

文章编号: 1004-924X(2016)03-0635-08

航空摆扫相机转弯成像像移分析及补偿

杨永明*, 李昕阳, 匡海鹏, 郑丽娜, 王德江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 为保证航空摆扫相机转弯成像过程中的成像质量, 对其像移计算及补偿方法进行了研究。根据航空摆扫相机的成像原理, 利用几何建模及速度矢量分解建立了转弯成像像移计算模型, 给出了基于均值补偿的转弯前向像移补偿方法。转弯前向像移补偿分析表明: 相机焦距为 500 mm, 曝光时间为 0.01 s, 速高比为 0.02 rad/s, 纵向视场角为 10° , 转弯角速度为 $0.5^\circ/\text{s}$ 时, 最大前向像移补偿残差量为 $2.22\text{ }\mu\text{m}$; 转弯角速度为 $1.5^\circ/\text{s}$ 时, 最大前向像移补偿残差量为 $3.36\text{ }\mu\text{m}$ 。另外, 转弯横向像移补偿分析表明: 横向像移量随纵向视场角幅值的增加而增大, 曝光时间为 0.005 s, 横向视场角为 30° , 转弯角速度为 $1^\circ/\text{s}$ 时, 横向像移量在纵向视场角为 4.5° 时达到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。转弯成像试飞实验结果表明: 得到的图像像质优良, 无几何形变, 前向像移补偿良好, 验证了本文提出的转弯成像像移补偿方法的正确性。

关键词: 航空相机; 转弯成像; 摆扫成像; 像移计算; 像移补偿

中图分类号: V245.6; TP247 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162403.0635

Image motion analysis and compensation for aerial scanning camera during turning flight

YANG Yong-ming*, LI Xin-yang, KUANG Hai-peng, ZHENG Li-na, WANG De-jiang

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yongmingyang@sohu.com

Abstract: The image motion calculation and compensation for an aerial scanning camera in turning imaging was researched to improve its imaging quality. The geometrical modeling and velocity vector decomposition were utilized to establish the image motion computation model of turning imaging according to the imaging principle of the aerial scanning camera. The mean compensation method for forward turning imaging motion was proposed based on the established model. The forward image motion compensation analysis on the turning imaging indicates that the maximum residual of forward image motion compensation is $2.22\text{ }\mu\text{m}$ at the focal length of camera in 500 mm, exposure time in 0.01 s, speed height ratio in 0.02 rad/s, the longitudinal field of view in 10° , and the angular velocity in $1^\circ/\text{s}$ and that is $3.36\text{ }\mu\text{m}$ at the angular velocity in $1.5^\circ/\text{s}$. Moreover, the latitudinal image motion compensation analysis on the turning imaging indicates that the latitudinal image motion value increases as the magnitude of longitudinal field of view increased, and the value reaches $3\text{ }\mu\text{m}$ while the exposure time is 0.005 s, the latitudinal field of view is 30° , the angular velocity is $1^\circ/\text{s}$ and the longitudinal field of view is 4.5° . The imaging experiment of test turning flight obtains excellent image quality without geometric distortion

收稿日期: 2015-08-27; 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61308099)

and proper forward image motion compensation, which verifies the validity of the proposed image motion compensation method for turning imaging.

Key words: aerial camera; turning imaging; scanning imaging; image motion computation; image motion compensation

1 引言

航空摆扫相机^[1-3]通过使相机镜头绕纵轴转动实现摆扫成像,其通常以线阵时间延迟积分电荷耦合器件(TDI CCD)^[4]为成像介质,具有大视场角、高分辨率、图像一致性高等优点,在遥感侦察领域得到广泛应用。航空摆扫成像过程中主要存在前向像移及摆扫像移^[5-6],其中,前向像移可通过以一定角速度转动的补偿反射镜进行补偿^[7-10],摆扫像移通过调节TDI CCD的行频来进行补偿^[11-12]。文献[7-11]通过共线方程、坐标变换等方法建立了像移速度的计算模型,但没有对相机转弯成像时的像移速度进行分析;文献[13]及文献[14]给出了前向像移补偿反射镜的伺服控制方法;文献[15]分析了载机大坡度转弯对航空相机成像的影响,其所给出的计算模型仍需完善。

