

## 斜视步进画幅遥感相机像移补偿方法研究

张树青<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 李友一<sup>1</sup>, 许永森<sup>1,2</sup>, 张 雷<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:**提出一种通过扫描镜两轴旋转与像面旋转机构,配合使用实现斜视画幅相机像移补偿方法。首先,在扫描镜处建立飞机牵连铅锤坐标系、机体坐标系、航迹坐标系、扫描镜补偿坐标系、提取相机几何模型,假定机体坐标系与镜头光学系统物方主点重合。为求得两轴补偿角速度,必须经过坐标变换解算出目标在扫描镜补偿坐标系下的速度和视轴长度;为计算像面旋转机构的位置,必须计算目标在机体坐标系下像面上的像移速度。由于获得的姿态角信息来自飞机惯导系统,受实际条件制约,须对上述理想算式进行简化,以便工程应用,最终给出了简化后的补偿公式。

**关键词:**斜视画幅相机; 像面旋转机构; 惯导系统; 坐标变换; 机体坐标系

**中图分类号:**TH74 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2008)03-0501-04

## Image motion compensation method of a step-frame LOROP camera

ZHANG Shu-qing<sup>1,2</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, LI You-yi<sup>1</sup>, XU Yong-sen<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<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 step-frame long range oblique photography (LOROP) camera was introduced. The camera's image motion compensation was realized by using scan mirror's two axes revolution combining with the image revolution mechanism. Firstly, the plumb axis system, aircraft-carried axis system, flight-path axis system, scan mirror compensation axis system must be built at the scan mirror of airplane. And then the camera's geometrical model was extracted by supposing the aircraft-carried axis system was coincide with the object's main image of the camera optical system. The compensation angular velocity was obtained by using coordinate conversion to coordinate the speed and sight axis length of target in compensation axis system of the scan mirror. And the position of image revolution mechanism was obtained with the image motion speed. In the fact, the attitude information came from the airplane's inertial system, so the angular velocity formula of image motion should be simplified. The compensation formula after simplified was provided finally.

**Key words:** LOROP camera; Image revolution mechanism; INS; Coordinate conversion; Attitude matrix

## 0 引言

远距离倾斜遥感相机具有机动灵活、操作安全等特点,因而被广泛应用于遥感探测。其从工作方式上可分为全景式和画幅式,画幅式又分为连续画幅式和步进画幅式,如美国 CA-295<sup>[1]</sup>,该相机伺服系统采用

绕相机中心轴以稳定、连续的方式旋转整个相机,与全景相机扫描运动类似<sup>[2]</sup>。相机面阵 CCD 采用 TDI 方式补偿扫描像移,同时采用卡塞格林光学组件补偿前向像移,使相机在曝光期间获得高分辨图像。步进画幅式,如 CA-261<sup>[3]</sup>,采用的是步进扫描方式,每幅曝光期间,扫描头视轴稳定不动(相对目标),文中重点介

收稿日期:2007-08-18; 修订日期:2007-09-10

基金项目:武器装备预研基金资助项目(6140517)

作者简介:张树青(1982-),男,黑龙江东宁人,博士生,主要从事遥感相机像移补偿理论及光学设计工作。Email: ziom.ac@163.com

导师简介:丁亚林(1964-),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事航空遥感相机稳像技术的研究。Email:dingyl1964@sohu.com

绍该模式相机。步进工作模式的画幅相机一般焦距较长,机体很大,尤其是胶片型相机,步进过程中,像面目标像在探测器上绕垂直探测器面的轴旋转<sup>[4]</sup>,转角扫描角和飞机姿态角有关。为获得连续图像,同时不引起异速像移补偿失真,必须设置像面旋转机构。在 CA-261 中,在扫描镜后面放置一个别汉棱镜,由别汉棱镜特有性质消除像旋。采用在像面处设置像面旋转机构,利用扫描镜作为稳定视轴元件实现含有姿态角的像移补偿。

