

文章编号 1004-924X(1999)06-0048-08

光学系统动态像点移动的坐标变换法

王 俊 卢 锷 王家骥

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

柳吉华

(吉林市广播电视大学教育处 吉林 130002)

摘 要 以宇宙飞船为载体的航天相机在轨工作过程中,由于受到空间动力学干扰源的作用,飞船、整个光学系统以及光学元件可能会产生振动,并由此引起曝光时间内像点的移动。这些振动必将造成光学系统成像质量的下降。本文探讨了振动过程中像点移动的分析方法——坐标变换法,并利用这种方法计算了航天相机主镜振动时的像点移动。

关键词 光学系统 振动 坐标变换法 像移

中图分类号 TP391.7, TP752.2 **文献标识码** A

1 引 言

随着航天事业的迅猛发展,航天相机的侦察能力逐步提高,相机的静态分辨率越来越高。但在实际使用过程中,一般都不能达到所设计的分辨率。这主要是由于在使用中,相机的分辨率除与本身光学系统有关外,还受到工作环境的制约。在空间的微重力环境下,飞船处于自由状态,对空间干扰非常敏感,轻微的激励便会造成整个系统的振动,而且很难衰减。由于振动的存在,相机的成像过程受到影响,其结果是成像质量的下降。成像质量下降主要有两个方面的原因:其中一方面是曝光时间内像点的移动。设一理想光学系统对一物点进行成像,所成的应该是一个点像,若成像过程中,光学系统或光学元件发生振动,根据几何光学的知识可知,这个点物在像面上的成像位置必将发生变化,也就是点物将在几个位置成像,这将使得本应聚集在一点的光强分布在几个点上,造成光强的幅值降低,而光的分布范围扩大,所成的像对比度降低、分辨率降低。这种情况与实际光学系统对点物成像所成的爱里斑直径增大、亮度降低是等效的。振动造成成像质量下降的另一个原因是振动使光学系统的像差变化。由于光学系统或光学元件的振动,使得相机在照相过程中,光学系统未保持设计时的状态,光学系统的

这种变化大多数情况下是导致成像质量的下降(振动与装调误差抵消的情况有存在的可能性)。

本文主要针对振动过程中像点的移动进行了探讨。对于这个问题,光线追迹法是一个比较成熟的方法,它利用光线传播的基本定律,可以准确的计算出光学系统发生变化时的成像情况。但光线追迹法计算量大,特别是应用于本文要讨论的振动过程中的像点移动问题,显得过于烦琐。动态光学理论^[1]从理论上讲能够计算振动过程中的光学系统成像,但这种方法至今只应用于一些光学元件的简单形式的运动造成的像移,对于复杂的振动形式,这种方法正确的实现是比较复杂的。一种思路比较清晰、运算比较简洁的计算像移的方法——坐标变换法^[2]已经成功的应用于详查相机的像移补偿的计算。这种方法详细分析了从地物到相机像面的坐标变换过程,精确地计算了地球自转以及飞船的轨道运动造成的像点在像面上的移动。本文是对这种方法的进一步深入,把相机的光学系统分解成由几组光学元件组成的系统,建立适当的坐标系及相应的坐标变换关系,得到了光学系统或元件振动过程中的像移的计算方法。

2 地物到成像的坐标变换

航天相机摄影时,从地理坐标系中的地物到像面坐标系中的像,可用一系列的坐标变换过程来描述。而为了确定坐标变换关系,首先建立起合适的坐标系。

2.1 坐标变换过程中的坐标系的定义

坐标变换中各坐标系定义如下(全部采用右手坐标系):

(1) 地心惯性坐标系 $I(I_1, I_2, I_3)$

原点在地心处, I_2 轴指向北极, I_3 轴为飞船的轨道平面和赤道面的交点, I_1 轴垂直于 I_2 和 I_3 两轴形成的平面,该坐标系保持惯性空间。

(2) 地球坐标系 $E(E_1, E_2, E_3)$

该坐标系固联于地球,原点与 I 系原点重合, E_2 指向北极,与 I_2 轴重合,地球坐标系在 I 系内绕 E_2 (即 I_2), 逆时针方向以角速度 ω 自转。

