

文章编号 1004-924X(2006)03-0490-05

# 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算

翟林培, 刘 明, 修吉宏

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**飞机的飞行和姿态变化使航空相机在拍照时产生像移, 必须通过像移补偿来提高照相分辨率。为获得飞机姿态角变化时在倾斜航空相机像面上的像移速度大小, 首先建立姿态变化过程的数学模型, 用坐标系的旋转来等同姿态角的变化, 然后根据坐标系旋转前后相同点坐标值之间的矩阵转换关系, 推算出单个姿态角变化导致的像移速度, 最后将此方法推广到三个姿态角都变化时像移速度的计算。实际应用证明了该方法是一种有效的斜视画幅式航空相机的像移速度计算法, 且直观、简单易行, 还可以扩展到星载相机上。

**关键词:**航空相机; 姿态角; 像移速度; 像移补偿; 坐标系旋转

中图分类号: V447.3 文献标识码: A

## Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera

ZHAI Lin-pei, LIU Ming, XIU Ji-hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** It is necessary to improve the imaging quality and enhance the image resolution of the camera in photographing by Image Motion Compension (IMC), when the image motion is brought out in airplane's continuing flight and altering airplane gesture angles including pitching angle, yawing angle and rolling angle. In this paper, a mathematical model was established in order to obtain the velocity of image motion while the gesture angles were changing, in which it is supposed that the rotation of the coordinate system is equal to the change of the gesture angles. The velocity of image motion was calculated out by analyzing the course of the gesture angle's change and utilizing the matrix transform relation between the different coordinates of the same position after the coordinate system's rotation in changing single angle. The method can be deduced to the situation of all the three angles' changing. The result is proved that it is an efficient method to calculate the image motion's velocity for the oblique frame aerial camera. This method is intuitionistic, practical and easy to be expanded to the camera fixed in satellite also.

**Key words:** aerial camera; gesture angle; image motion velocity; image motion compensation; coordinate system rotation

收稿日期: 2005-11-22; 修订日期: 2006-04-12.

# 1 引言

在航空相机照相时,由于飞行器运动和震动以及相机摆扫等原因致使相机的感光介质在曝光时与被照物的影像存在相对运动,由此带来的成像模糊即为像移。像移按产生原因的不同分为:飞行器的前向飞行运动造成的前向像移;飞行器姿态包括俯仰角、偏流角和滚动角变化带来的姿态变化像移;飞行器震动及气流波动引起的震动像移等。像移的存在极大地影响了成像质量,致使图像模糊不清,分辨力明显下降,要获得高对比度和高清晰的航摄图像必须进行像移补偿。像移补偿主要应用在高精度航空测量与测绘、航空航天军事侦察和空间遥感成像等领域。

像移速度的精确计算是进行像移补偿的必要条件。倾斜航空相机拍照时其任意姿态角的变化都将导致像面中心点对应地面目标的位置变化,利用地面上相同点在旋转前后不同坐标值之间的矩阵关系即可求出像移速度的大小。

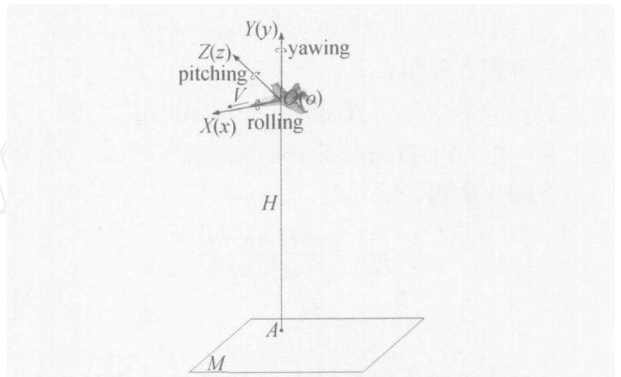
# 2 单姿态角变化引起的像移速度计算

如图 1 中所示,设飞机的航迹坐标系为  $OXYZ$ ,其中  $OX$  轴的正向为飞机的飞行方向, $OY$  轴的正向向上并与地面垂直, $OZ$  轴垂直于飞机的飞行方向且  $ZOX$  平面与地平面平行,坐标系符合右手定则。定义飞机绕  $OX$  轴的转角为滚动角,绕  $OY$  轴的转角为偏流角,绕  $OZ$  轴的转角为俯仰角,转动角的正向即从原点顺着坐标轴正向为顺时针方向。对于倾斜相机来说还存在一个相机的俯角,习惯上相机俯角规定为相机视轴与  $OZ$  轴夹的锐角,当相机俯角为  $90^\circ$  时倾斜相机成为垂直相机。

