

面阵 CCD 航测相机像移补偿技术研究

任航, 袁红艳

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 航空相机在拍照瞬间由于飞机的飞行运动和姿态变化而产生像移, 要提高照相分辨率必须通过像移补偿来实现。采用在相机与飞机间增设三轴稳定平台的机械式像移补偿法来补偿姿态像移和前向像移, 三轴稳定平台的三轴按照与飞机姿态变化角速率相等、方向相反进行旋转补偿姿态像移, 三轴稳定平台的俯仰轴以飞行方向反方向、角速率等于速高比旋转补偿前向像移, 并采用坐标变换法计算像移补偿后的残差, 通过分析面阵 CCD 相机像面各点在进行像移补偿后的像移残差均小于 $1/3$ 像元, 符合成像要求。

关键词: 面阵 CCD; 航测相机; 像移; 像移补偿; 残差; 坐标变换

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2011)03-0417-04

Research on Image Motion Compensation of Airborne Camera of Focal Plane CCD

REN Hang, YUAN Hongyan

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

Abstract: To improve the imaging quality and the image resolution of airborne cameras, it is necessary to compensate the image motion (IM) emerging in photographing. Three axis stable platform is assembled between the camera system and the unmanned aircraft, and the IM caused by the variation of the airplane gesture angles including pitching angle, yawing angle and rolling angle can be compensated by the reverse rotation of the stable platform in corresponding axis. The residual errors of the IM after compensation are analyzed and calculated in detail. The analysis results show that the residual errors of the image points are less than one third of the diameter of CCD pixel, which satisfies the imaging system.

Key words: focal plane CCD; airborne camera; image motion; image motion compensation; residual error; coordinates transformation

0 引言

像移补偿技术是航空相机的关键技术之一。航空相机拍照时, 由于振动, 飞行器的运动及相机的摆动使相机在曝光时目标影像与感光介质间发生相对运动, 导致成像模糊, 被称为像移。像移的存在, 使一点经过相机成的像变成线, 极大地影响了相机成像质量, 相机的分辨率严重下降。所以要获得高分

辨率航空图像, 必须进行像移补偿。目前常用的像移补偿法有光学式像移补偿法、机械式像移补偿法、电子式像移补偿法, 以及软件式像移补偿法。

采用在相机与飞机间增设三轴稳定平台的机械式像移补偿法来补偿姿态像移和前向像移, 三轴稳定平台的三轴按照与飞机姿态变化角速率相等、方向相反进行旋转补偿姿态像移, 三轴稳定平台的俯仰轴以飞行方向反方向、角速率等于速高比旋转补偿前向像移, 并采用坐标变换法计算像移补偿后的残差, 通过分析面阵 CCD 相机像面各点在进行像移补偿后的像移残差均小于 $1/3$ 像元, 满足成像要求,

收稿日期: 2010-11-16.

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项目(ZJ99130B).

证明本文提出的像移补偿方法是可行的。

1 面阵 CCD 航测相机像移补偿方法

1.1 前向像移补偿方法

在面阵 CCD 测绘相机拍照过程中,俯仰轴以角速度 ω_c 匀速摆动,工作在速度控制模式下,运动周期与拍照周期一致。工作过程如下:一次拍照结束,俯仰轴快速沿飞行方向运动到某个固定位置(根据速高比、面阵数码相机靶面尺寸等计算),然后以角速度 ω_c 沿飞行反方向匀速摆动进行拍照。重复上述过程,完成像移补偿过程。

稳定平台伺服控制系统接收到准备命令后,伺服控制系统控制稳定平台快速转到相机控制器预先设定的位置,等待拍照。当拍照指令下达到平台控制系统后,方位轴、滚转轴陀螺稳定,俯仰轴由起始位置启动,经 t_1 秒后进入稳速阶段,俯仰轴工作在速度控制模式下并沿飞行反方向摆动,保持速度 V/H 匀速,当摆动到镜头与地面垂直时,发送开始曝光信号;当俯仰轴到达扫描末位置时,即一次拍照结束后,俯仰轴按照位置控制模式快速转到起始位置,进行下一次拍照。当俯仰轴到达起始位置后自动由位置控制转速度控制,进行像移补偿。如此循环,直到拍照结束。

