

三反射系统航空遥感器像旋转分析

于春风^{1,2} 丁亚林¹ 惠守文¹ 张景国¹ 陈伟¹

(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 100049)

摘要 像旋转是影响和限制成像质量的一个重要因素。像面反射镜不随扫描反射镜同步旋转时,就会在焦平面上产生像旋转,导致地面信息丢失和图像分辨率明显下降。为了提高航空遥感相机的动态分辨率,必须对遥感相机进行像旋转分析。根据光反射矢量理论,对具有三反射光学系统的航空遥感器的成像特性进行研究。将整个遥感相机抽象为一个简单数学模型。在笛卡儿坐标系中,通过数学坐标变换的方法,对扫描反射镜沿俯角和位角方向的旋转对像质产生的影响做定量分析。扫描反射镜沿俯角方向旋转引起像旋转,沿位角方向旋转可以对前向像移进行补偿。通过分析,为设计一种对偏流角进行补偿的机构以及控制时间延时积分(TDI) CCD的积分时间提供理论依据。结果表明,该方法的同步旋转误差小于1/3 pixel,能够获得优质图像,从而提高整个系统的传递函数。

关键词 航空成像;像旋转;遥感器;三反射系统;笛卡儿坐标系;偏流补偿机构

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0823002

Analysis of Image Rotation for Aerial Remote Sensor with Three-Mirror Reflective Optical System

Yu Chunfeng^{1,2} Ding Yalin¹ Hui Shouwen¹ Zhang Jingguo¹ Chen Wei¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Image rotation is one important aspect on influence and confinement of image quality. The image mirror non-synchronous rotation with scanning mirror will cause image rotation in the focal plane. Consequently, it will lead to the loss of ground information and the image resolution will decrease significantly. In order to improve the dynamic state resolution of aerial remote sensor, it is indispensable to analyze the image rotation of aerial remote sensor. According to the optical reflection vector theory, imaging characteristics of aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system are studied. At first, a simple mathematic model is abstracted from the aerial remote sensor. In the Cartesian coordinate system, it can analyze the influence on image quality which is caused by scanning mirror rotation along the direction of position angle and plunge angle by the mathematic method of coordinate transformation. Scanning mirror rotations along directions of plunge and position angles produce image rotation and image motion, respectively. It will provide a theoretical basis for designing a mechanical structure to compensate for drift angle and for the control of integration time of time delayed and integration (TDI) CCD according to the analysis. Test results show that the rotation synchronous error is less than one-third of pixel size and that prime images can be acquired without any blurring. Thereby, the modulation transfer function (MTF) of optical system can be improved.

Key words aerial imaging; image rotation; remote sensor; three-mirror reflective optical system; Cartesian coordinate system; drift compensation mechanism

OCIS codes 230.0040; 280.4788; 080.2740

收稿日期: 2011-03-18; 收到修改稿日期: 2011-04-26

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06A208)资助课题。

作者简介: 于春风(1979—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事航空成像与测量技术等方面的研究。

E-mail: zhanglan3000@sina.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感相机稳定成像技术方面的研究。

E-mail: hou791016@163.com

1 引 言

航空遥感摄影与地面摄影的最大区别在于航空遥感器在工作过程中始终处于运动状态。在一定的曝光时间内,被拍摄的景物影像与探测器之间相对运动就会引起影像运动称为像移^[1]。像移将导致影像质量严重下降,因此必须设法消除。航空摄影中产生像移的主要原因特指那些使遥感器视轴指向发生改变的动作,主要包括航空相机扫描反射镜运动、飞机姿态运动和载机振动。在上述三类影响像移的因素中,相机扫描反射镜运动和飞机姿态运动在特定的航空摄影方式中还会引起像旋转的问题,即在载体飞行过程中由于引入载体姿态运动(俯仰、横滚、偏航和像面旋转)和遥感相机俯角方向运动导致像移矢量在像面坐标系中发生变化。如果不将像旋转消除将无法在遥感器焦平面上成清晰的影像。