## 1 建立相机几何数学模型

为了研究方便,将相机分为四部分:扫描头(含扫描镜);镜头加两折叠镜;胶片与快门组件;像面旋转机构,如图 1 所示。第一部分扫描头内含扫描镜,扫描头只绕相机中心轴旋转一个自由度,扫描镜除了和它一起旋转外,还可以绕自身位角轴旋转;第二部分相对飞机是不动的;第三部分可在第四部分带动下旋转。参考文献[5-6],选择机体坐标系(XYZ,简写 $S_0$ )、飞机铅垂地面坐标系( $X_g Y_g Z_g$ ,简写 $S_g$ )、航迹坐标系( $X_k Y_k Z_k$ ,简写 $S_k$ )。将机体坐标系原点建在扫描镜与镜

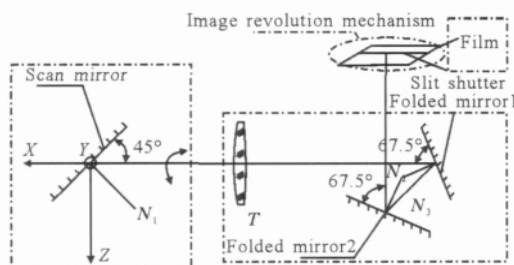


图 1 画幅相机几何模型原理图

Fig.1 Geometric model of frame camera

头中心轴交点处,X轴与相机镜头中心轴重合。此外,还需建立扫描镜坐标系,其相关定义如下:

扫描镜坐标系。在扫描镜处建立扫描反射镜坐标系 $X_s Y_s Z_s$ , $Y_s$ 为位角轴(扫描反射镜绕其位角运动), $Z_s$ 与扫描镜成 $45^\circ$ ,用右手定则判定 $X_s$ ;

对以下物理量定义:

(1) 相机视轴与像面任意一点关于相机光学系统共轭的地面目标点和扫描镜坐标原点之间的连线定义为视轴,用符号 $L$ 表示为标量;

(2) 扫描角 相机视轴与机体坐标系面 $XOZ$ 所成锐角,用 $\delta$ 表示;

初始时刻,扫描镜与 $XOZ$ 面垂直,并与 $XOY$ 面成 $45^\circ$ ,相机俯角 $90^\circ$ 。此时,扫描镜和机体坐标系重合。图 1 中 $N_1, T, N_2, N_3$ 分别为扫描镜法线向量、镜头坐标

变换矩阵、折叠镜 1 法线向量和折叠镜 2 法线向量。

## 2 斜视画幅相机补偿方案确定及原理分析

### 2.1 扫描头稳像

原理 通过驱动扫描头绕中心轴以一定角速度带动扫描镜旋转,同时扫描镜绕其位角轴以一定角速度旋转,在曝光期间内,使视轴相对该幅成像目标静止。图 2 是求补偿角速度的流程图。

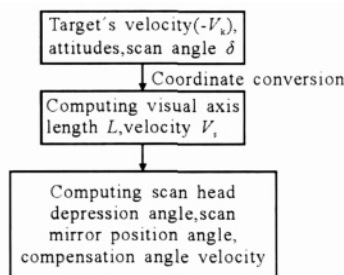


图 2 补偿角速度计算流程

Fig.2 Calculation flow of compensation angular velocity

$$V_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & \sin\delta \\ 0 & -\sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \cdot M \cdot \begin{bmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $M$ 是由航迹坐标系到机体坐标系下姿态坐标变换矩阵,由参考文献[7]得知 $M$ 可以通过两个途径实现:

$$(1) S_k (-\beta_k) \alpha_k \mu_k S_0;$$

$$(2) S_k S_g \psi \theta \phi S_0.$$

途径(1)的变换矩阵记为 $M_1$ ,途径(2)的变换矩阵记为 $M_2$ ,很容易得出它们的表达式:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\mu_k & \sin\mu_k \\ 0 & -\sin\mu_k & \cos\mu_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\alpha_k & 0 & \sin\alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha_k & 0 & \cos\alpha_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta_k - \sin\beta_k & 0 \\ \sin\beta_k & \cos\beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\left[ \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\chi & -\sin\chi & 0 \\ -\sin\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (3)$$

