

光学遥感立体测绘技术研究进展

余 达 刘金国* 周怀得 陈佳豫 周 磊 王国良 张博研

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 针对 1:50000 比例尺无地面控制点的立体测绘应用和当前卫星姿态测量精度低的问题, 采用国际首例的线面阵电荷耦合器件阵列测绘体制, 建立了完善的像移补偿模型, 设计实现了高强度、高刚度、高稳定度的测绘光学平台, 实现了光学平台各相机参数的标定, 突破了传输型无地面控制点定位关键技术, 满足无地面控制点 1:50000 比例尺地图测制, 实现了国家基础框架测绘。针对未来更高比例尺的应用需求, 提出了双面阵推扫立体测绘成像系统, 并针对超级互补金属氧化物半导体面阵传感器应用提出了相关要求, 展望了未来的技术发展。

关键词 测量; 立体测绘; 线面阵电荷耦合器件阵列; 地面控制点; 双面阵推扫成像

中图分类号 TN386.5; P231 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s112005

Recent Progress in Optical Remote Sensing Stereo Mapping Techniques

Yu Da Liu Jinguo Zhou Huaide Chen Jiayu Zhou Lei Wang Guoliang Zhang Boyan

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In view of the satellite attitude measurement accuracy is too low to meet the transmission type stereo mapping application requirements of 1:50000 topographic scale without ground control points, so the line-matrix charge coupled device array mapping system is firstly used in the world. The image motion velocity vector mathematical model is established, and the method of camera parameters calibration. The high strength, high rigidity, high stability optical mapping platform is designed to meet the requirement of the national infrastructure of surveying and mapping, which is a breakthrough for the key technology of positioning without ground control points. For the future demand, the double area array sensors pushbroom imaging system of surveying and mapping is proposed. The relevant application requirements for super complementary metal-oxide-semiconductor sensor and future technology development is also discussed.

Key words measurement; stereo mapping; line-matrix charge coupled device array; ground control points; double area array sensors pushbroom imaging

OCIS codes 120.0280; 040.1520; 110.2970

1 引 言

随着摄影测量技术的发展, 传输型光学立体测绘卫星因其可长期在轨运行、快速获取三维地理信息的能力, 克服了返回式卫星因受其携带的胶片数量限制而在轨寿命短、获取情报的时效性差和不能直接形成数字影像等不足, 已逐渐成为摄影测量卫星发展的主流^[1]。

单线阵电荷耦合器件(CCD)相机由于必须采用侧摆或前后摆动的方式才能获取立体影像, 如果利用它

收稿日期: 2015-01-25; **收到修改稿日期:** 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61405191)、吉林省科技发展计划(20150520102JH)、吉林省自然科学基金面上项目(201215107)

作者简介: 余 达(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事 CCD 相机成像电路应用技术方面的研究。

E-mail: ciompyuda@163.com

* 通信联系人。E-mail: liujg @ciomp. ac. cn

进行立体测绘,不但要求卫星应具有很高的姿态稳定度、定轨精度和姿态测量精度,并且对卫星平台的机动性、可靠性和稳定性要求极高。双线阵 CCD 相机具备沿轨立体成像的能力,几何控制强度优于单线阵相机,但因其仅满足交会的必要条件,对姿态稳定度的要求高,要实现高精度的立体测绘也需要地面控制点的支持。通过高精度的激光测距机和高精度星敏感器的联合使用也可以实现无地面控制条件下的高精度立体测绘。与单线阵摇摆或两线阵推扫构建立体影像相比,三线阵相机因具有在轨立体成像和可以重构外方位元素的等特点,使其几何强度高,可建立比较严整的光束法空中三角测量模型但仅依靠三线阵影像,构建的空中三角测量网误差较大,在进行高精度联合平差时,还必须提供外方位元素和少量地面控制点参与平差。

法国研制的崑宿星座卫星,日本的先进陆地观测卫星(ALOS),美国的 Ikonos、Quickbird、worldview 和 OrbView 卫星,以色列的 EROS-B 卫星等,这些卫星均可用来获取立体影像,均在高姿态控制精度和测量精度的条件下获得立体影像的。1:50000 比例尺地形图要求等高距 20 m,高程误差 6 m^[2]。国内资源三号卫星在有地面控制点的情况下具备 1:50000 比例尺地图测绘和 1:25000 万比例尺修测的能力^[3]。