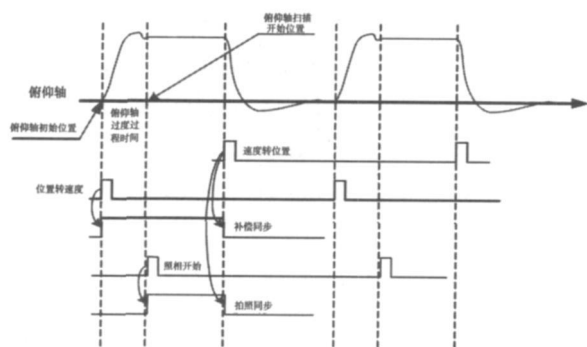


图1 旋转俯仰轴方法控制示意图

面阵 CCD 测绘相机摄影时间间隔 T 的计算如下:

$$T = (1 - \eta)H/V \times A/f$$

式中,航向重叠率 $\eta = 60\%$, A 为 CCD 面阵尺寸, H 为飞机的飞行高度, V 为飞机的飞行速度。

面阵 CCD 测绘相机中央控制系统根据 V 和 H 计算得到拍摄间隔,根据预定的程序动进行连续拍摄。

1.2 俯仰/偏航及横滚引起的像移补偿

面阵 CCD 测绘相机对由于飞机飞行姿态的变

化引起的像移补偿通过采用旋转三轴稳定平台三个轴系(俯仰轴、方位轴、横滚轴),其角速率与飞机姿态变化角速率相等、方向相反。当飞机姿态变化时,为了补偿其引起的像移,面阵 CCD 相机采用在飞机机体与相机光学系统与焦平面之间增设三轴陀螺稳定平台的方法补偿飞机的姿态变化引起的像移,具体实现过程是:当控制系统接收到飞机的三个姿态角变化信息,伺服控制器控制三轴陀螺稳定平台的三个轴旋转,其旋转的方向分别与飞机姿态变化的相反,从而达到补偿作用。三轴陀螺稳定平台进行像移补偿时其控制方法是:收到准备、停止拍照指令或者拍照周期内相机正在检调光指令,控制系统启动位置闭环控制,其位置反馈量是 IMU 的输出,保持相机在曝光前垂直对地且完成偏流补偿;收到拍照指令后,控制系统启动速度控制,速度反馈量是安装在稳定平台三个轴系上的速率陀螺,从而实现姿态补偿。

1.3 旋转俯仰轴方法旋转角速度计算

如图 2 所示,垂直放置的航空相机在曝光的瞬间,由于飞机的飞行运动,地物 A 相对飞机运动到 A' ,像点运动到 a' ,造成了影响移动,如果在相机曝光的同时,使 CCD 适当移动,则可以使像点 a 相对静止不动。

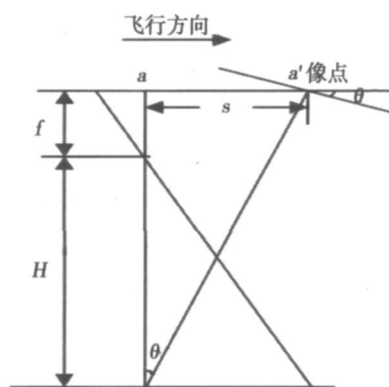


图2 补偿速度计算示意图

俯仰轴的角速度计算如下:

曝光开始时目标通过中心投影在像面上所成的像点为 a , 经过 t 时刻曝光后像点移动到 a' , 则经过 t 时刻的 a 点的像移量为

$$s = V_{imc} t$$

当采用俯仰轴旋转的方法补偿此像移 s 时,俯仰轴的旋转角速度为

$$\theta = \arctg(s/(f + H))$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{f+H}\right)^2} \times \frac{V}{f+H}$$

式中, θ 为俯仰轴的转动角度, s 为相机曝光过程中飞机的飞行距离, $s = Vt$, t 为曝光时间, V 为飞机飞行速度, f 为相机物镜焦距, H 为飞机的航高。

由于 $f, s \ll H$, 因此上式可简化为 $\omega_c = V/H$ 。由于计算舍入误差带来的像移量如表 1 所示, 其中曝光时间取 1/1000、1/500、1/250 和 1/100 s, $f = 90$ mm, V 取 50 m/s (最大速度), H 分别取 3 000 m (最低高度) 和 5 000 m。

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \cos \phi \\ V \sin \phi \\ 0 \end{bmatrix}$$

