

文章编号:1001-5078(2007)12-1303-04

航空遥感器姿态像移仿真分析

许永森^{1,2}, 丁亚林¹, 田海英¹, 董斌^{1,2}, 张树青^{1,2}, 张兰君^{1,2}

(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: 由于航空遥感器要求的分辨率愈来愈高, 因此需要更为精确的像移补偿模型。本文针对拍照时飞机姿态角变化在遥感器像面处所引起的姿态像移, 运用光线矢量与坐标系旋转相结合的方法建立遥感器姿态变化过程的数学模型。通过坐标系的旋转表示姿态的变化, 根据遥感器姿态变化前后像面上各离散点的光线矢量之差, 获得遥感器的姿态像移在像面上的大小与分布特征。运用该像移模型对遥感器姿态像移进行分析, 提出减小姿态像移的工程措施。

关键词: 像移补偿; 航空相机; 坐标系旋转

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A

The Simulation of Aerial Remote Sensor's Gesture Image Motion

XU Yong-sen^{1,2}, DING Ya-lin¹, TIAN Hai-ying¹, DONG Bin^{1,2}

ZHANG Shu-qing^{1,2}, ZHANG Lan-jun^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: As the resolving power of aerial remote sensor is demanded to be higher, the more precise image motion compensation model is needed. This article in view of the gesture image motion which causes by the altering airplane gesture angles including pitching angle, yawing angel and rolling angle, unifies the light vector and coordinate system revolving methods to establish a mathematical model of the remote sensor's gesture change process, in which it is supposed that the rotation of the coordinate system is equal to the change of the gesture angle. The magnitude and the direction of the remote sensor's gesture image motion can be obtaining in the image plane by calculating the light vector drift of each discrete point in the image plane. This method can be used in image motion compensation system.

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

1 引言

航空遥感器成像时, 像移是影响成像质量的主要原因之一。像移按产生原因的不同可分为: 飞行器的前向飞行所引起的前向像移, 飞行器的姿态运动包括俯仰角、偏流角、滚动角变化带来的姿态像移, 飞行器振动及气流波动所引起的振动像移等。要获得高清晰度的图像提高航空遥感器的分辨率必须进行像移补偿。因此, 建立正确的数学模型, 精确的计算像移是进行像移补偿的必要条件。

本文运用坐标系旋转与光线矢量相结合的方法, 通过描述遥感器在姿态变化的过程中像空间与物空间的相互关系, 定量地衡量航空遥感器成像过程中的姿态像移。

2 遥感器的物像空间关系

航空遥感器的工作状态如图1所示。假定遥感器的坐标系与飞行器的坐标系相重合, 建立遥感器的右手坐标系 C , 定义坐标系 C 的 x, y, z 轴分别为飞行器的横滚轴、俯仰轴与偏航轴, 其中 θ, ρ, ω 为绕坐标系 x, y, z 轴转动的角度, 规定正对坐标轴逆时针旋转为正。飞行器俯仰轴与横滚轴所构成的平面作为参考平面, 在飞行过程中认为参考平面始终保持水平状态。 z 轴的正方向作为遥感器光轴的方向。

作者简介: 许永森(1981-), 男, 2003年毕业于吉林大学, 现为中科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。E-mail: pm131@sina.com.cn

收稿日期: 2007-07-12

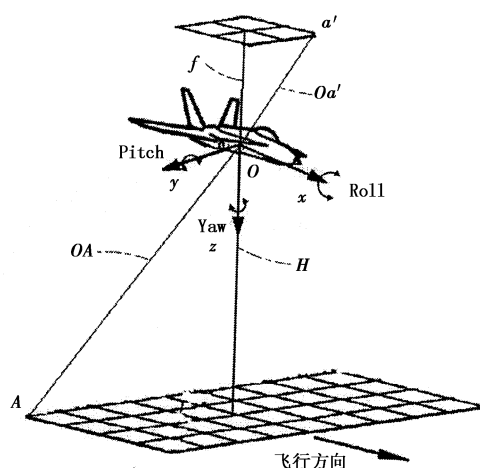


图1 遥感器的工作示意图

Fig. 1 aerial remote sensor

理想状态下遥感器的光轴垂直于地面,像面上任意像点 a' 的坐标为 $[x \ y \ -f]^T$, 与其共轭的物点 A 坐标为 $[X \ Y \ H]^T$, 向量 Oa 与 OA' 为光学系统的入射与出射光线矢量, $V_k = [0 \ 0 \ 1]^T$ 表示光轴方向上的单位矢量。两共轭点间的物像空间关系则可通过式(1)获得。从像方到物方的关系如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{H}{V_k^T [x \ y \ -f]^T} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理可得物方到像方的关系式如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{-f}{V_k^T [X \ Y \ H]^T} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ H \end{bmatrix} \quad (2)$$