德国在 MOMS 工程中创造了定向片法,采用推扫三线阵 CCD 影像束法平差^[4]。但在 1996 年 MOMS-2P 实践中发现平差航线模型高程带有多起伏的系统误差,不满足无地面控制点卫星摄影要求^[5]。目前我国卫星只能装备在轨测姿技术档次不甚高的星敏感器(大约 2"级 1 σ),受制于现有技术和硬件条件,直接利用定轨定姿数据进行无控制点目标定位与测图,无地面控制点条件下直接前方交会的目标点高程精度达不到 6 m(1 σ)的要求。针对这一问题,采用国际首例的线面阵 CCD 面阵(LMCCD)测绘体制,最终实现了无地面控制点 1:50000 比例尺立体测绘成像。

2 测绘技术理论基础及实现方法

2.1 LMCCD 测绘理论

王任享院士创立了 LMCCD 相机设计思想。在三线阵 CCD 相机的正视线阵 CCD 两侧各设置 2 个小面阵构成线阵面阵混合配置的相机,如图 1 所示。采用等效框幅式相片(EFP)法,并增加联接点真像平面坐标,可以使诸多三角锁模型得到很好的整合,从而显著地提高精度^[6]。经多方面的模拟数据平差计算,应用 LMCCD 相机影像 EFP 光束法平差,航线多起伏的系统误差现象消失,利用光束法平差可以使测轨、测姿误差的影响缩小约 0.6 的因子。

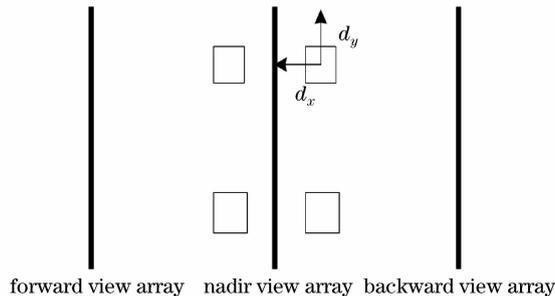


图 1 LMCCD 相机线阵面阵探测器配置

Fig. 1 Configuration of linear and area array sensors in LMCCD camera

LMCCD 影像的 EFP 法是在三线阵 EFP 光束法空中三角测量方法的理论基础上,增加小面阵 CCD 影像综合应用的平差方法。像点的选取是在正视影像上完成,应用影像匹配方法,求得小面阵 CCD 影像的同名点,并计算其在该 EFP 时刻的真框幅坐标。根据 EFP 法的思想,三线阵 CCD 影像在每条基线的 10 个 EFP 时刻都等效成为框幅式像片,并在 EFP 时刻增加了连接点真像平面坐标作为观测值,使航线中诸多三角锁模型的到较好的得到整合,提高平差高程精度^[7]。

