

航空相机的像面旋转特性分析

耿文豹^{1,2}, 翟林培¹, 丁亚林¹, 赵秀影^{1,3}

(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; 3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘 要: 航空相机利用 45° 反射镜绕光轴旋转对地物的扫描进行多航迹成像, 45° 反射镜绕光轴旋转时, 物体反射像也将绕光轴进行旋转, 造成像面信息无法配准, 为此必须采取适当的措施来消除像旋转, 保证相机成像质量。从产生像方旋转的原因出发, 基于光学反射成像理论, 通过实例分析, 归纳总结出扫描反射镜、光学成像物镜、折返镜对航空相机像面旋转特性的作用和影响, 给出判断像旋转方向的一般方法, 并以此为补偿像方旋转的理论依据, 提出了一种新型的补偿方法。通过地面试验, 获得了完全消除像旋转的图像信息, 结果表明: 该方法的同步旋转误差造成的最大像移量小于 $1/3$ 像元, 能够获得良好的图像效果而没有模糊, 验证了像方旋转理论的正确性, 及其补偿方法的可行性和实用性。

关键词: 航空相机; 像方旋转; 理论依据; 补偿方法

中图分类号: TN942.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2008)06-1053-05

Characteristic analysis for image rotation of aerial camera

GENG Wen-bao^{1,2}, ZHAI Lin-pei¹, DING Ya-lin¹, ZHAO Xiu-ying^{1,3}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In aerial camera, pictures in multi-track is taken by means of rotating a 45° scanning mirror. When the 45° scanning mirror rotated around the optics axis to scan the earth surface, the reflective image of objects would be rotated by the same axis along with the scanning of the 45° mirror, as the result, information on the focal plane could not be registered. Measures must be taken to eliminate image rotation. In this paper the relation of scanning mirror, optical imaging lens and replication mirror with the image rotation was summarized. A general approach was given to judge the image rotation direction, and one new compensating process was proposed according to compensation theory. Ground experiments show that the obtained pictorial information had been revolved completely. The result shows the largest image motion caused by synchronously rotating error was less than $1/3$ pixel. The image is free from blurring or infection of the imaging rotation. The experiments verify the correctness of the image rotation theory, direction judgment approach and compensation method.

Key words: Aerial camera; Image rotation; Theory basis; Compensation method

收稿日期: 2008-03-03; 修订日期: 2008-04-06

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA701203)

作者简介: 耿文豹(1982-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士生, 主要从事航空相机光机结构设计与研究。Email: gengwenbao@163.cn

导师简介: 翟林培(1945-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光机电信息处理与研究。Email: zxy923101@yahoo.com.cn

0 引言

随着空间遥感技术的发展,遥感仪器向着更高空间、更高分辨率和更大覆盖宽度的方向发展^[1-2]。航空相机普遍利用扫描反射镜的连续或者步进扫描的方法,来扩大航空相机的覆盖宽度,如 KA-112 相机和 KS-146 相机等。但是,当扫描观测角发生变化时,会造成物方反射像的方向发生改变,造成像面旋转,使像面无法配准,影响成像质量^[3-4]。参考文献[5-7]研究了 45° 反射镜的成像特点,但是都不是基于补偿航空相机像面问题出发,像面旋转方向也有较大出入,没有给出判断旋转方向的方法,为了解决像面旋转的问题,有必要从扫描反射镜、光学成像物镜、折返镜等方面研究各自对像面旋转的影响,为补偿方法提供理论依据,并提出合理的机械补偿方法。

1 像旋转的产生原因

所谓扫描反射镜就是在光学镜头前布置一个与光轴成 45° 的反射镜,通常也称为 45° 扫描镜。图 1 为扫描反射镜示意图。图中 A 为入射光线, N 为反射镜的法