(3) 飞船轨道坐标系 $B(B_1, B_2, B_3)$

原点在轨道面上, B_1 轴指向轨道前向, B_3 轴指向天顶(并过 I 系的原点), B_1 和 B_3 在轨道面内, B_2 与轨道面垂直。 B 系在 I 系内,沿轨道以角速度 Ω 作轨道运动。

(4) 地理坐标系 $G(G_1, G_2, G_3)$

从 B 坐标系沿 B_3 轴 (G_3 轴) 平移 $-(H - h)$ (飞船到船下点的真高度), 即得到 G 坐标系。 G_1, G_2 即景物偏离船下点前向和横向距离。

(5) 飞船静坐标系 $S(S_1, S_2, S_3)$

飞船静坐标系原点与 B 坐标系原点重合, 飞船无姿态运动时, S 坐标系和 B 坐标系重合, 飞船的三轴姿态 φ, θ, ψ 即指 S 坐标系在 B 坐标系内的三轴姿态。设飞船在轨运行过程中, 飞船的质心在轨道上, 那么飞船静坐标系的原点就是飞船的质心。

(6) 飞船动坐标系 $S_d(S_{d1}, S_{d2}, S_{d3})$

在没有振动时, 飞船动坐标系与飞船静坐标系重合, 而在振动过程中, 飞船动坐标系随飞船一起振动, 飞船静坐标系保持原来位置不动。

(10) 相机次镜坐标系 $M(M_1, M_2, M_3)$

相机次镜的主点为该坐标系的原点。 M 系相当于将相机主镜坐标系 C 平移了一个主镜与次镜之间的距离。

(11) 调焦镜组坐标系 $TJ(TJ_1, TJ_2, TJ_3)$

坐标系原点位于调焦镜组物方主点, TJ 系相当于将次镜坐标系平移 ST 距离。

(12) 像面坐标系 $P(P_1, P_2, P_3)$

像面坐标系的原点在像面的中心, 像面坐标系可以看成是调焦镜组坐标系沿 TJ_3 轴平移调焦镜组像方主点与像面之间的距离, P_1, P_2 组成像面。

从(7)到(12)所代表的坐标系间的空间关系如图 2 所示。

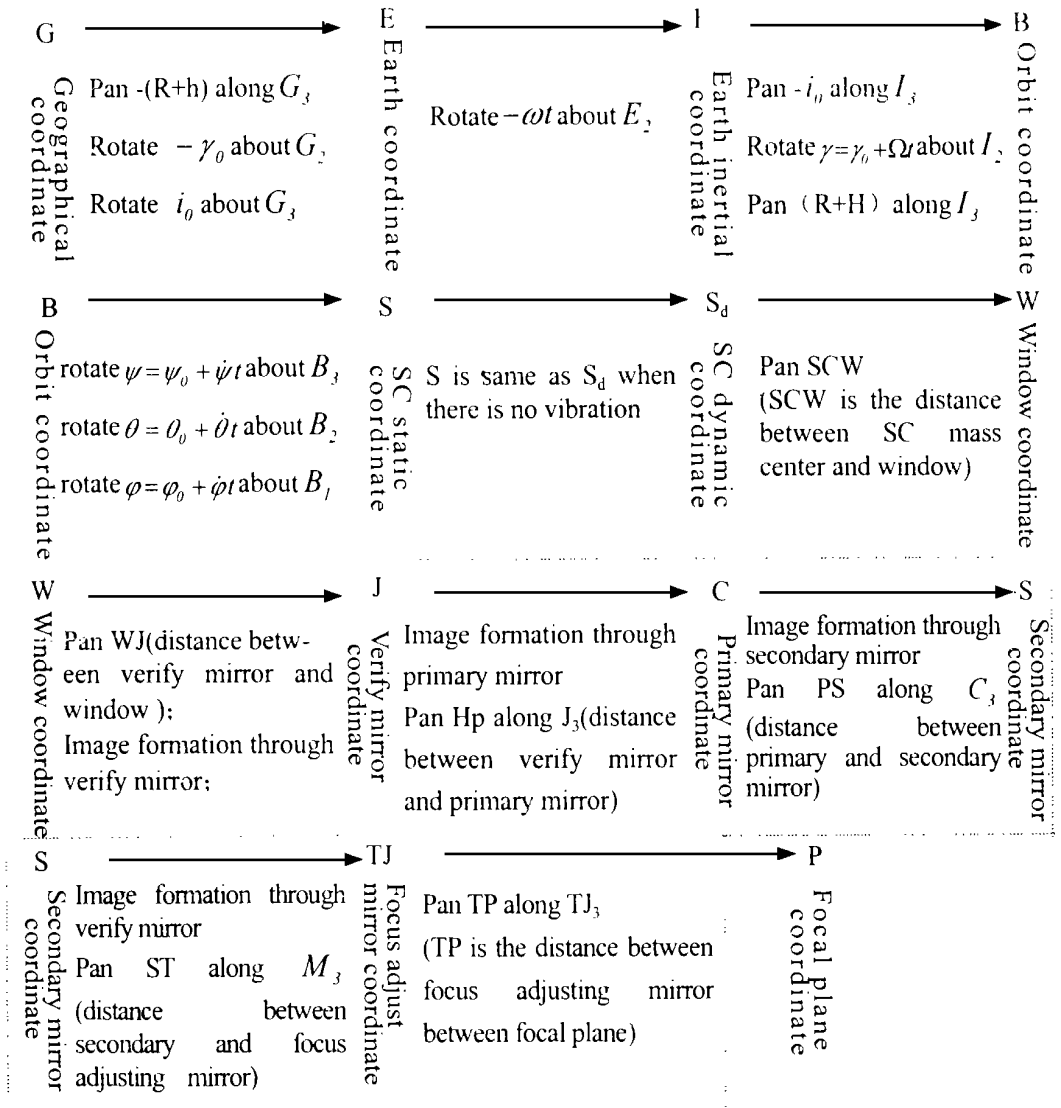


Fig. 3 The coordinates transformation process from object to image

2.2 成像的坐标变换过程

从地物到像面坐标系中的像这一变换过程,可利用以上所建立的坐标系,逐步进行坐标变换来实现。图3是坐标变换过程的图解表示。根据图3所示,整个变换过程按先后顺序大致可分为三个阶段:第一阶段是飞船外部空间坐标系之间的变换;第二阶段是飞船内部坐标系之间的变换;第三阶段反映了相机内部坐标系之间的变换。

(1) 从地理坐标系到飞船静坐标系的变换(第一阶段):

