相机 V 形检测块对比实验表明,提取的中心点分辨率为 1086 点,比传统方法增加 42.5% 有效点,且无冗余点,中心点到由中心点拟合直线的平均距离最小,分别为 0.294 与 0.3067 像素,条纹法向计算精确,计算时间为 75.8 ms。方法避免了被测体表面曲率变化大提取中心密度小的问题,提取的精度与鲁棒性高,满足在线精确测量。