

一种斜视画幅遥感相机异速像移计算与补偿实现

詹磊^{1,2}, 丁亚林¹, 张洪文¹, 刘虎³

(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; 3. 94891 部队机务大队部, 江苏 苏州 215157)

摘要:以斜视胶片步进画幅相机为例,介绍了一种基于该相机的像移补偿策略及具体实现过程。画幅相机由于横向视场较大,使得每幅横向各个视场目标对应物距各异,最终导致目标像相对探测器产生了异速像移。对产生异速像移实质给出了数学推导,对偏流机构存在的必要性进行了分析,提出了一种利用两轴旋转扫描镜,同时结合旋转偏流机构和曝光帘缝的像移补偿方案。最后,在已知相机俯角和视场角等信息情况下,推导出了具体的像移补偿公式。

关键词:斜视画幅相机;像移补偿;横向视场;偏流机构;步进;异速像移

中图分类号:TP722.4 **文献标识码:**A

Methods and Theories Analysis of Image Motion Compensation Based on LOROP Cameras

ZHAN Lei^{1,2}, DING Ya-lin¹, ZHANG Hong-Wen¹, LIU Hu³

(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;

3. Battalion Maintenance Department, 94891 Army, Suzhou 215157, China)

Abstract: This paper takes a long range oblique photography (LOROP) frame camera for an example. It deduces the whole course how to set up image motion mathematical model. Frame camera is a mode of operation for a tremendous increase in the across line of flight field of view. This causes that different field of view has different object distant, which results in heterogenic image motion vector on the film. It introduces mathematic demonstration about the reason of heterogenic image motion vector, analyzes the necessity of drift mechanism and puts forward a compensation method by using scan mirror, drift mechanism and exposure slit. At last, derives specific image motion compensation formula about depression and field of view.

Key words: LOROP camera; heterogenic image motion vector; field of view; cartesian coordinate

1 引言

斜视画幅式遥感相机具备远距离倾斜成像的能力,因此可获取纵深大量信息。然而影响这类相机地面分辨力的因素有很多,如相机动态摄影分辨率,镜头焦距等。动态摄影分辨率高低不仅与光学系统静态分辨率、相机检调焦精度等因素有关,还与像移补偿精度有着直接关系。像移补偿技术是遥感相机关键技术之一,由于遥感相机类型多,每种类型相机的像移都各具特点,因此很难用一个数学公式将各

种类型相机像移补偿公式都表达出来,所以像移补偿必须根据具体类型相机,探测器选择,提出合理补偿方案。

画幅相机的横向视场相对较大,斜视成像时横向视场内各目标在像面的前向像移并不相等,将前向像移在像面上分布不均匀的现象称为异速像移。

作者简介:詹磊(1982-),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读硕士研究生,主要研究方向为机械制造及自动化。
E-mail: pm131@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-10-12

横向视场角和相机俯角是形成异速像移的主要原因,异速像移的补偿是斜视画幅相机重点关心的问题。

2 异速像移分析与计算

2.1 相机数学模型建立

为了分析斜视成像时画幅相机的异速像移。首先建立相机像移的数学模型,模型主要包括三个部分:①扫描机构部分。该部分可提供步进扫描运动,扫描镜有两个自由度。②稳定部分,包括镜头、折叠镜1和折叠镜2。③像面旋转部分。在每幅目标曝光期间,第②部分相对飞机静止不动,其几何关系如图1所示。

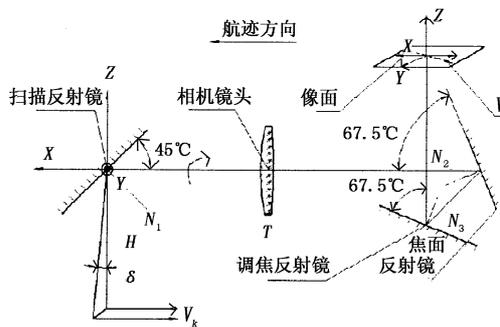


图1 斜视画幅相机数学模型

为了便于定量计算分别定义机体坐标系与扫描镜坐标系与相关的物理量:

机体坐标系:建在扫描镜处,原点和镜头光轴与扫描镜交点重合,X轴与镜头光轴重合,方向飞行前方为正;Y轴平行焦面和折叠镜2,垂直纸面指向读者,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:在扫描镜处建立扫描镜坐标系 X_s, Y_s, Z_s , Y_s 为位角轴(扫描镜绕它位角运动), Z_s 与扫描镜成 45° ,用右手定则判定 X_s 。

相机视轴:与像面中心点关于相机光学系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, OZ_s 所成锐角,用 δ 表示;

相机俯角:相机视轴与水平面的夹角;