当遥感器姿态改变时,此时物空间到像空间的关系可通过坐标变换矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{-f}{V_k^T R^T [X \ Y \ H]^T} \times R^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ H \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, R 为坐标变换矩阵。当飞行器姿态变化时,遥感器的坐标系相对于原坐标系 C 发生旋转,其顺序为先绕 z 轴改变偏航角,而后绕 y 轴改变俯仰角,

最后绕 x 轴改变横滚角。依据坐标旋转变换的定义可得坐标系旋转矩阵如式(4)所示:

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

3 遥感器姿态像移的仿真

航空遥感器像移的仿真过程如下:假设在某时刻 t , 在像面上取多组离散点 a_{ij}' , 其坐标为 $[x_i, y_j, -f]^T$, 通过像空间与物空间的变换关系式(1), 可以获得与像点 a_{ij}' 共轭的物点 A_{ij} , 其坐标为 $[X_i, Y_j, H]^T$ 。经 Δt 曝光时间后, 由于飞行器的前向飞行使物点 A_{ij} 的坐标在 C 中变化为 $[X_i - V \times \Delta t, Y_j, H]^T$, 其中, V 为飞行器的飞行速度。由于飞行器姿态的改变, 在曝光时间内使遥感器的光轴绕坐标系 C 的坐标轴产生了角运动量, 其大小分别为 $\Delta\theta, \Delta\rho, \Delta\omega$ 。物点 A_{ij} 的坐标值此时变为 $R^T [X_i - V \times \Delta t, Y_j, H]^T$, 然后经物像空间变换公式(3), 可以得到曝光后与 a_{ij}' 点所对应的光线矢量 $Oa_{ij\Delta t}'$, 最后将曝光前后离散点 a_{ij}' 所对应的光线矢量 $Oa_{ij\Delta t}'$ 与 Oa_{ij}' 求差, 即可获得遥感器前向像移与姿态像移的大小与分布。由于本文只分析姿态像移, 这里认为前向像移通过 TDI CCD 的积分功能完全补偿。

以某型航空遥感器为例, 遥感器的焦距 $f = 300\text{mm}$, 成像介质为 TDI 线阵 CCD, 像元尺寸 $b = 0.13 \times 10^{-3}\text{mm}$, TDI 级数取 48 级。通过在像面上取多组离散点, 以实测曝光时刻的飞机姿态为条件, 分析在这些姿态条件下遥感器的姿态像移。由于曝光时间较短, 可近似认为每个曝光时间内飞机是匀速运动。运用 Matlab 仿真计算遥感器在 x 与 y 方向姿态像移分量见表 1, 像移矢量分布如图 2 ~ 图 4 所示。

表1 飞机姿态与遥感器的姿态像移

Tab. 1 gesture motion of the airplane and the gesture image motion

	速高比 (V/H)/ s^{-1}	横滚角速率 Roll/s	俯仰角速率 Pitch/s	偏航角速率 Yaw/s	中心点的像移量 /($\times 10^{-2}\text{mm}$)		边缘点最大像移分量 /($\times 10^{-2}\text{mm}$)		边缘点平均像移分量 /($\times 10^{-2}\text{mm}$)	
					x 方向	y 方向	x 方向	y 方向	x 方向	y 方向
1	0.23	0.10	-0.10	-0.10	0.47	0.47	0.59	0.59	0.47	0.48
2	0.28	-0.90	0.10	0.10	0.38	3.48	0.60	3.70	0.40	3.60
3	0.27	-0.90	-0.20	-0.50	0.80	3.62	1.34	4.17	0.80	3.75
4	0.29	0.30	0.20	-0.30	0.74	1.11	1.02	1.39	0.75	1.03
5	0.31	-0.80	-0.10	-0.90	0.35	2.80	1.05	3.52	0.58	2.88
6	0.30	1.10	-0.20	-0.30	0.72	3.97	1.09	4.34	0.73	4.11
7	0.20	-2.10	-3.50	1.30	19.05	11.43	21.49	13.88	19.12	11.80