理论上 $M_1=M_2$ ,考虑载机在工作时 $(\chi, \psi), (\theta, \gamma), \theta, \gamma, \mu_k$ 均为小量,由公式(2)、(3)可以得出下列重要角

度关系:

$$\beta_k \quad \chi - \psi \quad (4)$$

该相机载机惯导系统实际可获得的参数有横滚角  $\phi$ 、俯仰角  $\theta$ 、偏流角  $\beta_k$ 、地速  $V$  (等于  $V_k \cdot \cos \gamma$ ) ,且姿态角解算顺序为  $\psi \quad \theta \quad \phi$  ,从获得的参数看,采用途径(2)更加合理,有利于工程实现。唯一的问题是,是否可以对最后矩阵乘积结果进行变形,使  $\chi, \psi$  为二者差的形式,最后用去  $\beta_k$  代替它们。

$$V_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot M_2 \cdot \begin{bmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

经整理,变形得:

$$V_s = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos(\psi - \chi) + \sin \theta \cdot \tan \gamma \\ \sin(\delta + \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos(\psi - \chi) + \cos(\delta + \phi) \cdot \sin(\psi - \chi) \\ -\sin(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma \\ \cos(\delta + \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos(\psi - \chi) - \sin(\delta + \phi) \cdot \sin(\psi - \chi) \\ -\cos(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma \\ (-V_k \cdot \cos \gamma) \end{bmatrix} \cdot \quad (6)$$

将公式(4)代入公式(6),得到:

$$V_s = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \cos \beta_k + \sin \theta \cdot \tan \gamma \\ \sin(\delta + \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta_k \cos(\delta + \phi) \cdot \sin \beta_k \\ -\sin(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma \\ \cos(\delta + \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta_k - \sin(\delta + \phi) \cdot \sin \beta_k \\ -\cos(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma \\ (-V_k \cdot \cos \gamma) \end{bmatrix} \cdot \quad (7)$$

视轴  $L$  采用下式计算<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_g \\ y_g \\ H \end{bmatrix} \quad (8)$$

由上式解出视轴长度为:

$$L = \frac{H}{\cos(\delta + \phi) \cdot \cos \theta} \quad (9)$$

图3为扫描头补偿原理图,依靠扫描镜绕  $Y_s$  轴旋转补偿  $V_s$  在  $X_s$  轴分量,并结合扫描镜几何光学性质<sup>[8]</sup>,设位角补偿角速度  $\omega_w$ ,有:

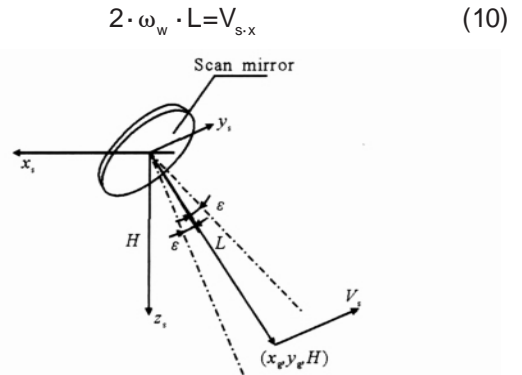


图3 扫描镜补偿原理图

Fig.3 Compensation principle of scan mirror

由公式(7)、(9)和(10)得出:

$$\begin{aligned} & (-V_k \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\delta + \phi) \cdot \\ & \omega_w = \frac{\cos \theta \cdot [\cos \theta \cdot \cos \beta_k + \sin \theta \cdot \tan \gamma]}{2H} \end{aligned} \quad (11)$$

令扫描头俯角补偿角速度为  $\omega_f$ ,有:

$$\omega_f \cdot L = V_{s,y} \quad (12)$$

由公式(12)、(7)和(9)得到:

$$\begin{aligned} & (-V_k \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \\ & [\sin(\delta + \phi) \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta_k + \cos \theta \cdot \\ & \omega_f = \frac{(\delta + \phi) \cdot \sin \beta_k - \sin(\delta + \phi) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma}{H} \end{aligned} \quad (13)$$

