

文章编号 1004-924X(2022)24-3128-11

航空光电成像像移与像旋运动补偿控制技术综述

王昱棠^{1,2}, 田大鹏^{1,2*}

(1. 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;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:本文从控制的角度综述了大视场、高分辨率需求下,航空光电成像系统像移与像旋运动补偿控制技术的先进技术及研究进展。结合像移与像旋运动补偿控制发展趋势,将其分为单一执行器补偿控制和多执行器协同补偿控制两大类。对于单一执行器补偿控制,从控制照准架、控制光路折转、控制成像介质运动的三个角度进行了总结;对于多执行器协同控制,从指令协调、机械联动和多执行器信息交互三个角度,对协同补偿控制方案进行了梳理和分析;最后从五个研究方面对像移与像旋运动补偿控制的难点和未来发展进行了展望。研究结果有助于航空光电成像领域学者快速全面的了解像移与像旋运动补偿控制的研究现状和发展趋势,为进一步提升航空光电成像装备的综合性能提供有益借鉴。

关键词:航空光电成像;像移;像旋;运动补偿;伺服控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223024.3128

Review of image shift and image rotation compensation control technology for aviation optoelectronic imaging

WANG Yutang^{1,2}, TIAN Dapeng^{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 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: d.tian@ciomp.ac.cn*

Abstract: In terms of control, this study systematically reviews the advanced technology and research progress of image shift and image rotation compensation control technology for aviation optoelectronic imaging with a large field of view and high-resolution requirements. Under the development trend of image shift and rotation compensation control, the technology can be divided into two major categories: single- and multi-actuator cooperative compensation controls. For single-actuator compensation control, compensation methods based on gimbal control, optical path folding, and imaging medium control are summarized. For multi-actuator cooperative compensation control, the collaborative control scheme is resolved and analyzed from the three perspectives of command coordination, mechanical linkage, and multi-actuator

收稿日期:2022-07-08;修订日期:2022-08-02.

基金项目:中国科学院前沿科学重点研究计划资助项目(No. ZDBS-LY-JSC044);国家自然科学基金资助项目(No. 12203049, No. T2122001);中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划资助项目(No. YSBR-066);长春市科技发展计划资助项目(No. 21SH03)

tor information interaction, and the difficulties and future development trends of image shift and image rotation motion compensation control are prospected from five research angles. The study will contribute to a rapid and comprehensive understanding of the research status and development trends of image shift and rotation compensation control in the field of aviation optoelectronic imaging and act as a helpful reference for further improving the synthesis performance of aviation optoelectronic imaging equipment.

Key words: aviation optoelectronic imaging; image shift; image rotation; motion compensation; servo control

1 引言

航空光电成像载荷搭载在飞机、飞艇等各类动基座载体上,可以机动灵活地获取直观的图像信息,是快速获取高精度场景图像数据的有效手段,广泛应用于军事侦察^[1]、电力巡检^[2]、地理测绘^[3]、环境监测^[4]、精准农业^[5]等重要的军事及民用领域,具有强烈的应用需求,是国内外的研究热点。

航空光电成像过程中,载机的前向运动、成像载荷扫描运动以及系统振动等因素会造成景物的像与成像介质间的相对运动,即像移和像旋。它们在成像介质上的耦合和叠加导致像模糊和拖尾效应,降低成像分辨率,导致目标形态的关键信息丢失,影响图像的整体判读和测量。控制成像装备内各类执行器是补偿像移和像旋运动、提高成像系统整体性能的最直接手段。随着航空光电成像的任务越来越复杂,补偿成像运动执行器的形式和数量越来越多,像移和像旋运动补偿控制方案也更多样,补偿效果也不仅仅局限在单一执行器控制性能的提升,还需要关注多个执行器间的协同控制以获得整体成像质量的提升,补偿难度越来越大。

二十世纪六七十年代开始,发达国家开始将运动补偿技术应用于高性能航空相机中。美国全球鹰相机、CA-295 双波段相机以及以色列 LOROP 光电侦察系统是典型的步进凝视成像系统,通过多轴照准架及主次镜配合实现步进扫描和稳定成像。其中,Raytheon 公司研制的具有广域搜索能力的高精度全球鹰相机采用主镜连续扫描、内置反射镜同步运动的视轴复合控制技术实现稳像和像移补偿,相机视轴稳定精度可达 3 μrad ,稳定带宽为 300 Hz,并能够实现 30 fps 的高

