

文章编号 1004-924X(2007)11-1789-07

# 凝视模式下的画幅相机两轴像移补偿

张树青<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 于春风<sup>1</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:**通过斜视画幅相机的几何模型,选择载机相关坐标系,建立了计算目标航迹速度到像面坐标系下像移速度的数学模型。通过坐标变换将航迹速度(目标在航迹坐标系下的速度)转换至机体坐标系下的速度矢量,最终至补偿坐标系下的运动矢量;计算视轴长度,得到了扫描镜补偿角速度。最后,阐述了像面旋转机构在像移补偿中的作用,并给出了具体位置角计算公式。提出的采用扫描镜和像面旋转机构相结合的方案实现了凝视工作模式下的画幅相机像移补偿,利用坐标变换计算出的相应量,可为将来画幅相机在该模式下的像移补偿工程应用提供必要的参考。

**关键词:**斜视航空相机;凝视模式;像面旋转机构;像移补偿

**中图分类号:**V248.3 **文献标识码:**A

## Attitude compensation of frame aerial camera based on spot mode

ZHANG Shu-qing<sup>1,2</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, YU Chun-feng<sup>1</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:** The spot mode is one of the operation methods used in frame aerial cameras. The mode can point at interest objects via rotating scan mirror in position angle and depression angle directions and can view objects from different directions. In this paper, the geometrical model of a camera is presented and the relative coordinate axes are chosen. Then, a mathematical model for computing the image velocity from track coordinate system to image plane coordinate system is established. To compute the compensation velocity, the object velocities under aircraft coordinate axes and the velocities under compensation coordinate axes are computed and the visual axis length is also calculated, then the compensation angle velocity is obtained. Finally, the image plane revolution mechanism's function is explained in detail. The scan mirror and image plane revolution mechanism are incorporated in frame attitude compensation method based on spot mode. The numerical values calculated by coordinate conversion will provide the references for IMC engineering application.

**Key words:** oblique aerial camera; spot mode; scan mirror; line of sight; coordinate conversion; image plane revolution mechanism; attitude compensation

收稿日期:2007-07-22;修订日期:2007-10-18.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)

## 1 引言

自动操作模式,曲线跟踪模式和凝视模式<sup>[1]</sup>是斜视画幅遥感相机三种常用的工作模式。在航拍时,有时目标前方有物体遮挡或被伪装,为获得感兴趣目标的详细信息,可采用多方位、多幅拍摄的方法,即用凝视工作模式来获取目标信息。在自动操作模式下,扫描镜一般仅在相机俯角方向上做步进扫描运动,前向像移补偿是通过位角摆动实现的;在曲线跟踪模式下,仅在俯角变化范围(为拍摄曲线状目标,如弯曲河流等)内较自动操作模式有调整;在凝视模式下,为了瞄准地面上一个目标,扫描镜在位角和俯角方向都要改变。本文采用扫描镜、像面旋转机构和快门帘缝相结合的方案实现像移补偿。控制像面旋转机构使帘缝与像移在胶片上的投影矢量相平行,保证异速像移补偿不失真;计算目标相对补偿坐标系的速度矢量和视轴长度后,解出扫描镜位角和扫描头俯角补偿角速度。

## 2 坐标系与相机数学模型的建立

### 2.1 坐标系选择<sup>[2]</sup>

凝视工作模式示意图如图 1 所示。

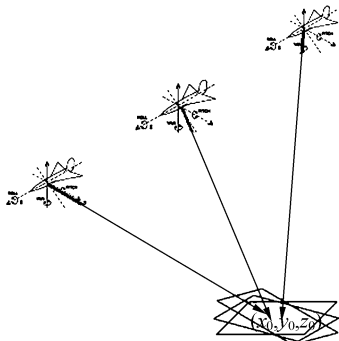


图 1 凝视工作模式示意图

Fig. 1 Spot mode diagram

为研究需要,建立以下几个笛卡尔坐标系:

地面固定坐标系( $x_0, y_0, z_0$ ):原点和三个坐标轴均相对于地面固定不动的坐标系;

铅锤地面固定坐标系( $x_g', y_g', z_g'$ ):地面固定坐标系之一,其 $z_g'$ 轴铅锤向下;

飞机牵连铅锤地面坐标系( $x_g, y_g, z_g$ ):原点固定于飞机重心,每个坐标轴方向均与 $x_g', y_g', z_g'$ 相同的坐标系;