公式(11)和(13)是中心视场推导的,没有考虑相机横向视场角因素,又因横向视场角与  $(\delta + \phi)$  角共面,所以只需对含有  $(\delta + \phi)$  的项修正,设镜头半视场角为  $\varepsilon$ ,引入  $t(t \in [-\varepsilon, \varepsilon])$ ,修正公式(11)和(13):

$$\begin{aligned} & (-V_k \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\delta + \phi + t) \cdot \cos \theta \cdot \\ & \omega_w = \frac{\cos \theta \cdot [\cos \theta \cdot \cos \beta_k + \sin \theta \cdot \tan \gamma]}{2H} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & (-V_k \cdot \cos \gamma) \cdot \cos(\delta + \phi + t) \cdot \cos \theta \cdot \\ & [\sin(\delta + \phi + t) \cdot \sin \theta \cdot \cos \beta_k + \\ & \omega_f = \frac{\cos(\delta + \phi + t) \cdot \sin \beta_k - \sin(\delta + \phi + t) \cdot \cos \theta \cdot \tan \gamma}{H} \end{aligned} \quad (15)$$

## 2.2 像面旋转机构原理及分析

文中研究对象为胶片型相机,采用焦面帘幕式快门曝光,该快门除控制狭缝调节曝光时间功能外,还具有配合扫描头一起实现异速像移<sup>[9]</sup>补偿的功能。

帘幕式快门工作原理:该快门分上下两层,两个快门帘上都有开口,快门曝光时,两个开口形成的曝光帘缝通过焦面,使胶卷曝光<sup>[10]</sup>。图4中,1、2、3和4代表目标横向视场的4个视场角位置,可以证明这4

个位置的像移速度大小是不等的,这种现象称为异速像移。本相机采用的异速像移补偿方案是:快门帘缝在从一端运动至另一端过程中,行至胶片上某个位置时,扫描镜位角和扫描头俯角同时以该位置对应的补偿角速度  $\omega_w$ 、 $\omega_f$  旋转。

上述过程的重要前提是快门帘缝必须与该幅的像移在胶片上投影方向平行,否则会引起异速像移补偿失真,参照图 5。

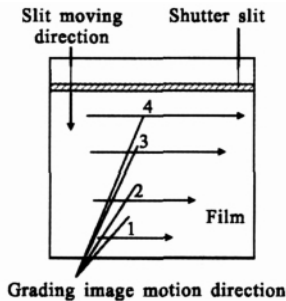


图 4 帘缝快门工作原理

Fig.4 Working principle of slit shutter

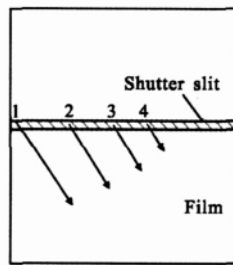


图 5 异速像移补偿失真示意图

Fig.5 Compensation distortion of graded image motion

假设快门帘缝与像移方向不平行,快门帘缝本应该对应一个横向视场位置(平行时),现在对应很多个横向视场位置,图中仅举 4 点为例,这 4 点位置的像移速度大小不等,但正如前面提到的那样,快门帘缝在该位置对应补偿  $\omega_w$ 、 $\omega_f$  是唯一确定的,即只能按照一个横向视场角补偿,这样,其他各点补偿必然失真,故必须在每幅目标曝光前保证像移方向与帘缝平行。这个条件是依靠相机像面旋转机构实现的。

如图 6 所示,快门和胶片位于像面旋转机构之

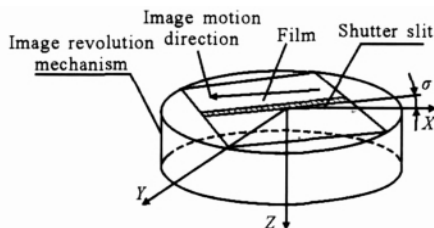


图 6 像面旋转机构工作原理图

Fig.6 Working principle of image revolution mechanism

上,可以随其绕 Z 轴旋转,设当旋转角度为  $\sigma$  时,快门帘缝与像移方向平行。计算流程如图 7 所示。

按照图 7 流程计算的  $\sigma$  角的物理意义是,此时像移方向与  $S_k$  的 X 轴夹角为  $\sigma$ ,欲使异速像移补偿不失真,像面旋转机构必须相对  $S_0$  转过一个  $\sigma$ ,以下是计

