

应用动态物像矢量共轭关系计算 航天相机像移

周庆才 王志坚

(长春理工大学研究生部 长春 130022)

摘 要

首先建立了航天相机的坐标系, 明确了物像矢量之间的几何对应关系; 其次定义了航天相机中的作用矩阵关系式; 最后根据静态以及动态的物像矢量共轭关系, 进行了航天相机的像移计算分析, 结果表明该方法概念简洁, 公式意义明确, 结果与齐次坐标变换方法结论一致.

关键词 物像共轭; 航天相机; 像移计算

1 引言

像移补偿是航天相机关键技术之一, 航天相机尤其是高分辨力航天相机必须有高精度的像移补偿系统才能保证好的成像质量. 动态光学^{[2]-[6]}是研究光学系统及元件动态成像特性的一门科学. 动态光学系统是指光学系统元件运动或相互间运动的系统. 动态光学理论主要应用于稳像光学系统的分析. 稳像光学系统是像相对某参照标记稳定的光学系统, 又分为绝对稳像光学系统和相对稳像光学系统, 即像相对基准坐标系(如大地坐标系)和相对接收器件稳定的光学系统. 航天相机像移补偿系统属于相对稳像光学系统, 即像相对相机底片(接收器件)稳定. 为了获得高精度的像移速度矢, 可以采用齐次坐标变换的方法^[1]. 本文介绍一种基于动态光学理论的计算方法.

2 基本概念

2.1 坐标系

地惯坐标系、轨道坐标系、地物坐标系及卫星坐标系, 如图1所示.

(1) 地惯坐标系 $Ox_i y_i z_i$: 轨道降交点为 K , 地球中心为 O , 以 $\overline{OK}$ 为 z_i 轴, 地球自转轴为 y_i , 建立一直角坐标系 $Ox_i y_i z_i$. 以此坐标系为地球自转的起始点.

(2) 轨道坐标系 $Ox_e y_e z_e$: 以 $\overline{OK}$ 为 z_e 轴, 卫星轨道面法线方向为 y_e 轴, 建立直角坐标系 $Ox_e y_e z_e$, 以此作为卫星绕地球转动的原始坐标.

(3) 地物坐标系 $Dx_d y_d z_d$: 随地球自转的坐标系, 原点取在星下点 D , $\overline{OD}$ 为 z_d 轴, y_d 轴与 y_i 轴平行, 建立直角坐标系 $Dx_d y_d z_d$.

2002-06-16 收到原稿, 2002-11-05 收到修定稿

(4) 卫星坐标系 $Bx_b y_b z_b$ 或 $D'x_b y_b z_b$: 绕卫星转轴 y_e 转动的坐标系. B 为卫星相机镜头的等效节点, D' 为底片上星下点 D 的像. $\overline{OB}$ (或 $\overline{OD'}$) 为 z_b 轴, y_b 轴与 y_e 轴平行.

2.2 航天相机的作用矩阵

1. 物、像坐标基底转换矩阵 R_0

R_0 可以反映静态下物像方向共轭关系,

$$(i' j' k') = (i j k) R_0,$$

$$R_0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2. 倍率矩阵 B

B 反映静态下物像的伸缩变换,

$$B = \begin{bmatrix} |\beta| & 0 & 0 \\ 0 & |\beta| & 0 \\ 0 & 0 & |\beta| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f'}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f'}{H-h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f'}{H-h} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中, H 为卫星至海拔零位线的高度, h 为星下点 D 的海拔高度.

3. 作用矩阵 R

R 反映静态下物像方向共轭和伸缩变换的矩阵,

$$R = BR_0 = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f'}{H-h} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f'}{H-h} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f'}{H-h} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3 航天相机像移补偿公式

航天相机的像移补偿公式主要用来计算相机在运动状态下胶片相对相机底片框的运动量, 以便控制胶片的运动.