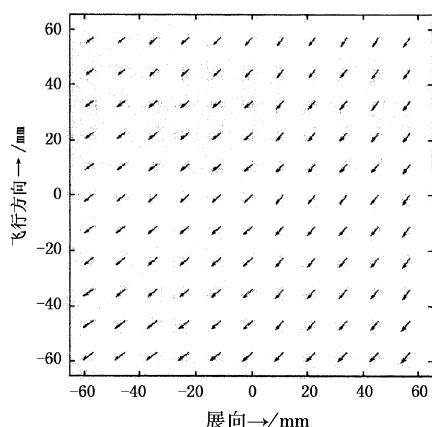


图2 条件1下的姿态像移

Fig. 2 gesture image motion of case 1

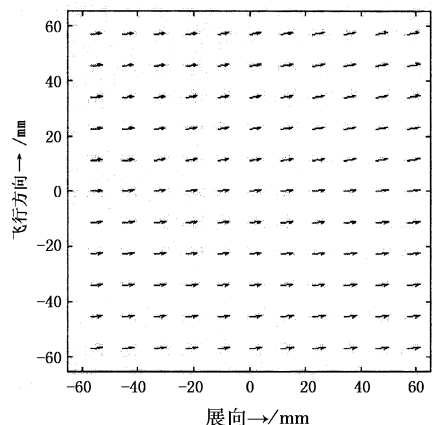


图3 条件2下的姿态像移

Fig. 3 gesture image motion of case 3

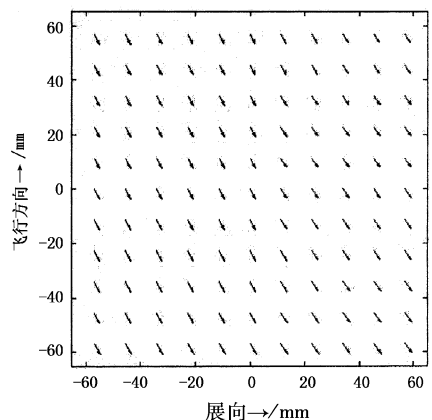


图4 条件7下的姿态像移

Fig. 4 gesture image motion of case 7

像面上的中心点为光学系统的焦点,焦点处只含有俯仰与横滚像移,其余点既包含了俯仰与横滚像移,又包含偏航像移。从姿态像移矢量分布图及表1的数据对比中可知,每组的中心点与边缘点沿 x 与 y 两方向的像移量的差别不大,说明在整个像面上俯仰与横滚像移所占的比重较大。飞行器姿态变化很小时,姿态像移可以忽略;飞行器存在小角度姿态变化时,在整个像面上,中心点与边缘点的像移

量相差很小,姿态像移可近似用中心处的像移来等效,其大小为 $\delta_{\text{像移}} = w \times f \times \Delta t$ (w 为光轴运动的角速率; Δt 为曝光时间);在飞行器姿态变化较大时,姿态像移量较大。

由于遥感器采用共轴光学系统,偏航像移在视场的边缘点大、中心点小,且绕光轴呈中心对称的分布,偏航角速率 $-0.1^\circ/\text{s}$ 时的姿态像移分布如图5所示。若不能很好地补偿偏航像移,它将影响像移在成像介质上分布的均匀性,增大像移补偿的误差。

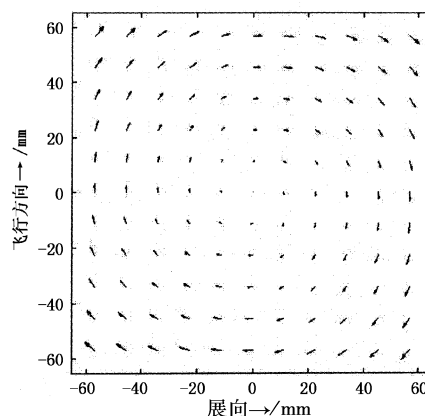
图5 $-0.1^\circ/\text{s}$ 的偏航像移

Fig. 5 yaw image motion

该型遥感器采用三轴陀螺稳定平台的方法,通过稳定平台的伺服系统补偿飞机不断变化的姿态,以减小姿态像移对遥感器成像的影响。伺服系统实际速率补偿精度为 $0.1^\circ/\text{s}$,在该补偿精度下,遥感器姿态像移沿 x 方向的残余像移量、曝光时间、速高比三者的关系如图6所示。从图6两组线段的对比中,在TDI级数相同的情况下,姿态像移量随着速高比的增大而减小;在速高比相同的情况下,姿态像移量随着TDI级数的变大而变大。当遥感器的速高比为 0.34s^{-1} 时,姿态像移沿 x 方向的残余像移量小于 $1/3$ 像元,满足成像要求。当速高比为 0.13s^{-1} 时, x 方向的残余像移量大于 $1/3$ 像元,不满足成像要求,此时遥感器允许的最小速高比为 0.25s^{-1} 。

