

# 焦面帘幕式快门对画幅式航空遥感器 成像畸变的影响

张洪文, 刘 明, 刘国嵩, 李延伟, 丁亚林

(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:** 针对胶片型画幅式遥感器倾斜成像时产生图像畸变、在航拍后图像处理中景物无法拼接的问题进行了研究。介绍了该遥感器所采用的焦面帘幕式快门的工作原理, 分析了遥感器在飞机姿态变化时的像移补偿。由于在曝光过程中的像移补偿误差使地面景物在像面上存在像移、以及焦面帘幕式快门的分时曝光特性, 使地面景物变形, 导致图像畸变。通过对产生畸变原因进行分析、计算, 给出计算图像畸变量的公式, 为航拍图像后处理时校正图像畸变提供技术支持。

**关键词:** 画幅式遥感器; 焦面帘幕式快门; 图像畸变

**中图分类号:** V243.5; TP391

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102709.0039

## Distortion Influence on Frame Camera Imaging of Focal Plane Curtain Shutter

ZHANG Hong-wen, LIU Ming, LIU Guo-song, LI Yan-wei, DING Ya-ling

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

**Abstract:** The research was based on that the scene images couldn't be mosaiced well in aerophotograph, which aimed at the image distortion of certain film aerial camera in oblique imaging. The principle of the focal plane curtain shutter used in the camera was introduced and the image motion compensation was analyzed while altering the plane's posture. The scenery and the images' distortion were caused by the compensation error to the image motion in exposure and the time-sharing characteristic of focal plane curtain shutter. The calculation formula of image distortion was given by analyzing the reason, providing the technology support for correcting the image distortion in later aerial image processing.

**Keywords:** frame camera; focal plane curtain shutter; image distortion

## 1 引言

画幅式航空遥感器是航空成像的重要手段之一,画幅式航空遥感器以其拍照时间短、图像几何保真度高等特点被广泛应用,但图像仍然会存在一定的几何畸变。产生图像畸变的原因很多,包括镜头光学系统本身的畸变、遥感器成像过程中成像介质不同时间曝光而产生的畸变等。通常情况下,对于长焦距画幅式航空遥感器,由于视场角较小,为增大地面覆盖宽度,一般在镜头前端增设扫描镜,遥感器通过摆动扫描镜实现分幅成像;拍照完成后,再对各幅图像进行拼接,形成连续完整的地面图像。但当飞机的姿态角变化过大时,地面景物的像移不能完全补偿,使遥感器成像过程中存在像移。长焦距画幅式航空遥感器经常采用焦面帘幕式快门,焦面帘幕式快门具有曝光均匀性好的优点,对镜头前端带扫描镜的画幅式遥感器倾斜成像时,结合遥感器扫描镜,还能进行渐变像移补偿。由于焦面帘幕式快门的分时曝光特性,使成像过程中成像介质不同时间曝光,导致图像产生几何畸变<sup>[1-5]</sup>。

本文主要针对采用焦面帘幕式快门的胶片型画幅式遥感器产生的图像畸变进行原因分析、计算,并给出计算图像畸变量的数学公式,为航拍图像的拼接、图像畸变的校正提供技术支持。

## 2 航拍图像现象

航空遥感器在对地面目标进行拍照后,得到的是若干幅航拍图像,需对所获得的航拍图像按照地面景物进行拼接,形成连续完整的地面图像产品。图1为画幅式航空遥感器垂直向下拍照,重叠率为56%时的两幅照片拼接后的图像。两幅图片中下半部分景物大部分都能很好地重合、叠加在一起,但上半部分景物则无法拼接,两幅图片中相同部分的景物错开一段距离,致使图像一侧拼接上,另一侧拼接不上,而且由一侧到另一侧错开的距离逐渐增大,如图2所示。图2为图1中白框内部分的放大图。由