为了不影响载机的气动布局,有些载机只能装备垂直摆扫成像相机,当载机转弯时以大横滚角姿态飞行,在该过程中,垂直摆扫成像相机可以大幅度提高成像距离及范围,实现倾斜成像功能,提高遥感侦察效率。为保证航空摆扫相机转弯成像过程中的成像质量,必须对转弯成像过程中的像移速度进行计算及补偿,然而目前缺少转弯成像过程中像移分析方法的研究。因此本文对航空摆扫相机转弯成像像移计算及补偿问题展开了深入分析,首先以载机直飞成像为基础,给出了载机直飞成像的像移补偿方法并分析了前向像移补偿残差随纵向视场角的变化情况;然后建立了转弯成像前向像移计算模型并给出补偿方法,最后分析了转弯横向像移量的变化情况。

2 摆扫相机的成像原理

航空摆扫相机的基本成像原理如图1所示。来自地面景物的光线经补偿反射镜折转至相机镜头,经镜头汇聚后入射到与水平轴成45°角的焦面折叠镜上;焦面折叠镜再将汇聚光线折转并在线阵TDI CCD的感光区成像。摆扫相机成像过程中主要存在以下4种像移:载机前向飞行产生的前向像

移,相机摆扫成像产生的摆扫像移,载机震动引起的像移及载机姿态变化导致的像移。对于前向像移,利用前向像移补偿反射镜进行补偿,反射镜控制系统结构如图2所示。成像过程中反射镜控制系统工作于位置/速度切换方式,摆扫成像过程工作于速度方式,以陀螺为速率反馈元件驱动补偿反射镜以给定角速度转动,补偿前向像移角速度;摆扫成像结束时切换为位置方式,将反射镜转至拍照起始位置。对于摆扫像移,通过调节线阵TDI CCD的行频^[11-12],使行频与惯性空间的摆扫速度相匹配来进行补偿。载机震动引起的像移可以通过在载机与相机间加装减震器来消减。对载机姿态变化导致的像移,可以通过反射镜控制系统及摆扫控制系统的速率反馈给陀螺感知并进行补偿。

3 直飞成像像移分析

3.1 前向像移建模

载机直飞成像可以认为是转弯成像的特例,即

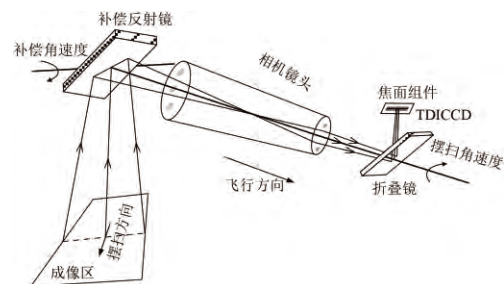


图1 摆扫相机摆扫成像原理

Fig. 1 Imaging principle of scanning camera

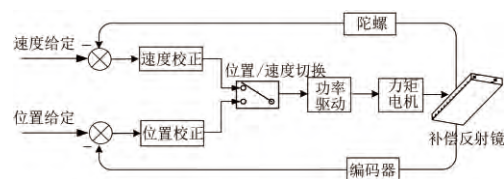


图2 前向像移补偿反射镜控制系统结构

Fig. 2 Control system structure of forward image motion compensation mirror

转弯半径为无穷大时的成像过程。载机直飞摆扫成像过程的主要参数及几何模型如图3所示。图3中 v 表示载机沿飞行方向的速度, h 表示载机与地面的相对高度, R 表示成像初始时刻相机主光轴在惯性空间的滚转角, β 表示相机的纵向(飞行方向)视场角, θ 表示相机横向摆扫角。对于成像区域中任意一点 A , 摆扫成像过程中 A 点对应的线速度为载机对地速度 v 。为计算 A 点的前向像移角速度 ω_A^F , 将 v 按图4所示进行分解, v_A^F 表示垂直于 PA 的速度分量, 为 A 点前向像移线速度。 v_A^H 表示沿 PA 方向的速度分量, v_A^H 不产生像移, 只会导致物距微小增加, 航空相机的成像距离远且景深较大, 物距的

