

文章编号 1004-924X(2000)03-0203-05

# 航相机像移补偿计算的坐标变换方法

颜昌翔, 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

**摘要:**由于航空、航天照相要求的分辨力愈来愈高,对像移补偿系统的要求愈来愈高。要求对产生像移速度的诸因素考虑得更为全面,也就是影响像移速度的诸因素的测量精度和像移速度的计算模型要更精确。本文应用坐标变换方法进行了航相机的像移补偿计算。首先归纳了航空航天相机(简称航相机)中像移补偿的原理、技术途径和实现方法。其次给出航相机光学系统和运动形式的齐次坐标变换,实现了像移补偿计算模型的各个基本要素,从而提出了像移补偿计算的一般数学模型,此模型适用于各种航相机的像移速度和像移补偿计算。再次,对应用坐标变换方法进行像移补偿计算作了详细归纳,最后简单讨论了对像移速度矢量公式的简化方法和像移补偿误差计算方法,以期得到满足计算精度的简化表达式。通过计算模型四个环节的变化,可以将此方法应用到各类航相机像移补偿系统。

**关键词:**坐标变换方法;像移补偿;航空航天相机

**中图分类号:**V445.8 **文献标识码:**A

## 1 引言

航空航天照相与一般地面照相的主要区别在于航空航天照相机在工作过程中,始终处于运动状态。当感光胶片(或光敏器件)在一定的曝光时间内,被拍照的景物影像与胶片(或光敏器件)之间存在相对运动,即相对的影像移动,我们简称为像移。

航空、航天照相要求的分辨力愈来愈高(达到微弧度量级或更高亚微弧度量级);焦距愈来愈长(几米,甚至十几米);由此对像移补偿的要求愈来愈高,补偿后的残差,应该是影像分辨力的一个较小的部分,才能获得很好的影像质量;焦距很长后,对航相机载体的姿态稳定度(姿态角速率)的限制愈来愈高,或者说姿态角速率也将是引起像移速度的一个很重要组成部分,成为像移补偿必须考虑的因素之一,要求我们在像移补偿中对产生像移速度的诸因素考虑得更为全面,影响像移速度的诸因素的测量精度和像移速度的计算模型要更精确。甚至对一些较高频率的振动、抖动也应采取必要的有效措施。

## 2 航相机像移补偿原理、技术途径和实现方法

### 2.1 航相机产生像移的诸因素

航空航天相机中产生像移的原因,主要由飞行体对地物的相对运动,姿态(俯仰、偏航和横滚)运动,以及由于飞行体的发动机和相机工作所引起的各种振动等。对于同样的上述原因,不同工作原理的相机(如分幅式、条幅式(又称缝隙式)、全景式)以及它们在飞行体上不同的安装方式(垂直、侧倾、前倾),所产生的像移大小和方向也各不相同。由飞行运动引起的像移,从理论上分析,有的通过补偿可以完全消除,有的只能部分补偿。而飞行体振动所引起的像移可以通过隔震、消震方法以及主动控制方法来解决。<sup>[1-2]</sup>

构成航相机像移因素可以归纳如下:

1) 影响航空相机像移速度的因素:

载机的真航速(矢量);航高;地形高度;姿态;姿态角速率;相机镜头焦距;相机安装精度;抖动等。

2) 影响航天相机像移速度的因素: 航天器的轨道运动速度; 轨道倾角; 轨道高度; 地形高度; 地球自旋运动; 星下点的经度及纬度; 姿态; 姿态角速率; 相机镜头焦距; 相机安装精度; 抖动等。

## 2.2 实现航相机像移补偿的技术途径

实现像移补偿的技术途径多种多样, 其实质都是在记录影像曝光时间内, 使记录影像的介质和运动的影像之间保持相对的静止。一般有以下技术途径:

### 1) 记录介质平移运动

可称为机械像移补偿法, 其实质是在拍照瞬间根据影像的移动速度移动胶片, 使影像在胶片上的像移量为零。对于中心快门的画幅式相机来说, 像面曝光在同一瞬间完成, 因此胶片也只需在曝光的同一瞬间满足补偿条件。对于像面狭缝快门来说, 应该在整个画幅曝光时间内使胶片运动满足补偿条件。而对于全景相机或斜视相机来说, 应该使胶片的补偿运动满足真角度像移补偿条件<sup>[5]</sup>。