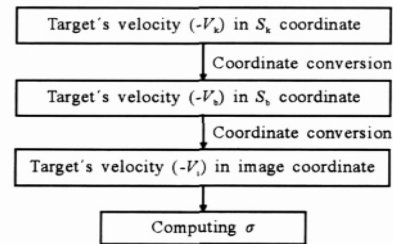


图 7 计算像面旋转角流程

Fig.7 Flow of evolution angle computation

算公式:

$$V_i = (E - 2N_3 N_3^T) \cdot (E - 2N_2 N_2^T) \cdot T \cdot (E - 2N_1 N_1^T) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\left[ \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\chi & \sin\chi & 0 \\ -\sin\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma = \arctan \left[ \frac{\cos\delta \cdot \cos(\delta+\phi) \cdot \sin(\psi-\chi) - \sin\delta \cdot \cos\theta \cdot \cos(\psi-\chi) - \cos\delta \cdot \sin\theta \cdot \sin(\delta+\phi) \cdot \cos(\psi-\chi) + \sin\delta \cdot \sin\theta \cdot \tan\gamma - \cos\delta \cdot \cos\theta \cdot \sin(\delta+\phi) \cdot \tan\gamma}{\cos\delta \cdot \cos\theta \cdot \cos(\psi-\chi) - \sin\delta \cdot \sin\theta \cdot \sin(\delta+\phi) \cdot \cos(\psi-\chi) + \sin\delta \cdot \cos\theta \cdot \cos(\psi-\chi) + \cos\delta \cdot \sin\theta \cdot \tan\gamma + \sin\delta \cdot \sin(\delta+\phi) \cos\theta \cdot \tan\gamma} \right] \quad (17)$$

将公式 (4) 代入公式 (17), 得到:

$$\sigma = \arctan \left[ \frac{-\cos\delta \cdot \cos(\delta+\phi) \cdot \sin\beta_k - \sin\delta \cdot \cos\theta \cdot \cos\beta_k - \cos\delta \cdot \sin\theta \cdot \sin(\delta+\phi) \cdot \cos\beta_k}{\cos\delta \cdot \cos\theta \cdot \cos\beta_k - \sin\delta \cdot \sin\theta \cdot \sin(\delta+\phi) \cdot \cos\beta_k - \sin\delta \cdot \cos(\delta+\phi) \cdot \sin\beta_k} \right]$$

### 3 结 论

通过提取研究对象几何数学模型,选择航迹坐标系、机体坐标系、飞机铅锤地面坐标系,建立扫描镜坐标系。重点分析了该相机采用的像移补偿策略,采用

(下转第 520 页)



精磨粗糙平面和精磨粗糙球面的面形进行了测试,并给出了结果数据和二维、三维波面图。结果表明:平面镜和精磨粗糙平面的面形比较好,峰谷值为0.077;而精磨粗糙球面面形一般,峰谷值为0.520。

