

文章编号 1004-924X(2007)11-1727-04

# 测绘相机坐标系与立方镜转换矩阵的标定

吴国栋<sup>1</sup>, 宋丹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了一种测绘相机坐标系与立方镜之间关系的标定方法。对两坐标系的转换矩阵、标定方法和标定精度进行研究。推导了两坐标系的关系,建立了坐标系间的转换矩阵。利用高精度二维转台、0.5"经纬仪和平行光管完成了测绘相机与相机立方镜坐标系之间的角度测量。最后,对标定精度进行了分析。误差分析结果表明:该方法的标定精度优于 $2''$ ( $1\sigma$ ),可以满足测绘相机坐标系与立方镜转换关系的标定要求,具有实用价值。

**关键词:**测绘相机;立方镜;转换矩阵;标定

**中图分类号:**V447.3;TH703 **文献标识码:**A

## Calibration of mapping camera and cubic prism coordinate system

WU Guo-dong<sup>1</sup>, SONG Dan<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A method for calibrating mapping camera and cubic prism coordinate system was introduced. The transformation matrix, calibration method and precision of the coordinate system were investigated. The relation of coordinate system was calculated, and the transformation matrix for coordinate system was established. Then, the angles between the mapping camera and the cubic prism coordinate system were tested by combining of high-accuracy 2D turntable, 0.5" theodolite and autocollimation telescope. Finally, the calibration precision was analyzed. The error analysis indicates that the precision is smaller than  $2''(1\sigma)$ , which shows that the method can meet the requirements of calibrating mapping camera and cubic prism coordinate system and is valuable for practical application.

**Key words:** mapping camera; cubic prism; transformation matrix; calibration

## 1 引言

航天摄影测量是伴随空间技术、摄影技术、图像数字传输、图像处理 and 电子计算机技术的发展而产生的一种新技术。它是有人造地球卫星、宇

宙飞船和航天飞机等飞行器作为运载工具,用各种传感器在轨道空间对地球表面进行遥感,根据获取的信息进行判读和信息处理,以测制或修测地图,在军事方面则用于对地面目标点位的确定和动态地图的编制<sup>[1]</sup>。

传输型摄影测量业务卫星利用测绘相机进行

摄影测量时,需要知道测绘相机在惯性坐标系中的姿态<sup>[2-4]</sup>。该姿态的确定,首先要通过星敏传感器测量得到星敏测量坐标系在惯性坐标系中的姿态,然后通过星敏测量坐标系与自身立方镜的关系转换矩阵、星敏立方镜与测绘相机立方镜的安装矩阵以及测绘相机立方镜与测绘相机坐标系的转换矩阵,最后求得测绘相机坐标系在惯性坐标系中的姿态。其中测绘相机立方镜与测绘相机坐标系的转换矩阵的标定是测绘相机研制任务中必不可少的环节。本文主要论述测绘相机立方镜与测绘相机测量坐标系的转换矩阵的标定方法。

## 2 坐标系的定义

### 2.1 测绘相机测量坐标系 ( $X_{\text{camera}} Y_{\text{camera}} Z_{\text{camera}}$ )

坐标原点在测绘相机 CCD 阵的中心,三轴与卫星坐标系三轴平行。测绘相机坐标系如图 1 所示。

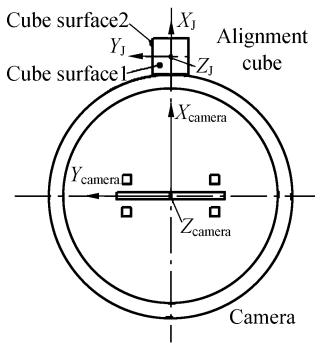


图 1 测绘相机坐标系

Fig. 1 Coordinate of mapping camera

### 2.2 测绘相机立方镜坐标系 ( $X_J Y_J Z_J$ )

坐标原点在立方镜的中心,三轴与测绘相机测量坐标系的三轴平行。

## 3 测绘相机测量坐标系与立方镜坐标系的转换矩阵

理论上,测绘相机测量坐标系与立方镜坐标

系是重合的,但装调过程中很难保证,这就要求高精度地标定出两坐标系的关系。两坐标系关系有多种表示方法<sup>[5-6]</sup>,主要有方向余弦式、欧拉转角式、罗德里格斯参数式、凯莱-克莱因参数式等,常用的是前三种。本方案采用第二种方法描述测绘相机立方镜坐标系与测绘相机测量坐标系间的转换矩阵。

两个坐标系的关系如图 2 所示:

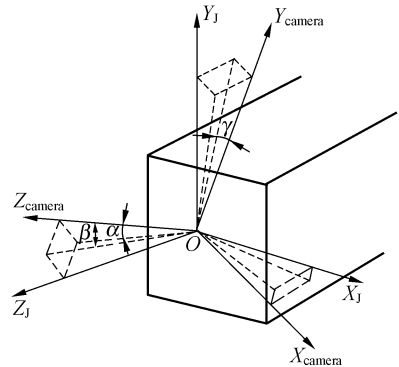


图 2 测绘相机坐标系与立方镜坐标系关系图

Fig. 2 Relationship of mapping camera and cubic prism coordinate

其中  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的定义如图 2 所示, $\alpha$  是  $Z_J$  轴在  $X_{\text{camera}} O Z_{\text{camera}}$  面投影与  $Z_{\text{camera}}$  轴间的夹角; $\beta$  是  $Z_J$  轴在  $Y_{\text{camera}} O Z_{\text{camera}}$  面投影与  $Z_{\text{camera}}$  轴间的夹角; $\gamma$  是  $Y_J$  轴在  $X_{\text{camera}} O Y_{\text{camera}}$  面投影与  $Y_{\text{camera}}$  轴间的夹角。

对应  $X_{\text{camera}}$ 、 $Y_{\text{camera}}$  和  $Z_{\text{camera}}$  旋转轴的主旋转矩阵  $C_X(\beta)$ 、 $C_Y(\alpha)$ 、 $C_Z(\gamma)$ 。

$$C_X(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$C_Y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$C_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

按照 3-1-2(ZXY)顺序旋转得到立方镜坐标系相对于测绘相机坐标系的转换矩阵  $C$ :

$$C = C_Y C_X C_Z = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \sin \gamma + \sin \beta \sin \alpha \cos \gamma & -\cos \beta \sin \alpha \\ -\cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma + \sin \beta \cos \alpha \sin \gamma & \sin \beta \sin \gamma - \sin \beta \cos \alpha \cos \gamma & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (4)$$

### 4 测试方案

标定相机立方镜与测绘相机测量坐标系关系利用大口径平行光管、0.5"经纬仪与精密二维转台组合测量来实现,整个测试系统安放在气浮平台上。

#### 4.1 标定过程

将转台与光管调整好,使光管水平,转台竖直轴垂直,水平轴水平并垂直于光管光轴,使相机测量坐标系与转台光管转台构成的直角坐标系一致。标定过程如图 3~5 所示:

第一步,将 0.5"经纬仪与立方镜+Y 面自准,测得  $\gamma$ ;

第二步,高低转动二维转台使光管与立方镜+Z 面高低方向自准,测得  $\alpha$ ;

第三步,方位转动二维转台使光管与立方镜+Z 面方位方向自准,测得  $\beta$ 。

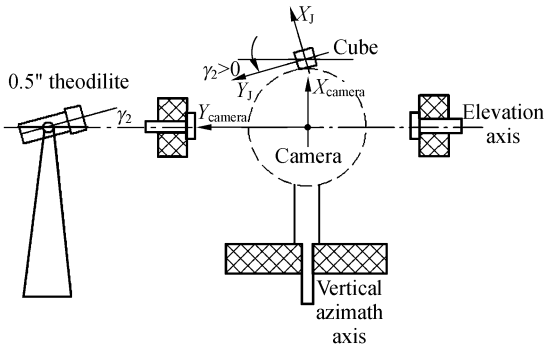


图 3  $\gamma$  角测量示意图

Fig. 3 Chart of measuring angle  $\gamma$

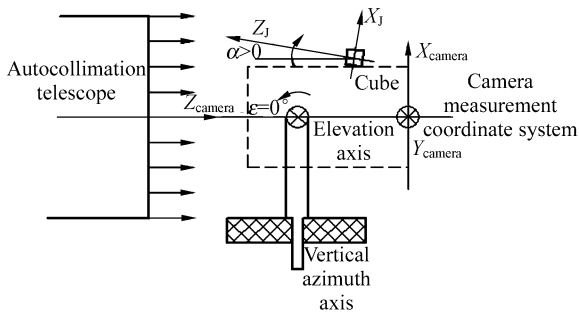


图 4  $\alpha$  角测量示意图

Fig. 4 Chart of measuring angle  $\alpha$

标定出立方镜坐标轴在测绘相机坐标系的投影角  $\alpha, \beta, \gamma$ , 利用公式(4)就可以得到相机立方镜相对于测绘相机测量坐标系的转换矩阵, 矩阵  $C$

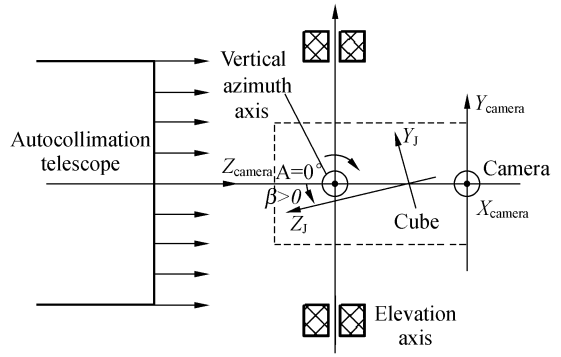


图 5  $\beta$  角测量示意图

Fig. 5 Chart of measuring angle  $\beta$

的逆矩阵  $C^{-1}$  即为测绘相机测量坐标系相对于相机立方镜的转换矩阵。即:

$$\begin{bmatrix} X_{camera} \\ Y_{camera} \\ Z_{camera} \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} X_J \\ Y_J \\ Z_J \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 4.2 标定方法的误差分析