机体坐标系( $x, y, z$ ):固定在飞机上的坐标系,其原点通常位于飞机的重心,三坐标轴定义: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下方的坐标轴;

航迹坐标系( $x_k, y_k, z_k$ ):原点通常固定于飞机的重心,其 $x_k$ 轴沿航迹速度的方向, $z_k$ 轴在包含 $x_k$ 轴的铅锤面内,垂直于 $x_k$ 轴,指向下方, $y_k$ 轴垂直于 $z_k, x_k$ 平面,指向右方。

### 2.2 飞机姿态定义<sup>[3]</sup>

为计算像移速度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,如图 2 所示。

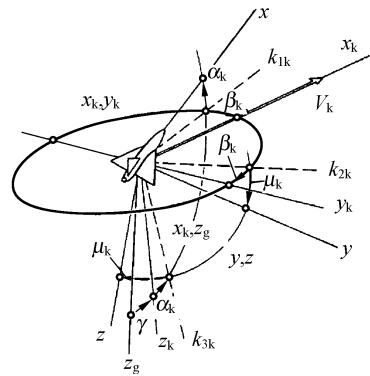


图 2 航迹坐标系相对于机体坐标系旋转

Fig. 2 Revolution between flight-path axis system and body axis system

航迹侧滑角:用 $\beta_k$ 表示,转动轴为 $z_k$ ;

航迹迎角:用 $\alpha_k$ 表示,转动轴为 $k_{2k}$ ;

航迹倾斜角:用 $\mu_k$ 表示,转动轴为 $x$ 。

关于转角正负定义同参考文献[2]。

为计算视轴长度,选择机体坐标系和飞机牵连铅锤坐标系,如图 3 所示。

偏航角:机体纵轴在水平面上的投影与 $x_g$ 轴的夹角,用 $\psi$ 表示,转动轴为 $z_g$ ;

俯仰角:机体纵轴与水平面的夹角,用 $\theta$ 表示,转动轴为 $k_2$ ;

滚转角:机体竖轴与过纵轴的铅锤平面的夹角,用 $\varphi$ 表示,转动轴为 $x$ 。

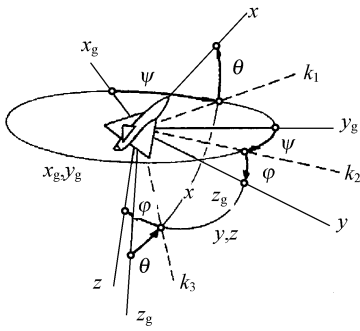


图 3 机体坐标轴系相对飞机牵连铅锤地面坐标轴系旋转

Fig. 3 Revolution between body axis system and aircraft-carried normal earth axis system

### 2.3 相机数学模型

整个模型可分为三个部分:(1)扫描机构部分,该部分可提供步进扫描运动,有两个自由度;(2)稳定部分,包括镜头、折叠镜 1 和折叠镜 2;(3)偏流部分,可绕像面坐标系  $z'$  轴旋转。在每幅目标曝光期间,第二部分相对飞机静止不动。几何关系如图 4 所示。

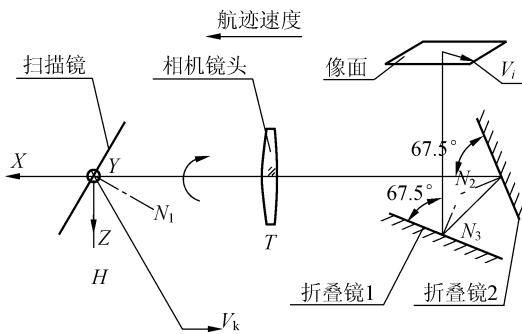


图 4 斜视画幅相机数学模型

Fig. 4 Mathematic model of oblique aerial frame camera

机体坐标系( $XYZ$ ):原点为镜头光轴与扫描镜交点, $X$ 轴与镜头光轴重合,方向飞行前方为正; $Y$ 轴平行两折叠镜,垂直纸面向里(本文提到的笛卡尔坐标系均遵守右手螺旋定则)。

扫描镜坐标系( $X_s Y_s Z_s$ ):坐标原点与机体坐标系原点重合, $Y_s$ 位于扫描镜面内,是扫描镜位角旋转轴, $Z_s$ 与扫描镜成  $45^\circ$ ,用右手定则判定  $X_s$ 。如图 5 所示。