#### 参考文献:

- [1] KWON O S, WYANT J C, HAYSLETT C R. Rough surface interferometry at 10.6  $\mu\text{m}$  [J]. Applied Optics, 1980, 19 (11): 1862- 1869.
- [2] DESTEFANO P R, WESTERN A B, STAHL H P, et al. Design review of an infrared phase - shifting interferometer [C]// Proceedings of SPIE, Optical Design and Processing Technologies and Applications, 1992, 1779: 35- 46.
- [3] VERMA K, HAN B. Far -infrared Fizeau interferometry [J]. Applied Optics, 2001, 40 (28) : 4891- 4897.
- [4] FURUYA A. Design of interferometer [C]// Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications, 1990, 1320 : 478- 482.
- [5] AI C. IR interferometers using modern cameras [C]// Proceedings of SPIE, Optical Manufacturing and Testing II, 1997, 3134 : 461- 464.
- [6] CHEN Jin-bang, CHEN Lei, WANG Qing, et al. A large aperture phase-shifting CO<sub>2</sub> laser interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers (陈进榜, 陈磊, 王青, 等. 大孔径移相式 CO<sub>2</sub> 激光干涉仪. 中国激光), 1998, 25(1): 31- 36.
- [7] CHEN Lei, GAO Zhi-shan, HE Yong. Focal length measurement of infrared lenses [J]. Acta Photonica Sinica (陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量. 光子学报), 2004, 33(8): 986- 988.
- [8] CHEN Lei, WANG Qing, ZHU Ri-hong. Measurement of the homogeneity of refractive index of the germanium crystal using IR interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers (陈磊, 王青, 朱日宏. 使用红外干涉仪测量锗材料折射率均匀性. 中国激光), 2005, 32(3): 404- 406.
- [9] HE Yong, CHEN Lei, WANG Qing, et al. Twyman -Green infrared phase-shifting interferometer and application [J]. Infrared and Laser Engineering (何勇, 陈磊, 王青, 等. 移相式泰曼-格林红外干涉仪及应用. 红外与激光工程), 2003, 32(4): 335- 33.
- [10] LANGE S R. Alignment System And Method For Infrared Interferometer: United States Patent, 5055695 [P], 1991.

(上接第504 页)

坐标变换方法先后求出了目标在扫描镜坐标系下的速度  $V_s$ , 视轴长度  $L$  和目标像在机体坐标系下的像移速度  $V_i$ 。讨论了像面旋转机构在异速像移补偿中的作用, 并推导出了其位置角与飞机姿态角和扫描角等之间的数学关系表达式, 与扫描头俯角补偿角速度  $\omega_i$  和扫描镜位角补偿角速度  $\omega_w$  一起作为本相机的像移补偿公式, 对上述 3 个公式进一步简化, 可作为实际像移补偿公式, 为相机实现实时像移补偿提供了重要的理论根据。

#### 参考文献:

- [1] LAREAU A G, PARTYNSKI A. Dual band framing cameras: technology and status [C]// Proceedings of SPIE Airborne Reconnaissance XXIV, 2000, 4127: 148- 156.
- [2] PARTYNSTI A J, LAKE C. Dual Band Framing Reconnaissance Camera. USA: 6,694,094[P]. 2004.
- [3] LAREAU A G. Flight Demonstration of the CA-261 Step Frame Camera [C]// Proceedings of SPIE, Airborne Reconnaissance XXI, 1997, 3128: 17- 19.
- [4] ZHANG Shu-qing, DING Ya-lin. Computing aerial camera s image plane revolution by coordinate conversion [J]. Optical Instrument (张树青, 丁亚林. 应用数学坐标变换方法计算航空相机像面旋转. 光学仪器), 2007, 29(1): 22- 26.
- [5] National Standards: GB/T 14410.6-93 (中华人民共和国国家标准: GB/T 14410.6- 93) [S], 1993.
- [6] BROCKHAUS R. Flight Control [M]. Translated by JIN Chang-jiang, XIAO Ye-lun. Beijing: National Defence Industry Press (鲁道夫 布罗克豪斯. 飞行控制. 金长江, 肖业伦, 译. 北京: 国防工业出版社), 1999.
- [7] ZHAI Lin-pei, LIU Ming, XIU Ji-hong. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering (翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算. 光学精密工程), 2006, 14(3): 490- 494.
- [8] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Engineering Optics [M]. Beijing: Mechanism Industry Press (郁道银, 谈恒英. 工程光学. 北京: 机械工业出版社), 2007: 39- 41.
- [9] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [C]// Proceedings of SPIE, Airborne Reconnaissance XXII, 1998, 3431: 96- 107.
- [10] AUGUSTYN T. KS-146A Camera development and flight test results [C]// Proceedings of SPIE, 1984, 496: 50- 55.