利用坐标变换矩阵^[2],将坐标变换过程中的平移、旋转都用平移矩阵和旋转矩阵表示,则可得这一变换过程的坐标变换矩阵。

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Psi & \sin\Psi & 0 & 0 \\ -\sin\Psi & \cos\Psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma & -(R+H) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & -\sin i_0 & 0 & 0 \\ \sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\omega & 0 & \sin\omega & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\omega & 0 & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos i_0 & \sin i_0 & 0 & 0 \\ -\sin i_0 & \cos i_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma_0 & 0 & \sin\gamma_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\gamma_0 & 0 & \cos\gamma_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & (R+h) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵 S 表示了地理坐标系中的物点用飞船静坐标系表示的坐标变换过程。由于相机已经采取了精度较高的像移补偿措施,地球坐标系的自转和飞船轨道坐标系沿轨道的轨道运动都将被补偿掉,所以,在只讨论振动对像移的影响时,将不考虑地球的自转和飞船的轨道运动。

(2) 从飞船静坐标系到校正镜组坐标系的变换(第二阶段):

系统没有振动时,飞船静、动坐标系重合,而与窗口坐标系之间的关系只是平移关系,三轴方向的平移量为飞船质心与窗口前端面中心之间的距离。从窗口坐标系到校正镜组坐标系之间也是平移关系,平移量为窗口坐标系原点到校正镜组物方主点之间的距离。

(3) 从校正镜组坐标系到像面坐标系的变换(第三阶段):