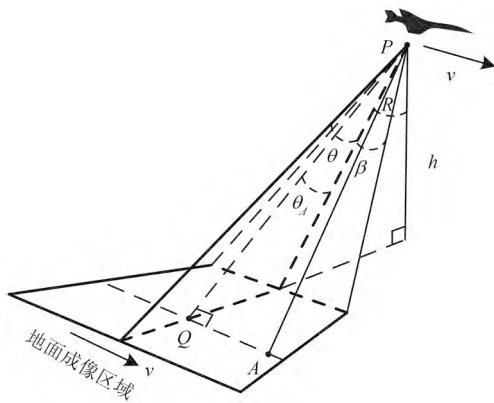


图3 直飞摆扫成像几何模型

Fig. 3 Geometrical model of scanning imaging for straight flight

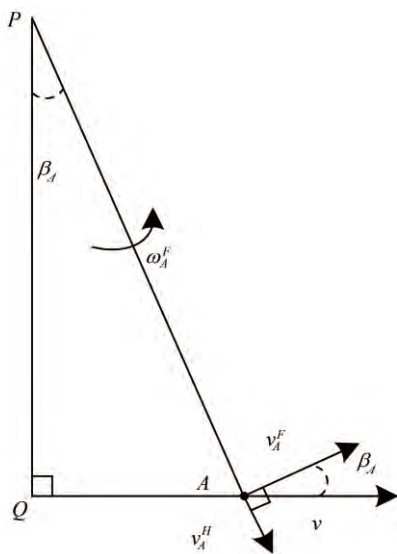


图4 直飞摆扫成像前向速度分解

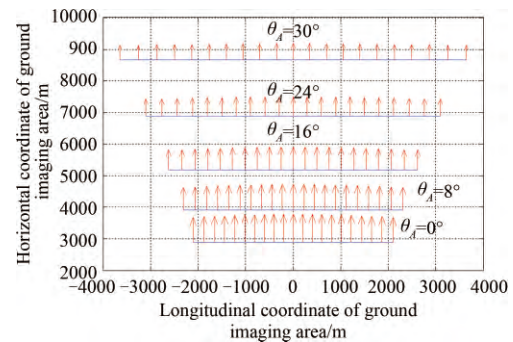
Fig. 4 Forward velocity decomposition of scanning imaging for straight flight

微小变化不影响成像质量。

ω_A^F 可以通过式(1)进行计算, 式(1)中 β_A 表示 A 点对应的纵向视场角, θ_A 表示 A 点对应的摆扫角, η 为速高比, $\eta=v/h$ 。

$$\omega_A^F = \frac{v \cos(\beta_A)}{h / (\cos(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A))} = \frac{\eta \cos(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A)^2}{1} \quad (1)$$

根据式(1)可以计算出直飞成像过程中成像区域不同位置的前向像移角速度, 图5给出了 $h=5\,000\text{ m}$, $\beta=20^\circ$, $R=30^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\eta=0.03\text{ rad/s}$ 时成像区域的前向像移速度场。图5中向量表示地面景物点的前向像移角速度, 为了便于对比分析, 对向量幅值进行了归一化处理, 并将向量沿顺时针转动 90° 。由图5可知, 摆扫角相同的地面景物点的前向像移角速度随纵向视场角的增大而减小; 纵向视场角相同的地面景物点的前向像移角速度随着摆扫角的增大而减小。

图5 直飞摆扫成像过程中 ω_A^F 变化情况Fig. 5 Variation of ω_A^F in scanning imaging for straight flight

3.2 前向像移补偿

通过调节摆扫成像过程中前向像移补偿反射镜的补偿角速度给定 ω_F 可以有效消除横向视场角变化导致的异速像移。根据反射镜补偿原理可知, 反射镜补偿成像过程中任意时刻地面成像区域的横向视场角相同, 补偿角速度也相同; 由图5可知横向视场角相同的地面景物点的前向像移角速度存在差异, 因此存在前向像移补偿残差, 需要对该补偿残差进行计算, 评估其对成像质量的影响。

通常 ω_F 利用式(2)计算, 即 ω_F 取为同一横向视场角下的最大前向像移角速度, 该方法可称为最大值补偿的方法。显然, 在 $\beta_A=\pm\beta$ 、 $\theta_A=0$ 时应用最大值补偿方法得到的前向像移残差最大。反过来可知, 同样成像条件下, 降低最大前向像移残差可以提高成像质量。利用式(3)计算 ω_F 可有效降