2.2 像移补偿理论

王家骥^[8]建立了像移速度矢计算数学模型,减小了卫星图像动态传递函数的下降,可解决成像模糊影响立体测绘精度问题,模型为

$$\begin{aligned}
 V_{P_1} = \frac{dP_1}{dt} \Big|_{t=0} = & \frac{f}{H-h} [\Omega(R+h) - \omega(R+h)\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \cos\theta_0 \cos\psi_0 \\
 & - \frac{f}{H-h} [\omega(R+h)\sin i_0\cos\gamma_0 - G_1\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \cos\theta_0 \sin\psi_0 \\
 & + \frac{f}{H-h} [G_1\Omega - G_1\omega\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\cos\gamma_0] \sin\theta_0 + \frac{G_1f}{H-h} (\dot{\theta}\sin\theta_0\cos\psi_0 + \dot{\psi}\cos\theta_0\sin\psi_0) \\
 & + \frac{G_2f}{H-h} (\dot{\theta}\sin\theta_0\sin\psi_0 - \dot{\psi}\cos\theta_0\cos\psi_0) - f\dot{\theta}\cos\theta_0, \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{P_2} = \frac{dP_2}{dt} \Big|_{t=0} = & \frac{f}{H-h} [\Omega(R+h) - \omega(R+h)\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\sin\gamma_0] \\
 & \times (-\cos\bar{\omega}_0\sin\psi_0 + \sin\bar{\omega}_0\sin\theta_0\sin\psi_0) \\
 & - \frac{f}{H-h} [G_1\Omega - G_1\omega\cos i_0 - G_2\omega\sin i_0\cos\gamma_0] \sin\bar{\omega}_0\cos\theta_0 \\
 & - \frac{G_1f}{H-h} [\dot{\varphi}(\sin\bar{\omega}_0\sin\psi_0 + \cos\bar{\omega}_0\sin\theta_0\cos\psi_0) + \dot{\theta}\sin\bar{\omega}_0\cos\theta_0\cos\psi_0 \\
 & - \dot{\psi}(\cos\bar{\omega}_0\cos\psi_0 + \sin\bar{\omega}_0\sin\theta_0\sin\psi_0)] \\
 & + \frac{G_2f}{H-h} [\dot{\varphi}(\sin\bar{\omega}_0\cos\psi_0 - \cos\bar{\omega}_0\sin\theta_0\sin\psi_0) - \dot{\theta}\sin\bar{\omega}_0\cos\theta_0\sin\psi_0 \\
 & + \dot{\psi}(\cos\bar{\omega}_0\sin\psi_0 - \sin\bar{\omega}_0\sin\theta_0\cos\psi_0)] \\
 & + f(\dot{\varphi}\cos\bar{\omega}_0\cos\theta_0 - \dot{\theta}\sin\bar{\omega}_0\sin\theta_0), \tag{2}
 \end{aligned}$$

像移速度主向量值为

$$V_P = \sqrt{V_{P_1}^2 + V_{P_2}^2}, \tag{3}$$

偏流角为

$$V_P = \arctan(V_{P_2}/V_{P_1}), \tag{4}$$

式中 R 为相对于地心的地球半径, H 为被摄景物处航天器的轨道高度, h 为被摄景物的地物地形高度, i_0 为轨道倾角(轨道平面和地球赤道平面间的夹角), a 、 λ 分别为在地心坐标系中, 航天器星下点经度和纬度, ω 为地球自转角速率 $7.2921 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, Ω 为在摄影时刻, 航天器轨道运动相对地心的角速率, ψ_0 、 θ_0 、 φ_0 分别为航天器坐标系相对于轨道坐标系在摄影时刻的偏航、俯仰和横滚姿态角, $\dot{\psi}$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 分别为航天器坐标系相对于轨道坐标系的偏航、俯仰和横滚角速率, ψ_{\max} 、 θ_{\max} 、 φ_{\max} 为航天器三轴姿态角的最大值, $\dot{\psi}_{\max}$ 、 $\dot{\theta}_{\max}$ 、 $\dot{\varphi}_{\max}$ 为航天器三轴姿态角速率的最大值, f 为遥感器镜头焦距。其中 G_1 和 G_2 为

$$\begin{cases} G_1 = (H-h) \left(\frac{\sin\bar{\omega}_0\cos\theta_0}{\cos\bar{\omega}_0\sin\psi_0} - \frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0\sin\psi_0} \right) / \left(\frac{\sin\psi_0}{\cos\psi_0} + \frac{\cos\psi_0}{\sin\psi_0} \right) \\ G_2 = (H-h) \left(\frac{-\sin\bar{\omega}_0\cos\theta_0}{\cos\bar{\omega}_0\cos\psi_0} - \frac{\sin\theta_0}{\cos\theta_0\sin\psi_0} \right) / \left(\frac{\cos\psi_0}{\sin\psi_0} + \frac{\sin\psi_0}{\cos\psi_0} \right) \end{cases}, \tag{5}$$

式中 V_{P_1} 、 V_{P_2} 分别为遥感器像面上前向和横向像移速度, V_P 为遥感器像面上像移速度主向量值, β_p 为遥感器像面上像移速度主向量在像面坐标系内与 P_1 轴的夹角—偏流角。