### 2) 相机角运动

使相机绕通过摄影物镜后节点的轴线根据补偿条件进行转动。

### 3) 光束角运动

利用相机物镜前方的回转反射镜的回转或楔形镜组的相对运动实现像移补偿。

### 4) 航空航天器角运动

用于航空航天器与相机固结情况, 也可以应用类似于相机角运动通过航空航天器的姿态运动实现像移补偿。

### 5) 电子学方法(同步匹配方法)

采用 TDI CCD 技术后独有的一种补偿方法, 应用行转移的匹配对前向像移进行补偿<sup>[3]</sup>。

## 2.3 实现航相机像移补偿的方法

1) 纵向、横向分别补偿: 应用于画幅式相机, 对纵向和横向像移分别补偿。

2) 主向量补偿: 应用于画幅式相机的整体补偿, 采用转动加平动片台的机构实现。

3) 真角度像移补偿: 应用于全景相机, 采用旋转位于相机镜头前方的光楔或反射镜实现。

## 2.4 像移补偿计算分析常见的方法

像移补偿计算分析常见的方法是各因素独立分析的方法, 在这种分析方法中, 常用正交投影分解方法, 其特点是考虑主要的因素、忽略次要因素, 考虑各因素独立作用分量, 忽略耦合作用分

量。这种方法具有表达式简单、计算简便, 但其补偿误差即补偿后的残差大。对于焦距很长, 影像分辨率很高的情况下, 应用这种方法受到限制, 必须寻求一种高精度的像移补偿分析计算方法, 即本文介绍的坐标变换方法。

## 3 航相机齐次坐标变换矩阵<sup>[4]</sup>

坐标变换是涉及空间位置关系转换的数学处理方法。航相机中用到的坐标变换的实质, 是将物空间坐标通过在不同坐标系之间的转换, 最终求出影像在像面坐标中的位置方程和运动方程。这种转换关系可分解为直角坐标系的平移、以原点为中心的缩放和绕原点的旋转等基本变换, 因而这种转换关系具有一一映射的性质。

本文中坐标系一律采用右手坐标系。为表示坐标变换, 采用齐次坐标变换矩阵是一种很方便的方法:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在  $4 \times 4$  矩阵中, 按虚线划分为 4 部分。其中  $3 \times 3$  部分为旋转和比例部分,  $3 \times 1$  部分为平移部分,  $1 \times 3$  部分为 0,  $1 \times 1$  部分为 1。

其中  $4 \times 1$  矩阵  $[x \ y \ z \ 1]^T$  和  $[x' \ y' \ z' \ 1]^T$  分别表示物空间中物点坐标和它经坐标变换后像空间中像点的坐标, 第四行为 1 表示为物、像点的坐标, 若为 0 则表示由物、像点到物镜后节点的矢量, 即光线(由运算关系知, 对矢量没有平移计算)。

考虑光学系统的成像按高斯公式计算的过程, 物点和像点、入射光线和出射光线以及光学系统均应处于同一坐标系中。如对于摄影物镜, 计算公式是以光轴为坐标系的一轴如  $z$  轴, 物方原点为等效高斯成像系统的物方主点, 像方原点为等效高斯成像系统的像方主点。

光学系统成像的坐标系及物点、像点表示如下:

有限远光点, 表示为:  $[x \ y \ z \ 1]^T$ 。

无限远光点(或光线、矢量), 表示为:  $[x \ y \ z \ 0]^T$ ,  $\mathbf{0}$  表示向量, 式中  $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ 。

### 4 航相机中光学系统成像矩阵

$$M = 1 - 2NN^T \quad (3)$$

此变换矩阵对光线适用。若坐标系原点在反射面上,则对光点的计算也成立,如将坐标系原点选定在平面镜的旋转中心,便于计算。

#### 4.1 摄影物镜光学系统的成像矩阵

以透镜中心为原点,假设物点为  $[x \ y \ z \ 1]^T$ ,像点为  $[x' \ y' \ z' \ 1]^T$ ,设此有光焦度的光学系统参数为:物方焦距  $f$ ,像方焦距  $f'$ ,放大倍率  $\beta = \frac{zf'}{(z+f')}$ 。则:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