解得:

$$\begin{cases} V_x = V(\cos \theta \cos^2 \phi + \cos \theta \sin^2 \phi) \\ V_y = (\sin \alpha \sin \theta \cos^2 \phi - \cos \alpha \sin \theta \cos \phi + \sin \alpha \sin \theta \sin^2 \phi + \cos \alpha \cos \phi \sin \phi) \\ V_z = (\cos \alpha \sin \theta \cos^2 \phi + \sin \alpha \sin \theta \cos \phi + \cos \alpha \sin \theta \sin^2 \phi - \sin \alpha \cos \phi \sin \phi) \end{cases}$$

式中, ϕ 、 θ 、 α 分别为在摄影时刻的偏航、俯仰和横滚姿态角。

表 1 舍入误差带来的像移量数值(单位: μm)

H/m	曝光时间/s			
	1/1000	1/500	1/250	1/100
3 000	0.500 1	0.500 2	0.500 4	0.500 9
5 000	0.18	0.18	0.180 1	0.180 2

设三轴方向上的像移角速度分别为 ω_x 、 ω_y 、 ω_z , 而垂直像平面的像移速度有可能会产生焦平面某些位置离焦, 这里不予考虑, 则另外两个像移角速度分别为 $\omega_x = \frac{V_x}{L}$, $\omega_y = \frac{V_y}{L}$ 。面阵 CCD 测绘相机采用旋转俯仰轴补偿方法补偿飞机飞行引起的像移, 此时不考虑飞机的姿态变化, 当飞机的三个姿态角都等于零时, 即航迹坐标系 G、飞机牵连铅垂地面坐标系 C、机体坐标系 S 重合时, 相机像面上的像移角速度计算如下: $\alpha = \theta = \phi = 0$, $L = H$, $\omega_x = \frac{V}{H}$, $\omega_y = \omega_z = 0$ 。因此, 面阵 CCD 测绘相机像移补偿角速度 $\omega_{mc} = V/H$, 方向与俯仰角的正向相反, 即三轴陀螺稳定平台绕 S_2 轴以 $\omega_{mc} = V/H$ 的角速度反方向旋转来补偿飞机的飞行运动引起的像移。

2 像移残差分析

为了计算像移补偿系统补偿后的残差, 将像移

从表 1 中可以看出, 由于计算舍入误差带来的近轴点像移量均不超过 1/3 像元(即 3 μm), 对成像质量的影响可以忽略。

1.4 像移补偿角速度的计算

当飞机姿态变化产生偏航俯仰和滚动角时, 飞机的速度方向与初始飞机无姿态变化时的速度方向夹角即为偏航角, 相机像移补偿速度的方向随姿态变化而变化, 像移补偿速度的大小是由飞机速度 \bar{V} 在坐标系旋转后分别在三个轴方向轴上的分量来决定的, 设这三个分量分别为 V_x 、 V_y 、 V_z :

进行分解为由于飞机飞行运动引起的像移与由于飞机姿态变化引起的像移进行讨论, 并在此基础上分别讨论由于补偿飞机飞行运动后的残差与补偿飞机姿态变化后的残差, 将其进行同方向相加, 得到总残差量。在考虑飞机姿态变化导致的补偿残差时假设飞机的飞行速度为零, 而在分析计算飞机的飞行速度导致的像移补偿残差时假设飞机的姿态角均为零。

2.1 飞机姿态变化的像移补偿残差

当飞机姿态变化时, 为了补偿其在引起的像移, 面阵 CCD 航测相机采用在飞机机体与相机光学系统与焦平面之间增设三轴陀螺稳定平台的方法补偿飞机的姿态变化引起的像移, 具体实现过程是: 当控制系统接收到飞机的三个姿态角变化信息, 伺服控制器控制三轴陀螺稳定平台的三个轴旋转, 其旋转的方向分别与飞机姿态变化的相反, 从而达到补偿作用。因此补偿飞机姿态变化引起的像移残差主要取决于面阵 CCD 测绘相机三轴陀螺稳定平台伺服控制系统的控制精度。三轴稳定平台的控制精度为 $0.1^\circ/\text{s}$, 即经过补偿后的等效飞机残余姿态角速率为 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$, 曝光时间取 1/1000、1/500、1/250 和 1/100 s, $f = 90$ mm, V 取最大速度 50 m/s, H 取最低高度 3 000 m, 由于飞机姿态变化引起的像移残差量如图 3 所示。