2.3 测绘光学平台设计

如图 2 所示, 在 1 个 1000 kg 左右的小卫星上, 集成了 3 台分辨率为 5 m 的全色测绘相机, 1 台分辨率为 10 m 的 4 波段多光谱相机, 1 台分辨率为 2 m 的全色高分辨率相机, 相机幅宽均为 60 km。为实现大基高比和结构紧凑的目标, 三线阵相机采用折射式光学系统^[9-10], 如图 3 和图 4 所示。同时高分辨率相机和多光谱相机采用无中心遮拦、无中间像的 Cook-TMA 全反式光学系统^[11], 如图 5 所示。

测绘光学平台由于体积、重量的限制和测绘精度的要求, 对光学系统设计制造特别是离轴三反光学系统的加工、装调和检测提出了严苛的要求。建立了基于模糊综合评判理论的计算机控制光学表面成形技术(CCOS)抛光模型, 首次将模糊数学理论和表面误差的功率谱密度(PSD)评价方法应用到 CCOS 加工过程中, 突破了离轴三反光学设计、大口径离轴非球面数控加工、离轴三反高精度装调以及计算机全息离轴高精度非球面检测等技术^[12-13]。

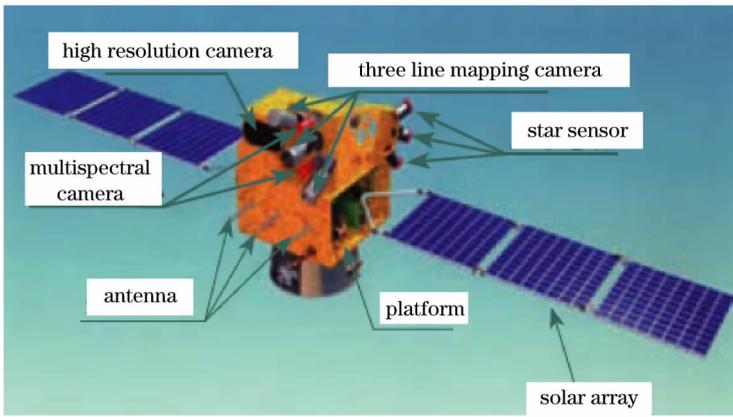


图 2 LMCCD 测绘相机配置

Fig. 2 Configuration of LMCCD mapping camera

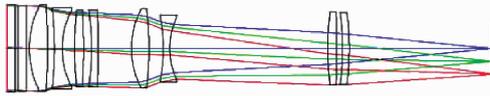


图 3 正视相机光学系统结构图

Fig. 3 Optical structure of nadir view camera

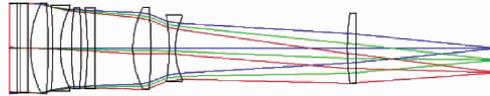


图 4 前后视相机光学系统结构图

Fig. 4 Optical structure of forward and backward view camera

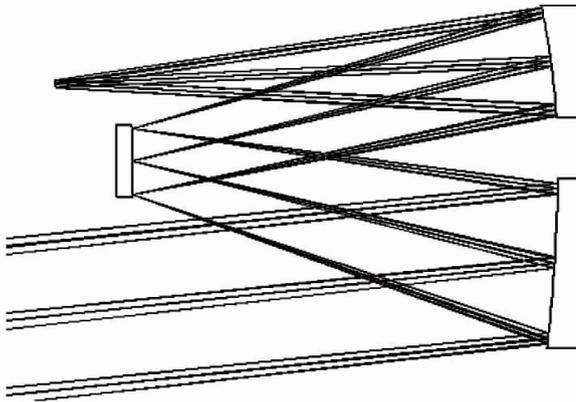


图 5 多光谱相机光学结构图

Fig. 5 Optical structure of multi spectral camera

2.4 光学平台各相机参数的标定

测绘光学平台各相机内方位元素、畸变,前视、正视和后视相机之间的交会角,视轴平行性等高精度几何标定,是实现高精度测绘的基础。为此,研制了 7.5 m 平行光管和 0.5"高精度二维转台,实现了相机内方位元素主点位置的标定精度优于 0.2 pixel、主距标定精度优于 20 μm、相机交会角标定精度优于 2"的高精度几何标定^[14]。

