

# 航空相机的像旋转特性分析及其补偿方法

王俊善<sup>1,2</sup>, 翟林培<sup>1</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 王晓军<sup>1,2</sup>, 肖占全<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** :航空相机在多航迹成像方式中,随着 45° 反射镜绕光轴旋转对物进行扫描,物体反射像也将绕光轴进行旋转,为此必须采取消除像旋转的措施来保证成像质量。为阐述产生像旋转的原因,分析了扫描反射镜的像旋转特性;并在探讨消除像旋技术理论的基础上,提出了一种反射镜与探测器同步转动消除像旋转的方法。在多航迹工作方式中,此方法为相机扫描机构连续扫描成像提供了必要条件。利用此方法还改进了以往步进式扫描机构的惯量大、扫描效率低的问题,并在实际工程中得以应用和证明。试验结果表明,该方法的同步旋转误差小于 1/3 像元,能够获得良好的图像效果。

**关键词** :航空相机; 像旋转; 45° 扫描反射镜; 扫描成像

中图分类号:TN202 文献标识码:A 文章编号:1007-2276(2008)03-0493-04

## Characteristic analysis and correction technique about the image rotation of aerial camera

WANG Jun-shan<sup>1,2</sup>, ZHAI Lin-pei<sup>1</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, WANG Xiao-jun<sup>1,2</sup>, XIAO Zhan-quan<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract**: While aerial camera took pictures by way of many airlines and its 45° scanning mirror rotates and scans terrestrial object, the reflected image of the object rotates around the optical axis. It is necessary to eliminate the image rotation so as to maintain its image quality. Based on the cause of the image rotation, the image rotation characteristic of the scanning mirror was analyzed. And through the exploration of the techniques for eliminating the image rotation, one method in which the mirror and its detector rotate synchronously was suggested. The scanning device could image in continuous scanning way and need not remain stationary as step scanning imaging devices. Moreover, this method could solve the problem of large inertia and low scanning efficiency of conventional step scanning devices. It had been applied and evidenced in practical engineering. Test results show that the rotation synchronous error is less than one-third of pixel size and that good images can be acquired without any blurring.

**Key words**: Aerial camera; Image rotation; 45° scanning mirror; Scanning imaging

## 0 引言

目前,国内外遥感仪器中常在光学镜头前加一个

与光轴成 45° 的反射镜,使仪器能够卧式安装,以减小载机平台的空间<sup>[1]</sup>。除此之外,为扩大相机的地面覆盖范围,通常使反射镜绕光学系统光轴连续摆动或步

收稿日期:2007-08-09; 修订日期:2007-09-12

基金项目:国防预研项目(ZJ99130B)

作者简介:王俊善(1982-),男,甘肃张掖人,硕士,主要从事航空相机的稳定成像技术研究。Email:wangjunshan2007@hotmail.com

导师简介:翟林培(1945-),男,吉林长春人,研究员,硕士,主要从事航空遥感技术方面的研究。

进,进行多航迹拍照,如 KA-112 相机和 KS-146 相机等。但是随着安装有反射镜的扫描机构的连续摆动或步进,会产生像与探测器的相对旋转,即像旋转现象,从而使图像模糊。为解决上述问题,分析像产生的原因和研究一种行之有效的消除像旋转技术是非常必要的<sup>[2-3]</sup>。

## 1 像旋转的产生

如图1所示,把相机看成由扫描机构绕  $Y_0$  旋转  $\omega_1$  和反射像面绕  $Y_0$  旋转  $\omega_2$  组成,而反射镜自身绕  $X_0$  的旋转记为  $\omega_3$ 。45°反射镜安装在扫描机构中并与光轴成 45°,所以可以把  $\omega_1$  看作是反射镜绕  $Y_0$  的旋转角速度。