以卫星坐标系 $Bx_b y_b z_b$ 为基础建立物像坐标系, 以等效节点 B 为原点. 物坐标为 $Bxyz$, 像坐标为 $Bx'y'z'$. 如图 2 所示.

3.1 动态物像矢量共轭关系

以 B 为物像坐标原点. 当卫星在 t_0 时刻转到某位置时, 地球表面上一点 A 成像于卫星相机底片的 A' 点. 分别用物矢量 $\mathbf{A}$ 和像矢量 $\mathbf{A}'$ 表示. 经过 t 时间后, 卫星绕 y_e 轴转 Ωt 角, 此时等效节点变为 B_m . 在运动后的物像坐标分别为 B_mxyz 和 $B_mx'y'z'$. 底片框中心由 D' 转动到 P' , 与之共轭的地面点为 P 点, P 点相当于星下点 D 绕 y_e 轴转动 Ωt 角. D 点位移用矢量 $\mathbf{P}$ 表示, $\mathbf{P} = \overline{DP}$; D' 点位移用矢量 $\mathbf{P}'$ 表示, $\mathbf{P}' = \overline{D'P'}$.

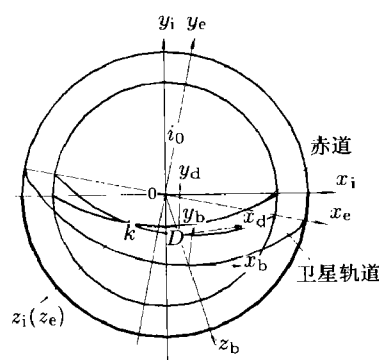


图 1 坐标系示意图

Fig.1 Illustration of coordinate

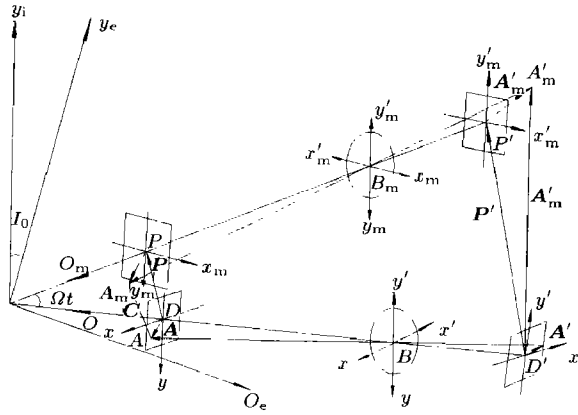


图 2 矢量共轭关系示意图

Fig.2 Illustration of conjugate vectors

由于地球自转, t 时刻后, 地球表面上的 A 点转到 A_m , 其位移用矢量 C 表示, $C = AA_m$, 与 A_m 共轭的像点为 $A_{m'}$, 其在静像面坐标 $D'x'y'z'$ 内用 A'_m 表示, 在动像面坐标 $P'x'_my'_nz'_m$ 内用 $A'_{mP'}$ 表示.

(1) 物点 A_m 在动物面坐标 $Px_my_mz_m$ 内标定, 像点 A'_m 在动像面坐标 $P'x'_my'_nz'_m$ 内标定:

$$A'_{mP'} = BA_{mP}. \quad (4)$$

由矢量四边形 DPA_mA 可知,

$$A_{mP} = A_P + C_P - P_P. \quad (5)$$

由矢量三角形 $D'P'A'_m$ 可知,

$$A'_{mP'} = A'_{mD'} - P'_{D'}. \quad (6)$$

(2) 物矢量 A_m 在静物面坐标 $Dxyz$ 内标定, 像矢量 A'_m 在静物面坐标 $D'x'y'z'$ 内标定:

$$\begin{cases} A_{mD} = T^{-1}(y_{eD}, \Omega t) A_{mP}, \\ A'_{mD'} = T^{-1}(y_{eD'}, \Omega t) A'_{mP'}. \end{cases} \quad (7)$$

式中, $T^{-1}(y_{eD}, \Omega t)$ 为绕 y_e 轴旋转 Ωt 角的旋转矩阵的逆矩阵, y_e 轴在 $Dxyz$ 坐标内标定; $T^{-1}(y_{eD'}, \Omega t)$ 为绕 y_e 轴旋转 Ωt 角的旋转矩阵的逆矩阵, y_e 轴在 $D'x'y'z'$ 坐标内标定.

