

文章编号 1004-924X(2012)11-2439-05

面阵彩色航空遥感相机前向像移补偿机构精度分析

李延伟^{1,2*}, 远国勤^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中科院航空光学成像与测量重点实验室,
吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:考虑航空遥感相机中前向像移补偿机构的运动精度会直接影响相机分辨率,本文对相移补偿机构的补偿精度进行了分析。首先,研究了面阵彩色航空遥感相机的机械式前向像移补偿机构的特点,给出了对应于曝光时间的前向像移补偿速度残差的许用值;其次,分析了影响像移补偿精度的主要误差来源,建立了速度补偿残差的数学模型,并运用 Monte Carlo 算法对其进行了仿真分析;最后,通过动态目标发生器成像试验对仿真结果进行验证。试验结果显示,前向像移补偿机构的速度补偿残差 3σ 为 $395.6 \mu\text{m/s}$,与仿真分析结果 $400 \mu\text{m/s}$ 基本一致,说明该精度分析方法可以比较准确地确定前向像移补偿精度。

关键词:航空相机;像移补偿;速度补偿残差;精度分析;Monte Carlo 算法

中图分类号:V447.3;V243.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2439

Accuracy analysis of forward image displacement compensation device for aerial scan color CCD camera

LI Yan-wei^{1,2*}, YUAN Guo-qin^{1,2}

- (1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yanwei201314@163.com*

Abstract: The compensation accuracy of a forward image displacement compensation device in an area scan color CCD camera was analyzed, because it would influence the resolution of the camera directly. The characteristics of the mechanic compensation device were researched, and the allowable residual error of the velocity compensation corresponding exposure time was given. A mathematical model for the residual error of velocity compensation was established after analyzing main error sources of the device, then the error model was simulated by the Monte Carlo method. Finally, the compensation accuracy was verified by an imaging test with a dynamic target simulator. The test results show that the residual error of velocity compensation is $395.6 \mu\text{m/s}$, which is coincident with the simulation data $400 \mu\text{m/s}$. It is concluded that the method can estimate accurately the matching error accuracy.

Key words: aerial camera; image displacement compensation; residual error of velocity compensation; accuracy analysis; Monte Carlo method

收稿日期:2012-05-11;修订日期:2012-07-25.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA701203)

1 引言

航空遥感相机工作时,在曝光时间内被照物影像相对于感光介质间的相对运动称为像移。像移会引起图像拖尾,导致成像模糊,直接影响相机的分辨率,因此要获取高质量图像必须进行像移补偿^[1-3]。对垂直工作状态的面阵彩色航空遥感相机而言,前向像移是影响其分辨率的主要因素。由于面阵彩色 CCD 滤镜阵列采用 Bayer 滤波模式工作,无法通过电荷转移的方式(即 TDI 功能)进行前向像移补偿,因此面阵彩色航空遥感相机需要设置像移补偿机构补偿前向像移。

像移补偿的前提是准确地计算像移,目前计算像移速度的方法有矢量分解法^[4]和坐标变换法^[5]。像移补偿机构应按照与像移速度一致的原则驱动感光介质以消除像移,但由于受支撑形式、原动件动力学性能、机构运动转化方式、制造及装调误差等因素影响,机构的驱动速度不可能与像移速度完全一致。在曝光时间内,感光介质的移动速度与理论像移速度在补偿后仍存在的相对速度称为像移补偿速度残差,像移补偿速度残差不可能完全消除。

本文从航空相机感光介质与被照景物像移速度一致性角度出发,分析了影响像移补偿精度的主要原因,建立了像移补偿速度残差的数学模型,采用 Monte Carlo 算法对模型进行了仿真分析,并通过试验进行了验证。

2 前向像移补偿机构原理

航空遥感相机有多种像移补偿方式,对应有不同的像移补偿机构^[6-7]。对于某面阵彩色航空遥感相机,采用了等径共轭凸轮机构驱动 CCD 探测器的机械式像移补偿方式,该方式具有传动链短、误差传递环节小、探测器上各处前向像移补偿速度一致等优点。