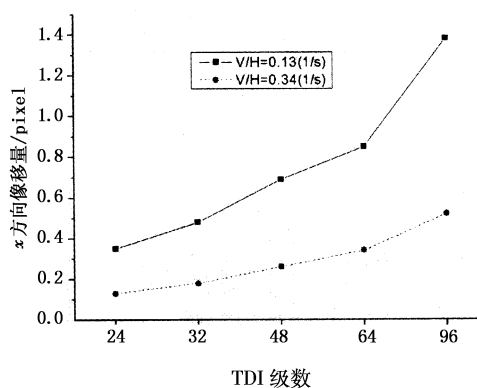


图6 速高比、姿态像移与TDI级数的关系

Fig. 6 the relationship of V/H , gesture image motion and TDI stage

4 结束语

通过运用该模型对遥感器姿态像移的分析,可以精确地得到姿态像移在整个像面上的大小与分布,依据本文分析的结论给出减小遥感器姿态像移的工程措施:

(1)横滚与俯仰像移对遥感器成像质量的影响较大。因此要进一步地提高陀螺稳定平台对飞机横滚与俯仰的速率补偿精度。

(2)通过合理地选择速高比范围,选用较小的TDI级数,减小曝光时间,降低姿态像移对成像质量的影响。

实际应用证明以上方法对于提高航空遥感器的成像质量具有很好的效果。

参考文献:

- [1] Wang J Q. Optical instrument collectivity design [M]. Teaching Material of Department of Graduate of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 1998. (in Chinese)
- [2] Zhai Lin-pei, Liu Ming, Xiu Ji-hong Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 7(4): 490 - 494. (in Chinese)
- [3] Andre G Lareau. Electro-optical imaging array with motion compensation [C]//SPIE Proceedings, 2023, (Airborne Reconnaissance XVII), 1993: 65 - 79.
- [4] André G. Lareau Advancements in E-O Framing [C]//SPIE, 3431, 1998, Airborne Reconnaissance XXII: 96 - 107.
- [5] Light D. An airborne direct digital imaging system [J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2001, 11: 1299 - 1305.
- [6] Mathews B, Zwicker T. Flight test results from the ultra high resolution, electro-optical framing camera for reconnaissance and other applications using a 9216 × 9216 pixel, wafer scale, focal plane array [C]//SPIE Proceedings, Airborne Reconnaissance XXIII, 1999.
- [7] Tao Jia-sheng. Study on the imaging quality of TDI CCD sensor under image motion and sampling effect [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32: 52 - 55. (in Chinese)
- [8] Zhao Gui-jun, Chen Chang-zheng, Ren Jian-yue, et al. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(4): 91 - 95. (in Chinese)
- [9] Liu Ming, Wu H Sh, Kuang H P, et al. Method and application of image motion compensation in areospace camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(4): 30 - 34. (in Chinese)

资 料 信 息

中国光学光电子行业协会现有 2007 北京光电周少量剩余资料:

1. 亚欧光电企业名录

内容为法、德、意、波兰、英、立陶宛、爱沙尼亚等国家的 42 家光电企业的中文简介,包括地址、电话、网址、联系人、产品、合作意向等,是一份很实用的有参考价值的资料,32 开,68 页。每册收工本费 50 元人民币(含平寄邮费),数量有限,欲购从速。

2. 中国光电产业发展论坛文集

题目包括:展望二十一世纪上半叶光电子技术的发展(中国科学院院士 简水生);透明陶瓷材料(中国工程院院士 沈德忠等);FPD 产业展望——机遇与选择(仅摘要)(京东方科技集团副总裁 董友梅);全固态激光器研究最新进展(清华大学电子工程系教授 霍玉晶);我国红外热像仪产业及技术的新发展(浙江大立科技股份有限公司董事长 庞惠民)。

本资料为 16 开,64 页,每册收工本费 20 元人民币(含平寄邮费),数量有限,欲购从速。

汇款方式:

一、银行汇款

帐号:201090022 - 58 开户行:北京银行酒仙桥支行

开户名称:中国光学光电子行业协会

二、邮局汇款

汇款地址:北京 8511 信箱 中国光协 邮编:100015

以上两种汇款均可,一俟款到即开发票及寄书,请务必写清楚购买人的地址、姓名及联系方式。

汇款后将底单传真至:010 - 64347322。

联系人:中国光学光电子行业协会 万迪女士

电话:010 - 84321218 010 - 64331367

传真:010 - 64347322

网址:www.coema.org.cn