目前常用的消像旋方法有在光学系统前增设光学元件消像旋和电子图像消像旋。光学元件消像旋主要有道威棱镜消像旋和 K 镜消像旋。道威棱镜的折射作用会引起系统光学效率的降低,棱镜材料会对某些特征波段的光谱产生吸收作用,而且棱镜的色散作用会影响系统的像质,所以实际应用中很少采用。K 镜消像旋法因 K 镜的存在使系统的体积增大很多,并且必须保证扫描镜的旋转轴与 K 镜的光轴及回转轴严格重合,否则像面上将会有像旋残量。光学元件消像旋有很好的实时性,但会减少光信号的能量,降低图像的信噪比,增大系统的体积和重量。电子图像消像旋对胶片型航空遥感器产生的像旋转无法消除,只能对 CCD 探测器已经获得的图像进行消旋转,实时性不好。该方法实际是将 CCD 探测器获得的畸变图像进行校正^[2],校正的效果取决于内插算法和多种角速率传感器及陀螺的精度。该方法处理数据量巨大,对硬件的要求很高。它减小了系统的体积和重量,但是是以损失部分图像信息为代价的。这在一定程度上限制了该技术的适用范围。本文提出了一种消像旋的方法,在扫描镜旋转的同时,探测器通过传动机构也同步反向旋转,消除扫描反射镜旋转所引起的像旋转。旋转探测器消像旋的方法在消像旋的几种方法中是最直接的方法,只要保证探测器与目标的像同步旋转就能保证在任意时刻消像旋。旋转探测器消像旋的方法具有对成像系统很重要的实时性,不会损失目标区域的信息量,并且增加的体积和重量小,不会影响整个系统的力学性能。随着电子产品的发展和机械制造业的发展,使用旋转探测器消像旋的方法将成为

最简单、有效的一种方法。此种方法既有光学图像消像旋时间不滞后的优点,又有电子图像消像旋仪器结构简单的优点,故对旋转探测器消像旋的研究具有重要的意义。

2 工作原理及数学模型

2.1 坐标系选择

地面固定坐标系:原点和三个坐标轴均相对于地面固定不动。

机体坐标系:固定在飞机上的坐标系,其原点通常位于飞机的重心。

航迹坐标系:原点通常固定于飞机的重心,其 X 轴沿航迹速度的方向,Z 轴在包含 X 轴的铅垂面内,垂直于 X 轴,指向上方,Y 轴垂直于 Z-X 平面,指向右方;当无飞行姿态角时与机体坐标系重合^[3]。通常由全球定位系统(GPS)确定。航迹坐标系相对于机体坐标系之间的旋转关系如图 1 所示。

纵轴(X):飞机参考面内指向前方的坐标轴。

横轴(Y):垂直于飞机参考面指向右方的坐标轴。

竖轴(Z):飞机参考面内垂直于纵轴指向上方的坐标轴。

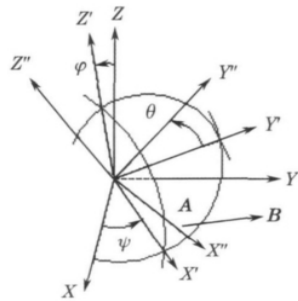


图 1 航迹坐标系相对于机体坐标系旋转

Fig. 1 Revolution between flight-path coordinate system and body coordinate system

2.2 飞机姿态定义

为计算像移旋转选择航迹坐标系和机体坐标系,姿态角是航迹坐标系相对于机体坐标系的角度。

俯仰角:飞机纵轴与水平面夹角,飞机抬头为正。

横滚角:飞机横轴与水平面夹角,飞机右倾斜为正。

偏航角:飞机纵轴与预定航向的夹角,相对预定航向左偏为正。

2.3 光反射矢量理论

用矢量形式描述反射镜反射定律,A 为入射光线,N 为反射镜面法线,B 为出射光线。根据反射镜物像共轭原理有^[4]