基于 n 组测量数据 y_i 和 ω_i ,利用最小二乘多元回归的方法,表示为

$$y_i = y_0 + f \cdot \tan\omega_i, \quad (6)$$

式中 y_i 为不同物方视场角下像点位置坐标, y_0 为主点位置坐标, f 为相机主距, ω_i 为不同物方视场角。

误差方程为

$$v_i = y_i - (y_0 + f \cdot \tan\omega_i), i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

正规化方程组:

$$\begin{cases} n \cdot y_0 + (\sum \tan\omega_i) \cdot f = \sum y_i \\ (\sum \tan\omega_i) \cdot y_0 + (\sum \tan\omega_i) \cdot f = \sum (y_i \cdot \tan\omega_i) \end{cases}, \quad (8)$$

求解正规方程组得到主点、主距的最佳估计值。

主距为

$$f = \frac{n \cdot \sum (y_i \cdot \tan\omega_i) - \sum \tan\omega_i \sum y_i}{n \cdot \sum \tan^2\omega_i - (\sum \tan\omega_i)^2}. \quad (9)$$

主点为

$$y_0 = [\sum y_i - (\sum \tan\omega_i) \cdot f]/n. \quad (10)$$

各视场径向畸变为

$$D_i = v_i = y_i - (y_0 + f \cdot \tan\omega_i). \quad (11)$$

3 未来工作及展望

3.1 双面阵推扫立体测绘成像系统

基于 LMCCD 的传输型卫星立体测绘系统,可以满足 1 : 50000 比例尺地理信息生产和更新的需求,需发展 1 : 10000 和 1 : 5000 比例尺地理信息生产和更新。考虑到三线阵系统的体积和重量,基于长光辰芯公司已经制作出 30×5 的 CMOS 图像传感器,提出了如图 6 所示的双面阵推扫立体测绘成像系统,并进行相关应用的研究,要求前视和后视传感器均与地面平行放置,构建大画幅相机。同名点重复交迭,达到画幅面阵的精度技术特点等效大画幅相机,立体影像具有水平摄影、大基高比的特点,外方位元素可精确测定,地面处理方法经典,EFP 法要求在一条线上取三点,也许可取消对高精度的激光测距机和高精度星敏感器的依赖。前后视相机采用相同的光学系统,两光学系统光轴平行,垂直对地,视轴交汇角与两离轴角重合。每帧图像都满足中心投影规律,每幅图像只需要一组姿态参数,降低了对姿态更新率的要求,解决现有采用三线阵推扫成像,每行图像都需要对应的姿态参数,导致姿态测量速率低以及精度大大降低的问题。

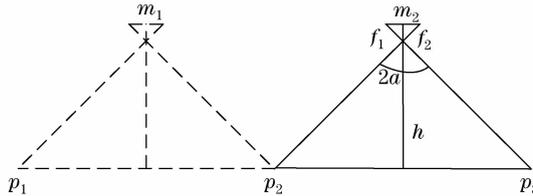


图 6 双面阵立体测绘系统

Fig. 6 Double area array stereo mapping system

3.2 双面阵推扫重叠率要求

为保证双面阵图像的重叠率,面阵图像传感器的行周期 t_H :

$$t_H = \frac{S_{GSD}}{V_N} = \frac{S_{GSD}}{\frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{GM}{R+H}}} = \frac{\frac{b \times H}{f \times \cos a}}{\frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{GM}{R+H}}}, \quad (12)$$

式中 V_N 为星下点的平均速度, G 为万有引力常数, M 为地球质量, R 为平均地球半径, H 为飞行器平均离地高度, S_{GSD} 为地面像元分辨率, b 为面阵图像传感器的像元尺寸, a 为两面阵光学系统的离轴角,其值为两光学系统夹角值的一半。为使两面阵图像系统的图像完全重叠,面阵 CCD 图像传感器的最佳帧周期为

$$t_{frame} = \frac{2 \tan a \times H}{m \times \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{GM}{R+H}}}, \quad (13)$$