在整个飞船系统的振动过程中,每一个光学元件都可能发生相互独立的振动,所以,有必要对每一个光学元件都建立独立的坐标系,但考虑到实际结构中,两块校正镜的距离相当小,而且安装在一个校正镜室内,支撑刚度比较高,不会产生相互运动;两块调焦镜也比较靠近,而且由同一个支撑结构支撑,两调焦镜的振动形式应基本一致。所以,可以将两块校正镜等效为一块透镜^[3]。地物经光学系统成像,可分解成首先由校正镜组成像,其次由主镜成像,然后经过次镜和调焦镜成像。每次成像后的物像关系可用成像矩阵来描述。而后经过几次坐标系的平移便可得到物点在像面上成像的位置。根据高斯成像公式,可得到透镜和反射镜的成像矩阵分别为:

$$M_T = \begin{bmatrix} l/l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f/(f+l) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_F = \begin{bmatrix} l/l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f/(l-f) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此, 写出物点经过光学系统最后成像到焦面时的变换矩阵:

$$M_c = \begin{bmatrix} T_{xx}/T_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{xx}/T_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_{ff}/(T_x + T_{ff}) & -TP \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{xx}/S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{xx}/S_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{ff}/(S_x - S_{ff}) & -ST \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} P_{xx}/P_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{xx}/P_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{ff}/(P_x - P_{ff}) & -PS \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{xx}/V_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{xx}/V_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_{ff}/(V_x + V_{ff}) & -HP \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 M_c 可称为相机成像作用矩阵(图 2 中用虚框包围部分的变换过程)。

其中: V_{xx}, V_x : 为校正镜组的像距和物距;

P_{xx}, P_x 为主镜的像距和物距;

S_{xx}, S_x 为次镜的像距和物距;

T_{xx}, T_x 为调焦镜组的像距和物距。

HP 为校正镜组像方主点到主镜主点的距离;

PS 为主次镜主点的距离;

ST 为次镜主点到调焦镜组物方主点的距离;

TP 为调焦镜组像方主点到像面的距离。

图 2 中虚框包围的部分也可用另外一个矩阵表示^[2], 即相机的成像、平移矩阵:

$$M_x = \begin{bmatrix} -f/H - h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f/H - h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f/H - h & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

于是便有: $M_c = M_x$ (5)

3 系统发生振动时的像移计算及应用

在振动过程中, 飞船、相机或光学系统各元件偏离无振动状态下的位置, 从而使成像矩阵及坐标系之间的变换关系不再成立。在振动的系统中, 设坐标系跟随光学元件一起振动, 则在某一振动时刻的各个坐标系便可通过光学元件的位置确定出来。若此时找出振动系统相邻坐标系之间的变换关系, 把这种关系加入到成像过程中的变换矩阵, 即可得到振动的光学系统的成像变换矩阵。