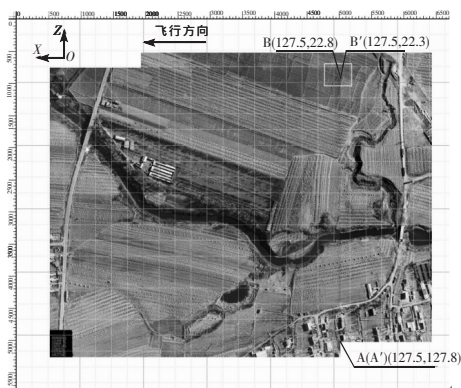


图1 重叠率56%的两幅航拍照片拼接后的图像

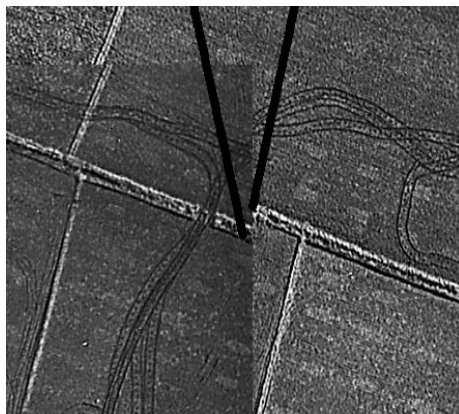


图2 地面景物局部放大图

于图像为沿飞行方向垂直向下连续拍照的相邻两幅图像,照相距离相同,因此该现象不会是由两幅图像比例尺不同造成的,由此可以判断是图像畸变产生了此种现象。

## 3 画幅式遥感器航拍成像产生畸变原因分析

本文所研究的遥感器是一种通过扫描镜步进摆动分幅成像来增大遥感器视场角、提高地面覆盖宽度的长焦距画幅式遥感器,该遥感器采用焦面帘幕式快门,快门帘缝运动方向与飞机飞行方向垂直,如图3所示。快门工作时,帘缝由一端运动到另一端,使像面在曝光成像时被分成若干个连续的条带,快门帘缝匀速通过胶片使胶片分时曝光,扫描镜可