#### 4.2 平面镜、棱镜等无光焦度光路反射折转系统的成像矩阵

对平面镜,设其单位法矢量为  $N = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ 0]^T$ ,则变换矩阵为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\gamma)\cos(\varphi) \\ \sin(\gamma)\sin(\varphi) - (n_h + \sin(\alpha)\sin(\gamma)\sin(\varphi) - \cos(\alpha)n_g)\sin(\alpha) \\ n_g + (n_h + \sin(\alpha)\sin(\gamma)\sin(\varphi) - \cos(\alpha)n_g)\cos(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $n_k = n^2 - 1, n_g = \sqrt{n_k + \cos(\gamma)^2}, n_h =$

棱镜是平面镜的组合,对于平行光,可以等效为一个平面镜的作用。

#### 4.3 单光楔等光路微小偏折系统的成像矩阵

##### 4.3.1 单光楔

光楔是小角度偏折系统,将此光楔按图1位置放置,即光楔第一透光面垂直于  $z$  轴而光楔尖端(光楔方向)为  $y$  轴负向(称光楔坐标系)。

假定入射光线为  $[x \ y \ z \ 0]^T = [\sin(\gamma) \ \cos(\varphi) \ \sin(\gamma) \ \sin(\varphi) \ \cos(\gamma) \ 0]^T$ ,其中  $\gamma$  为入射光线与  $z$  轴的夹角,  $\varphi$  为光线矢量在  $xy$  平面投影矢量与  $x$  轴的夹角。若光楔楔角为  $\alpha$ ,光楔材料的折射率为  $n$ ,则出射光线为:

假定光楔在坐标系中绕  $z$  轴旋转  $-\varphi(\varphi = \omega t)$  而得,则偏转后光线在坐标系中的位置可用下式计算:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta\sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 & \theta\cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\sqrt{-n_k + (-\sin(\alpha)\sin(\gamma)\sin(\varphi) + \cos(\alpha)n_g)^2}$   
对方向与  $z$  轴夹角很小(小于  $2^\circ$ )的光线  $[x \ y \ z \ 0]^T, z \approx 1, x \approx 0, y \approx 0$ 。当光楔楔角很小(小于  $2^\circ$ )时,令偏转角  $\theta = (n - 1)\alpha$ ,由(4)得到矩阵表达的偏转后的光线的近似计算公式(经一级近似即忽略二阶小量,误差小于  $0.1\%$ )为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

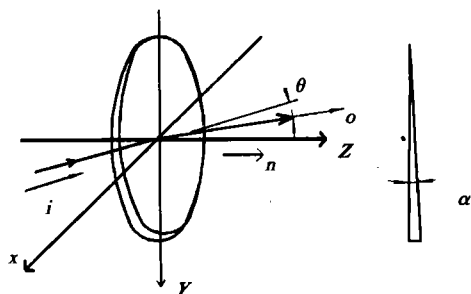
##### 4.3.2 双光楔

若有两个相同的光楔(如图2),平行放置,设光楔1绕  $z$  轴转  $-\varphi_1$  而光楔2绕  $z$  轴转  $-\varphi_2$  而得,则经过此对光楔偏转后的光线在坐标系中的位置可用下式计算:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2\theta\sin(\varphi)\cos(\Delta\varphi) & 0 \\ 0 & 1 & 2\theta\cos(\varphi)\cos(\Delta\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:  $2\varphi = \varphi_1 + \varphi_2, 2\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ 。

令  $\varphi_1 = \varphi_{01} + \omega_1 t, \varphi_2 = \varphi_{02} + \omega_2 t, \omega_1 = -\omega_2 = \omega$ ,则  $\varphi = (\varphi_{01} + \varphi_{02})/2, \Delta\varphi = \omega t + (\varphi_{01} - \varphi_{02})/2$ ,由此可以实现余弦方式的光路偏折。



