

文章编号 1004-924X(2020)06-1221-05

航空光学成像与测量技术新进展

田大鹏^{1,2*}, 邵晓鹏³

1. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要:航空光学成像与测量技术具有高时效、低成本、高分辨、易判读等突出优势。作为一种不可或缺的光学遥感手段得到了广泛地应用。由于受到航空飞行的影响,光学载荷需要在有限的体积、重量和功耗约束下解决气动力(矩)干扰、振动、温度和气压的急剧变化等问题,从而获得更加清晰的光学影像和更精确的测量结果。面对本领域对航空光学成像与测量的新技术、新方法、新理论的需求,组织了航空光学成像与测量专题,在精密光学、精密机械、精确控制以及图像处理等方面介绍了一批优秀的研究成果。从理论引领和工程参考价值的角度,推动相关研究的进一步发展。

关键词:航空光学成像与测量;光学;机械;控制;图像处理

中图分类号:TP702 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202806.1221

New emerging technologies in airborne optical imaging and measurement

TIAN Da-peng^{1,2*}, SHAO Xiao-peng³

1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 3. *School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)*
- * *Corresponding author, E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn*

Abstract: Airborne optical imaging and measurement technology has prominent advantages such as high timeliness, low cost, high resolution and easy interpretation. It has been widely applied as an indispensable optical remote sensing method. Due to the influence of aviation flight, in order to obtain clearer optical images and more accurate measurement, the problems should be solved such as aerodynamic, vibration, temperature and pressure changing under the constraints of limited volume, weight and power consumption. To meet the demand of new technologies, new methods and new theories in this field, a special issue of airborne imaging and measurement was organized. A number of excellent research results were introduced in the fields of precision optics, precision mechanics, precision con-

收稿日期:2020-03-01;修订日期:2020-03-05.

基金项目:中国科学院青年创新促进会会员项目资助(No. 2017257);国家自然科学基金项目(No. 61673365)

trol and image processing. It promotes the further development of relative research from the perspective of theoretical guidance and engineering reference value.

Key words: airborne imaging and measurement; optics; mechanics; control; image processing

1 引言

航空光学成像与测量技术利用各类飞行器(包括有人机、无人机、浮空器等)搭载光学有效载荷,在对流层至临近空间的广阔空域内对陆、海、空、天目标进行探测、成像、识别与测量等。与航天光学遥感相比,航空成像与测量在时效性、灵活性、分辨率以及成本方面具有突出优势。在云层遮挡导致航天遥感无法拍摄到地面图像的条件下,航空器可以在云层以下飞行成像,弥补航天遥感的不足。与航空微波成像相比,光学成像与测量利用被动接收的光辐射,隐蔽性更好,并且能够获取实时、直观的彩色图像,可判读性更佳。航空成像与测量技术无论从搭载平台的角度还是体制机制的角度,都是不可或缺的遥感手段。

实现航空成像与测量的光学载荷受航空飞行环境的影响很大。航空器有限的运载能力对光学载荷的体积、重量、功耗提出了严格的约束,而对成像距离、测量精度、温度适应能力等性能又提出的严苛的要求。解决航空飞行环境的强约束条件与高性能指标的矛盾成为航空光电成像与测量技术的核心问题。在大气中飞行时,光学载荷受到载机姿态晃动、严重的震动以及气动力(矩)的影响,视轴很难稳定指向和跟踪成像目标,降低观测质量;由于载机前向飞行或处于扩大收容范围的目的采用主动扫描成像的工作方式会在成像过程中带来像移的影响导致图像模糊;航空器从地面升至高空的过程中,光学载荷工作的环境温度、气压快速地大范围变化,对光学成像构成严重影响;大气对光的折射、散射、吸收等作用限制了大气层内的成像和测量距离。这些问题的解决需要从体制机制的层面上在精密光学、精密机械、精确控制等角度进行交叉研究和创新设计,结合计算机图像处理技术最大程度地挖掘、提升航空光电成像性能。