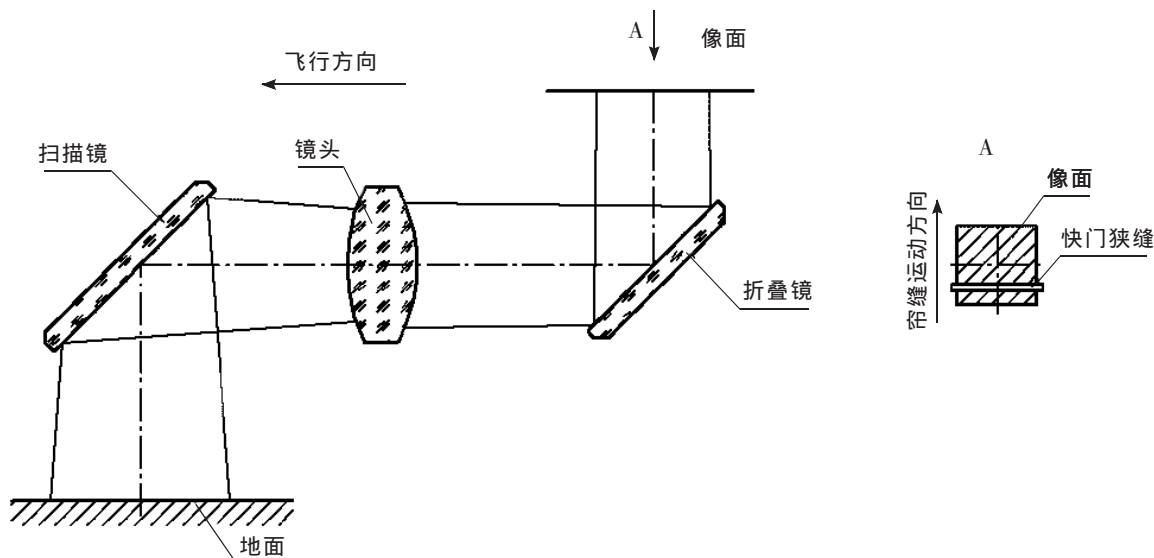


图3 画幅式遥感器工作原理示意图

根据每个条带上的前向像移速度不同进行分别逐条补偿,即渐变像移补偿。

实际上,遥感器在载机上进行航拍工作时,遥感器不但要对前向像移进行补偿,还要对飞机的姿态变化(横滚、俯仰、偏流)使遥感器产生的像移进行补偿,才能获得较为清晰的图像。在一般情况下,姿态角速率通过控制系统都能得到较好的补偿,但当遥感器照相时,即快门曝光期间姿态角速率发生较大变化时,由于控制系统带宽限制,系统存在反应时间等因素,姿态角速率不能得到及时补偿,使姿态角速率产生的像移不能被完全补偿,有时还会很大。因此,在快门曝光期间内,由于焦面帘幕式快门的分时曝光特性,使胶片上先曝光的景物被固定下来,后曝光的景物因为存在像移而运动了一段距离,使图像上的景物发生扭曲变形,产生图像畸变。

#### 4 图像畸变量计算方法

由于图像畸变是遥感器未实现完全像移补偿造成的,因此,要校正图像畸变,需计算遥感器的像移补偿残量。遥感器进行像移补偿时所需要的速度、高度、横滚角、俯仰角、偏流角等参数由飞机的惯导系

统及飞机上的GPS给出,横滚角速率、俯仰角速率、偏流角速率由遥感器上的精密陀螺给出。

如图4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 $OX$ 轴的转角为横滚角,绕 $OY$ 轴的转角为偏流角,绕 $OZ$ 轴的转角为俯仰角,转动角的正向是从原点顺着坐标轴正向看为顺时针方向。令 $H$ 为飞

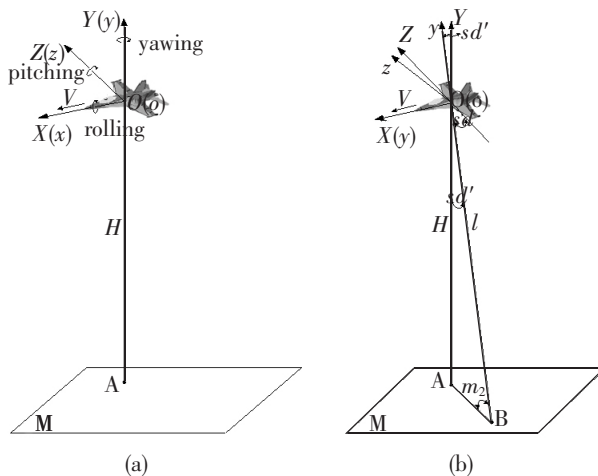


图4 遥感器俯角的变化: (a) 遥感器俯角为零; (b) 遥感器俯角为 $sd$ 。

机的航高,  $V$  为航速, 其正方向与  $OX$  轴的正向相同, 遥感器的俯角为  $sd$ 。飞机坐标系为  $oxyz$ , 其中  $ox$  和  $oz$  轴俗称为飞机的纵轴和横轴。图 4 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<sup>[6-8]</sup>。

遥感器的像移补偿是通过遥感器的反射镜和扫描头的转动实现的。由于飞机在飞行过程中姿态在不断变化, 飞机姿态角速率变化会产生像移, 遥感器借助安装在反射镜和扫描头上的精密陀螺感测飞

机姿态角速率变化, 通过驱动反射镜和扫描头的转动来补偿飞机姿态角速率变化产生的像移。也就是说, 反射镜和扫描头的转动是遥感器控制器给出用于补偿前向像移的量和精密陀螺给出的用于补偿飞机姿态角速率变化的量二者合成的结果<sup>[6]</sup>。