考虑到面阵图像传感器的工作原理,最大帧周期为

$$\frac{2\tan a \times H}{m \times \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{GM}{R+H}}} < t_{\text{frame_max}} \leq \frac{2\tan a \times H}{(m-1) \times \frac{R}{R+H} \times \sqrt{\frac{GM}{R+H}}} \quad (14)$$

两面阵光学系统的夹角 $2a$ 与面阵图像传感器的像元尺寸 b 、行数 k 、焦距 f 的限定关系为

$$\frac{2\tan a}{m} < \frac{b \times k}{f \times \cos a} \leq \frac{2\tan a}{m-1}, \quad (15)$$

式中 m 为大于 1 的正整数。

3.3 双面阵推扫图像传感器要求

随着半导体技术的进步,现今互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺已从 0.5 μm 发展到 65 nm;航天工艺也变为了 0.18 μm ,可在指定的像素间隔允许提高光填充率^[15]。CMOS 技术的进步主要归功于:1)采用掩埋型光电二极管来大幅减少暗电流;2)通过削减敏感节点的电容来获得高转换增益,把信号放大到噪声之上,获得的低的等效增益低于 $2e^-$;3)埋沟金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)削减噪声和背景闪烁噪声,4)使用背照、使用高阻硅和高压衬底偏置来有效收集电荷,提高量子效率和像素混叠^[16]。有报道采用 P 型衬底的暗电流可削减 30 倍,噪声也更小。CMOS 可工作在更高的频率,多数可支持开窗;具有高光溢出免疫的自然属性,工作时仅需要一个简单的偏置电压和时钟电平。另外 CMOS 图像传感器能提供更多的功能,如时序和控制、信号处理、模数转换和数字接口电路部分都集成在单个芯片中,可大大地减小了为空间应用的成像系统的体积、功率、散热和整体的复杂性。科学级 CMOS 将在空间仪器特别是对系统的体积、重量、功率、需要开窗的工作环境、随机像素获取、需要增强的辐射容限方面发挥越来越大的作用。

但将 CMOS 图像传感器应用在双面阵推扫测绘应用,也有待改进的性能和功能。整幅图像需要在同一时刻曝光,需要使用全局快门。而现今的 CMOS 多采用卷帘式快门,每行像素在不同的时刻积分。当使用全局快门时每个像素需要一个存储单元,会使噪声大大增加,还需解决像素内杂散光的灵敏度或者说快门的效率问题^[17]。受 CMOS 工作电压的限制,动态范围偏低。另外,在大比例尺的应用中,获取的光能量变弱,信号的转移速率变快,会进一步增加噪声。也许随着技术的进步,通过背照明提高量子效率,使用新材料改进性能,通过制冷进一步降低暗噪声,通过使用图像处理领域的运动适应的信号积分技术提高弱光下灵敏度能满足应用要求。

3.4 双面阵推扫的其他要求

由于线阵 CCD 每行需要一组姿态信息,而星敏感器的姿态信息更新率低,故需要结合高速的陀螺的角速度信息来进行插值计算;而面阵图像传感器在一帧的摄像时间里只需要一组姿态信息,其姿态信息更新率与星敏感器提供的姿态更新率相当,可考虑采用外触发的星敏感器来提供指定时刻的姿态信息,避免插值计算的误差;对于时间同步系统,直接采用成像单元的控制接收时间同步信号,避免传统的通过软件传输接口通信的方式来传递,存在传输延时不确定问题,进一步提供时间同步精度。光机系统参数的稳定性、夹角、焦距、地面偏流问题也需考虑,还需解决光学系统由于另一方向的视场角增大导致的畸变增大问题。

4 结 论

经过航天应用验证,采用 LMCCD 立体测绘体制进行每行图像姿态位置信息的平差,通过优化的光机结构设计及标定检测和像移补偿,可在较低的卫星姿态测量精度条件下实现 1:5 万比例尺的立体测绘。提出的基于大面阵 CMOS 图像传感器的双面阵推扫立体测绘成像,进行相关技术攻关,有望进一步提高测绘精度,满足 1:5000 比例尺的立体测绘应用要求。

参 考 文 献

- Zhu Hong, Liu Weijia, Zhang Aibing. Overview and development trend of optical remote sensing stereo mapping techniques [J]. Modern Radar, 2014, 36(6): 6-12.
朱 红,刘维佳,张爱兵. 光学遥感立体测绘技术综述及发展趋势 [J]. 现代雷达, 2014, 36(6): 6-12.
- Light D L. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(12): 1613-1623.