像移补偿机构主要由高速电机、凸轮轴、等径共轭凸轮机构、支座、精密直线导轨以及轴角传感器等组成,图 1 所示为其机构简图。选用摆线修正的等速运动规律作为等径共轭凸轮机构的运动规律,其工作原理为:高速电机作为机构的原动件,通过减速器后驱动凸轮轴,等径共轭凸轮机构

配合精密直线导轨将电机的单向圆周运动转化为 CCD 探测器的直线运动,实现对前向像移的补偿。

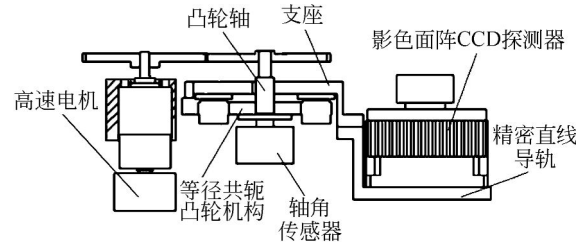


图 1 前向像移补偿机构简图

Fig. 1 Structural diagram of forward image displacement compensation device

3 像移补偿精度分析与速度残差数学模型

为保证遥感相机的动态分辨率,在快门曝光时间 t 内,像移补偿速度残差 ΔV 导致的像移量不大于 $1/3$ 个像元,即:

$$\Delta V \cdot t \leq \frac{a}{3}, \quad (1)$$

式中: a 为 CCD 像元尺寸,该面阵彩色航空遥感相机的像元尺寸 $a=12 \mu\text{m}$ 。

据式(1)可确定不同曝光时间所对应的像移补偿速度残差许用值,如图 2 所示。

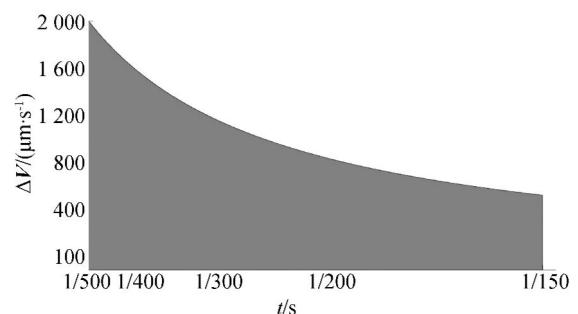


图 2 像移补偿速度残差许用值

Fig. 2 Allowable value of residual error of velocity compensation

像移补偿机构的误差来源主要有零件制造误差、装调误差、非平衡负载造成的原动件输出速度波动和光学系统误差等。本节将对各种误差进行分析,建立像移补偿速度残差的数学模型。

3.1 加工误差对像移补偿速度残差的影响

像移补偿机构驱动 CCD 探测器的理论速度

为:

$$\mathbf{V}(\delta) = \frac{v}{H}f = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_i), \quad (2)$$

式中: $\mathbf{V}(\delta)$ 为理论像移补偿速度, v 为遥感相机航迹速度, H 为航迹高度, f 为遥感相机光学系统焦距, δ 为等径共轭凸轮转角, x_i 为凸轮机构中各零件名义尺寸。

由于存在制造误差, x_i 有误差小量 Δx_i ,造成前向像移补偿速度残差 $\Delta V_1(\delta)$,即:

$$\mathbf{V}(\delta) + \Delta \mathbf{V}_1(\delta) = \varphi(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_i + \Delta x_i).$$

文献[8]给出了加工误差(凸轮基体加工误差 ΔR_{2i} 和滚子径向跳动误差 ΔR_{1i} 造成的 CCD 位移误差函数 $\Delta L(\delta_i)$):

$$\Delta L(\delta_i) = \left[\cos \alpha - \frac{R \sin^2 \alpha}{\sqrt{\rho_2^2(\delta_i) - R^2 \sin^2 \alpha}} \right] \Delta R_{1i} + \left[\frac{\rho_2(\delta)}{\sqrt{\rho_2^2(\delta_i) - R^2 \sin^2 \alpha}} \right] \Delta R_{2i}, \quad (3)$$

