

文章编号 1004-924X(2007)11-1779-05

# 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿

许永森<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 田海英<sup>1</sup>, 董 斌<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:**航空遥感器成像过程中飞行器的向前飞行和姿态变化,使地面物体发出的光线相对于遥感器的光轴产生运动,从而引起共轭像点的运动,在成像介质上产生像移。运用光线矢量与光轴旋转变换相结合的方法,针对飞行器向前飞行使物体与光轴间发生的平移,以及飞行器姿态变化使光轴方向的改变,建立了光线矢量与光轴单位矢量间的关系,得到了航空遥感器在斜视状态下的像移模型。以实测遥感器的工作参数为条件,分析和计算了遥感器的像移,并给出了像移补偿的方法。实际应用证明光线矢量与光轴旋转变换相结合计算像移的方法,不仅综合了前向像移与姿态像移,而且计算简便,可推广于航空遥感器的研究中。

**关键词:**像移补偿;航空遥感器;坐标系旋转;前向像移补偿;

**中图分类号:**V248.3 **文献标识码:**A

## Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation

XU Yong-sen<sup>1,2</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, TIAN Hai-ying<sup>1</sup>, DONG Bin<sup>1,2</sup>

(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*)

**Abstract:** The forward motion and attitude variation of the aircraft can cause a deviation between the optical axis and the light emitted from the object on the ground, which produces conjugate point movement and image motion on imaging medium. By using the method combining light vector with optical axis revolution, aiming at the translation between object and optical axis and the deviation of the optical axis direction caused by the attitude variation of the aircraft, the relationship between light vector and optical unit vector is obtained, and the mathematical model for image motion compensation is established. The image motion of remote sensor is analyzed and calculated with measured parameter and the method of image motion compensation is given. The results show that the method integrates forward image motion with attitude image motion, which is easy to calculate and can be applied in the research of aerial remote sensor.

**Key words:** image motion compensation; aerial camera; coordinate system rotation; forward motion compensation

收稿日期:2007-07-22;修订日期:2007-10-18.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)



像移,而由飞行器姿态变化引起的像移称之为姿态像移。

以斜视遥感器为例,定义 $[x_{ij} \ y_{ij} \ z_{ij}]^T$ 为 $a_{ij}$ 点在 $C_j$ 下的坐标, $V$ 为飞行器的飞行速度,假定飞行器静止不动,地面景物向反方向运动。在 $C_1$ 坐标系下与斜视像面 $2$ 上点 $a_2'$ 共轭的物点 $A_2$ 经过曝光时间 $\Delta t$ 后相对遥感器的光轴产生平移, $A_{21}$ 的坐标变化为 $[X_{i1} \ Y_{i1} \ H]^T - [V \times \Delta t \ 0 \ 0]^T$ 。斜视成像时遥感器具有初始的俯角,为了论述的

方便,这里将遥感器的光轴绕 $C_1$ 的 $x$ 轴转动 $\theta$ 表示为 $[\theta \ 0 \ 0]$ 。曝光过程中由于飞行器的姿态变化使光轴绕坐标系 $C_1$ 的三个坐标轴分别旋转了 $\Delta\theta, \Delta\delta, \Delta\omega$ ,表示为 $[\theta + \Delta\theta \ \Delta\delta \ \Delta\omega]^{[4]}$ 。规定 $R$ 为光轴方向单位矢量的旋转变换矩阵。依据坐标变换的定义,光轴方向的单位矢量先绕 $z$ 轴改变偏航角 $\Delta\omega$ ,而后绕 $y$ 轴改变俯仰角 $\Delta\delta$ ,最后绕 $x$ 轴改变横滚角 $\Delta\theta^{[2]}$ ,变换矩阵 $R$ 如式(4)所示。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta + \Delta\theta) & -\sin(\theta + \Delta\theta) \\ 0 & \sin(\theta + \Delta\theta) & \cos(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta\delta & 0 & \sin \Delta\delta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \Delta\delta & 0 & \cos \Delta\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta\omega & -\sin \Delta\omega & 0 \\ \sin \Delta\omega & \cos \Delta\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在 $C_1$ 坐标系下,以物点的坐标值变化表示飞行器的向前飞行,以光轴的坐标旋转变换表示飞行器的姿态变化。要计算曝光时间内遥感器像移,需要在同一坐标系下计算曝光前后像面上各点所对应的光线矢量差。