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 η 表示。

初始时刻,扫描镜与 XOZ 面垂直,并与 XOY 面成 45° ,相机俯角 90° 。此时,扫描镜和机体坐标系重合。根据定义可知三个反射镜法线向量依次是:

$$N_1 = (-\sin(\pi/4) \quad 0 \quad -\cos(\pi/4))^T$$

$$N_2 = (-\cos(\pi/8) \quad 0 \quad -\sin(\pi/8))^T$$

$$N_3 = (-\sin(\pi/8) \quad 0 \quad -\cos(\pi/8))^T$$

2.2 相机俯角、视场角与异速像移关系

为了便于分析,先假设成像过程中飞机的姿态角很小(忽略不计)。扫描镜工作时的示意图如图2所示,其中 δ 为相机扫描角, ε 为相机的半视场角(横向和纵向)。相机俯角 $90^\circ - \delta$,位角为零,视轴指向 E 点时, $N_0 = (-\sin(\pi/4) \quad 0 \quad -\cos(\pi/4))^T$ 扫描镜法线向量,当扫描镜绕 X 轴旋转了 δ 后,扫描镜法线向量在机体坐标系的向量为:

$$N_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & -\sin\delta \\ 0 & \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} N_0$$

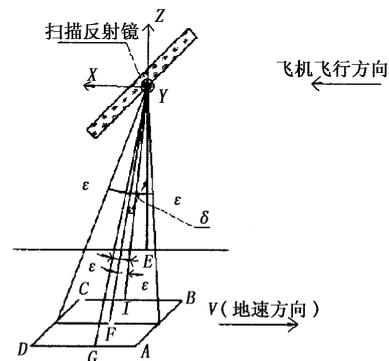


图2 相机俯角示意

在 $ABCD$ 面上任意取一点 (x, y, z) ,由几何关系有:

$$\begin{aligned} z &= -H \\ y &= H \tan \xi \quad (\xi \in [\delta - \varepsilon, \delta + \varepsilon]) \\ x &= \frac{H \tan \zeta}{\cos \xi} \quad (\zeta \in [-\varepsilon, \varepsilon]) \end{aligned} \quad (1)$$

设点 (x, y, z) 经扫描镜反射后,像点相对机体坐标系 (x', y', z') ,由平面镜几何成像定律由:

$$(x' \ y' \ z')^T = (E - 2N_1 N_1^T) (X \ Y \ Z)^T \quad (2)$$

将式(1)各个量代入式(2)中得到:

$$\begin{aligned} x' &= \frac{H \cos(\xi - \delta)}{\cos \xi} \\ y' &= \frac{H \sin \delta \tan \zeta}{\cos \xi} + \frac{H \cos \delta \sin(\xi - \delta)}{\cos \xi} \\ z' &= \frac{H \cos \delta \tan \zeta}{\cos \xi} + \frac{H \sin \delta \sin(\xi - \delta)}{\cos \xi} \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, x' 只与扫描角 δ 和 ξ 有关,与纵向视场角 ζ 无关,据此可以判定 AD 和 BC 经反射镜的像必垂直与 X 轴,将 A, B, C, D 四点俯角,位角值,即 $A(\delta + \varepsilon, -\varepsilon), B(\delta - \varepsilon, -\varepsilon), C(\delta - \varepsilon, \varepsilon), D(\delta + \varepsilon, \varepsilon), F(\delta, 0)$ 代入式(3)中,得 $A'B'C'D'$ 坐标并绘制如图3所示。

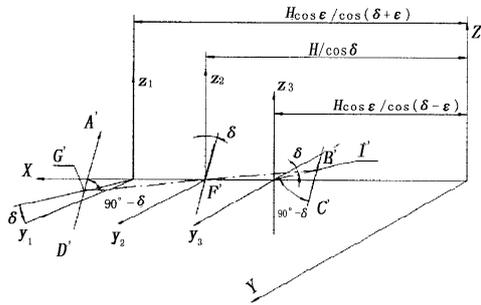


图3 画幅各点经扫描镜后像点位置分布

由式(3)可以得到的结论有:① F' 在 X 轴上,且 G', F', I' 共线并与 X 轴共面,此面与 XY 面成 δ 角,记该面为 S_1 ;② $A'D', B'C'$ 分别位于 y_1z_1 和 y_2z_2 面内,分别与 z_1, z_2 成 δ 角,并相互平行;③ $A'B'C'D'F'G'I'$ 共面,记该面为 S_2 ,有 $S_1 \perp S_2$;④ y_1z_1, y_2z_2 和 y_3z_3 都与 X 轴垂直,三面在 X 轴位置坐标分别为 $x_1 = \frac{H \cos \varepsilon}{\cos(\delta + \varepsilon)}, x_2 = \frac{H}{\cos \delta}, x_3 = \frac{H \cos \varepsilon}{\cos(\delta - \varepsilon)}$ 。目标各个位置在区域 $ABCD$ 内相对相机的速度矢量可看成均等,记为 V 。