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

式中 N_x, N_y, N_z 为反射镜法线矢量在基准坐标系中的分量。

用矢量形式描述反射镜转动原理, N_0 在基准坐标系中分别绕 X, Y 轴旋转得到 N_{X0}, N_{Y0} 为

$$N_{X0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} N_0, \quad (2)$$

$$N_{Y0} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} N_0,$$

式中 θ, φ 为反射镜在基准坐标系中分别绕 X, Y 轴旋转的角度。

2.4 建立航空遥感器数学模型

建立数学模型过程中适当选取坐标系, 将会给计算带来方便。在反射镜上建立机体坐标系 XYZ 。整个模型分为三部分: 1) 扫描机构部分, 该部分提供步进扫描运动, 有两个自由度(俯角、位角)。2) 镜头部分, 包括主镜、次镜、三镜和焦面反射镜, 它们之间的相对位置关系是固定不变的, 整个部分与载体也相对静止。3) 偏流机构部分, 主要包括偏流机构和 CCD 探测器。整个偏流机构在曝光期间与影像同步旋转。如图 2 所示。

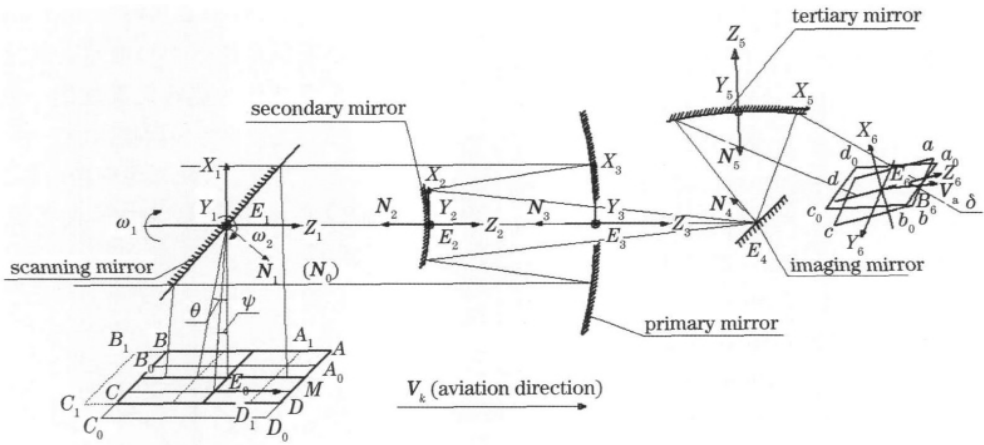


图 2 三反射系统航空遥感器数学模型

Fig. 2 Mathematic model of aerial remote sensor with three-mirror reflective optical system

3 像旋转矢量计算

3.1 非球面反射镜法线汇

从广义上来讲, 除了球面和平面(可以认为是球面的特例, 曲率半径为无穷大)以外的其他表面都可以称为非球面, 包括非对称性的空间曲面, 或称自由曲面。在绝大多数情况下, 应用非球面镜的光电成像系统采用轴对称非球面。旋转非球面通常采用了笛卡儿坐标系, 以光线传播的方向为 Z 轴的正方向, X 轴为离非球面轴的径向距离, Y 轴垂直于纸面并指向纸面外, 以非球面顶点为坐标原点, 如图 3 所示。其方程 $L^{[5]}$ 如下

$$Z = \frac{cX^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2X^2}} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i X^{2i}, \quad (3)$$