低最大前向像移残差, ω_F 取为同一横向视场角下的前向像移角速度的均值, 故称该方法为均值补偿方法。由式(3)可知均值补偿方法在 $\beta_A = \pm\beta$ 、 $\theta_A = 0$ 时前向像移补偿残差最大。

$$\omega_F = \eta \cos(R + \theta_A), \quad (2)$$

$$\omega_F = \frac{1}{2\beta} \int_{-\beta}^{\beta} \eta \cos(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A)^2 d\beta_A = \eta \cos(R + \theta_A) \cdot \left(\frac{\sin(2\beta)}{4\beta} + \frac{1}{2} \right). \quad (3)$$

摆扫成像过程中同一纵向视场角下的最大前向像移补偿残差量 d_F 可由式(4)计算, 其中 f 表示相机焦距, t 表示曝光时间。

$$d_F = \text{abs}(\omega_A^F - \omega_F) \cdot f \cdot t / \cos(\beta). \quad (4)$$

图6比较了两种前向像移补偿方法中 d_F 随纵向视场角的变化情况。图6中 $f=500 \text{ mm}$, $t=0.01 \text{ s}$, $\eta=0.03 \text{ rad/s}$, $R=30^\circ$, $\beta=10^\circ$ 。由图6可知, 相同成像条件下均值补偿方法所产生的补偿残差量小于最大值补偿方法所产生的补偿残差量。为了保证成像质量, 要求最大像移补偿残差量小于 $1/3$ 像元长度。假设选取像元大小为 $9 \mu\text{m}$ 的TDI CCD, 由图6可知当纵向视场角为 10° 时, 均值补偿方法的最大像移补偿残差为 $2.6 \mu\text{m}$, 满足成像要求; 最大值补偿方法的最大像移补偿残差为 $4.0 \mu\text{m}$, 超过 $1/3$ 像元长度。

4 转弯成像像移分析

4.1 前向像移建模

载机转弯成像的几何模型如图7所示。

图7 P 点为载机所处位置, P' 点为 P 点在地面的投影, O 点为载机转弯飞行的圆心, O' 点为 O 点在地面的投影, r 为载机转弯半径, ω 为载机转弯的角速度, ω_A 为任意地面景物点 A 对应的转弯角速度, Q 点为摆扫成像过程中对 A 点成像时刻成像景物所在直线与直线 $O'P'$ 的交点。通过分析转弯成像过程可知 $\omega_A = \omega$, 即转弯成像过程中地面景物点以与载机相同的角速度绕 O' 点转动。

设 A 点成像时线速度为 v_A , 则有 $v_A = |O'A| \omega$, 将

$$\omega_c^F = \frac{(r + h \cdot \tan(R + \theta_A)) \cdot \cos(\beta_A) \cdot \omega}{h / (\cos(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A))} = \eta \cdot \cos(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A)^2 + \omega \cdot \sin(R + \theta_A) \cdot \cos(\beta_A)^2 \quad (6)$$

根据式(6)可以得出经幅值归一化处理后, ω_T^F 及 ω_c^F 在成像区域的变化情况, 为了便于比较将前向像移角速度的方向顺时针转动 90° ,

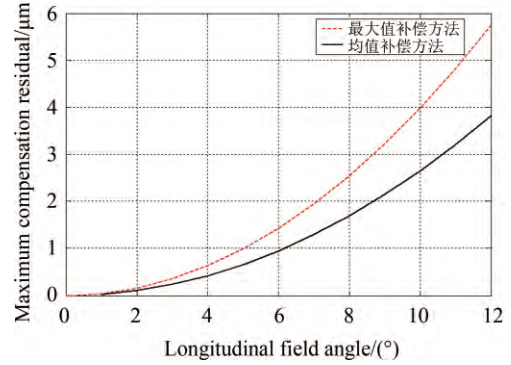


图6 最大像移补偿残差随纵向视场角的变化情况

Fig. 6 Maximum image motion compensation residual varies with longitudinal field angle