令飞机偏流角为  $\gamma$ ,  $p$  为飞机俯仰角, 飞机的横滚角为  $\lambda$ , 当飞机的 3 个姿态角都产生变化时, 航空遥感器像移速度在  $ox$  轴、 $oz$  轴的分量为<sup>[6]</sup>:

$$\begin{cases} \eta_x = \frac{V}{H} \cos \gamma \cos^2 p \sin(sd - \lambda) + \eta_{\text{俯仰}} \\ \eta_z = \frac{V}{H} [\sin \gamma \sin(sd - \lambda) + \cos \gamma \sin p \cos(sd - \lambda)] \cos p \sin(sd - \lambda) + \eta_{\text{横滚}} \end{cases} \quad (1)$$

当快门曝光期间姿态角速率发生较大变化时, 由于控制系统带宽限制, 姿态角速率不能得到及时补偿, 使姿态角速率产生的像移不能被完全补偿。为测得遥感器实际的像移补偿量, 可在遥感器反射镜和扫描头的转轴上安装编码器, 通过编码器测出

反射镜和扫描头的转速。由几何光学可知, 反射镜转速的两倍即为遥感器俯仰方向的实际像移速度补偿量, 扫描头转速即为遥感器横滚方向的实际像移速度补偿量。因此, 航空遥感器像移补偿残量为:

$$\begin{cases} \eta_x = \frac{V}{H} \cos \gamma \cos^2 p \sin(sd - \lambda) + \eta_{\text{俯仰}} - 2\omega_{\text{俯仰}} \\ \eta_z = \frac{V}{H} [\sin \gamma \sin(sd - \lambda) + \cos \gamma \sin p \cos(sd - \lambda)] \cos p \sin(sd - \lambda) + \eta_{\text{横滚}} - \omega_{\text{横滚}} \end{cases} \quad (2)$$

为了便于分析问题, 现只对图 4 中  $oz$  方向上的变形量进行分析。以上面所述画幅式遥感器为例, 如图 5 所示, 当像面上没有像移时, 图像上  $A$ 、 $B$  两点之间的距离为  $L_{AB}$ , 当像面上帘缝运动方向有像移时, 快门帘缝由  $A$  点一侧进入画幅,  $A$  点先曝光, 然后快门帘缝向  $B$  点运动, 快门帘缝由  $A$  点运动到  $B$  点的时间内由于  $B$  点存在像移,  $B$  点向前移动了一段距离到  $B'$  点, 虽然  $A$  点也存在像移, 但  $A$  点先曝光被固定在胶片上,  $B$  点继续运动到  $B'$  点, 因此图像被拉长。当像移速度方向与帘缝运动方向相反时, 图像被缩短。图像上  $B$ 、 $B'$  两点之间的距离差  $\Delta L$  如公式 (3) 所示<sup>[9-10]</sup>:

$$\Delta L = \int_0^t \Delta \eta_z dt = L_{BB'} \quad (3)$$

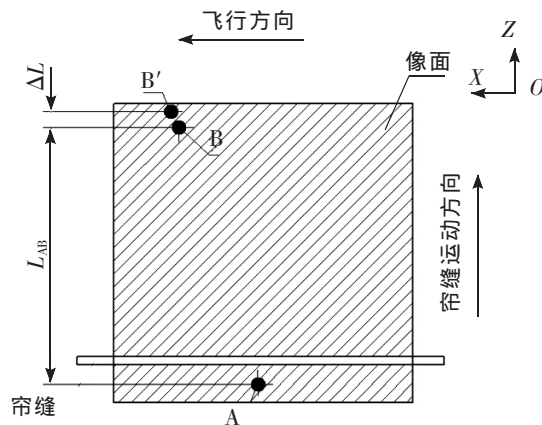


图5 快门帘缝曝光运动示意图

$\Delta L$  为在快门帘缝从  $A$  点到  $B$  点的运动时间内  $B$  点走过的距离;  $t$  为快门帘缝从  $A$  点到  $B'$  点的运动时间:



$$t = \frac{L_{AB'}}{v} = \frac{L_{AB} + \Delta L}{v} = \frac{L_{AB}}{v} + \frac{\Delta L}{v} = \frac{L_{AB}}{v} \quad (\Delta L \text{ 远小于 } v, \text{ 忽略不计}) \quad (4)$$