式中: α 为凸轮机构压力角, R 为滚子半径, $\rho_2(\delta)$ 凸轮工作轮廓上 δ 角向径。根据式(3)可得加工误差造成的像移补偿速度残差:

$$\Delta \mathbf{V}_1(\delta) = \frac{d\Delta L(\delta)}{d\delta} \times \frac{d\delta}{dt} = \Delta L'(\delta) \times \omega, \quad (4)$$

式中: ω 为凸轮角速度。

3.2 控制系统对像移补偿速度残差的影响

伺服系统中由于存在凸轮机构压力角的变化造成负载不平衡性,高速电机不可避免地存在力矩波动,影响速度稳定度^[9]。速度稳定度函数 $\varphi(\delta)$ 可由布置于凸轮轴末端的轴角传感器测得。根据凸轮机构的等速运动规律,可得出高速电机控制系统精度对像移补偿残差的影响:

$$\Delta \mathbf{V}_2(\delta) = \frac{h}{\delta_0} \varphi(\delta), \quad (5)$$

式中: $\frac{h}{\delta_0}$ 为等径共轭凸轮机构类速度。

3.3 其他误差对像移补偿速度残差的影响

遥感相机光学系统误差和遥感相机工作姿态测量误差等将会干扰像移补偿理论值的计算。光学系统焦距、航迹速度和航迹高度,分别有误差量 Δv 、 ΔH 及 Δf 时,由式(2)可得像移补偿速度残差为^[10]:

$$\Delta \mathbf{V}_3(\delta) = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial v} dv + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial f} df + \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial H} dH = \frac{fH\Delta v + vH\Delta f - vf\Delta H}{H^2}. \quad (6)$$

根据矢量合成原理,可给出像移补偿速度残差为:

$$\Delta \mathbf{V}(\delta) = \Delta \mathbf{V}_1(\delta) + \Delta \mathbf{V}_2(\delta) + \Delta \mathbf{V}_3(\delta). \quad (7)$$

4 应用 Monte Carlo 算法分析前向像移补偿精度

由于各种误差因素的随机分布性,采用数值解析方法难以解算前向像移补偿速度残差,应用 Monte Carlo 算法,通过给出相关的参数误差概率分布模型来计算所需特征的统计值,从而得出遥感相机的像移补偿残差。

首先根据像移补偿速度残差模型,确定影响残差的因素以及各参数的误差分布和参数特征值,生成随机数列 $\Delta H_n, \Delta v_n, \dots, \Delta R_{1n}$ ($n=1, 2, \dots, 3\ 600$),如表 1 所示。然后根据遥感相机使用技术指标,确定一组工作参数名义值 H, v, f ,将上述数据带入误差数学模型,计算出实际像移补偿残差。当速高比为航空遥感相机上限(0.171/s)时,仿真得出的像移补偿速度及残差统计结果如图 3、图 4 所示。根据统计结果,像移补偿速度残差 $3\sigma(\Delta \mathbf{V}) = 400\ \mu\text{m/s}$,在曝光时间不大于 1/150 s 时,像移量小于 4 μm ,满足使用要求。

表 1 残差的影响因素及参数特征值

Tab. 1 Influencing factors and parameter characteristic roots of residual errors

序号	名称	误差分布	误差量(3 σ)	备注
1	航迹高程/m	正态分布	40 ^[2]	测量精度
2	航迹速度/(m·s ⁻¹)	正态分布	6 ^[2]	测量精度
3	遥感相机焦距/mm	正态分布	0.2	测量精度
4	滚子径向跳动误差/ μm	正态分布	1	研磨精度
5	凸轮基体加工误差/ μm	正态分布	2.5	加工精度
7	原动件输出速度波动/(rad·s ⁻¹)	正态分布	4.7 ^[9]	控制精度