式中 c 为顶点曲率半径的倒数, k 为二次常数, a_i 为多项式系数。

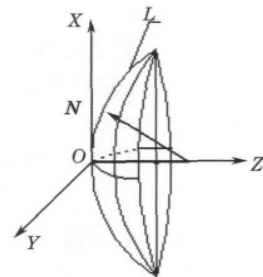


图 3 非球面方程和法线汇坐标系

Fig. 3 Equation of aspheric and normal line assemble coordinate system

非球面反射镜任意点处的法线矢量均不相同, 因此, 非球面存在一个法线集合, 称之为法线汇, 如图 3 所示。将(3)式转换为曲面方程如下

$$Z = \frac{c(X^2 + Y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(X^2 + Y^2)}} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i (X^2 + Y^2)^i.$$

设其隐函数为

$$F(X, Y, Z) = \frac{c(X^2 + Y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2(X^2 + Y^2)}} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i(X^2 + Y^2)^i - Z = 0. \quad (5)$$

因非球面反射镜处处光滑, 所以其曲面方程存在连续导函数。从而可求得非球面反射镜的法线矢量为

$$N[F_X(X, Y, Z), F_Y(X, Y, Z), -1], \quad (6)$$

也可将 N 用矢量在坐标系中的方向角的形式表示

$$N = [\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma], \quad (7)$$

式中

$$\cos \alpha = \frac{F_X(X, Y, Z)}{\sqrt{[F_X(X, Y, Z)]^2 + [F_Y(X, Y, Z)]^2 + (-1)^2}},$$

$$\cos \beta = \frac{F_Y(X, Y, Z)}{\sqrt{[F_X(X, Y, Z)]^2 + [F_Y(X, Y, Z)]^2 + (-1)^2}},$$

$$\cos \gamma = \frac{-1}{\sqrt{[F_X(X, Y, Z)]^2 + [F_Y(X, Y, Z)]^2 + (-1)^2}}.$$

3.2 三反射系统的光线追迹

设 $E_0(X_0, Y_0, Z_0, 1), E_1(X_1, Y_1, Z_1, 1), E_2(X_2, Y_2, Z_2, 1), E_3(X_3, Y_3, Z_3, 1), E_4(X_4, Y_4, Z_4, 1), E_5(X_5, Y_5, Z_5, 1)$ 点为目标光线与各个反射镜面的交点, $E_6(X_6, Y_6, Z_6, 1)$ 为 E_0 的共轭像点。 V_k 为航迹坐标系与地面固

定坐标系的相对速度。物点 E_0 在扫描反射镜坐标系(扫描反射镜坐标系与机体坐标系重合)的坐标为 $(X_0, Y_0, Z_0, 1)$, 则由 E_0 发出的光线经过坐标原点的矢量 $\overrightarrow{E_0 E_1}$ 为 $(X_0, Y_0, Z_0, 1)$, 经过扫描反射镜反射后的矢量为

$$\overrightarrow{E_1 E_2} = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^T) \overrightarrow{E_0 E_1},$$

$$\mathbf{N}_1 = [\cos \alpha_1, \cos \beta_1, \cos \gamma_1, 1]^T,$$

扫描反射镜法线矢量将矢量 $\overrightarrow{E_1 E_2}$ 由坐标系 $X_1 Y_1 Z_1$ 变换^[6]到坐标系 $X_2 Y_2 Z_2$:

$$\overrightarrow{E_1 E_2}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 1 & n_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \overrightarrow{E_1 E_2}, \quad (8)$$

式中 l_1, m_1, n_1 分别为坐标系 $X_1 Y_1 Z_1$ 在坐标系 $X_2 Y_2 Z_2$ 中的坐标值, 在系统中为已知量。在将坐标系 $X_1 Y_1 Z_1$ 中坐标原点 $(0, 0, 0, 1)$ 转换到坐标系 $X_2 Y_2 Z_2$ 中为 $(l_1, m_1, n_1, 1)$, 由直线的点法式方程可得反射后的直线方程(在坐标系 $X_2 Y_2 Z_2$ 中)。这样 $\overrightarrow{E_1 E_2}'$ 与非球面的曲面方程的交点 E_2 便可通过解析几何求出。代入(6)式得