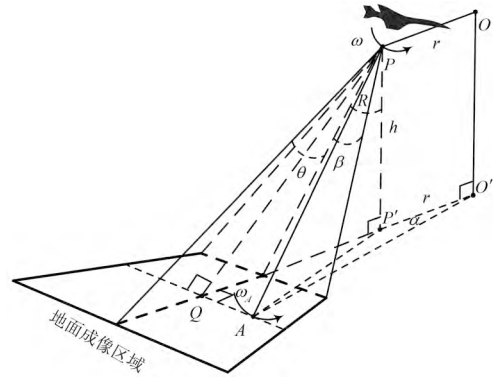


图7 载机转弯摆扫成像几何模型

Fig. 7 Geometrical model of scanning imaging for turning flight

v_A 按图8所示分解为平行于 QA 的速度分量 v_A^T 及垂直于 QA 的速度分量 v_A^S , 则有 $v_A^T = v_A \cos(\alpha)$, $v_A^S = v_A \sin(\alpha)$ 。根据图8可知 $|O'A| = |O'Q| / \cos(\alpha)$, 则 v_A^T 可由式(5)计算出。根据式(5)可推导出转弯成像前向像移角速度 ω_c^F 的计算方法如式(6)所示。由式(6)可知 ω_c^F 由两部分组成, 一部分为载机前向飞行产生的前向像移角速度 ω_A^F ; 一部分为载机转弯产生的前向像移角速度 ω_T^F ($\omega_T^F = \omega \sin(R + \theta_A) \cos(\beta_A)^2$)。 ω_T^F 由 ω 、 β_A 及横向视场角 $(R + \theta_A)$ 决定, 与载机航高无关; 当 ω 趋近于0时, ω_T^F 趋近于0, 载机由转弯飞行趋近于直飞, ω_c^F 趋近于 ω_A^F 。

$$v_A^T = |O'Q| \cdot \omega = (r + h \cdot \tan(R + \theta_A)) \cdot \omega, \quad (5)$$

其中 $h = 5000 \text{ m}$, $R = 30^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\beta = 20^\circ$, $\omega = 1^\circ/\text{s}$, $\eta = 0.02 \text{ rad/s}$ 。结果如图9-10所示, 由图9可知 ω_T^F 的幅值随 θ_A 的增加而增大, 随 β_A 的增加而减小; 由图10

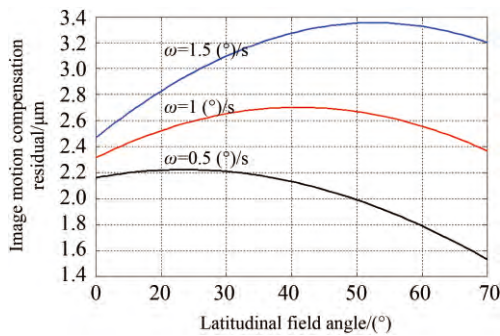


图 11 像移补偿残差量随横向视场角的变化情况
Fig. 11 Image motion compensation residual varies with latitudinal field of view

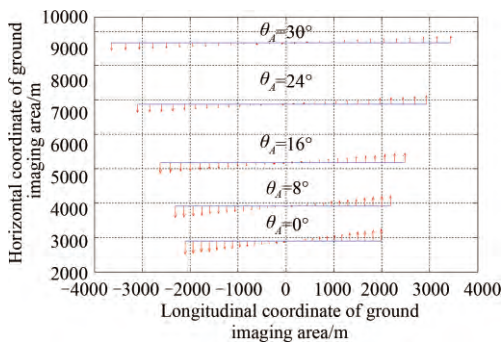


图 12 转弯摆扫成像过程中 ω_A^s 的变化情况
Fig. 12 Variation of ω_A^s of scanning imaging for turning flight

制, 通常无法对 ω_A^s 进行补偿。因此, 需要分析摆扫成像过程中 ω_A^s 所导致的最大横向像移量 d_s 对成像质量的影响, d_s 可由式(11)进行计算。