$L_{AB}$  是图像上 A 点到 B 点的距离, 可在图像上实测;  
 $v$  为快门帘缝运动速度, 为 3 000 mm/s。

将式 (2)、(4) 代入 (3), 可得:

$$\Delta L = \int_0^t \Delta \eta_z dt = \int_0^{\frac{L_{AB}}{v}} \frac{V}{H} [\sin y \sin(sd-\lambda) + \cos y \sin p \cdot \cos(sd-\lambda)] \cos p \sin(sd-\lambda) + \eta_{\text{横滚}} - \omega_{\text{横滚}} dt \quad (5)$$

公式 (5) 中的参数值可通过飞机惯导、遥感器的精密陀螺及编码器获得。通过后续计算可知在快门帘缝从 A 点到 B 点的运动时间内 B 点走过的距离  $\Delta L$ , 这样便可计算出图像上 A 点到 B 点无畸变时的距离, 从而得到 A 点到 B 点在  $oz$  轴方向上的相对畸变量。

同理, 可以计算出 A 点到 B 点在  $ox$  轴方向上的相对畸变量, 由此便可计算出像面上任意两点无畸变时的距离, 通过图像处理软件进行畸变校正。

## 5 结 论

本文详细介绍了画幅式遥感器的工作原理, 结合焦面帘幕式快门的工作特点, 从遥感器像移补偿的角度分析了航拍图像产生的畸变原因, 得出遥感器成像时的像移补偿残量是引起图像畸变的原因, 并给出计算图像畸变量的数学公式, 为后续图像处理时校正畸变提供每幅图像畸变量数据, 实现图像的完全拼接, 为画幅式遥感器航拍图像的拼接提供技术支持。本文分析未包括速度、高度、横滚角、俯仰角、偏流角、横滚角速率、俯仰角速率、偏流角速率等参数误差引起的像移补偿误差产生的畸变。由本文分析可知, 在遥感器航拍过程中, 飞机保持平稳的飞行姿态, 减小姿态角变化以及提高飞机惯导、GPS、精密陀螺、编码器等传感器的精度及像移补偿精度、控制系统的抗干扰能力都可以减小小照片图像畸变。

## 参考文献

- [1] Brown E B. V/H image motion in aerial cameras[J]. *Photogrammetric Engineering*, 1965: 308-323.
- [2] 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.
- [3] Boyce M C, Arruda E M. Constitutive models of rubber elasticity: a review [J]. *Rubber Chemistry And Technology*, 2000, 73(3): 504-552.
- [4] Treloar L R G. The elasticity of a network of long chain molecules [J]. *Rubber Chemistry And Technology*, 1943, 16(4): 746-751.
- [5] 邵娜, 应捷. 视频序列中运动目标检测与跟踪方法研究[J]. *光机电信息*, 2009, 26(2): 31-34.
- [6] 翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. *光学 精密工程*, 2006, 6(3): 490-494.
- [7] 修吉宏, 翟林培. 影响航空图像质量的主要因素分析[J]. *红外*, 2005, 8(8): 10-16.
- [8] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏, 等. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(4): 30-34.
- [9] 李威, 李朝晖, 颜昌翔, 等. 胶片型空间相机的快门设计和研究[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(z1): 9-14.
- [10] 张雷, 丁亚林, 蒋桂德. 帘幕式快门曝光精度数学建模及计算[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(9): 2098-2105.

作者简介: 张洪文 (1974-), 男, 汉族, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 2003年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事航空航天遥感器的研制。E-mail: zhw\_sohu@sina.com