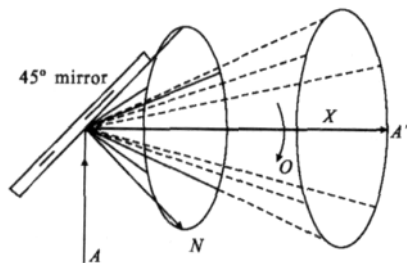


图 1 扫描反射镜示意图

Fig.1 Scanning mirror sketch

$$S_{p\xi} = \begin{bmatrix} \cos\xi + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} & -P_z \sin\xi + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\xi}{2} & P_y \sin\xi + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\xi}{2} \\ P_z \sin\xi + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\xi}{2} & \cos\xi + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} & -P_x \sin\xi + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\xi}{2} \\ -P_y \sin\xi + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\xi}{2} & P_x \sin\xi + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\xi}{2} & \cos\xi + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\xi}{2} \end{bmatrix}$$

ξ 角的正负号由右手法则决定。

图 2 为扫描反射镜摆动成像示意图,图中 α 为入射光矢 A_0 与 XOZ 平面的夹角, φ 为入射光矢 A_0 在 XOZ 平面内的投影直线与 OZ 轴的夹角。建立扫描反射镜的固定坐标系 $X_0 Y_0 Z_0$, X_0 指向沿光轴方向光线入射方向, Z_0 指向垂直指向水平面向下, Y_0 轴由右手法则确定。 $X' Y' Z'$ 为像面坐标系,其指向与坐标系 $X_0 Y_0 Z_0$ 相同。

线, A' 为入射光线 A 的反射光线。当 45° 扫描镜绕 X 轴转过角度 θ 时,法线 N 相应地产生空间转动,其轨迹为一圆锥的母线。由平面镜的反射定理知其发射光线 A' 也会按照一定的规律发生转动,即产生像方旋转。

2 反射镜扫描成像特性分析

为了定量分析 45° 扫描反射镜成像特性需要两个重要公式。

(1) 镜面反射作用的解析表达式^[6,8-9]:

$$A_1 = (E - 2NN^T)A_0 = RA_0 \quad (1)$$

式中: A_0 为入射光线矢量; A_1 为出射光线矢量; N 为反射镜的法线方向的单位矢量。设 $N = [N_x, N_y, N_z]^T$, 代入公式(1), 则有:

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_x N_y & -2N_x N_z \\ -2N_x N_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_y N_z \\ -2N_x N_z & -2N_y N_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵 R 称为光矢量的反射矩阵。

(2) 矢量转动公式^[6-9]:

矢量 B 绕转轴单位矢量 p 转动 ξ 角而成的矢量 B' , 则:

$$B' = S_{p\xi} \cdot B \quad (3)$$

$S_{p\xi}$ 为矢量 B' 绕 p 转动 ξ 度的转动矩阵。设 $P =$

$[P_x \ P_y \ P_z]^T$, 则:

如图 2 所示, 入射光矢 $A_0 = [\cos\alpha \sin\varphi, -\sin\alpha, -\cos\alpha \cos\varphi]^T \times |A_0|$, 扫描反射镜未转动时的法线矢量为 $N_0 = [\sin 45^\circ, 0, \cos 45^\circ]^T$, 代入公式(2), 则有反射镜的反射矩阵 $R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 代入公式(1)得 A_0 的反射光线矢量:

$$A_1 = [\cos\alpha\cos\varphi, -\sin\alpha, -\cos\alpha\sin\varphi]^T |A_0| \quad (4)$$

当扫描反射镜绕 X 轴转过 θ 角, 反射镜视轴同样绕 X 轴转动 θ 角, θ 为锐角, 所以入射光线由 A_0 转变为 A'_0 , 此时, 扫描反射镜的摆扫产生横向像移, 通过探测器的沿时积分功能或专门的装置可以得到补偿^[1,3]。