由式(11)可以得出不同转弯角速度下 d_s 随纵向视场角的变化情况(图13), 其中 $R=30^\circ$, $f=500\text{ mm}$, $t=0.005\text{ s}$ 。若 CCD 像元为 $9\text{ }\mu\text{m}$, 当 $\omega=1(^\circ)/\text{s}$ 时, d_s 达到 $3\text{ }\mu\text{m}$ (三分之一像元) 时 $\beta=4.5^\circ$; 当 $\omega=0.5(^\circ)/\text{s}$ 时, d_s 达到 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时 $\beta=9.1^\circ$ 。

$$d_s = \omega \cdot \cos(R) \cdot \tan(\beta) \cdot f \cdot t / \cos(\beta). \quad (11)$$

5 转弯成像试飞试验

对转弯成像试飞过程中的某型航空摆扫相机, 应用本文提出的转弯成像像移补偿方法进行像移补偿。试飞图像如图14所示, 转弯成像过程中的主要参数设置如下: $\eta=0.018\text{ rad/s}$, $\omega=0.89(^\circ)/\text{s}$, $\beta=1.5^\circ$ 。图14(a)为横向视场角为 25° 时所成图像, 根据式(7)可知, 此时载机前向飞行所引起的前向像移分量起主导作用; 图14(b)为横向视场角为 55° 时所成图像, 此时载机转弯所引起的前向像移分量起主导作用。通过分析图14可知, 试飞转弯成像图

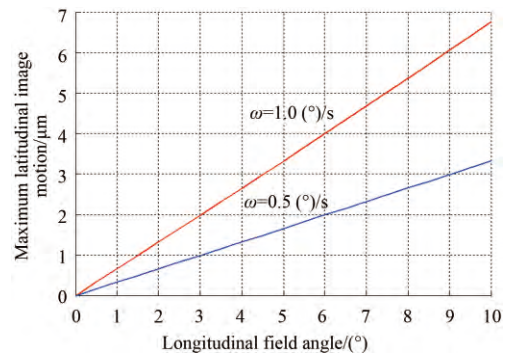
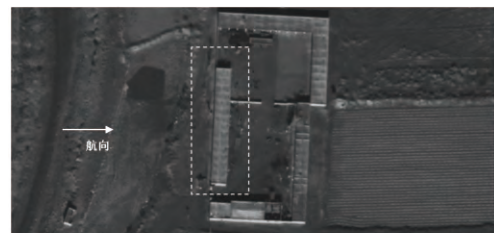


图 13 最大横向像移量随纵向视场角变化情况
Fig. 13 Maximum latitudinal image motion versus longitudinal field of view



(a) 横向视场角为 25° 时图像
(a) Image when longitudinal field of view is 25°



(b) 横向视场角为 55° 时图像
(b) Image when longitudinal field of view is 55°

图 14 试飞转弯摆扫成像图

Fig. 14 Scanning images of test turning flight

像层次清晰, 像质优良; 虚线框内建筑物前向像移方向的直线边界清晰, 无几何形变, 前向像移补偿效果良好; 这验证了本文所提出的转弯成像像移补偿方法的正确性。

6 结 论

本文对航空摆扫相机转弯成像时的像移计算及补偿进行了深入分析, 建立了转弯成像的像移计算模型, 给出了基于均值补偿的转弯成像前向像移补偿方法。根据转弯成像像移计算模型可知转弯成像前向像移角速度由两部分组成, 一部分像移角速度取决于载机速高比, 其幅值随着横向视场角的增大而减小, 与载机直飞成像前向像移角速度相同; 另一部分像移角速度由载机转弯角速

度决定, 其幅值随着横向视场角的增大而增大, 与载机的飞行高度无关。

转弯前向像移补偿分析结果表明, 相机焦距为 500 mm, 曝光时间为 0.01 s, 速高比为 0.02 rad/s, 纵向视场角为 10° , 转弯角速度为 $0.5(^\circ)/s$ 时的最大前向像移补偿残差量为 $2.22\ \mu\text{m}$; 转弯角速度为 $1.5(^\circ)/s$ 时, 最大前向像移补偿残差量为 $3.36\ \mu\text{m}$ 。转弯成像横向像移量随纵向视场角幅值的增加而增