由于相机是固联到飞机上的,因此不加区分飞机坐标系和相机坐标系,统称为飞机坐标系  $oxyz$ ,其中  $ox$  和  $oz$  轴俗称为飞机的纵轴和横轴。在图 1 称中  $M$  为平行于  $ZOX$  平面的地平面, $oy$  轴的反向与地平面  $M$  的交点为点  $A$ ,即像面中心点对应地面目标为  $A$  点。

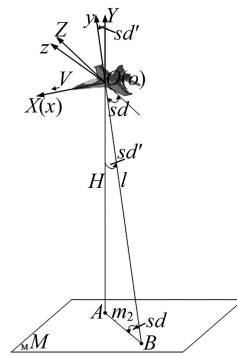
令  $H$  为飞机的航高, $V$  为航速,其正方向与  $OX$  轴的正向相同,则地面相对飞机的速度即地

速为  $-V$ ,又由于地物在像面上所成为倒像,则地速在像面上形成的像移速度方向与  $V$  的方向相同,所以当相机俯角为  $90^\circ$  且飞机的三个姿态角都等于零即坐标系  $oxyz$  和  $OXYZ$  重合时,相机像面上的像移角速度等于  $V/H$ ,而当相机俯角为  $sd$  时,相机的像移角速度等于  $(V/H) \sin sd$ ,见图 1(b),其推导过程如下:



(a) 相机俯角为零

(a) Pitching angle = 0



(b) 相机俯角为  $sd$

(b) Pitching angle =  $sd$

图 1 相机俯角的变化

Fig. 1 Change of camera s pitching angles

由上图可知,相机的俯角为  $sd$  时,等效的飞机滚动角为:

$$sd = 90^\circ - sd, \tag{1}$$

图 1(b)中  $oy$  轴的反向与地平面的交点即目标点由点  $A$  变为点  $B$ ,令点  $B$  在航迹坐标系  $OXYZ$  中的坐标值为  $(0, -H, m_2)$ ,其中  $m_2$  是一个未知数,而在飞机坐标系  $oxyz$  中点  $B$  的坐标值为  $(0, -l, 0)$ , $l$  为相机到目标点  $B$  的距离,则

根据坐标系旋转公式可证明下式成立：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos sd & \sin sd \\ 0 & -\sin sd & \cos sd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -H \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

即：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -H\cos sd + m_2 \sin sd \\ H\sin sd + m_2 \cos sd \end{bmatrix}, \quad (3)$$

得到方程组：

$$\begin{cases} -l = -H\cos sd + m_2 \sin sd \\ 0 = H\sin sd + m_2 \cos sd \end{cases}, \quad (4)$$

联立解得：

$$\begin{cases} m_2 = \frac{-H\sin sd}{\cos sd} \\ l = \frac{H}{\cos sd} \end{cases}, \quad (5)$$

对于不随旋转运动变化的飞机速度矢量  $V$ ，其在旋转后飞机坐标系中的三个速度分量也可由坐标系旋转公式获得如下：

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos sd & \sin sd \\ 0 & -\sin sd & \cos sd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则有：

$$\begin{cases} V_x = V \\ V_y = 0 \\ V_z = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

那么  $ox$  轴方向上的像移角速度为：

$$\dot{x} = \frac{V_x}{l} = \frac{V}{H} \cos sd = \frac{V}{H} \sin sd, \quad (8)$$

而在  $oy$  轴和  $oz$  轴方向上的像移速度为零。

### 3 三姿态角变化引起的像移速度计算

当飞机的三个姿态角都产生变化时，其顺序

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ -H \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