斜视状态下遥感器像面上各点的像移矢量,除以曝光时间 $\Delta t$ 可得到像移速度矢量。

### 5 仿真结果与分析

由于坐标系变换只改变物点的坐标值而不改变坐标系内各点的空间关系。为了便于计算,将斜视时所有 $C_1$ 的坐标变换到 $C_2$ 坐标系下,定义坐标系变换矩阵为 $R_c$ ,且 $R_c = R^{-1}$ ,则 $A_2$ 点变换到 $C_2$ 坐标系下的坐标值 $A_{22}$ 为 $R_c([X_{i1} \ Y_{i1} \ H]^T - [V \times \Delta t \ 0 \ 0]^T)$ 。经过曝光后在 $C_2$ 坐标系下与 $A_{22}$ 共轭的像点为 $a_{22}'$ ,该点坐标值经式(5)计算可得。式(5)中 $V_{2k} \cdot R^{-1}[X_{i1} - V \times \Delta t \ Y_{i1} \ H]^T$ 为光线矢量 $OA_{22}$ 在光轴方向上单位矢量的投影,是物点 $A_{22}$ 的成像物距, $V_{2k} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 为坐标系 $C_2$ 下光轴方向上的单位矢量。 $-f/(V_{2k} \cdot R^{-1}[X_{i1} - V \times \Delta t \ Y_{i1} \ H]^T)$ 的物理意义为遥感器光学系统的垂轴放大倍率。

以某胶片型斜视遥感器为例,遥感器的焦距 $f=900 \text{ mm}$ ,像面尺寸为 $144 \text{ mm} \times 144 \text{ mm}$ ,曝光时间 $\Delta t=0.005 \text{ s}$ 。实测曝光时刻的两组工作参数见表1,以这两组参数为分析条件,通过 Matlab 仿真计算可得斜视时遥感器的像移。

表 1 遥感器的工作参数

Tab. 1 Parameters of remote sensor

	速高比	横滚角速率	俯仰角速率	偏航角速率
	$V/H/(1/s)$	$\text{Roll}/(^{\circ}/s)$	$\text{Pitch}/(^{\circ}/s)$	$\text{Yaw}/(^{\circ}/s)$
1	0.050	0.10	-0.10	-0.10
2	0.028	-2.10	-3.50	1.30

遥感器斜视成像时像面上存在着近景点与远景点。表2前向像移的数据对比表明,前向像移在近景点最大,在远景点最小,且从近景点到远景点逐渐变小,这种变化的前向像移称之为渐变像移。前向像移在近景点和远景点的差值,随着遥感器俯角的增大而增大,随遥感器速高比的增加而增加。以表1中的第2组参数为条件,当遥感器的俯仰角为 $30^{\circ}$ 时,前向像移的矢量分布如图2所示(图中右侧为近景区,左侧为远景区)。

$$\begin{bmatrix} x_{i2} \\ y_{i2} \\ z_{i2} \end{bmatrix} = \frac{-f}{V_{2k} \cdot R^{-1}[X_{i1} - V \times \Delta t \ Y_{i1} \ H]^T} \times R^{-1} \begin{bmatrix} X_{i1} - V \times \Delta t \\ Y_{i1} \\ H \end{bmatrix} \quad (5)$$

将曝光前像面上的坐标也变换到 $C_2$ 坐标系下,其坐标值为 $[x_{i2} \ y_{i2} - f]^T$ 。在 $C_2$ 坐标系下对曝光前后像面对应点的光线矢量求差,即可得到

表 2 斜视遥感器的像移

Tab.2 Image motion of oblique remote sensor

遥感器的俯角		8°		13°		30°	
遥感器的工作参数(见表 1)		1	2	1	2	1	2
前向像移	近景点像移量(mm)	0.225	0.126	0.223	0.124	0.202	0.113
	远景点像移量(mm)	0.221	0.124	0.216	0.120	0.188	0.105
姿态像移 $x$	中心点像移量(mm)	0.007	0.274	0.007	0.274	0.007	0.274
	边缘点最大像移量(mm)	0.008	0.283	0.008	0.283	0.008	0.283

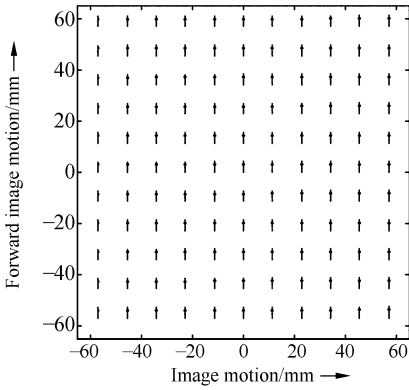


图 2 遥感器的前向像移

Fig. 2 Forward image motion of remote sensor

由于飞行器的姿态始终处于变化之中,姿态像移对传感器成像的影响很大。表 2 中姿态像移沿  $x$  方向的分量,在曝光时间一定时只与飞行器的姿态变化速率有关,与遥感器的俯仰角度无关。沿  $y$  方向姿态像移分量也如此。

像移在成像介质上沿  $x$  与  $y$  两个方向具有分量,遥感器的工作参数实时地输入到控制器,控制器通过上述的像移模型计算出曝光时刻沿  $x$  与  $y$  方向姿态像移速率  $V_x$ 、 $V_y$ ,远景点的前向像移速率  $V_{IMC}$ ,以及近景点与远景点的像移速率差值  $\Delta V_{IMC}$ 。遥感器的像移补偿系统通过改变光轴绕  $x$  和  $y$  轴运动的角速率,使得曝光时间内影像相对于成像介质保持相对静止完成像移补偿<sup>[5-8]</sup>。