以下物理量定义为:

相机视轴:与像面任意一点关于相机光学系

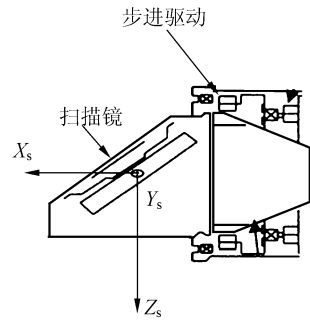


图 5 扫描头组件原理图

Fig. 5 Scan mirror diagram

统共轭的地面目标点和扫描镜坐标系原点之间的连线定义为该点的视轴,符号为  $L$ ,为标量;

扫描角:相机视轴与扫描镜坐标系  $X_s O Z_s$  所成锐角,用  $\delta$  表示;

相机位角:扫描镜坐标系  $-Z_s$  与机体坐标系  $YOZ$  面所成锐角,用  $\eta$  表示。

补偿坐标系:由扫描镜坐标系绕其位角轴位角变化方向旋转  $\eta$ (反射镜旋转一个角度,为保证出射光线不变,入射光线以两倍角度同方向旋转<sup>[4]</sup>),得到的坐标系  $X_c Y_c Z_c (Y_c = Y_s)$ 。

图 4 中的相关数学参量:

$$T = \frac{f'}{L} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & -1 & \\ & & -1 \end{pmatrix} \text{ (镜头坐标变换矩阵);}$$

$$N_0 = \left( -\sin \frac{\pi}{4} \quad 0 \quad \cos \frac{\pi}{4} \right)^T \text{ (初始时刻扫描镜法线向量);}$$

$$N_2 = \left( \cos \frac{\pi}{8} \quad 0 \quad \sin \frac{\pi}{8} \right)^T \text{ (折叠镜 2 法线向量);}$$

$$N_3 = \left( -\sin \frac{\pi}{8} \quad 0 \quad -\cos \frac{\pi}{8} \right)^T \text{ (折叠镜 1 法线向量)。}$$

初始时刻,扫描镜与  $XOZ$  面垂直,并与  $XOY$  面成  $45^\circ$ ,此时扫描镜坐标系与机体坐标系重合。

扫描镜坐标系与机体坐标系之间的关系:扫描镜相对飞机只有两个自由度,沿位角转动和俯角转动。参看图 5,扫描镜位角运动是绕自身  $Y_s$  位角轴旋转,俯角变化是绕相机俯角轴,即机体坐标系  $X$  轴,这是扫描镜运动特征,  $X_s Y_s Z_s$  固定在扫描镜上,凝视工作模式中,扫描镜位角和俯角均发生变化,因此计算像移矢量时涉及坐标变换矩阵是否与扫描镜位角、俯角旋转次序有关的问题,下文将给予充分证明。

### 3 凝视目标在不同坐标系的运动速度计算

#### 3.1 位角旋转与俯角旋转顺序问题

由机体坐标系  $XYZ$ (开始时  $XYZ$  与  $X_s Y_s Z_s$  重合)到  $X_s'' Y_s'' Z_s''$  只有两个途径:

(1)先俯角转动后位角转动,  $X_s Y_s Z_s$  绕  $X_s$  旋转(正对  $X_s$  正向看逆时针旋转为正,以后凡涉及旋转均按此规定)角度  $\delta$  得到  $X_s' Y_s' Z_s'$  ( $X_s' = X_s$ ),再绕  $Y_s'$  轴旋转角度  $\eta$ ,得到  $X_s'' Y_s'' Z_s''$ 。

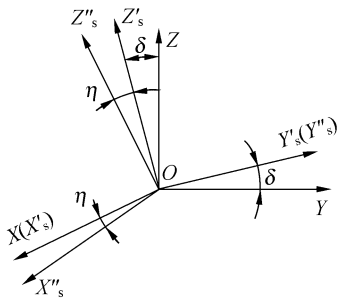


图 6 先俯角再位角坐标系旋转示意图

Fig. 6 Depression revolution then position revolution

设地面一点在机体坐标系下的坐标是  $(x, y, z)$ , 因为途径(1)中每次旋转轴都是当前坐标系中的坐标轴,所以每次只要左乘一个旋转矩阵,即可得到  $(x, y, z)$  在当前坐标系(扫描镜坐标系)下的坐标  $(x', y', z')$ :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