误差分析方法有很多<sup>[7]</sup>, 下面利用微分法对标定误差进行分析。主要的误差源如下。

测试过程中,  $\gamma$  角的测量误差主要由二维转台的调平误差、经纬仪的调平误差、相机的安装误差和经纬仪自准直测量误差组成;  $\alpha, \beta$  角的测量误差主要由二维转台的调平误差、光管的调平误差、相机的安装误差、转台的测角误差和光管自准直测量误差组成。

(a)  $\gamma$  角的测量误差

(1) 二维转台的调平误差  $\sigma_{\gamma_1} = 0.5''$

(2) 经纬仪的调平误差  $\sigma_{\gamma_2} = 0.7''$

(3) 相机的安装误差  $\sigma_{\gamma_3} = 1''$

(4) 经纬仪自准直测量误差  $\sigma_{\gamma_4} = 1''$

$$\sigma_{\gamma} = \sqrt{\sigma_{\gamma_1}^2 + \sigma_{\gamma_2}^2 + \sigma_{\gamma_3}^2 + \sigma_{\gamma_4}^2} = 1.65''$$

(b)  $\alpha, \beta$  角的测量误差

(1) 二维转台的调平误差  $\sigma_1 = 0.5''$

(2) 光管的调平误差  $\sigma_2 = 1''$

(3) 相机的安装误差  $\sigma_3 = 1''$

(4) 二维转台的测角误差  $\sigma_4 = 0.5''$

(5) 光管自准直测量误差  $\sigma_5 = 0.5''$

$$\sigma_{\alpha\beta} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2} = 1.66''$$

另外, 在标定中要对温度、湿度、振动和气流等环境因素进行控制, 可采取建立恒温室、气浮隔振平台等措施。温度应控制在  $(18 \pm 1.5)^\circ\text{C}$ , 4 h

温度变化 $<0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;湿度在 $40\%\sim 65\%$ ;气浮平台系统台座顶面在 $2\sim 100\text{ Hz}$ 频段内任一频率点的振动速度幅值 $V_{\text{rms}}\leq 0.01\text{ mm/s}$ ;洁净度 10 万级;避免环境影响。

此方案的角度标定精度优于 $2''(1\sigma)$ 。

## 5 结 论

测绘相机测量坐标系与相机立方镜之间的

转换矩阵的标定是获得测绘相机在惯性坐标系中姿态必不可缺少的环节,该转换矩阵的标定需要在相机研制完成后使用前在地面完成,本论文提出的标定方案可以在实验室完成,标定精度优于 $2''(1\sigma)$ 。该方案同样可以应用在星敏感器研制中对星敏感器和星敏立方镜关系的标定,还可以用于测量坐标系与立方镜之间的稳定性标定。

## 参考文献:

- [1] 陈元枝. 基于星敏感器的卫星三轴姿态测量方法研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2000.  
CHEN Y ZH. *Method for testing satellitic axes attitude based on star tracker*[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- [2] 王涛, 冯展军, 尤太华, 等. 基于星敏感器的飞行器姿态确定方法[J]. 导航与控制, 2005, 4(1): 15-16.  
WANG T, FENG ZH J, YOU T H, *et al.*. Attitude determination of aircraft based on star sensor[J]. *Navigation and Control*, 2005, 4(1): 15-16. (in Chinese)
- [3] 邓红, 陈浩明, 刘光斌. 基于星敏感器的导弹姿态矩阵线性化解算方法[J]. 战术导弹控制技术, 2006, 55(4): 83-84.  
DENG H, CHEN H M, LIU G B. Solution of linearizing missile attitude matrix based on star trackers[J]. *Tactic Missile Control Technology*, 2006, 55(4): 83-84. (in Chinese)
- [4] 陈东祥, 王多, 王金敏. 利用“球面三角”建立三维图形旋转变换参数间的关系[J]. 工程图学学报, 2001, 4(4): 97-99.  
CHEN D X, WANG D, WANG J M. Applying spherical trigonometry method to establish the interconversion between 3D rotation transformation parameters[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2001, 4(4): 97-99. (in Chinese)
- [5] MALCOIM D. A survey of attitude representation[J]. *Journal of Astronautical Science*, 1993, 41(4): 493-517.
- [6] 朱长征. 基于星敏感器的星模式识别算法及空间飞行器姿态确定技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2004.  
ZHU CH ZH. *Research of star pattern recognition algorithms based on star trackers and attitude determination of aircraft*[D]. Graduate University of National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [7] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.  
WANG J Q. *Total Design of Optic Instrument*[M]. Changchun: Changchun Institute of Optic, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)

**作者简介:** 吴国栋 (1965—), 男, 辽宁阜新, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员, 主要研究方向为光学遥感器像质评价及测绘相机的几何标定技术研究。E-mail: wuguodong586@163.com