该型传感器像移补偿系统的工作示意图如图 3。在曝光时间内,伺服系统 1 驱动反射镜绕俯仰轴  $y$  转动,由于斜视时前向像移在像面上是变化的,通过采用反射镜与焦面快门协同工作的方式,快门的帘缝从远景点运动到近景点的过程中,反射镜的补偿速率由  $(V_x + V_{IMC})/2f$  逐渐地增加到  $(V_x + V_{IMC} + \Delta V_{IMC})/2f$ ,补偿沿  $x$  方向的像移<sup>[8]</sup>如图 4 所示。在曝光时间一定时, $V/H$  与传感器

的俯角决定了前向像移的大小,飞行器的俯仰角速率决定了俯仰像移的大小。伺服系统 2 驱动扫描头组件绕横滚轴  $x$  工作在速率状态,稳定传感器工作的俯仰角,补偿沿  $y$  方向的像移。

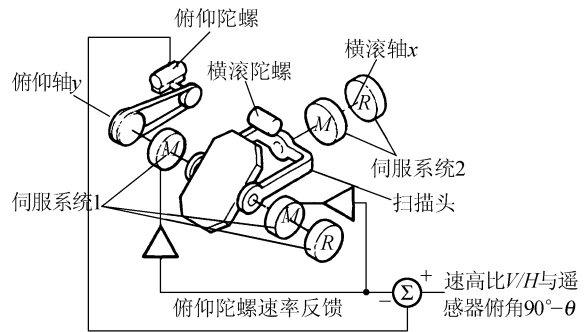


图 3 像移补偿系统

Fig. 3 Image motion compensation system

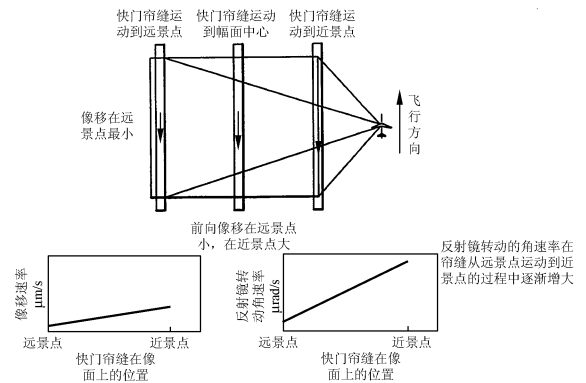


图 4 斜视时渐变像移的补偿方法

Fig. 4 Compensation method of graded IMC in oblique mode

通过测试遥感器的伺服系统,扫描头工作在表 1 的第 2 组参数时,绕  $x$  轴补偿的速率误差为  $0.10^\circ/s$ ,反射镜绕  $y$  轴补偿的速率误差为  $0.15^\circ/s$ ,经计算像面上最大的残余像移量为  $\Delta x$

$=0.008 \text{ mm}$ ,  $\Delta y=0.012 \text{ mm}$ 。此时残余像移量偏大,通过调整快门帘缝的宽度缩短曝光时间,减小残余像移量,允许的最大曝光时间为  $2 \text{ ms}$ 。

## 6 结 论

运用光线矢量和光轴旋转变换相结合的方

法,建立了遥感器斜视状态下的像移模型,以测试的工作参数为条件计算遥感器的前向像移和姿态像移,并分析其补偿的策略,为遥感器的像移补偿提供了可靠的理论依据,该方法可应用于各类遥感器的像移计算之中。

### 参考文献:

- [1] 王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所研究生部教材,1998.  
WANG J Q. *Optical Instrument Collectivity Design*[M]. Changchun: Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [2] 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, 14(3): 490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
- [3] LAREAU A G. Advancements in E-O framing [J]. *SPIE*, 1998, 3431: 96-107.
- [4] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation [J]. *SPIE*, 1993, 2023: 65-79.
- [5] LIGHT D. An airborne direct digital imaging system[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 11: 1299-1305.
- [6] 刘明, 吴宏圣, 匡海鹏, 等. 航相机的像移补偿方法及应用[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(4): 30-34.  
LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al.*. Method and application of image motion compensation in aerospace camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 30-34. (in Chinese)
- [7] MATHEWS B, ZWICKER T. Flight test results from the ultra high resolution, electro-optical framing camera for-reconnaissance and other applications using a  $9216 \times 9216$  pixel, wafer scale, focal plane array[J]. *SPIE*, 1999, 3751: 133-144.
- [8] 王家骥, 金光, 颜昌翔. 光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 13(2): 105-116.  
WANG J Q, JING G, YAN CH X. Orientation error analysis of airborne opto-electric tracking and measuring device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 13(2): 105-116. (in Chinese)

**作者简介:**许永森(1981—),男,河南信阳人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学工程专业博士研究生,主要从事航空遥感器的研究工作; E-mail: pm131@sina.com.cn

丁亚林(1964—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要从事航空遥感器稳像技术的研究。