“航空光学成像与测量技术”专题面向解决限制航空光电载荷性能的各项因素,从系统光学设计、机械设计、运动控制、环境适应性和图像信息

增强与智能处理等角度,提出了若干创新思想和创新成果,对光学成像载荷相关研究具有一定的引导和启示作用。

航空光电载荷的光学设计是实现高性能成像的基础。小型化、高传函、低畸变的光学设计始终是一项重要课题。论文[1]针对广域高分辨率成像需求,采用伽利略型共心多尺度成像结构将球透镜与次级相机阵列进行级联,理论视场可接近 180° ;通过设计相机阵列的排列方式进一步实现轻量化。调制传递函数曲线在 270 lp/mm 处达到 0.3 ,全视场弥散斑半径均方根值最大为 $1.398\ \mu\text{m}$,场曲在 0.03 mm 以内,畸变小于 $\pm 0.3\%$ 。论文[2]针对复杂环境下远距离暗弱点目标探测的需求设计了中波/长波红外双波段双视场系统,采用高阶非球面减少镜片数量,提高透过率;光学被动消热差设计实现了光学系统 $-40^\circ\text{C}\sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内的无热化设计。

对目标进行探测除了需要高性能的光学设计外,对目标的辐射特性以及大气传输特性的研究也十分必要。论文[3]针对现有空基红外系统对作用距离的影响因素考虑较少的问题,开展空寂红外系统作用距离建模研究,构建了综合目标辐射特性、大气温度和红外系统高度等因素的探测模型,在指导小目标探测系统设计方面具有一定的应用前景。与对空探测相比,采用航空光学成像的手段对海探测是近年来新兴的热点。论文[4]考虑了对海成像和海上目标识别的应用需求,建立了海面微面元的偏振双向反射分布函数模型。与传统的红外强度成像相比,红外偏振成像可以提供更多海面细节信息,目标与海面的偏振特性差异更加明显,对比度更高。

光学系统在制造过程中需要对光学元件的面型进行检测。通常依靠干涉测量技术实现这一目的。论文[5]提出了一种针对传统窗口傅里叶变换相位提取算法中选取小尺寸窗口抑制线性相位误差的改进方法,确定了可使线性相位误差抑制程度达到最大的最优窗口尺寸选取原则,线性误差抑制程度得到了明显提高。

与单一波段的成像相比,光谱成像能够获得

更丰富的景物信息,在应用中越来越受到重视。论文[6]综述了快照式光谱成像技术的研究现状。系统地分析了不同技术实现的快照式光谱成像的原理、优点、缺点与现状。论文对相关领域的研究人员快速全面掌握快照式光谱成像仪的研究现状和发展趋势具有指导意义,为未来相关载荷性能提升指出了研究方向。

光学是载荷的核心,而要充分发挥出光学设计的性能还需要精密机械和精密控制的有力支撑。航空器在高空飞行时环境温度较低,与地面状态相差很大。光学系统往往由于环境参数变化带来的几何尺寸变形产生一定的离焦。在成像飞行任务过程中在线检、调焦具有重要意义。自准直检焦是当前航空光电载荷常用的检焦方法。论文[7]分析了低温对自准直检焦系统的影响,结合工程应用的需求进行了仿真,对低温条件下工作的航空光电载荷设计具有指导意义。论文[8]则从元器件的角度研究了基于 Ronchi 光栅的自准直检焦方法,提出了光栅自准直检焦的模型,给出了 Ronchi 光栅周期的选择方法,实验验证了其有效性。

针对飞行载荷姿态扰动补偿,论文[9]提出了一种精密钢丝绳传动的光电稳定平台设计。利用钢丝绳传动的实现了大减速比、高传动刚度的机械框架,在较轻的自重条件下能够实现较大的负载能力,通过外场试验验证了其实现的大负载视轴稳定性能。论文[10]则考虑了飞机姿态、速度、高度等飞行参数对拍照重叠率的影响。基于坐标变换的方法,分析了载机姿态运动时成像区域与预期区域的偏离情况,给出了相机补偿量的计算公式,从参数修正的角度有效抑制了航拍过程中重叠率的变化。

除实现成像外,航空光学载荷还能够根据自身内部轴角与载机坐标对景物目标进行定位测量。论文[11]针对大倾角远距离航空成像定位测量,进行了系统误差分析与建模,给出了包含系统误差修正模型的对地目标定位算法,提出一种地面控制点估计残差参数的方法可有效减小定位误差,提高定位精度。

在航空光电载荷中,对视轴指向进行控制以补偿载机姿态扰动和补偿成像像移也是一项重要的研究课题。针对航空光电成像载荷中的控制问题,论文[12]提出了一种等价捷联惯性稳定控制