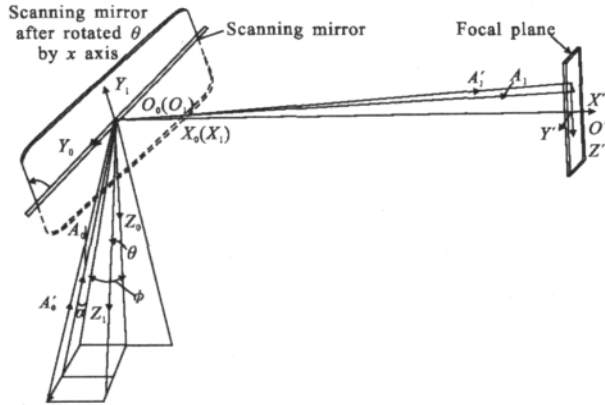


图2 扫描反射镜成像示意图

Fig.2 Imaging sketch of scanning mirror image

扫描反射镜绕 X 轴旋转, 所以 $P = [1 \ 0 \ 0]^T$, $\alpha = \theta$ 代入公式(3)有:

$$A'_0 = S_{X,\theta} A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} A_0 \quad (5)$$

扫描反射镜的法线矢量:

$$N' = S_{X,\theta} N_0 \quad (6)$$

则反射光矢 $A'_1 = (E - 2N'N'^T)A'_0$ 代入公式(5)得:

$$A'_1 = (E - 2(S_{X,\theta} N_0)(S_{X,\theta} N_0)^T) S_{X,\theta} A_0 \quad (7)$$

将 $A_0, N_0, S_{X,\theta}$ 代入公式(7)得:

$$A'_1 = [\cos\alpha\cos\varphi, \sin\theta\cos\alpha\sin\varphi - \cos\theta\sin\alpha, -\cos\theta\cos\alpha\sin\varphi - \sin\theta\sin\alpha]^T |A_0|$$

设 $M \times A_1 = A'_1 \quad (8)$

M 为从 $A_1 \sim A'_1$ 的转换矩阵, 将 A_1, A'_1 代入公式(8), 可得:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} = S_{X,\theta}$$

可以看出, 当扫描反射镜绕 X 轴转过 θ 角后, 扫描反射镜覆盖的地面区域任一点, 经过扫描反射镜所成的像同时绕 X 轴转过 θ 角, 这就是 45° 反射镜扫描成像特性。

3 航空相机的像面旋转特性

航空相机的光学系统一般由扫描反射镜、成像物镜和折反镜组成, 如图3所示。载机飞行方向与相机光轴方向平行, 扫描反射镜绕成像物镜光轴旋转对地物进行扫描, 再通过成像物镜和折反镜, 成像在焦平面上。这里, 反射镜绕 Y_0 轴旋转做前向像移补偿, 对像旋转不会产生影响, 这里不再赘述^[1]。所谓相机的像面旋转特性就是研究地面物体在焦平面上所成的像在扫描反射镜对地摆扫时的运动规律。为了很好地分析各个组成部分对像面旋转的影响, 首先通过实例分析, 进而归纳总结出一般规律。