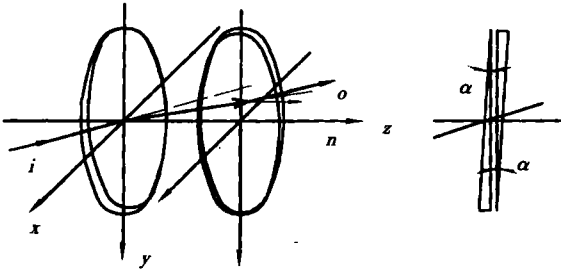


Fig. 2 Two-wedge system

### 5 航相机成像坐标变换模型

航相机成像过程的坐标变换,分为四个阶段:地物到航行轨道的坐标变换  $M_1$ ;航行轨道到相机载体的坐标变换  $M_2$ ;相机载体到相机的坐标变换  $M_3$ ;相机到像面的坐标变换  $M_4$ 。可得到物像点的对应关系式:

$$X' = M_4 M_3 M_2 M_1 X = MX$$

像面上任意点的像移速度的计算如下:

给定  $X' = X'_0, t = t_0$ , 求  $V(X'_0, t_0)$

$$= \left( \frac{d}{dt} X' \right) \Big|_{t=t_0}$$

先求  $M_0 = M \Big|_{t=t_0}, X_0 = M_0^{-1} X'_0$ , 再求  $V = X_0$

$$\frac{dM}{dt} \Big|_{t=t_0} \tag{8}$$

#### 5.1 地物 $Gx_g, y_g, z_g$ 到航行轨道 $Bx_b, y_b, z_b$ 的坐标变换 $M_1$

这个阶段分为航空和航天两类:

##### 1) 航空类:

从地物到飞行航线,由于飞行速度是相对地面的速度,飞行航线坐标系与地面坐标系只考虑平移关系。

##### 2) 航天类:

从地物坐标系到轨道坐标系(如图 3),必须通过地惯坐标系的联系。转换过程包括:地物坐标系到地球坐标系,地球坐标系到地惯坐标系,地惯坐标系到轨道坐标系等三个过程。

地物坐标系  $Gx_g, y_g, z_g, z_g$  轴负向指向地心,  $x_g$  轴平行赤道平面指向东方,  $y_g$  轴位于原点所在经度平面内指向北方,原点  $G$  在地球表面。

地球坐标系  $O_e, x_e, y_e, z_e$ , 固结在地球上,原点  $O_e$  在地心,  $Y_e$  轴指向北极,  $x_e$  与  $z_e$  轴位于赤道平面内,绕  $y_e$  轴以地球自转角速度  $\omega$  旋转。

地惯坐标系  $O_i, x_i, y_i, z_i$ , 原点  $O_i$  在地心,  $y_i$  轴指向北极,  $x_i$  与  $z_i$  轴位于赤道平面内,  $z_i$  轴指向航天

器的轨道平面和赤道平面的交点(降交点),为惯性参考系。

轨道坐标系  $Bx_b, y_b, z_b$ , 原点  $B$  在轨道上,  $z_b$  轴负向指向地心,  $x_b$  轴指向轨道前向,  $y_b$  轴垂直于轨道平面。