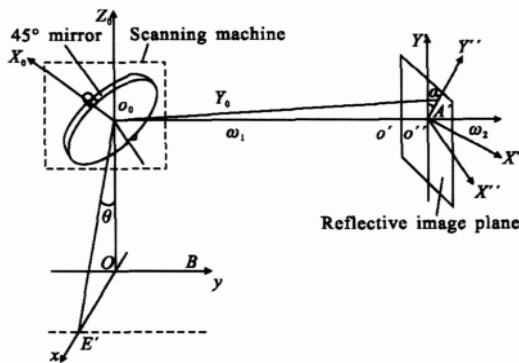


图 1 反射镜旋转成像示意图

Fig.1 Imaging sketch map of reflective mirror rotation

若反射像平面不转动( $\omega_2=0$ ),扫描机构在没有绕  $Y_0$  转动前,地物坐标系  $OXY$  经 45°反射镜的反射像在焦面上的坐标系为  $O'X'Y'$ 。当扫描机构绕  $Y_0$  转动任意角度  $\theta$  后,地物坐标系  $OXY$  经 45°反射镜的反射像在焦面上的坐标系为  $O'X''Y''$ ,并且绕  $Y_0$  转动某一角度  $\alpha$ 。所以在相机的光学系统中,就会产生像与探测器之间的相对旋转。对于具有 TDI 功能的大面阵 CCD 探测器,如果不进行消除像旋转处理,会使图像更加模糊,严重影响成像质量。

## 2 扫描反射镜的像旋转特性分析

### 2.1 反射镜反射矢量的计算

镜面反射示意图如图 2 所示。镜面反射定理的矢量公式为<sup>[4]</sup>:

式中:  $A$ 、 $A'$  分别代表像矢量和物矢量,如图 2 所示;  $N$  表示反射镜的法线矢量,令

$$N = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}$$

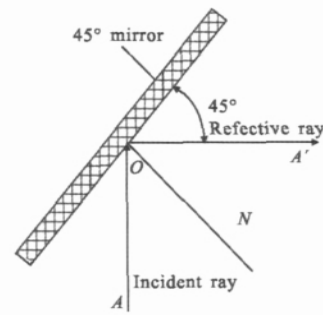


图 2 镜面反射示意图

Fig.2 Sketch map of mirror reflection vector

$$A' = (E - 2NN^T)A \quad (1)$$

$$\text{则 } E - 2NN^T = \begin{bmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

所以,公式(1)可写为:

$$A' = RA \quad (3)$$

式中:  $R = E - 2NN^T$  表示反射矢量矩阵。

反射镜法线矢量  $N$  绕某矢量  $P$  轴转动任意角度  $\theta$ ,其正负由右手规则确定,转动后的矢量  $N$  为:

$$N = S_{p,\theta} N \quad (4)$$

式中:  $S_{p,\theta}$  表示绕  $P$  轴转动任意角度  $\theta$  的转动矩阵,其值为:

$$S_{p,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta + 2P_x^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ P_z \sin\theta + 2P_x P_y \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_y^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} & -P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} \\ -P_y \sin\theta + 2P_x P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & P_x \sin\theta + 2P_y P_z \sin^2 \frac{\theta}{2} & \cos\theta + 2P_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

若  $P$  轴为  $y_0$  轴,则  $\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ,带入公式(5),得:

$$S_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.2 光学机械式消除像旋转特性分析

用此方式的具体解决方法有:探测器与扫描机构同步转动;加 K 镜、道威棱镜、别汉棱镜消像旋或使用专门的像旋转器。这些方法的共同之处是:使像与

探测器不发生相对转动<sup>[5-8]</sup>。

由于这些方法要转动探测器或者是通过光学元件发挥作用,将进入探测器前的光学图像绕其中心旋转某一角度,就需要从物方计算地面景象在探测器面上的像旋特性。为方便研究,假设飞机没有姿态变化。

如图1所示,反射镜坐标系  $O_0(X_0, Y_0, Z_0)$  中,  $Y_0$  平行于光轴  $Z_0$  垂直地面指向天顶,  $X_0$  由右手规则确定;