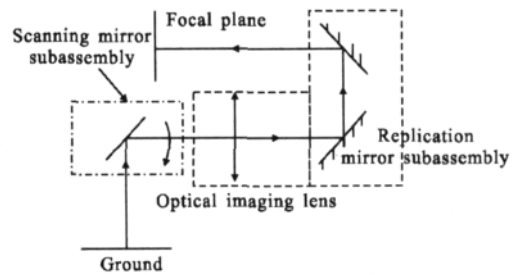


图3 航空相机的组成框图

Fig.3 Block diagram of aerial camera

3.1 应用实例分析

实例1 图4为某航空相机的结构布置方式, 建立如图所示的全局坐标系 XYZ 以及与坐标系 XYZ 指

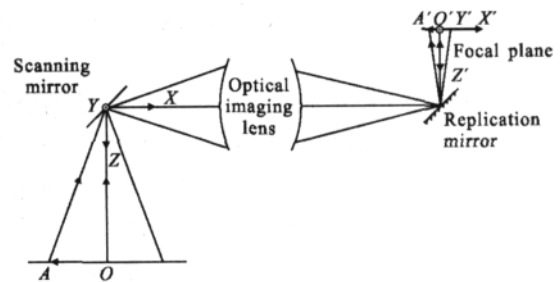


图4 实例1的布置方式

Fig.4 Arrangement of instance 1

向相同的焦面坐标系 $X'Y'Z'$, 研究在扫描反射镜覆盖范围内的任一物矢 OA 在焦面所成的像 $O'A'$ 随扫描反射镜旋转的运动规律。扫描反射镜的单位法线矢量 $N_0 = [\sin 45^\circ, 0, \cos 45^\circ]^T$, 折返镜的单位法线矢量为 $N_1 = [-\sin 45^\circ, 0, -\cos 45^\circ]^T$, 光学系统透射作用矩阵 $T = \rho \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$, ρ 为成像光学组件的缩放倍率, 为一常数。

扫描反射镜在初始位置,没有发生转动时反射镜覆盖范围内地物任一点 V 点的像 V' 在焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标值为:

$$\begin{aligned} [X'_0 \ Y'_0 \ 0]^T &= (E - 2N_1 N_1^T) T \\ (E - 2N_0 N_0^T) [X_0 \ Y_0 \ 0]^T &= \\ \rho [-X_0 \ -Y_0 \ 0]^T & \end{aligned} \quad (9)$$

扫描反射镜绕 X 轴转过 θ 角后,相机视轴同样绕 X 轴旋转了 θ 角,所以地物在坐标系 XYZ 下的坐标值为:

$$[X_1 \ Y_1 \ 0]^T = S_{X,\theta} \times [X_0 \ Y_0 \ 0]^T \quad (10)$$

扫描反射镜覆盖内任一点 V 点的像 V' 在焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标值为:

$$\begin{aligned} [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T &= (E - 2N_1 N_1^T) T \\ (E - 2N_0 N_0^T) [X_1 \ Y_1 \ 0]^T & \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $N'_0 = S_{X,\theta} N_0$, 将 $S_{X,\theta}$ 和公式(10)代入公式(11),可得:

$$\begin{aligned} [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T &= \\ \rho [-X_0 \cos\theta + Y_0 \sin\theta \ -X_0 \sin\theta - Y_0 \cos\theta \ 0]^T & \end{aligned} \quad (12)$$

对比公式(9)和公式(12),设

$$M \times [X'_0 \ Y'_0 \ 0]^T = [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T \quad (13)$$

M 为从 $OA \sim O'A'$ 的转换矩阵,将公式(9)和公式(12)代入公式(13),可得:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = S_{Z',\theta}$$

即航空相机在图 4 所示的布置方式下,扫描反射镜绕全局坐标系 XYZ 的 X 轴旋转 θ 角时,造成物像绕焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 的 Z' 轴旋转 θ 角。这种情况下焦平面探测器绕 Z' 相应旋转 θ 角,即可将像方旋转补偿。

实例 2 相机结构布置方式如图 5 所示,建立和实例 1 相同的坐标系。

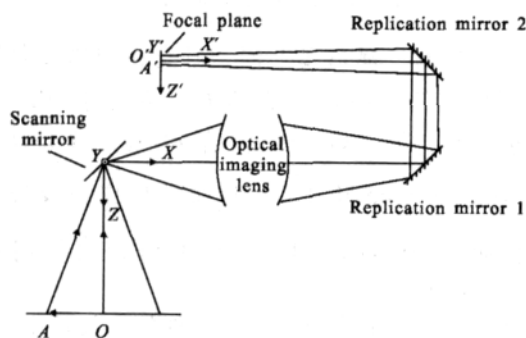


图 5 实例 2 的布置方式
Fig.5 Arrangement of instance 2

扫描反射镜的单位法线矢量 N_0 、折返镜 1 的单位法线矢量为 N_1 、光学系统透射作用矩阵 T 与实例 1 相同,折返镜 2 的单位法线矢量 $N_2 = [-\sin 45^\circ, 0, -\cos 45^\circ]^T$,则有扫描反射镜在初始位置,没有发生转动时扫描反射镜覆盖范围内地物任一点 V 点的像 V' 在焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标值为:

$$\begin{aligned} [X'_0 \ Y'_0 \ 0]^T &= (E - 2N_2 N_2^T) (E - 2N_1 N_1^T) \times \\ T (E - 2N_0 N_0^T) [X_0 \ Y_0 \ 0]^T &= \\ \rho [0 \ -Y_0 \ -X_0]^T & \end{aligned} \quad (14)$$

扫描反射镜绕 X 轴转过 θ 后,扫描反射镜覆盖范围内地物任一点 V 点的像 V' 在焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 中的坐标值为:

$$\begin{aligned} [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T &= (E - 2N_2 N_2^T) (E - 2N_1 N_1^T) \times \\ T (E - 2N'_0 N_0^T) [X_1 \ Y_1 \ 0]^T & \end{aligned} \quad (15)$$

将 $S_{X,\theta}$ 公式(10)代入公式(15),可得:

$$\begin{aligned} [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T &= \\ \rho [0 \ -X_0 \sin\theta - Y_0 \cos\theta \ -X_0 \cos\theta + Y_0 \sin\theta]^T & \end{aligned} \quad (16)$$

对比公式(14)和公式(16),设

$$M \times [X'_0 \ Y'_0 \ 0]^T = [X'_1 \ Y'_1 \ 0]^T \quad (17)$$

M 为从 $OA \sim O'A'$ 的转换矩阵,将公式(9)和(12)代入公式(17),可得:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} = S_{X',-\theta}$$

即航空相机在图 4 所示的布置方式下,扫描反射镜绕全局坐标系 XYZ 的 X 轴旋转 θ 角时,造成物像绕焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 的 X' 轴旋转 $-\theta$ 角。将焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 反向建立,则像方绕 $X'Y'Z'$ 的 X' 轴随扫描反射镜同步旋转 θ 角。这种情况下焦平面探测器绕 Z' 相应旋转 θ 角,即可将像方旋转补偿。

3.2 航空相机像面旋转特性的一般规律

通过上述实例分析,可知像面旋转是由扫描反射镜绕 X 轴的对地摆扫造成的,扫描反射镜的对地扫描会造成反射像旋转,这一旋转是相对于扫描反射镜旋转的同时、同方向、同角度的同步旋转;相机的光学成像物镜对像面旋转没有任何影响;折返镜的布置方式一方面会改变相机的焦面布置,进而改变像方旋转的旋转轴线,另一方面还会改变像方旋转相对于扫描反

射镜的旋转方向。具体确定像方旋转方向规则为:在扫描反射镜(相机上)建立全局坐标系 XYZ , X 指向沿光轴方向的光线入射方向, Z 轴指向星下点, Y 轴按右手规则确定; 在焦面中心处建立焦面坐标系 $X'Y'Z'$, 在光学系统偶数次折返的情况下 $X'Y'Z'$ 与 XYZ 指向相同, 在光学系统奇数次折返的情况下 $X'Y'Z'$ 与 XYZ 指向相反; 则扫描反射镜绕 X 正向旋转时, 像方在焦面坐标系 $X'Y'Z'$ 绕垂直与焦平面的轴正方向旋转, 正方向按右手规则确定, 反之亦然。