这里令

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta \sin \delta & -\sin \eta \cos \delta \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ \sin \eta & -\cos \eta \sin \delta & \cos \eta \cos \delta \end{bmatrix}$$

(2)先位角转动后俯角转动,  $X_s Y_s Z_s$  (初始时刻与机体坐标系  $XYZ$  重合)绕  $Y_s$  旋转角度  $\eta$ ,得  $X_s' Y_s' Z_s'$ ,再绕  $X_s$  ( $X_s = X$ ,扫描镜在俯角运动是扫描头绕镜头光轴旋转得到的)旋转角度  $\delta$ ,得  $X_s'' Y_s'' Z_s''$ 。由于第二次俯角旋转不是绕当前坐

标系的坐标轴旋转的,所以不能像第一次位角旋转那样直接左乘旋转矩阵。

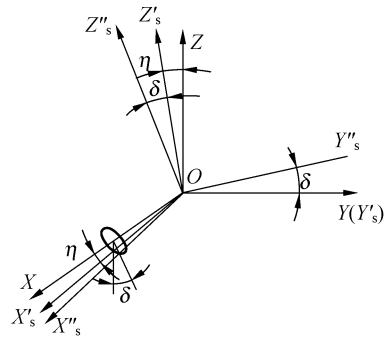


图 7 先位角再俯角坐标系旋转示意图

Fig. 7 Position revolution then depression revolution

空间坐标变换<sup>[5]</sup>的过程:在新坐标系三个坐标轴  $X', Y', Z'$  上分别取  $e_1, e_2, e_3$  单位正向量,它们在初始坐标系的坐标记作  $e_1 = (e_{1x}, e_{1y}, e_{1z})$ ,  $e_2 = (e_{2x}, e_{2y}, e_{2z})$ ,  $e_3 = (e_{3x}, e_{3y}, e_{3z})$ ,则矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \\ e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \\ e_{3x} & e_{3y} & e_{3z} \end{bmatrix}$$

即初始坐标系下的坐标到新坐标系下坐标的转换矩阵。扫描镜先绕  $Y_s$  旋转角度  $\eta$  后,得到扫描反射镜坐标系  $X_s' Y_s' Z_s'$ ,该坐标系坐标轴单位向量在机体坐标系  $XYZ$  下的坐标为  $e_1' = (\cos \eta, 0, -\sin \eta)$ ,  $e_2' = (0, 1, 0)$ ,  $e_3' = (\sin \eta, 0, \cos \eta)$ ;再绕  $X$  轴(俯角)旋转角度  $\delta$ ,得到扫描坐标系为  $X_s'' Y_s'' Z_s''$ ,该坐标系坐标轴单位向量在机体坐标系  $XYZ$  下的坐标为  $e_1'' = (\cos \eta, \sin \eta \cos \delta, -\sin \eta \sin \delta)$ ,  $e_2'' = (0, \cos \delta, -\sin \delta)$ ,  $e_3'' = (\sin \eta, -\cos \eta \sin \delta, \cos \eta \cos \delta)$ ,故机体坐标系下的坐标到当前扫描镜坐标系下坐标的转换矩阵

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} e_{1x}'' & e_{1y}'' & e_{1z}'' \\ e_{2x}'' & e_{2y}'' & e_{2z}'' \\ e_{3x}'' & e_{3y}'' & e_{3z}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \eta & \sin \eta \cos \delta & -\sin \eta \sin \delta \\ 0 & \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \eta & -\cos \eta \sin \delta & \cos \eta \cos \delta \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1$$

$\mathbf{M}_1$  是机体坐标系下的坐标到扫描镜坐标系下的坐标变换矩阵。由此可以得出,对当前采用扫描镜旋转方案,俯角和位角的旋转顺序不影响坐标变换矩阵的结果,以后为方便起见,采用第一种途径坐标变换。

### 3.2 目标在补偿坐标系的运动速度计算

坐标变换流程:目标运动速度(航迹坐标系)→(按  $\beta_k, \alpha_k, \mu_k$  顺序)机体坐标系→(俯角,位角

变换矩阵  $M_1$ )扫描镜坐标系→(位角方向旋转  $\eta$ )补偿坐标系下的目标速度  $V_c$ 。

$$V_c = \begin{pmatrix} v_{cx} \\ v_{cy} \\ v_{cz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{pmatrix} M_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu_k & \sin \mu_k \\ 0 & -\sin \mu_k & \cos \mu_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta_k & \sin \beta_k & 0 \\ -\sin \beta_k & \cos \beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