$$\mathbf{N}_2 = [\cos \alpha_2, \cos \beta_2, \cos \gamma_2, 1]^T.$$

依次对各个反射镜应用上述计算过程, 可求得

$$\overrightarrow{E_5 E_6}' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_5 \\ 0 & 1 & 0 & m_5 \\ 0 & 0 & 1 & n_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_5 \mathbf{N}_5^T) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_4 \\ 0 & 1 & 0 & m_4 \\ 0 & 0 & 1 & n_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_4 \mathbf{N}_4^T) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_3 \\ 0 & 1 & 0 & m_3 \\ 0 & 0 & 1 & n_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_3 \mathbf{N}_3^T) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_2 \\ 0 & 1 & 0 & m_2 \\ 0 & 0 & 1 & n_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_2 \mathbf{N}_2^T) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & m_1 \\ 0 & 0 & 1 & n_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_1 \mathbf{N}_1^T) \overrightarrow{E_0 E_1}. \quad (9)$$

通过坐标系 $X_6 Y_6 Z_6$ 中矢量 $\overrightarrow{E_5 E_6}'$ 和点 E_5 便可求得直线 $E_5 E_6$ 的点法式方程, 方程与平面 $X_6 O Z_6$ 的交点就是物点 E_0 的共轭像点 E_6 在坐标系 $X_6 Y_6 Z_6$ 中的坐标 (X_6, Y_6, Z_6) 。

3.3 扫描镜沿位角方向旋转对像旋转方向的判定

以遥感器星下点为例^[7], 扫描镜沿位角方向旋转时如图 2 所示, 摄影物空间面积由 $ABCD$ 变为 $A_1 B_1 C_1 D_1$ 。坐标系变化如图 4 所示, 扫描反射镜坐标系绕机体坐标系 Y 轴旋转欧拉角为 η 。将 $\mathbf{N}_1 = N_{Y_0}$ 代入(9)式, 可知扫描镜沿位角方向旋转时不会引起像旋转问题,

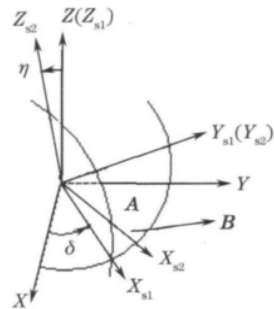


图 4 机体坐标系与扫描反射镜坐标系的旋转

Fig. 4 Revolution between body coordinate system and scanning mirror coordinate system

$$N_{Y_0} = \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} N_0. \quad (10)$$

3.4 扫描镜沿俯角方向旋转对像旋转方向的判定

以传感器星下点为例^[7],扫描镜沿俯角方向旋转时如图 2 所示,摄影物空间面积由 $ABCD$ 变为 $A_0B_0C_0D_0$ 。坐标系变化如图 4 所示,扫描反射镜坐标系绕机体坐标系 X 轴旋转的欧拉角为 δ 。将 $N_1 = N_{X_0}$ 代入(9)式,可知扫描镜沿俯角方向旋转时会引起像旋转问题,

$$N_{X_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} N_0. \quad (11)$$

3.5 考虑遥感器飞行姿态时像旋转方向的判定

遥感器飞行过程中存在俯仰角、横滚角、偏航角,这些角导致航迹坐标系相对于机体坐标系发生旋转,如图 1 所示,航迹坐标系中的矢量 \vec{AB} 转换到机体坐标系中的矢量为 $\vec{A'B'}$ 。

$$\vec{A'B'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{AB} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \psi & \cos \varphi \sin \psi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \theta \sin \varphi \cos \psi - \cos \theta \sin \psi & \sin \theta \sin \varphi \sin \psi + \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \cos \varphi & 0 \\ \cos \theta \sin \varphi \cos \psi + \sin \theta \sin \psi & \cos \theta \sin \varphi \sin \psi - \sin \theta \cos \psi & \cos \theta \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{AB}. \quad (12)$$