进而, 本文利用以上所讨论的方法, 对相机主镜振动时造成的像点位移进行了计算, 结果如图 4 所示。

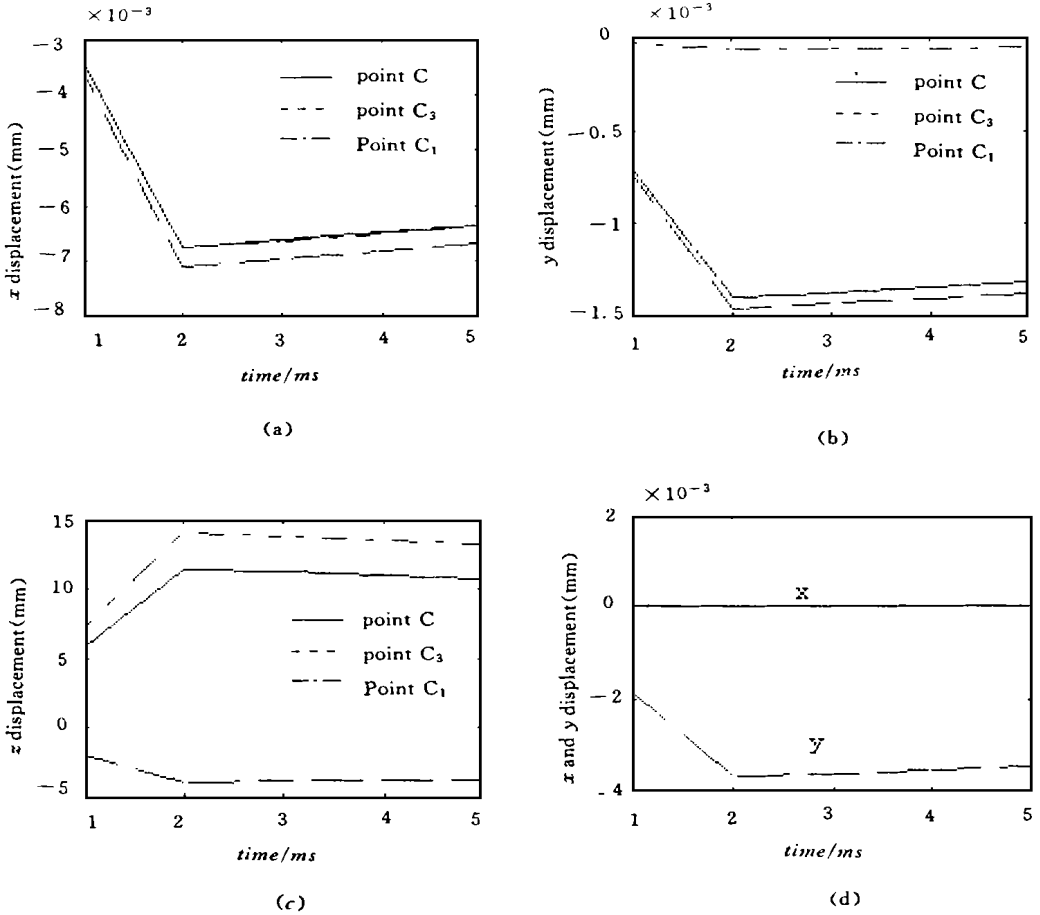


Fig. 4 Vibration of the primary mirror and corresponding image motion

图4中,(a)是主镜坐标系原点 C 以及 X 轴上的点 C_1 和 Z 轴上的点 C_3 在曝光时间内 X 方向的位移,(b)、(c)分别是这三个点 Y 、 Z 方向上的位移,(d)是相应于主镜振动的像点位移。

4 结 论

通过本文的分析可见,对于振动中的光学系统,可通过坐标变换法进行成像过程的求解。这种方法的优点在于思路清晰,运算过程比起其他方法简单明了,从地理坐标系中的地物,经过一系列的空间坐标变换,投影到飞船坐标系中,再根据飞船结构及振动状态,将地物在窗口坐标系内表示,然后利用光学系统参数及光学元件的振动,得到动态光学系统成像过程的坐标变换矩阵,整个坐标变换过程自然流畅,便于理解和实际应用。同时,本文讨论的方法为航天相机成像过程中颤振问题的研究打下了良好的基础。

参 考 文 献

- 1 王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下物象共轭理论. 长春光学精密机械学院学报. 1992, 15(2): 1 ~ 13
- 2 王家骥. 光学仪器总体设计. 长春光学精密机械研究所研究生教材. 1998. 78 ~ 80
- 3 伽塔克 A K, 谢伽拉扬 K 著. 袁一方等译. 近代光学. 上海: 高等教育出版社. 1987: 2 ~ 28

Coordinates Transformation Method on Image Motion of Dynamic Optical System

WANG Jun, LU E, WANG Jia-Qi

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

LIU Ji-Hua

(*Educational Administration Office, Jilin Telecast University, Jilin 132002*)

Abstract

When a space camera which is kept in a spacecraft is working in the space, spacecraft and the optical system of the camera will vibrate because of the existence of space dynamic interruption. So the image point of an object will move during the exposure. For an optical system, the result of motion of the image point will be a degradation of image quality. An analysis method on image point motion due to vibration — coordinates transformation method is discussed in this paper. To illustrate this method, the image motion was calculated due to the primary mirror vibration.

Key Words: Optical system, Vibration, Coordinates transformation method, Image motion

王 俊 男, 1971 年生. 1994 年毕业于吉林工业大学汽车与拖拉机专业, 1997 年获得吉林工业大学工学硕士学位, 1997 年考入中国科学院长春光学精密机械研究所攻读博士学位。