方法。常见的视轴稳定控制是将角速率陀螺与光学系统固连,通过直接测量视轴的惯性角速度构建反馈控制实现惯性稳定。而陀螺与安装基座捷联则可以测量载机的角运动,通过构建前馈提高带宽、减小误差。该文分析了捷联稳定平台安装基座的影响,考虑了基座捷联控制时的振荡现象并提出了消除振荡的复合控制方法,有效提高了光电平台的隔离度。论文[13]面向一种扫描成像系统的扫描轴控制问题,设计了快速非奇异终端滑模控制与扩张高增益观测器相结合的复合控制方法,提高了系统的鲁棒性和转速控制精度。论文[14]面向应用于航空光电载荷的音圈电机驱动的快速反射镜控制问题设计了自抗扰控制器,对快速反射镜动态性能和稳态性能都有较好的提升,对于工程设计具有较高的参考价值。

光学、机械和控制共同决定了航空成像的基本性能。而通过计算机图像处理则可以最大程度上挖掘获取到的图像中的有用信息,提高载荷整体性能。论文[15]针对红外暗弱目标探测问题,提出一种基于改进多尺度分形特征的红外图像弱小目标检测算法,不仅具有较好的准确率还实现了较好的实时性。对于 320×240 分辨率的红外图像检测速度接近 30 frame/s。论文[16]则面向有雾图像的增强问题,针对现有去雾处理算法存在的光晕效应和色彩失真等问题提出了一种基于四叉树细分的改进大气光估计方法以及改进的引导滤波算法,有效减弱了去雾图像中景物边缘光晕,色彩还原效果较好。

航空对海遥感对于图像信息处理而言带来了更复杂的影响。海上成像容易受到云雾、海杂波等影响;海面图像单调,目标尺度小且不易辨识。论文[17]为了克服海上目标检测时目标尺度多变的问题提出了一种改进的复合检测方法,克服尺寸敏感的问题,与当前广泛使用的全局阈值分割显著图相比,漏检率更低并且具有较低的虚警率,能够检测不同尺寸和方向的舰船目标。

近年来,人工智能技术的再次兴起推动了光电载荷智能化程度的发展,解放了人力。论文[18]针对图像中的景物自动多标签分类问题,提出一种基于循环神经网络的分类处理方法,解决传统图像多标签分类算法准确率低、泛化性差等问题,与传统方法相比精确率和召回率都有所提升。

航空光电成像与测量技术使一项多学科交叉融合、具有强烈需求牵引和工程实践背景的研究课题。在航空强约束条件下继续提高光学载荷的性能指标、提高载荷的自动化与智能化程度将成为本领域在一段时期内的核心议题。只有以光学

成像的机理为主线,考虑从目标到大气传输介质再到成像载荷的全链路,通过光学、机械、控制、人工智能等多个角度有机结合,才能实现光学成像与测量性能的整体提升,并在应用中取得更好的效果。

参考文献:

- [1] 刘飞,刘佳维,邵晓鹏. 高集成度小型化共心多尺度光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1275-1282.
LIU F, LIU J W, SHAO X P. Design of high integration and miniaturization concentric multi-scale optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1275-1282. (in Chinese)
- [2] 张洪伟,丁亚林,马迎军,等. 红外双波段双视场成像告警系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1283-1294.
ZHANG H W, DING Y L, MA Y J, *et al.*. Design of infrared dual-band/dual-FOV imaging early warning system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1283-1294. (in Chinese)
- [3] 王卫杰,黄俭,袁光福,等. 空基红外系统作用距离建模及应用分析[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1295-1302.
WANG W J, HUANG J, YUAN G F, *et al.*. Modeling and application analysis of operating range of Air-Based Infrared System [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1295-1302. (in Chinese)
- [4] 张弛,吴鑫,谢建. 一种新的海面红外偏振特性表征模型[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1303-1313.
ZHANG CH, WU X, XIE J. A new model of infrared polarization characteristics on sea surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1303-1313. (in Chinese)
- [5] 陈瑜,潘永强,刘丙才,等. 基于窗口傅里叶变换的线性相位误差抑制技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1314-1322.
CHEN Y, PAN Y Q, LIU B C, *et al.*. Linear phase error suppression technique based on Window Fourier Transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1314-1322. (in Chinese)
- [6] 高泽东,高洪兴,朱院院,等. 快照式光谱成像技术研究对比[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1323-1343.
GAO Z D, GAO H X, ZHU Y Y, *et al.*. Research and comparison between different snapshot spectral imaging technologies [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1323-1343. (in Chinese)
- [7] 刘伟毅,徐钰蕾,石磊,等. 航空低温温度对自准直检焦系统的影响研究[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1226-1235.
LIU W Y, XU Y L, SHI L, *et al.*. The Influence of aviation low temperature on the auto-collimating focusing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1226-1235. (in Chinese)
- [8] 刘学吉,丁亚林,李锋,等. 航空遥感相 Ronchi 光栅自准直检焦模型分析与验证[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1236-1244.
LIU X J, DING Y L, LI F, *et al.*. Theoretical analysis and verification of Ronchi grating auto-collimated focusing for aerial remote camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1236-1244. (in Chinese)
- [9] 石磊,许永森,田大鹏,等. 钢丝绳传动航空光电稳定平台设计与试验[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1245-1253.
SHI L, XU Y S, TIAN D P, *et al.*. Design and test of an aviation stable platform by cable drive[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1245-1253. (in Chinese)
- [10] 李军,黄厚田,修吉宏,等. 载机飞行参数对倾斜成像重叠率影响及补偿[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1254-1264.
LI J, HUANG H T, XIU J H, *et al.*. Effect and Compensation of Overlap influenced by Flight Parameter of Oblique Aerial Camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1254-1264. (in Chinese)
- [11] 李彬,丁亚林,修吉宏,等. 大倾角远距离航空成像修正系统误差定位方法[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1265-1274.
LI B, DING Y L, XIU J H, *et al.*. System error corrected ground target geo-location method for long distance aviation imaging with large inclination Angle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1265-1274. (in Chinese)
- [12] 王中石,田大鹏,石磊,等. 考虑安装基座影响的光

- 电平台等价捷联惯性稳定控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1344-1352.
- WANG ZH SH, TIAN D P, SHI L, *et al.*. Equivalent strapdown inertial stability control of photoelectric platform considering the influences of mounting base [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1344-1352. (in Chinese)
- [13] 吴少博, 苏秀琴, 王凯迪. 周视扫描成像系统的转台转速高精度控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1353-1364.
- WU SH B, SU X Q, WANG K D. High precision speed control for the turntable of the circumferential scanning imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1353-1364. (in Chinese)
- [14] 黄浦, 杨秀丽, 修吉宏, 等. 音圈致动快速反射镜阶自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1365-1374.
- YANG P, YANG X L, XIU J H, *et al.*. Reduced-order active disturbance rejection control of fast steering mirror driven by VCA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1365-1374. (in Chinese)
- [15] 谷雨, 刘俊, 沈宏海, 等. 基于改进多尺度分形特征的红外图像弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1375-1386.
- GU Y, LIU J, SHEN H H, *et al.*. Infrared dim-small target detection based on an improved multi-scale fractal feature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1375-1386. (in Chinese)
- [16] 韩昊男, 钱锋, 吕建威, 等. 改进暗通道先验的航空图像去雾[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1387-1394.
- HAN H N, QIAN F, LÜ J W, *et al.*. Aerial image dehazing using improved dark channel prior [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1387-1394. (in Chinese)
- [17] 赵浩光, 王平, 董超, 等. 结合多尺度视觉显著性的舰船目标检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1395-1403.
- ZHAO H G, WANG P, DONG CH, *et al.*. Ship detection based on the multi-scale visual saliency model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1395-1403. (in Chinese)
- [18] 陈科峻, 张叶. 循环神经网络多标签航空图像分类[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1404-1413.
- CHEN K J, ZHANG Y. Recurrent neural network multi-label aerial images classification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1404-1413. (in Chinese)

作者简介:



田大鹏(1984—),男,辽宁铁岭人,副研究员,博士生导师,中国科学院青年创新促进会会员,2012年于北京航空航天大学获得博士学位,2009~2012年任日本庆应义塾大学先导研究中心共同研究员,主要从事运动控制理论与技术方面的研究。E-mail: d. tian@ciomp. ac. cn



邵晓鹏(1973—),男,山东威海人,教授,博士生导师,1997年、2002年、2005年分别于西安电子科技大学获得学士、硕士、博士学位,现为西安电子科技大学物理与光电工程学院院长,主要从事计算成像与图像处理方面的研究。E-mail: xpshao@xidian. edu. cn