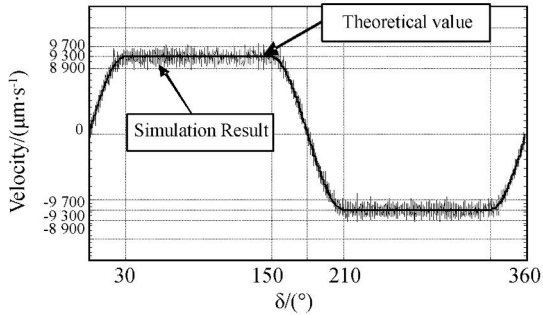


图 3 像移补偿速度仿真结果

Fig. 3 Simulation result of velocity compensation

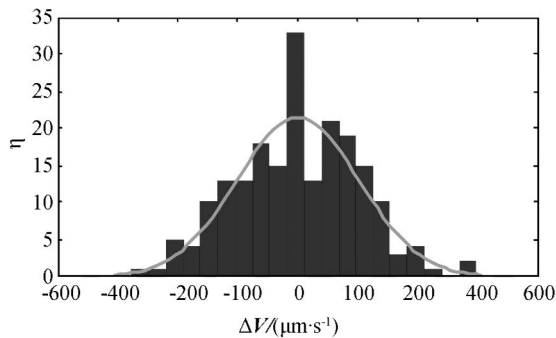


图 4 像移补偿速度残差频率密度分布

Fig. 4 Frequency density portion of residual error

5 试验验证

根据某彩色面阵 CCD 遥感相机的要求,设计制造了机械式像移补偿机构,对动态目标发生器成像以验证像移补偿速度残差数学模型。实验装置如图 5 所示。通过调节动态目标发生器精确模拟目标(分辨率板)在不同速高比下的姿态速率,遥感相机像移补偿机构带动 CCD 像面运动,补偿目标移动带来的像移,对动态分辨率板成像。获取的图像如图 6 所示。通过对分辨率板的判读对像移补偿精度进行评价。当快门曝光时间为 $1/150$ s 时,遥感相机目视动态分辨率 R_{di} 可达到 37 Lp/mm,对比遥感相机的静态分辨率 $R_{si}=41$ Lp/mm,依据文献[11]给出的计算公式: $\frac{1}{R_{di}} = \frac{1}{R_{si}} + \delta$ (δ 为像移量),计算得出 $\delta=2.637 \mu\text{m}$,则此时前向像移补偿速度残差 $\Delta V=395.6 \mu\text{m/s}$,与仿真结果一致。但

由于速度残差模型中未考虑各误差因素的相关系数和快门曝光时间误差,致使仿真结果与实验值间存在一定差异。

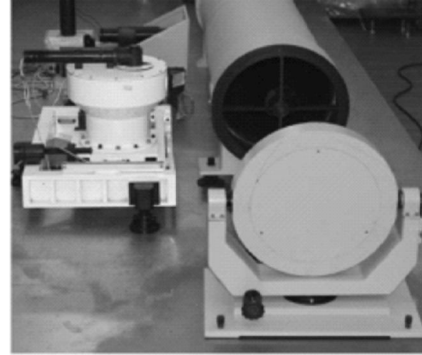


图 5 像移补偿精度测量实验装置

Fig. 5 Experimental facility of measuring compensation accuracy

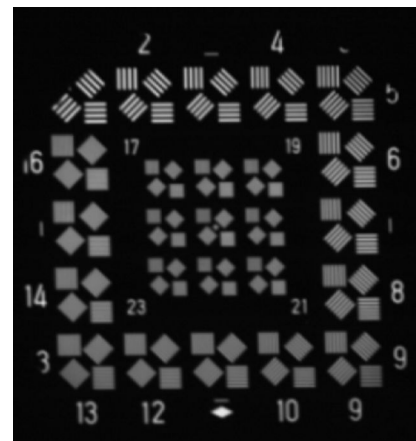


图 6 相机动态目标成像图

Fig. 6 Image of dynamic target simulator

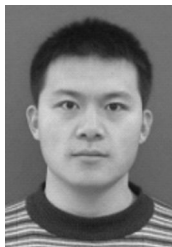
6 结论

像移补偿本质上是速度的补偿,本文从像移补偿机构速度残差的许用值出发,分析了影响前向像移速度补偿精度的主要因素,建立了速度残差的数学模型,并采用 Monte Carlo 算法对像移补偿残差的频率密度进行了仿真分析。仿真结果显示,前向像移速度补偿残差 $3\sigma=400 \mu\text{m/s}$,在曝光时间不大于 $1/150$ s 时,满足遥感相机的指标要求。通过动态目标发生器成像试验验证了该方法的有效性,证明该方法可比较精确地确定像移补偿速度精度,并可用于其他类型的像移补偿方式的分析与计算。