将 (7) 式代入 (4) 式, 可得:

$$A_{mP'} = T(y_{eD'}, \Omega t) B T^{-1}(y_{eD}, \Omega t) A_{mP}. \quad (8)$$

将 (5), (6) 式代入 (8) 式可得:

$$A'_{mD'} - P'_{D'} = T(y_{eD'}, \Omega t) B T^{-1}(y_{eD}, \Omega t) (A_D + C_D - P_D). \quad (9)$$

(3) 物像矢量均在静像面坐标 $D'x'y'z'$ 内标定.

由动态光学可知,

$$T(y_{eD}, \Omega t) R_0 = R_0 T(y_{eD'}, \Omega t). \quad (10)$$

即

$$T^{-1}(y_{eD}, \Omega t) = R_0 T^{-1}(y_{eD'}, \Omega t) R_0^{-1}, \quad (11)$$

且

$$(A_D + C_D - P_D) = R_0 (A_{D'} + C_{D'} - P_{D'}). \quad (12)$$

将 (11), (12) 式代入 (9) 式, 可得:

$$A'_{mD'} - P'_{D'} = T(y_{eD'}, \Omega t) R T^{-1}(y_{eD'}, \Omega t) (A_{D'} + C_{D'} - P_{D'}).$$

去掉下角标 “D”, 规定物像矢量及转轴均在 $D'x'y'z'$ 内标定

$$A'_m - P' = T(y_e, \Omega t) R T^{-1}(y_e, \Omega t) (A + C - P). \quad (13)$$

即

$$A'_m - P' = R(A + C - P),$$

所以,

$$A'_m = P' - RP + R(A + C). \quad (14)$$

(14) 式为航天相机在正确状态下的物像共轭关系式, 其中原点项反映位置共轭关系, 旋变项反映方向共轭关系.

卫星有 3 种运动姿态, 即偏航、俯仰和横滚. 这 3 种运动用矩阵 S 代表新坐标相对原坐标的变化, 则

$$S = S(\theta, \varphi, \psi). \quad (15)$$

相机的此 3 种姿态运动可视为等效节点 B 的平移和绕 B 的旋转, 由动态光学知像面上产生的像点位移对于航天相机而言等于等效节点的位移 B . 将此项加到 (14) 式中,

$$A'_m = P' - RP + R(A + C) + B. \quad (16)$$

3.2 底片框的运动

(1) 正确姿态下底片框的运动为

$$A'_D = P' + T(y_e, \Omega t) A' = P' + T(y_e, \Omega t) RA. \quad (17)$$

(2) 有姿态角后底片框的运动为

$$A'_D = P' + B + D + T(y_e, \Omega t) RA. \quad (18)$$

式中, D 为由姿态角引起的像面坐标运动,

$$D = \begin{bmatrix} D_{x'} \\ D_{y'} \\ D_{z'} \end{bmatrix} = (S - E) \begin{bmatrix} \beta A_{x'} \\ \beta A_{y'} \\ f' \end{bmatrix}. \quad (19)$$

式中, E 为单位矩阵.