地面坐标系  $O(X, Y, Z)$  中,  $OZ$  与  $O_0Z_0$  重合。反射镜绕  $X_0$  轴旋转做前向像移补偿时,对像旋不会产生影响,这里不再赘述。所以,以下的讨论中  $\omega_3=0$ 。

设反射镜旋转后,绕  $Y_0$  轴转过  $-\theta$  角,反射镜法线的矢量坐标为:

$$N = S_{y,\theta} N_0 = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin\theta}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{\cos\theta}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

入射光线为:

$$A = E \cdot O_0 = (-\sin(-\theta), 0, \cos(-\theta))^T$$

将上式带入公式(2)、(3),得到反射矢量  $A$  为:

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & -\sin\theta & \sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \\ 0 \\ \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2\sin\theta\cos^2\theta}{-\sin^2\theta+\cos^2\theta} \\ -1 \\ \frac{2\sin^2\theta\cos\theta}{-\sin^2\theta+\cos^2\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

像方的旋转角  $\alpha$  为:

$$\tan\alpha = \frac{A_z}{A_x} = \tan\theta$$

即  $\alpha = -(-\theta) \quad (9)$

根据公式(9),反射镜转过  $-\theta$  后,在不加任何消像旋光学元件的情况下,像与反射镜旋转角度的大小相等,方向相反。

### 3 应用实例与分析

#### 3.1 应用实例

依据上述像旋转原理,并且遵循不增加设备结构体积和质量的原则,采用探测器件与扫描机构同步旋转的方式。如图3所示,相机水平安放,与飞行方向平行,来自地物的光线入射到与水平光轴成  $45^\circ$  的扫描反射镜上,折转  $45^\circ$  后射入光学镜组,而后经过两次  $45^\circ$  反射,最后成像在探测器上,经过光电转换输出数

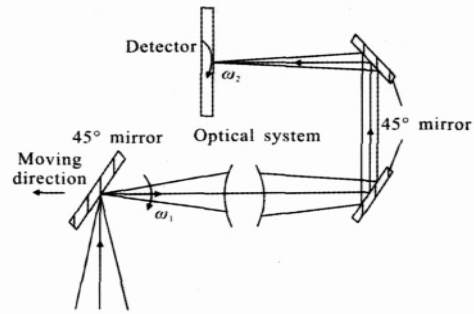


图3 同步消像旋光学示意图

Fig.3 Optical diagram of eliminating image rotation synchronously

字图像。两个  $45^\circ$  反射镜的法线分别为:

$$N_1 = \left[ 0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right]^T, N_2 = \left[ 0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right]^T$$

将  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $A$  带入公式(2)、(3),得到此系统中探测器面上的反射矢量  $A$  为:

$$A = R_1 \cdot R_2 \cdot A_0 = \begin{bmatrix} \frac{-2\sin\theta\cos^2\theta}{-\sin^2\theta+\cos^2\theta} \\ -1 \\ \frac{2\sin^2\theta\cos\theta}{-\sin^2\theta+\cos^2\theta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

则旋转角  $\alpha$  为:

$$\tan\alpha = \frac{A_z}{A_x} = -\tan\theta$$

即  $\alpha = -(-\theta) \quad (11)$

根据公式(11),反射镜转过  $-\theta$  后,反射矢量  $A$  在  $O_0$  坐标系中的旋转角仍为  $-\theta$ ,转向绕  $Y_0$  轴逆时针。因此,在此系统中,反射镜和其映射像绕光轴旋转的角度大小和方向相同。

将公式(11)两边对时间  $t$  微分:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} \quad (12)$$

令  $\omega_2 = \frac{d\alpha}{dt}$  为探测器的旋转角速度,  $\omega_1 = \frac{d\theta}{dt}$  为扫描机构的旋转角速度,且  $\omega_2 = -\omega_1$ 。由此,照相时,在扫描机构作扫描运动的同时,探测器也随之同步同向旋转,即可消除像旋转。