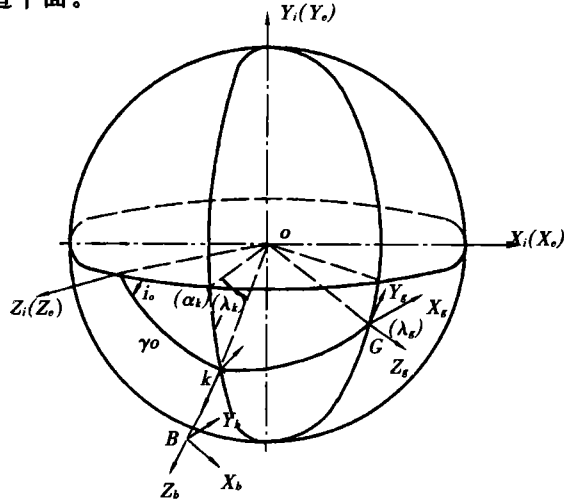


Fig. 3 Aerospace coordinate

#### 5.2 航行轨道 $Bx_b, y_b, z_b$ 到相机载体 $Sx_s, y_s, z_s$ 的坐标变换 $M_2$

航行轨道坐标系到相机载体坐标系的坐标变换是由相机载体的运动姿态所决定。

#### 5.3 相机载体 $Sx_s, y_s, z_s$ 到相机 $Cx_c, y_c, z_c$ 的坐标变换 $M_3$

相机载体到相机的坐标变换由相机在载体上的安装方式及相机相对载体的运动所决定。由于相机相对其载体运动中,平移对成像过程影响不大,所以只考虑转动因素。

#### 5.4 相机 $Cx_c, y_c, z_c$ 到像面 $Px_p, y_p, z_p$ 的坐标变换 $M_4$

相机到像面的坐标变换由相机的光学和机械组件共同决定。这里包括了相机系统采用的(除像面措施以外)一系列像移补偿措施,诸如各类光学式的像移补偿方法。

### 6 公式的简化及误差估计

像移速度的精确公式是相当复杂的。通过引入容许的误差,可以将公式进行简化。由简化公式容易看出像移规律,从而决定相应的补偿措施。当然,应用简化后公式有限制,因而需要采用误差估计的办法决定简化公式的应用范围。

#### 6.1 航相机系统的像移速度及像移补偿误差的计算详细表达式的推导

应用前面所述计算方法,就可以得到航相机系统的像移速度的计算详细表达式。推导过程应

用 MATLAB 数学软件可以很容易实现。另外,给出像移计算的各个参数的测量或估计误差,根据像移速度的计算详细表达式,应用微分法可以给出计算像移速度的估计误差的计算表达式。

## 6.2 参数误差对像移速度计算误差的影响

按随机误差的合成方法,根据估计误差的计算表达式,可以得出各参数的误差对整体估计误差的影响大小,从而为像移补偿的整体误差的分配提供依据。

误差分配的方法,根据影响整体误差的各参

数的误差大小,以及误差影响整体误差的各参数误差的系数大小,来对未知参数误差进行调整的方法。

## 7 结论

应用坐标变换方法建立了航相机像移补偿计算精确数学模型,根据此模型可以对航相机像移补偿进行高精度分析。

## 参考文献:

- [1] 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].长春:吉林省出版局出版,1980.
- [2] 利文斯顿 罗伯特 G 等.航空摄影机[M].北京:测绘出版社,1985.
- [3] Wang Haining, Wei Zhonghui. Experiment and research of TDI CCD camera[C]. Proc. SPIE, 1996, 2894, 251-259.
- [4] 王家骥编著.光学仪器总体设计[M].长春:中科院长春光机所研究生部,1998.
- [5] Es'kov D N, Druz'I I. Methods of compensating the image motion velocity for oblique panoramic photography[J]. Sov. J. Opt Technol. 1977, 44(12):745-747.

## Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system

YAN Chang-Xiang, WANG Jia-Qi

(Space Optics Department, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Changchun 130021, China)

**Abstract:** As the resolving power of aerospace photography is demanded to be higher, the precision of IMC (Image Motion Compensation) system must be higher. For this reason, the sources for inducing image motion need to be considered more comprehensively. Namely, the measurement precision for all factors that affect the IM and the calculating modle for IM should be more accurate. In this paper, the coordiante transform methods were used to calculate the IMC of aerospace camera system. Firstly, the theory, the technical ways and the methods for realizing IMC in aerospace camera system were concluded; Secondly, in form of homogeneous matrix, all the coordinate transformation were summed up, from which all the basic parts of IMC mathematics calculation model were realized and a general mathematics model for calculating IMC was put forward; Thirdly, the calculation of IMC using coordinate transform methods were expatiated. Finally, the methods of simplifying the vector expression of IM velocity and calculating the error of IMC were discussed birefly, so as to obtain the precise and simplified expressions of IM velocity and error estimation of IMC. Through changing the four parts of the calculation model, the method can be applied to IMC systems of all sorts of aerospace cameras.

**Key words:** coordinate transform methods; IMC; aerospace camera system

**作者简介:** 颜昌翔(1973-),男,湖北省洪湖市人,1995年毕业于长春光学精密机械学院光学工艺及测试专业,获工学学士。1998年毕业于浙江大学光学仪器专业,获工学硕士。现为中科院长春光学精密机械与物理研究所机械制造及自动化专业博士研究生。