4 像方旋转的补偿及其试验

消除像方旋转的具体方法有: 加 K 镜、道威棱镜、别汉棱镜等; 还有专门的像旋转器。共同之处是: 使像与探测器不发生相对转动^[5-6,8-9]。为了验证上述像方旋转特性的正确性, 设计了探测器与扫描机构同步转动机构, 如图 6 所示。照相时, 在扫描机构作扫描运动的同时, 探测器也随之同步旋转^[9], 图中 1 与相机探测器连接, 且其转动中心与探测器转动中心严格重合, 2 为传动皮带, 4 与相机扫描反射镜相连, 且转动中心与扫描反射镜严格重合, 3 为压紧轮, 避免皮带打滑, 保证扫描反射镜与相机探测器同步转动。

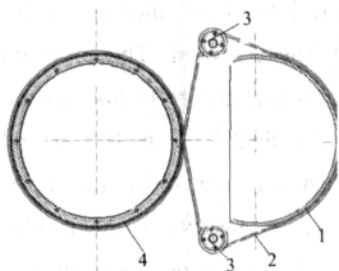


图 6 同步旋转机构示意图
Fig.6 Sketch of in-step rotary mechanism

通过地面试验, 获得了清晰的图片, 如图 7 所示, 可以看出在图片中的黑线处很好地实现了像面配准, 并取得了良好的成像效果, 说明像方旋转特性的正确

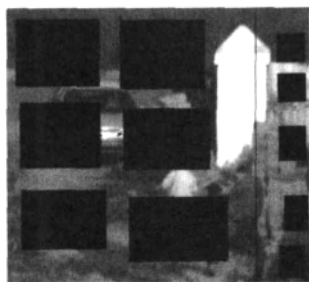


图 7 地面试验图片
Fig.7 Picture of ground experiment

性, 同时也提出一种新的消除像旋转的方法, 即像面探测器与像同步旋转。通过样机试验, 取得良好的成像效果, 而且不会增加系统的结构和体积。

5 结 论

从像旋转问题入手, 分析了产生像面旋转的原因, 并通过具体实例分析了航空相机像面旋转的特性, 总结出了确定航空相机像方旋转方向的方法, 得出结论:

- (1) 扫描反射镜的对地扫描是造成像方旋转的原因, 相机的光学成像物镜对像方旋转没有影响;
- (2) 像方旋转与扫描反射镜的旋转同时、同步、同角度, 旋转方向与折返镜的布置方式有关;
- (3) 试验验证了像方旋转特性的正确性, 并提出用像面探测器与像同步旋转的方法来消除像面旋转。

参考文献:

- [1] XU Zhi-hai, CHEN Yue-ting, WANG Qi, et al. Image tremble compensation for space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 593-596. (in Chinese)
- [2] CHEN Feng, LI Jin-zong, HUANG Jian-ming, et al. Research of special structure of aerospace camera and ground processing technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(6): 485-488. (in Chinese)
- [3] ZHAO Yue-jin, YU Xiao-mei. Discal image rotator [C]// *Proceedings of SPIE, Hybrid Image and Signal Processing IV*, 1994, **2238**: 184-188.
- [4] ZHAO Miao-juan, ZHANG Liang. Analysis of thermal imaging assembly opto-mechanical scan method [J]. *Electronics Optics & Control*, 2001, **84**(4): 35-38. (in Chinese)
- [5] LIU Yin-nian. Analysis of the imaging characteristics and scanning trace of the 45° rotating scanning mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 110-112. (in Chinese)
- [6] ZHANG Shu-qin, DING Ya-lin, LI You-yi. Computing aerial camera's image plane revolution by coordinate conversion. [J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(1): 22-26. (in Chinese)
- [7] HUI Bin, LI Jing-zhen, HUANG Hong-bin, et al. Optical analysis of space two-axis scanning mirror [J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(9): 508-510. (in Chinese)
- [8] LIAN Tong-shu. *Conjugate Theory of Reflection Prism* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 1-6. (in Chinese)
- [9] WANG Jun-shan, ZHAI Lin-pei, DING Ya-lin, et al. Characteristic analysis and correction technique for image rotation of aerial camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(3): 493-496. (in Chinese)