#### 3.2 实例分析

以往相机在多航迹成像时,扫描机构步进一角度的同时,需要有电机同步驱动探测器组件转动一角度后静止,拍照后,扫描机构再步进,进行下一航迹拍照。这种方式虽然消除了像旋转,但是探测器组件和扫描机构的转动惯量大,对控制系统的要求高。因此,提出了一种连续摆扫消除像旋转的方法,即在 CCD

成像时,使探测器组件随着扫描机构连续同步转动,达到消除像旋转的目的,如图 4 所示。但与此同时会带来摆扫像移,此问题可以利用 CCD 器件的 TDI 功能来解决。

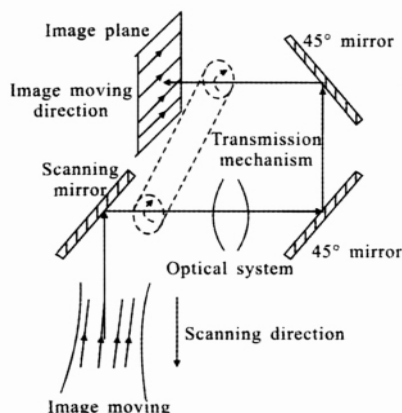


图 4 摆扫像移示意图

Fig.4 Sketch map of scanning image motion

为维护良好的成像效果,焦面组件上加有加热片和风扇,并在外壳体上开有多处通风孔,即使探测器旋转,也能够使探测器在高/低温环境中,保持恒定的温度范围。

## 4 结 论

根据光学反射矢量计算理论,采用光学机械方式消除扫描反射镜像旋转的理论,并提出了扫描机构和探测器连续旋转解决 CCD 相机像旋转的方法。

应用此方法扫描机构能够连续扫描,解决了以往相机在多航迹成像时,扫描机构步进成像所带来的惯量大、扫描效率低的问题,降低了控制系统的精度。

另外,应用此方法不需要在光学系统中加入任何

专门消除像旋转的光学元件,如 K 镜、道威棱镜、别汉棱镜等,也不会增加系统的结构和体积。

## 参考文献:

- [1] HUI Bin, LI Jing-zhen, HUANG Hong-bin, et al. Optical analysis of space two-axis scanning mirror [J]. Infrared Technology (惠彬,李景镇,黄虹宾,等.45°二维扫描镜扫描轴系特性分析.红外技术),2006,28(9):508-510.
- [2] XU Chao, JIN Wei-qi, WANG Xia, et al. Design of optical plate modulating microscanner based on staring imaging detector[J].Infrared and Laser Engineering (徐超,金伟其,王霞,等.基于凝视成像探测器的平板调制式微扫描器设计.红外与激光工程),2007,36(1):27-31.
- [3] LIU Zhao-jun, CHEN Wei. Space applications of staring imaging technology with area FPA [J]. Infrared and Laser Engineering (刘兆军,陈伟.面阵凝视型成像空间应用技术.红外与激光工程),2006,35(5):541-545.
- [4] LIAN Tong-shu. Conjugate theory of reflective prism [M]. Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology (连铜淑.反射棱镜共轭理论.北京:北京理工大学出版社),1988.
- [5] ZHAO Yue-jin. Line of 2 sight stabilization mirror assembly [C]// Proceedings of SPIE, Acquisition, Tracking, and Pointing VI, 1992, 1697:499-503.
- [6] ZHAO Yue-jin, YU Xiao-mei. Discal image rotator [C]// Proceedings of SPIE, Hybrid Image and Signal Processing IV, 1994, 2238:184-188.
- [7] ZHAO Miao-juan, ZHANG Liang. Analysis of thermal imaging assembly opto-mechanical scan method [J]. Electronics Optics & Control (赵妙娟,张良.热成像组件光机扫描方案分析.光电与控制),2001,84(4):35-38.
- [8] WANG Gui-fu, CHEN Gui-lin, CHEN Yu-liang. A new idea about reflection formation scanner of the atellite [J]. Optical Technique (王贵甫,陈桂林,陈雨良.以反射镜作为卫星二维扫描成像扫描镜的新思路.光学技术),2001,27(3):249-251.