- 3 Gao Weijun, Sun Li, Wang Changjie, *et al.*. Design and verification of three-line array camera for ZY-3 high resolution stereo mapping satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(3): 25–34.
高卫军, 孙立, 王长杰, 等. “资源三号”高分辨率立体测绘卫星三线阵相机设计与验证 [J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 25–34.
- 4 Ebner H, Kornus W, Strunz G, *et al.*. A simulation study on point determination using MOMS-02/D2 imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, 57(10): 1315–1320.
- 5 Wang Renxiang, Hu Xin, Wang Jianrong. Photogrammetry of mapping satellite-1 without ground control points [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(1): 1–5.
王任享, 胡莘, 王建荣. 天绘一号无地面控制点摄影测量 [J]. *测绘学报*, 2013, 42(1): 1–5.
- 6 Wang Renxiang, Hu Xin, Wang Jianrong, *et al.*. Characteristics of the LMCCD camera satellite photogrammetry [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 29(4): 10–12.
王任享, 王建荣, 王新义, 等. LMCCD 相机卫星摄影测量的特性 [J]. *测绘科学*, 2014, 29(4): 10–12.
- 7 Yang Xiuce. Research on Automatic Measure Technique for Image Points of LMCCD Imagery [D]. Zheng Zhou: PLA Information Engineering University, 2009.
杨秀策. LMCCD 影像像点自动量测技术研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009.
- 8 Wang Jiaqi. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1586–1589.
王家骐. 航天光学遥感器像移速度矢计算数学模型 [J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1586–1589.
- 9 Miao Jianyu, Zhang Liping, Tian Tiejun, *et al.*. Realizable technology of light-machine structure for three-line array CCD tridimensional mapping camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2183–2189.
苗健宇, 张立平, 田铁印, 等. 三线阵 CCD 立体测绘相机结构实现技术 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2183–2189.
- 10 Tian Tiejun, Wang Hong, Gu Fengang, *et al.*. Optical system design of three-line array stereoscopic mapping camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(11): 2692–2698.
田铁印, 王红, 谷凤安, 等. 三线阵立体测绘相机光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2692–2698.
- 11 Lü Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(8): 2154–2160.
吕世良, 刘金国, 贾平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8): 2154–2160.
- 12 Yan L, Wang X, Zheng L, *et al.*. Experimental study on subaperture testing with iterative triangulation algorithm [J]. *Optics express*, 2013, 21(19): 22628–22644.
- 13 Yan F, Zhang X. Optimization of an off-axis three-mirror anastigmatic system with wavefront coding technology based on MTF invariance [J]. *Optics express*, 2009, 17(19): 16809–16819.
- 14 Wu Guodong. Calibration of inner orientation parameters and distortion for three-mirror off-axis TDICCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(3): 462–467.
吴国栋. 离轴三反时间延迟积分 CCD 相机内方位元素和畸变的标定 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 462–467.
- 15 M B de Boisanger, F Larnaudie, O Saint-Pé. CMOS image sensors optimised for GEO observation [C]. *SPIE Remote Sensing, International Society for Optics and Photonics*, 2013, 8889: 88891F.
- 16 Wang S Y, Ling H H, Hu Y S, *et al.*. Characteristic of e2v CMOS sensors for astronomical applications [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2014, 9154: 91542I.
- 17 Scott A D, Cote P, Rowlands N, *et al.*. Candidate detector assessment for the CASTOR mission [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, International Society for Optics and Photonics*, 2014, 9154: 91542C.

栏目编辑: 苏 岑