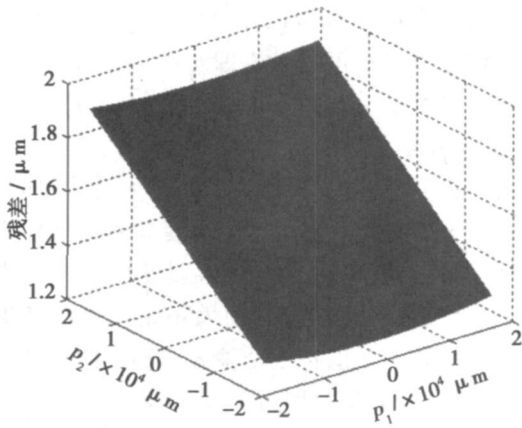


图3 姿态像移残差图

2.2 像前移补偿残差

利用坐标变换法计算飞机飞行引起的像移(像前移)补偿残差时,飞机的姿态角为零,即 $\varphi = \theta = \psi = 0$, 由于面阵 CCD 航测相机采用旋转三轴稳定平台的俯仰轴来补偿像前移,此时计算像移补偿残差时可以将其等效为飞机的飞行速度 V , 飞机的俯仰角 $\theta = \omega_{mc} t = -Vt/H$ 时的像移计算,可以计算出:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ H \end{pmatrix}$$

解得: $m_1 = H \tan \theta, m_2 = 0, L = H / \cos \theta$.

前向像移为 $\Delta p_1 = p'_1 - p_1 = \frac{fVt}{H} \cos^2 \theta +$

$\frac{fL}{H} \sin \theta \cos \theta - p_1 \sin^2 \theta$; 横向像移为: $\Delta p_2 = p'_2 - p_2$

$= 0$. 总像移残差为 $\Delta p = \sqrt{\Delta p_1^2 + \Delta p_2^2} = |\Delta p_1|$. 其中, p_1, p_2 为摄影时刻相机像面上任一点的坐标。

如图4所示为利用坐标变换法计算得到的面阵 CCD 测绘相机像移残差曲线图,从图中可以看出像面上的任一点的像移补偿残差均不超过 1/3 像元,最小值位于像面中心点处。

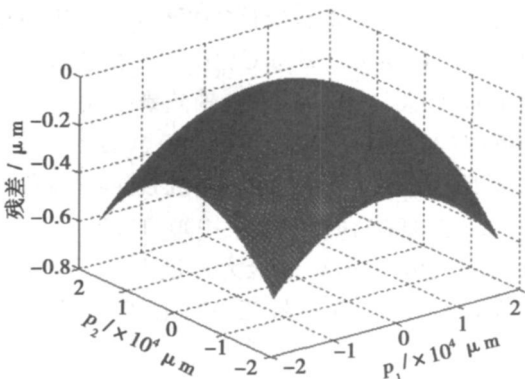


图4 像面上任意一点残差图

同一列上各点的像移补偿残差以中心点对称分布,离中心点越远的像面点,像移补偿残差越大。同样,同一行上各点的像移补偿残差以中心点对称分布,离中心点越远的像面点,像移补偿残差越大。

2.3 总像移量

面阵 CCD 测绘相机像移补偿总残差等于像前移补偿残差与姿态补偿残差之和。如图5所示为像移补偿总残差分布图,从图中可以看出,在像面中心点的像移补偿残差最小,而在像面边缘处的残差偏大。但总体来说,利用三轴稳定平台补偿飞机飞行运动与姿态变化引起的像移的方法是可行的,满足成像系统要求,像面上任一像元的像移总残差均小于 1/3 像元。

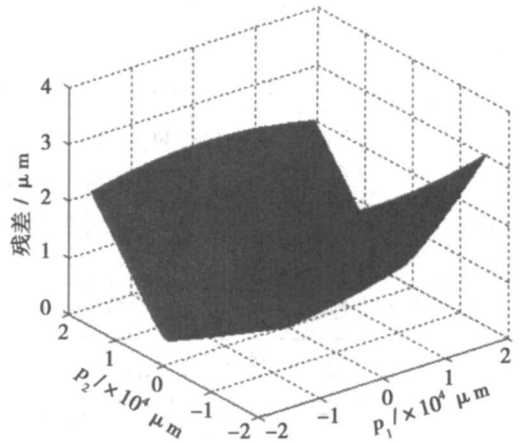


图5 像移补偿总残差图

3 结论

本文采用在焦平面与飞行器之间增设三轴稳定平台的方法来补偿飞行器的飞机运动及姿态变化引起的像移,同时采用旋转俯仰轴改正法补偿飞机前向飞行运动引起的像移,并计算出其补偿的角速度,并通过坐标变换法计算出了像移补偿残差,其前向像移、姿态像移及总像移残差均小于 1/3 像元,满足成像要求。