根据几何光学高斯成像公式^[3]:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (4)$$

式(4)中, $|l| \gg f'$, 且 $\left| \frac{1}{l} \right| \approx 0$, 得 $l' \approx f'$, $A'B'C'D'$ 区域各点与镜头、像面之间的关系如图4所示。

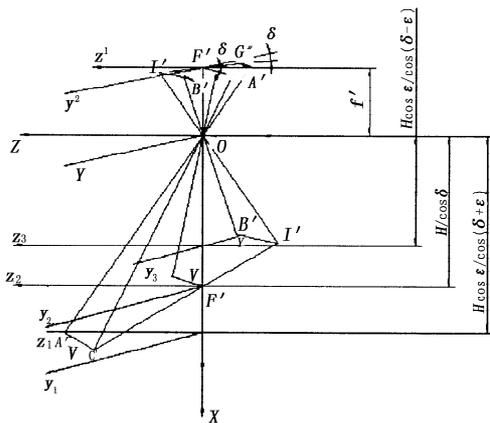


图4 画幅各点经整个光学系统后在像面像点坐标

位于画幅 AD, BC 上的目标运动矢量 V 经反射镜后位于 $A'G'$ 和 $B'I'$ 上,经后面光学系统后的像移矢量位于 $A''G''$ 和 $B''I''$ 上,方向如图4所示。设 AD, BC 上的目标运动矢量分别为 V_1, V_2 ,显然有 $V_1 = V_2 = V$,在 $A''G''$ 和 $B''I''$ 上的像移矢量记作 v_1, v_2 ,由图4空间几何关系可以得出:

$$\frac{v_1}{V_1} = \frac{f'}{H \cos \varepsilon \cos(\delta + \varepsilon)}, \frac{v_2}{V_2} = \frac{f'}{H \cos \varepsilon \cos(\delta - \varepsilon)} \quad (5)$$

对于画幅内任意一点 m ,由式(3)、式(4)可以得到:

$$v_m = \frac{V f' \cos \xi}{H \cos(\xi - \delta)} \quad (6)$$

由式(6)可看出像移速度与飞行速度,飞行高度、相机俯角($90^\circ - \delta$)和横向视场角有关,与纵向视场角无关,且像移矢量与 Z' 轴成 δ 。在整个画幅内由于横向视场角和相机俯角造成像面内大小不等的像移,称为异速像移。

为定量研究在某个扫描角处整个画幅内像移不均匀性,这里设 $V = 300\text{m/s}, f' = 1000\text{mm}, H = 3000\text{m}, \delta = \pi/6$,曝光时间 $t = 0.1\text{s}$,设 y 为画幅内纵向视场内像面像移量(曝光时间内),设光学系统半视场角 $\varepsilon = 5^\circ$ 。 $y = \frac{V f' \cos \xi \cdot t}{H \cos(\xi - \frac{\pi}{6})}$ ($\xi \in [\frac{5\pi}{36},$

$\frac{7\pi}{36}]$),为比较不同 δ 的异速,取 $\delta = 0, \pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3$,对应像移曲线 j, m, y, n, z 如图5所示。

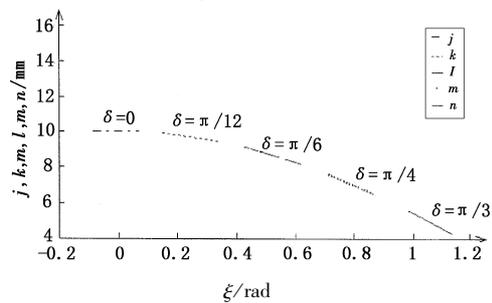


图5 不同 δ 下的异速像移分布情况

从图5可以看出,像移不均匀性随 δ 的增大而增大,以 $\delta = \pi/3$ (z 曲线)为例。计算出 $\xi = \frac{11\pi}{36}$ 和 $\xi = \frac{13\pi}{36}$ 两点像移之差 $\Delta z = 1.4758\text{mm}$,如果按照中间像移量进行补偿,像面上最大的补偿残差将为 $\frac{\Delta z}{2} = 0.7379\text{mm}$,这个像移残差会严重影响相机的成像质量,必须设法消除。

3 异速像移补偿方法与实现方案

根据对异速像移的分析,该型画幅相机采用像面旋转机构,扫描镜补偿机构与曝光帘缝三者相结合的方法实现像移补偿。

异速像移补偿关键环节:①像面旋转^[8]组件,使快门转过相应的扫描角,达到异速像移方向与曝

光狭缝平行,不引起补偿失真;②使曝光帘缝从一端运动至另一端,控制相对应扫描镜旋转速度(变速旋转),最终实现异速像移补偿。对于第一点的必要性下面给出证明:

$A'B'C'D'$ 是 $\delta = 0$ 时,快门的位置,此时曝光帘缝如图6所示; $A''B''C''D''$ 是扫描角 δ 不等于零时,此时像移分布如图6箭头方向所示,如果曝光狭缝不随旋转这个角度,位于狭缝出各个点像移不等(如1,2,3,4四点),如按照唯一速度补偿狭缝像移,必然会引起补偿失真。因此,快门帘缝应在偏流机构驱动下,必须相应地旋转 δ 。之后,快门从一端开始向另一端运动,每运动至幅面的一个位置,在物方都有唯一的 ξ 与之对应,如图7所示。

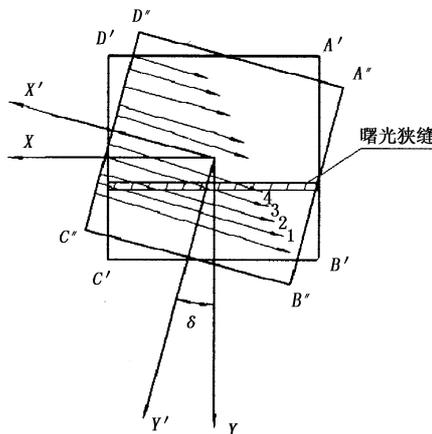


图6 异速像移补偿与曝光狭缝

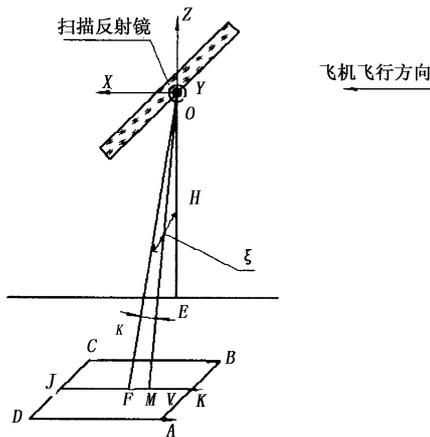


图7 补偿示意

在图7中,假设在时间时刻 $t(t < t_b, t_b$ 为曝光时间),看直角三角形 OFM 。

$$\tan \kappa = \frac{FM}{OF} = \frac{Vt}{H} = \frac{Vt \cos \xi}{H} \quad (7)$$

同时对式(7)两边 t 求导,得:

$$\sec^2 \kappa \times \frac{d\kappa}{dt} = \frac{V \cos \xi}{H} \quad (8)$$

由于 κ 是个很小的数, $\sec^2 \kappa \approx 1$, 式(8)可化简为:

$$\frac{d\kappa}{dt} \approx \frac{V \cos \xi}{H} \quad (9)$$

这里, $\frac{d\kappa}{dt}$ 表示 OF 绕扫描镜位角轴旋转的角速度。

为保证 OF 与扫描镜相对静止,须使 OF 出射光线不变,此时,入射和出射光线交角改变 κ ,由反射镜几何性质,必须使反射镜逆时针旋转, $\frac{\kappa}{2}$ 即扫描镜旋转角速度 $\frac{V \cos \xi}{2H}$,在曝光帘缝的运动配合下,完成异速像移补偿。

4 结论

异速像移补偿一直都是斜视画幅遥感相机的研究热点。通过建立斜视相机数学模型,分析产生异速像移的原因,推导出它与相机俯角、视场角等参数的数学表达式,并分析了相机在不同俯仰角时,像移分布的不均匀性。依据分析的结论,选择了偏流机构,扫描镜和曝光帘缝三者相结合的方案,实现异速像移的补偿,并给出相应的补偿公式。上述对异速像移的计算与分析对斜视画幅相机像移补偿方案的选择和最后补偿实现具有普遍意义,对工程实际应用有指导意义。

参考文献:

- [1] James P Quinn. DSP-based stabilization systems for LOROP cameras[J]. SPIE,1991,1538:150-166.
- [2] T Augustyn. KS-146A camera development and flight test results[J]. SPIE,1984,496:50-55.
- [3] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [4] Andre G Lareau. Flight demonstration of the CA-261 step frame camera[J]. SPIE,1997,3128:17-28.
- [5] Andre G Lareau. Advancements in E-O framing [J]. SPIE,1998,3431:96-107.
- [6] Partynsti, et al. Dual band framing reconnaissance camera [P]. United States,2004,6,694,094.
- [7] 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(Sup):1550-1552.
- [8] 张树青,丁亚林,等. 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.
- [9] 刘宏友,彭锋,等. MATLAB 6. x 符号运算及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2003.