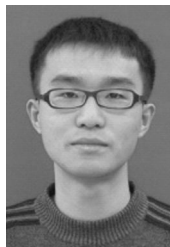
参考文献:

- [1] LAREAU A G. Electro-optical imaging array with motion compensation [J]. *SPIE*, 1993, 2023:65-79.
- [2] 许永森,丁亚林,田海英,等.推扫式航空遥感相机像移补偿精度的分析[J].*光学精密工程*, 2009, 17(2):454-456.
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y. Analysis of image motion compensation accuracy for aerial push-broom sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):454-456. (in Chinese)
- [3] 张树青,丁亚林,李友一.斜视步进画幅遥感相机像移补偿方法研究[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(3):502-504.
ZHANG SH Q, DING Y L, LI Y Y. Image motion compensation method of a step-frame LOROP camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3):502-504. (in Chinese)
- [4] 刘明,吴宏圣,匡海鹏.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. Method and application of image motion compensation in aerospace camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4):30-34. (in Chinese)
- [5] 袁海燕,袁红艳,田国华.航空遥感面阵 CCD 相机像移速度计算方法[J].*黑龙江工程学院学报(自然科学版)*, 2010, 24(1):73-76.
YUAN H Y, YUAN H Y, TIAN G H. Calculation of image motion in CCD camera [J]. *Journal of Heilongjiang Institute of Technology*, 2010, 24(1):73-76. (in Chinese)
- [6] LIGHT D. An airborne direct digital imaging system [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, 67(11):1299-1305.
- [7] 谷松,王绍举,金光.高精度空间相机像移补偿机构设计与试验[J].*长春理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 34(2):16-19.
GU S, WANG SH J, JIN G. Design and test for fine image motion compensation mechanism in space camera [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2011, 34(2):16-19. (in Chinese)
- [8] 惠守文,远国勤,丁亚林,等.等径共轭调焦凸轮机构的精度分析及优化设计[J].*光电工程*, 2010, 37(5):133-138.
HUI SH W, YUAN G Q, DING Y L, et al.. Accuracy analysis and optimization design of constant-diameter conjugate focusing cam [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(5):133-138. (in Chinese)
- [9] 宋彦,高慧斌,张淑梅,等.直流力矩电机力矩波动的自适应补偿控制[J].*光学精密工程*, 2010, 18(10):2212-2216.
SONG Y, GAO H B, ZHANG SH M, et al.. Adaptive compensation of torque ripple in DC torque motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2212-2216. (in Chinese)
- [10] 毛英泰.误差理论与精度分析[M].北京:国防工业出版社,1982.
MAO Y T. *Error Theory and Precision Analysis* [M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1982. (in Chinese)
- [11] 陈惠萍,蔡俊良.航空摄影系统中分辨率的匹配问题[J].*测绘学报*, 1987, 16(2), 121-124.
CHEN H P, CAI J L. On the matching of resolution in an aerial photographic system [J]. *Acta-geodetica et Cartographica Sinica*, 1987, 16(2):121-124. (in Chinese)

作者简介:



李延伟(1983—),男,山东郓城人,博士研究生,助理研究员,2005年于四川大学获学士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事航空相机光机结构设计及优化方面的研究。E-mail: yanwei201314@163.com



远国勤(1984—),男,河南周口人,博士研究生,助理研究员,2005年、2007年于吉林大学分别获学士、硕士学位,主要从事光机结构设计方面的研究。E-mail: 2581876@sina.com