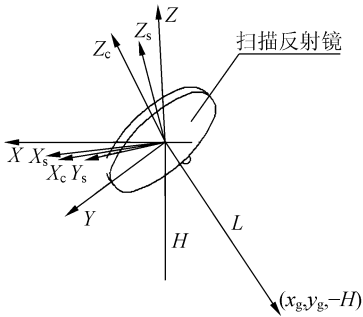


图 8 视轴长度求解

Fig. 8 Visual axis length solution

在获得飞机航迹速度和航迹侧滑角、航迹倾斜角和航迹迎角及位角和俯角信息后,代入式(1)可求得  $v_{cx}, v_{cy}$ 。

为求扫描镜补偿角速度,还必须计算出视轴长度  $L$ ,如图 8 所示。

视轴长度的求解可参考文献[6]。设视轴所指的地面点在飞机牵连铅锤地面坐标系坐标为  $(x_g, y_g, -H)$ ,飞机牵连铅锤地面坐标系  $(X_g Y_g Z_g)$ →偏航、俯仰和滚动(假设按  $\psi, \theta, \varphi$  顺序)→机体坐标系  $(XYZ)$ →经  $M_1$ →扫描镜坐标系  $(X_s Y_s Z_s)$ →位角旋转矩阵→补偿坐标系  $(X_c Y_c Z_c)$ ,此时  $(x_g, y_g, -H)$ 点在补偿坐标系下的坐标为  $(0, 0, -L)$ 。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{pmatrix} M_1 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ -H \end{pmatrix} \quad (2)$$

在已知飞机偏航、横滚和滚动三个姿态角及扫描镜位角和俯角信息后,式(2)是一个三元一次方程组,可以解出  $L$ 。

### 3.3 偏流机构位置角计算

本论文研究对象属胶片型相机,采用了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>[7]</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部分,快门曝光时,两个快门开口部分形成的曝光帘缝通过焦面,使胶卷曝光<sup>[8]</sup>。图 9 中,1、2、3 和 4 代表目标横向视场的四个视场角位置,可以证明这四个位置的像移速

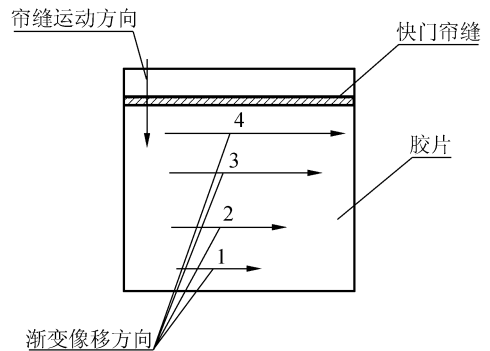


图 9 帘缝快门工作原理

Fig. 9 Principle of exposure slit

度大小是不等的,这种现象被称为异速像移。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  $\omega_x, \omega_y$  旋转。

上述过程必须有个重要前提:快门帘缝必须

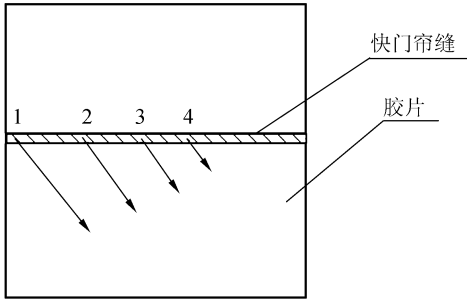


图 10 异速像移补偿失真示意图

Fig. 10 Gradual image motion compensation distortion

与该幅的像移在胶片上的投影方向平行,否则必会引起异速像移补偿失真,参照图 10。

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,这四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是由  $\omega_x, \omega_y$  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<sup>[9-10]</sup>实现的,必须计算偏流机构位置角  $\sigma$ 。 $\sigma$  角的物理意义是像移方向与机体坐标系的  $X$  轴夹角,欲使异速像移补偿不失真,像面旋转机构须相对机体坐标系转过一个  $\sigma$  角,计算公式为:

$$\mathbf{V}_i = \begin{pmatrix} V_{ix} \\ V_{iy} \\ V_{iz} \end{pmatrix} = (\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_3\mathbf{N}_3^T)(\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_2\mathbf{N}_2^T)\mathbf{T}(\mathbf{E} - 2\mathbf{N}_1\mathbf{N}_1^T) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mu_k & \sin \mu_k \\ 0 & -\sin \mu_k & \cos \mu_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_k & 0 & -\sin \alpha_k \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_k & 0 & \cos \alpha_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta_k & \sin \beta_k & 0 \\ -\sin \beta_k & \cos \beta_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -V_k \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