将(12)式计算结果代入(9)式可知遥感器飞行姿态对像旋转的影响。将航迹坐标系中的矢量 $\vec{AB} = [0, 0, V_k, 1]^T$ 代入(12)式和(9)式可得

$$V_a = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

像面旋转的角度 $\eta = \arctan \frac{V_y}{V_x}$ 。

4 实验方案及装置

以现有样机为实验基础,对上述推导过程进行验证。以焦距 $f=1800$ mm 的相机为例^[8],样机的光学参数为:主镜 $k=-2.14574$,次镜 $k=-0.64136$,三镜 $k=0.226895$,像元尺寸 0.012 mm。实验设备包括目标发生器、飞行姿态摇摆台、样机和计算机等。扫描反射镜控制原理如图 5 所示。

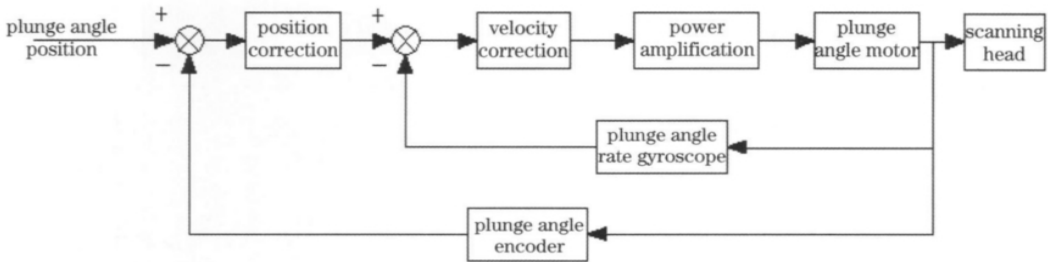


图 5 扫描反射镜控制原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of control principle about scanning mirror

旋转探测器机构主要由驱动组件、内筒、外筒、精密钢球和位置反馈编码器等组成,其结构如图 6 所示。为保证机构的精度,精密钢球经过筛选,通过光电自准直仪检测该机构的摆动量为 $2.9''$ 。应用

编码器 DSH40-18H 对旋转探测器机构内筒旋转位置进行测量,采用数字信号处理(DSP)控制方式^[9],测量数据如表 1 所示,位置偏差角是通过编码器的码值和偏流机构的位置得到,仅选 13 组数据进行说明。

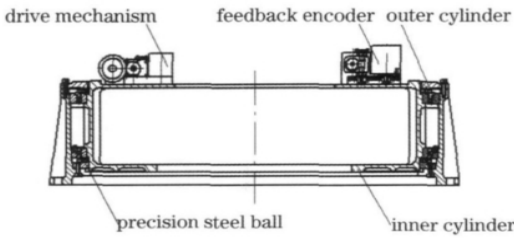


图 6 旋转探测器机构方案图

Fig. 6 Schematic diagram of the rotary detector mechanism

表 1 测量数据

Table 1 Measurement data

Drift mechanism position / (°)	Encoder output number	Deviation angle θ / (")
-12.78	111444	6.8
-10.65	112995	6.4
-8.52	114546	5.9
-6.39	116095	-5.3
-4.26	117648	5.5
-2.13	199199	6.1
0	120749	0
2.13	112301	5.4
4.26	123852	6.2
6.39	125403	6.7
8.52	126954	5.1
10.65	128503	-5.8
12.78	130056	6.3

根据表 1 中数据,由贝塞尔公式求得位置偏差角的平均值 $\bar{\theta}$ 为

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{13} \theta_i}{n} = 2.369'',$$

标准差为

$$\sigma = S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{13} (\theta - \theta_i)^2}{n - 1}} = 5.645,$$

$$\sigma_{\bar{\theta}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = 1.566,$$