根据坐标旋转变换的定义及坐标旋转公式，可知式(9)成立。

当飞机改变姿态角且相机倾斜时符合上述条

是这样的：首先是绕  $OY$  轴改变偏流角，然后是绕飞机横轴的俯仰角，最后是绕飞机纵轴的横滚角，并且都按照转动角的正向旋转，其过程描述如下：

如图 2 所示，坐标系旋转前在直角坐标系  $OXYZ$  中， $OY$  轴与平行于  $ZOX$  的地平面  $M$  的交点为点  $A$ ， $A$  点的坐标值为  $(0, -H, 0)$ ，坐标系

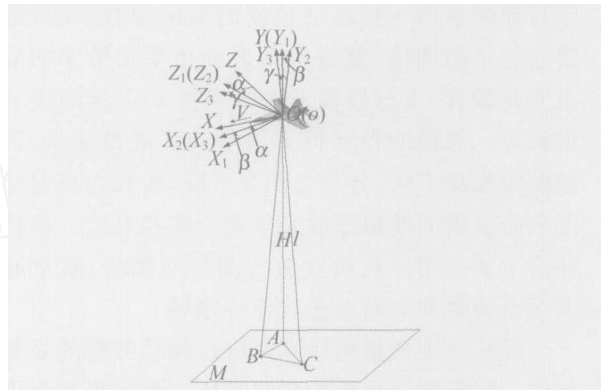


图 2 坐标系旋转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coordinate system's rotation

首先绕  $OY$  轴旋转  $\alpha$  角，形成新坐标系  $OX_1Y_1Z_1$ ，此时  $OY_1$  轴与地平面  $M$  的交点仍为点  $A$ ，然后坐标系  $OX_1Y_1Z_1$  又绕  $OZ_1$  轴旋转  $\beta$  角，形成新坐标系  $OX_2Y_2Z_2$ ，此时  $OY_2$  轴与地平面  $M$  的交点为点  $B$ ，最后让坐标系  $OX_2Y_2Z_2$  绕  $OX_2$  轴旋转  $\gamma$  角，形成新坐标系  $OX_3Y_3Z_3$ ，此时  $OY_3$  轴与地平面  $M$  的交点为点  $C$ ，令点  $C$  在坐标系  $OXYZ$  中的坐标值为  $(m_1, -H, m_2)$ ，而在坐标系  $OX_3Y_3Z_3$  中的坐标值为  $(0, -l, 0)$ ，则对于地面上同一点  $C$  在坐标系旋转前后的坐标值存在如下式所示的坐标转换关系矩阵方程：

件，令飞机偏流角为  $\gamma$ ， $\beta$  为飞机俯仰角， $sd$  为飞机的横滚角，则有：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ -l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos sd & \sin sd \\ 0 & -\sin sd & \cos sd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos p & \sin p & 0 \\ -\sin p & \cos p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos y & 0 & -\sin y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin y & 0 & \cos y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ -H \\ m_2 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

为求式(10)中  $m_1$ 、 $m_2$  和  $l$  三个未知数,将上述矩阵方程逐项展开,得到以下齐次线性方程组:

$$\begin{cases} 0 = m_1 \cos y \cos p - H \sin p - m_2 \sin y \cos p \\ -l = m_1 (\sin y \sin sd - \sin p \cos sd) - H \cos p \cos sd + m_2 (\sin y \sin p \cos sd + \cos y \sin sd) \\ 0 = m_1 (\cos y \sin p \sin sd + \sin y \cos sd) + H \cos p \sin sd + m_2 (\cos y \cos sd - \sin y \sin p \sin sd) \end{cases}, \quad (11)$$

解得:

$$\begin{cases} m_1 = -\frac{H}{\cos p \cos sd} (\sin y \sin sd - \cos y \sin p \cos sd) \\ m_2 = -\frac{H}{\cos p \cos sd} (\cos y \sin sd + \sin y \sin p \cos sd) \\ l = \frac{H}{\cos p \cos sd} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos sd & \sin sd \\ 0 & -\sin sd & \cos sd \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos p & \sin p & 0 \\ -\sin p & \cos p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos y & 0 & -\sin y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin y & 0 & \cos y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

解此矩阵方程得到以下结果:

$$\begin{cases} V_x = V \cos y \cos p \\ V_y = V (\sin y \sin sd - \cos y \sin p \cos sd) \\ V_z = V (\sin y \cos sd + \cos y \sin p \sin sd) \end{cases}, \quad (16)$$