参考文献:

[1] 袁红艳.面阵 CCD 测绘相机像移补偿技术的研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2007.
 [2] 常本义.关于数字航测相机像移补偿问题[J].解放军测绘学院学报,1998,15(2):105-108.
 [3] 里程遥.LMK 航空摄影机前向运动补偿控制系统分析与设计[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2001:2-50.

(下转第 428 页)

制系统的稳定性进行分析。结合数学仿真曲线可以证实模糊参数整定 PID 控制器在卫星姿态大角度机动控制中的动态性能、稳定性及适应能力,从而得到这种控制器的可行性。

参考文献:

- [1] Buijtenen W M, Schram G, Babuska R, et al. Adaptive Fuzzy control of satellite attitude by reinforcement learning [J]. IEEE Trans. Fuzzy Systems, 1998, 6(2): 185-194.
- [2] Thongchet S, Kuntanapreeda S. A fuzzy-neural bang-bang controller for satellite attitude control [J]. Proc. of SPIE, 2001, 4390: 97.
- [3] 王蜀泉. 基于模糊控制的卫星大角度姿态机动控制方法研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(1): 111-117.

(上接第 423 页)



图 5 线阵 CCD 周视扫描图像

4 结论

本文介绍了基于线阵 CCD 的高分辨率图像采集系统的基本结构和工作原理,设计了系统各功能模块的硬件电路,并利用 VC 多线程技术实现了线阵 CCD 周视图像采集、实时显示、存储。最后的软硬件系统调试结果达到预期效果,表明该方案具有一定的可行性。

参考文献:

- [1] 王庆有. 光电传感器应用技术 [M]. 北京: 机械工业出

(上接第 420 页)

- [4] 刘明. 像移补偿技术综述 [J]. 电光与控制, 2004, 11(4): 46-49.
- [5] 颜昌翔. 航相机像移补偿计算的坐标变化方法 [J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 203-207.

- [4] Chiang R Y, Jang J S. Fuzzy logic attitude control for cassini spacecraft [J]. Fuzzy Systems, 1994, 3: 1532-1537.
- [5] Wertz J R. Spacecraft Attitude Determination and Control [M]. Kluwer Academic Pub., 1991.
- [6] Kaplan M. Modern Spacecraft Dynamics and Control [M]. John Wiley and Sons Inc., 1976.
- [7] 韩晓泉. 模糊控制在光电跟踪伺服系统的应用研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [8] 解旭辉. 基于模糊滑模控制器的伺服跟踪控制研究 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 913-918.

作者简介:

梁爽(1974-), 男, 仪器科学与技术专业博士生, 主要研究方向为精密控制技术。

E-mail: liangsh-ciomp@hotmail.com

版社, 2007.

- [2] Toshiba. Toshiba CCD linear image sensor CCD (Charge Coupled Device) TCD1209D [Z]. 2001.
- [3] 曾锋, 易茂祥. 图像采集系统的线性 CCD 驱动电路设计 [J]. 合肥工业大学学报, 2009, 32(1): 120-123.
- [4] 李彩, 王安, 刘勇. 8 位高速 A/D 转换器 TLC5510 的应用 [J]. 国外电子元器件, 2003(7): 59-61.
- [5] 杨世忠, 王建国, 邢丽娟. FIFO 存储缓冲芯片 IDT7203 的原理及应用 [J]. 国外电子元器件, 2001(8): 64-67.
- [6] 林愿, 吴淑泉, 冼志妙. USB2.0 控制器 CY7C68013 的接口设计实现 [J]. 国外电子元器, 2004(12): 13-16.

作者简介:

张林(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信技术。

E-mail: zhanglin1925@163.com

作者简介:

任航(1982-), 男, 助理研究员, 研究方向为航空光电稳定平台。

E-mail: renhang10@163.com