式(3)中,  $\mathbf{N}_1 = (\mathbf{M}_1)^{-1}\mathbf{N}_0$ , 这是因为在计算  $\sigma$  时,以机体坐标系为参考坐标系,利用式(3)求得的  $\sigma$  如下:

$$\sigma = \arctan \frac{V_{iy}}{V_{ix}}. \quad (4)$$

## 4 补偿实现过程

利用式(4)求出的  $\sigma$ , 旋转偏流机构(快门帘缝)至快门帘缝同前向像移方向平行放置;利用式(1)和式(2),可求出扫描镜位角补偿角速度  $\omega_x = \frac{1}{2} \frac{v_x}{L}$  (位角方向上为保证出射光线不变,反射镜以入射光线变化率的  $1/2$  变化,正对  $Y_s$  看,逆时针旋转),俯角补偿角速度  $\omega_y = \frac{v_y}{L}$ 。像面旋转机构的作用是带动胶片相应旋转  $\sigma$ , 避免了异速像移补偿失真。这个动作是在每幅目标曝光前完成的;在曝光期间,扫描镜在位角和俯角方向上按上述角速度旋转,即可实现扫描镜视轴相对凝视

目标静止。

## 5 结论

本文通过对凝视工作模式进行分析,合理选择与机体相关的坐标系,提取相机几何模型。首先,对扫描镜的位角和俯角旋转顺序与坐标变换结果的无关性给予了证明,为后面建立计算目标在像面坐标系的像移速度和在补偿坐标系下的运动速度及计算视轴长度奠定基础。在补偿方案中,采用旋转扫描镜、像面旋转机构和快门帘缝相结合的方案完成凝视工作模式下的像移补偿。最后给出了横向视场中心带目标的补偿角速度,对于横向视场其它目标带的补偿角速度,由于篇幅有限,这里未作详细探讨,在实际航拍中,只要根据飞机姿态,相机位角和俯角信息,同时对横向视场内视轴长度  $L$  进一步实时修正,把横向视场内任意的位置视轴  $L$  数学表达式代入  $\omega_x$  和  $\omega_y$  的计算式中即可求得变速旋转角速度,此时在快门帘缝的配合下,完成该模式下的异速像移补偿。

## 参考文献:

- [1] 王光,王金堂. KS-146 长焦距航空照相机[M]. 北京:中国人民解放军空军司令部情报部,1989.  
WANG G, WANG J T. *KS-146 Long Focal Length Aerial Camera* [M]. Beijing: Staff Department of China, 1989. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家标准:GB/T 14410.1-93[S].  
National standards: GB/T 14410.1-93[S]. (in Chinese)
- [3] 鲁道夫 布罗克豪斯. 飞行控制[M]. 北京:国防工业出版社,1999.  
RUDOLF B. *Flight Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [4] 郝道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.  
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004.
- [5] 蒋大为. 空间解析几何及其应用[M]. 北京:科学出版社,2004.  
JIANG D W. *Space Analytic Geometry and its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 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[J]. 光学精密工程,2006,14(3): 490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
- [7] ANDRE G L. Advancements in E-O framing[J]. *SPIE*, 1998, 3431:96-107.
- [8] AUGUSTYN T. KS-146A camera development and flight test results[J]. *SPIE*, 1984, 496:50-55.
- [9] 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[J]. 光学仪器, 2007, 29(1):22-26.  
ZHANG SH Q, DING Y L. Computing aerial camera's image plane revolution by coordinate conversion[J]. *Optical Instrument*, 2007, 29(1):22-26. (in Chinese)
- [10] 张继超,张洪文,丁亚林. 一种航空画幅相机偏流机构的设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(增):1550-1552.  
ZHANG J CH, ZHANG H W, DING Y L. Design for a kind of aerial camera's drift structure[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(Supp.):1550-1552. (in Chinese)

作者简介:张树青(1982—),男,黑龙江东宁人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事航空遥感器像移补偿技术与光学设计工作;E-mail: ciom. ac@163. com

丁亚林(1964—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事航空遥感相机稳像技术的研究。E-mail: dingyl1964@sohu. com