3.3 像点相对底片框的位移

像点相对底片框的位移 $\Delta A'$ 为

$$\Delta A' = A'_m - A'_D = R[E - T(y_e, \omega t)]A + RC - RP - D. \quad (20)$$

式中,

$$A = (i' \ j' \ k') \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ R + h \end{bmatrix}, \quad (21)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{x'} \\ C_{y'} \\ C_{z'} \end{bmatrix} = [T(y_i, \omega t) - E] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ R + h \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$y_i = \begin{bmatrix} y_{ix'} \\ y_{iy'} \\ y_{iz'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\gamma_0 + \Omega t) \sin i_0 \\ \cos i_0 \\ -\sin(\gamma_0 + \Omega t) \end{bmatrix}, \quad (23)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_{x'} \\ P_{y'} \\ P_{z'} \end{bmatrix} = [T(y_e, \Omega t) - E] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ R + h \end{bmatrix}. \quad (24)$$

(20) 式是各矢量在正确姿态时的像面坐标 $D'x'y'z'$ 内标定, 将其在已有姿态角的像面坐标内标定, 则

$$\Delta A'' = S^{-1} \Delta A'. \quad (25)$$

计算可得,

$$\Delta A'' = S^{-1} R \left([T(y_i, \omega t) - T(y_e, \Omega t)] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ R + h \end{bmatrix} + [E - S] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H - h) \end{bmatrix} \right). \quad (26)$$

3.4 像移速度

取 $t_0 = 0$, 对像移 $\Delta A''$ 对时间微分, 即可得到像移速度公式, 式中 $\Delta A'_z$ 为离焦量, 由于物距很远, 此项并不大, 且无法补偿, 故主要是计算 $V_{x''}$ 和 $V_{y''}$.

4 结束语

本文运用动态光学理论论述了航天相机在沿轨道运行时, 地球表面物体在航天相机像面的像相对底片框的位移和运动速度, 从而探讨像移补偿问题. 文中并没论及补偿方法(光学法、机械法、电子法等). 同时也没涉及相机振动、变形等的稳像问题. 所得结果与采用齐次坐标变换方法结论一致, 充分证明了本方法的适用性.

参 考 文 献

- [1] Yan Changxiang, Wang Jiaqi. Method of coordinate transformation for IM & IMC calculation in aerospace camera system. *Opt. Precision Eng.*, 2000, **8**(3):203—207, in Chinese (颜昌翔, 王家骥. 航天相机像移补偿计算的坐标变换方法. *光学精密工程*, 2000, **8**(3):203—207)
- [2] Wang Zhijian, Zheng Jianping. The Object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):1—13, in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下物像共轭理论. *长春光学精密机械学院学报*, 1992, **15**(2):1—13)
- [3] Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical, image-stabilization and generalized optical image-stabilization. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):29—37, in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学稳像、广义光学稳像. *长春光学精密机械学院学报*, 1992, **15**(2):29—37)
- [4] Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilizing system. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):38—51, in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学稳像系统. *长春光学精密机械学院学报*, 1992, **15**(2):38—51)
- [5] Wang Zhijian. Application of prism moving theory in optical image-stabilization. *Acta Armamentarii*, 1988, **4**:20—26, in Chinese (王志坚. 棱镜转动定理在光学稳像中的应用. *兵工学报*, 1988, **4**:20—26)
- [6] Zheng Jianping, Wang Peng, Wang Zhijian. Board optical stabilitying image. *SPIE*, 1994, **2321**:532—537
- [7] Sanjib K.Ghosh. Image motion compensation through augmented collinearity. *Opt. Eng.* **24**(6):1014—1017

CALCULATING IMAGE MOTION OF AEROSPACE CAMERA BASED ON DYNAMIC OBJECT-IMAGE CONJUGATE RELATION

ZHOU Qingcai WANG Zhijian

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract

In this paper, the coordinate system of aerospace camera is established. The geometry relation between object and image vectors is made clear. Then operation matrix in aerospace camera is defined. Finally, based on the static and dynamic object-image conjugate relation, image motion in aerospace camera was analysed. The result shows the concise concept and simple expression of this method, which is consistent with uniform coordinate transform method.

Key words Object-image conjugate, Aerospace camera, Calculating image motion