设三轴方向上的像移角速度分别为  $\dot{x}$ 、 $\dot{y}$  和  $\dot{z}$ ,而垂直像平面的像移速度  $\dot{y}$  通常不予考虑,则另外两个像移角速度  $\dot{x}$  和  $\dot{z}$  分别为:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{V_x}{l} = \frac{V \cos y \cos p}{H / \cos p \sin (sd - \alpha)} \\ \dot{z} = \frac{V_z}{l} = \frac{V (\sin y \cos sd + \cos y \sin p \sin sd)}{H / \cos p \sin (sd - \alpha)} \end{cases}, \quad (17)$$

经整理后,得:

令飞机的滚动角为  $\alpha$ ,仍然用  $sd$  表示相机俯角,则有:

$$sd = 90^\circ - \alpha \quad sd + \alpha = 90^\circ \quad (sd - \alpha) = 0, \quad (13)$$

则相机距目标的距离  $l$  为:

$$l = \frac{H}{\cos p \sin (sd - \alpha)}, \quad (14)$$

应当指出,当飞机姿态变化产生偏流、俯仰和滚动角时,飞机的速度方向是不变的,但由于存在姿态角,相机像移补偿速度的方向随姿态变化而变化,像移补偿速度的大小是由飞机速度  $V$  在坐标系旋转后分别在三个轴方向上的分量来决定的,设这三个速度分量分别为  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ ,那么有:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{V}{H} \cos y \cos^2 p \sin (sd - \alpha) \\ \dot{z} = \frac{V}{H} [\sin y \sin (sd - \alpha) + \cos y \sin p \cos (sd - \alpha)] \cos p \sin (sd - \alpha) \end{cases}, \quad (18)$$

当坐标系旋转角的顺序不一样即姿态角变化顺序不同时,上述像移角速度的表达式也会产生变化,另外当坐标系的定义以及旋转的正方向定义不一致的话也会出现不同的结果,这里就不再一一给出。

## 4 结 论

利用飞机姿态角变化和坐标系旋转的关系来计算像移速度大小,对于提高倾斜航空相机的像移补偿精度及摄影分辨力都具有重要意义,同时该方法也可以扩展到星载相机的情况下,不同之

处在于还要考虑地球的转动速度,此时目标速度应是卫星速度在地面的投影和地球转速的合速度,另外星载情况下的地面是近似球面而非平面,所以计算过程存在一些差异。

### 参考文献:

- [1] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation[J]. *SPIE*, 1993, 2023:65-79.
- [2] BROWN E B. V/H image motion in aerial cameras[J]. *Photogrammetric Engineering*, Jan, 1965:308-323.
- [3] 史光辉. 像移对卫星摄影成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(4): 31-34.  
SHI G H. The effect of image motion on the quality of the images formed for the satellite photography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(4): 31-34. (in Chinese)
- [4] FARRIER M, KAMASZ S R, MA F, *et al.* Megapixel image sensors with forward motion compensation for aerial reconnaissance applications[J]. *SPIE*, 1993, 2023:80-92.
- [5] [苏]. E. 谢尔巴科夫 著. 孙振洲, 周桂琴 译. 航空照相机的设计与计算[M]. 吉林: 吉林省科技翻译协会, 1985.  
. E. S Writer. SUN ZH ZH, ZHOU G Q Translator. *Design and calculation of aerial cameras*[M]. Jilin: The Association of Science and Technology Translation in Jilin, 1985. (in Chinese)
- [6] ROSENFELD G H. The problem of exterior in orientation in photogrammetry[J]. *Photogrammetric Engineering*, May, 1958:536-552.
- [7] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏, 等. 航相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 30-34.  
LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al.* Method and application of image motion compensation in aerospace camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 30-34. (in Chinese)
- [8] OLSON G. Image motion compensation with frame transfer CCD's[J]. *SPIE*, 2002, Vol. 4567:153-160.
- [9] NOLAN P. Mathematical analysis of blur on a photographic film caused by motions of a vehicle[J]. *Photogrammetric Engineering*, Dec, 1964:754-764.

**作者简介:**翟林培(1945 - ),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,主要从事航空航天相机的研制工作。