算术平均值的极限误差按 t 分布计算。由 $\nu = n - 1 = 12, \alpha = 0.05$ 可得 $t_{\alpha} = 2.18$, 置信区间的半宽度为

$$\Delta_{\bar{\theta}} = t_{\alpha}(\nu) \frac{S}{\sqrt{n}} = 3.413.$$

像面视场直径 $d = 300$ mm, 视场边缘的误差值 δ_v 为

$$\delta_v = d \tan\left(\frac{\bar{\theta} + \Delta_{\bar{\theta}}}{2}\right) = 0.0038 \text{ mm} < 0.004 \text{ mm}.$$

实验数据经处理后可知,探测器旋转机构满足成像要求,且误差小于 1/3 pixel。图 7 为该遥感器

试飞获得图像。该遥感器应用于临近空间,成像清晰,满足分辨率要求。



图 7 试飞图像

Fig. 7 Test flight image

5 结 论

由上述分析可知扫描镜沿位角方向旋转时,影像不产生旋转。扫描镜沿俯角方向旋转时,影像产生旋转,扫描镜转过角度和像旋转的角度成定比关系、方向相反,因此可以采用扫描镜与 CCD 探测器同步反向旋转的方法来消除像旋转。此外,在物空间任取两点进行矢量运算,可以得到像空间任意两点之间的像旋转量。运用这种方法还可以对遥感器因飞行姿态(俯仰、偏航和横滚)以及振动等引起的像移做定量分析^[10~12]。将此方法应用到航天领域,利用地球质心坐标系,可分析因地球旋转而引起的偏流对像移及像旋转的影响,以及遥感器的航迹高度对像旋转的影响等。

参 考 文 献

- 1 Sierbakov. Design and Calculation of Aerial Camera [M]. Sun Zhenzhou, Zhou Guiqin Transl. Changchun: The Association of Science and Technology Translation in Jilin, 1985
谢尔巴科夫. 航空照相机的设计与计算 [M]. 孙振洲, 周桂琴译. 长春: 吉林省科技翻译协会, 1985
- 2 Li Shi, Zhang Bao, Sun Hui. Real-time restoration of images blurred by rotational motion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 648~653
李仕, 张葆, 孙辉. 旋转运动模糊的实时恢复 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 648~653
- 3 State Technical Supervision Bureau. GB/T 14410.1-1993 Flight Mechanics-Concepts, Quantities and Symbols, Axis Systems and Motion State Variables [S]. Beijing: Standards Press of China, 1993
国家技术监督局. GB/T 14410.1-1993 飞行力学概念, 量和符号坐标轴系状态变量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993
- 4 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1987
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 5 Xin Qiming. Manufacturing Technology of Plastic Aspheric Lens [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005
辛企明. 光学塑料非球面制造技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- 6 Gu Song, Wang Shaoju. Design and control of drift adjusting

- mechanism in space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(3): 616~620
- 谷松, 王绍举. 空间相机调偏流机构的设计与控制[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(3): 616~620
- 7 Zhang Shuqin, Ding Yalin, Li Youyi *et al.*. Computing aerial camera's image plane revolution by coordinate conversion[J]. *Optical Instruments*, 2007, **29**(1): 22~26
- 张树青, 丁亚林, 李友一等. 应用数学坐标变换方法计算航空相机像面旋转[J]. *光学仪器*, 2007, **29**(1): 22~26
- 8 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
- 李旭阳, 李英才, 马臻等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097
- 9 Zhou Jiufei, Zhai Linpei, Zhou Gang *et al.*. Autofocus method of aerial imaging device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 105~108
- 周九飞, 翟林培, 周刚等. 航空成像设备自动调焦方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 105~108
- 10 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 郭永祥, 李英才, 吕保斌等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 11 Qian Yixian, Liang Wei, Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function for high resolution aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 192~196
- 钱义先, 梁伟, 高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 192~196
- 12 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683