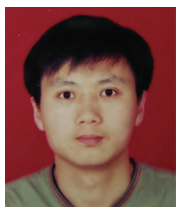
大, 当曝光时间为 0.005 s, 横向视场角为 30° , 转弯角速度为 $1(^\circ)/s$ 时, 横向像移量在纵向视场角为 4.5° 时达到 $3\ \mu\text{m}$ 。试飞成像试验结果验证了本文所提出的转弯成像像移补偿方法的正确性。本文所提出的像移计算及补偿方法对航空摆扫相机转弯成像具有重要的参考意义, 可用于计算转弯成像前向像移补偿角速度, 分析并评估前向像移补偿残差量及横向像移量对像质的影响。

参考文献:

- [1] 李昕阳, 张涛, 刘志明, 等. 全景式TDICCD摆扫航空相机像面旋转的高精度补偿[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0611001.
LI X Y, ZHANG T, LIU ZH M, *et al.*. High accuracy compensation for image surface rotation of panoramic TDI CCD scanning aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0611001. (in Chinese)
- [2] 刘志明, 朱明, 陈黎, 等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711001.
LIU ZH M, ZHU M, CHEN L, *et al.*. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711001. (in Chinese)
- [3] 李刚, 杨名字. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 401-406.
LI G, YANG M Y. Image motion measurement for airborne camera based on joint transform correlation [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 401-406. (in Chinese)
- [4] WANG D J, ZHANG T, KUANG H P. Clocking smear analysis and reduction for multi-phase TDI CCD in remote sensing system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4868-4880.
- [5] 李广泽, 孔德柱, 刘金国. 宽覆盖型光学遥感相机侧摆像移速度计算[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 750-758.
LI G Z, KONG D ZH, LIU J G. Computation of scroll image motion velocity of wide coverage optical remote camera [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 750-758. (in Chinese)
- [6] 张玉欣, 刘宇, 葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学, 2010, 1 (2): 112-118.
ZHANG Y X, LIU Y, GE W Q. Development and prospect of image motion compensation technology [J]. *Chinese Optics*, 2010, 1(2): 112-118. (in Chinese)
- [7] 赵嘉鑫, 张涛, 杨永明, 等. TDI-CCD全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728003.
ZHAO J X, ZHANG T, YANG Y M, *et al.*. Image motion velocity field of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728003 (in Chinese)
- [8] 孙辉, 张淑梅. 机载成像系统像移计算模型与误差分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(11): 2492-2499.
SUN H, ZHANG SH M. Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2492-2499. (in Chinese)
- [9] 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌. TDICCD全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2465-2472.
WANG D J, KUANG H P, CAI X CH. Digital implementation of forward motion compensation in TDICCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2465-2472. (in Chinese)
- [10] BERAN S R. Method of forward motion compensation in an aerial reconnaissance camera, US: 6366734B1 [P]. 2002
- [11] 吴宏圣, 潘凝, 翟林培. TDICCD全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 546-549.
WU H SH, PAN N, ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDICCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 546-549. (in Chinese)
- [12] 赵嘉鑫, 张涛, 杨永明, 等. TDI-CCD全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728003.
ZHAO J X, ZHANG T, YANG Y M, *et al.*. Image motion

- velocity field of TDICCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0728003. (in Chinese)
- [13] WANG D J, LI W M, YAO Y, *et al.*. A fine image motion compensation method for the panoramic TDICCD Camera in remote sensing applications [J]. *Optics Communications*, 2013, 298-299: 79-82.
- [14] 黄浦, 葛文奇, 李友一, 等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(4): 812-819. HUANG P, GE W Q, LI Y Y, *et al.*. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 812-819. (in Chinese)
- [15] 付金宝, 丁亚林, 仲崇亮, 等. 带干扰观测器的航空相机前向像移补偿控制器[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1456-1463. . FU J B, DING Y L, ZHONG CH L, *et al.*. Compensation controller with disturbance observer for forward image motion of aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6): 1456-1463. (in Chinese)
- [16] 李文明, 徐正平, 陈希惠, 等. 飞机大坡度转弯对航空相机成像的影响[J]. 光电工程, 2012, 39(6): 29-33. LI W M, XU ZH P, CHEN X H, *et al.*. Influence of aircraft sharp turns on the image quality of the aerial camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(6): 29-33. (in Chinese)

作者简介:



杨永明 (1980-), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 2009年于吉林大学获得博士学位, 主要从事航空光电成像技术及航空稳像控制技术研究。
E-mail: yongmingyang@sohu.com