频步进凝视成像^[6]。英国 F-9120 相机为典型连续扫描成像系统,利用线阵时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)探测器实现全景扫描成像,驱动扫描镜转动补偿像移,稳定精度优于 0.5 μrad ^[7]。双谱段航空远距斜视 DB-110 相机利用扫描与步进凝视混合成像模式实现不同谱段性能优化,通过控制俯仰照准架补偿前向像移,第三代 DB-110 相机视轴稳定精度能够控制在 1/2 个像元之内^[8]。

自上世纪 90 年代,国内多家单位先后开展了像移与像旋运动补偿技术研究。王德江等研究了 TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿方法,像移补偿残差为 0.425 μm ^[9]。王惠林等分别推导了平行光路和会聚光路中快速反射镜像移补偿随动角度的规律^[10]。针对航空成像系统扫描反射镜运动带来的像旋问题,一些学者提出齿轮、钢丝绳的机械联动^[11]以及双电机同步控制^[12]等像旋补偿方案。

本文对航空光电成像像移与像旋补偿控制技术进行了系统的分析和研究,以提升成像系统性能为核心目标,从控制的角度对不同补偿方法进行分类论述,分析和对比了每种方法的优缺点,并对航空光电成像运动补偿的发展给出相应的思考和建议。

2 原理与分类

2.1 概念和原理

航空光电成像过程中,载机的高速前向运动导致曝光时间内景物与成像介质间的相对运动,产生前向像移(图 1),载机飞行过程中姿态变化和振动会产生随机像移和振动像移^[13]。

为扩大收容范围、提高作业效率,航空光电

成像载荷可以采用扫描成像方式,在垂直于飞行方向上主动控制视轴运动,通过摆扫或推扫成像方式高效地获取大范围目标图像(图 2)。

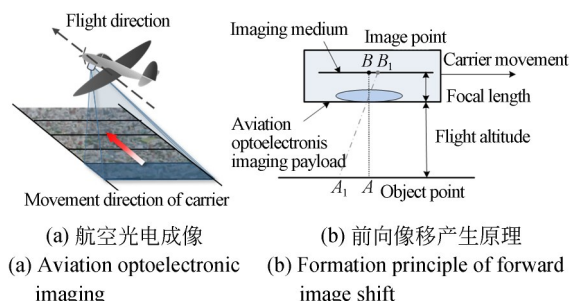


图 1 航空光电成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aviation optoelectronic imaging

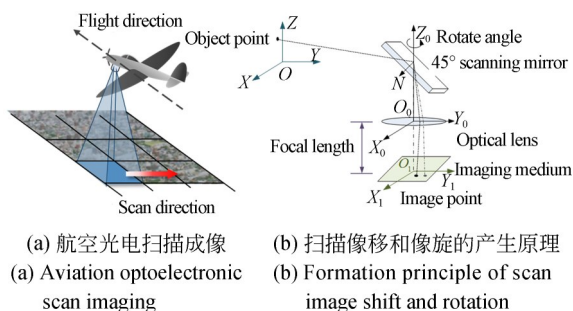


图 2 航空光电扫描成像示意图

Fig. 2 Schematic diagram of aviation optoelectronic scan imaging

但是,传统采用旋转整个光学系统的扫描方式存在惯量大、响应慢、能耗高等问题,而且采用旋转扫描镜的方式会影响成像光路中光束的折转,导致在曝光时间内景物与成像介质之间的相对运动,产生扫描像移和像旋^[14]

2.2 技术分类

航空光电成像像移和像旋补偿控制分类如图 3 所示,根据运动补偿回路控制结构,分为单一执行器控制补偿和多执行器协同控制补偿。单一执行器控制补偿是指对某一个执行器单独设计控制器来补偿像移或像旋。多执行器协同控制补偿是指当系统中存在多个成像运动相关的执行器时,补偿控制器是在考虑整体成像性能的条件通过指令协同、机械联动或者信息交互的方式设计。

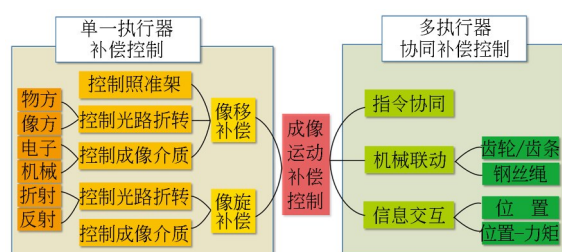


图 3 成像运动补偿控制分类

Fig. 3 Classification of image motion compensation control

3 单一执行器控制补偿

3.1 像移补偿控制

3.1.1 基于照准架控制的像移补偿

航空光电成像载荷一般为包含一个或多个轴系自由度的多照准架结构。扫描成像过程中,通过控制载荷俯仰照准架与载机飞行方向反向同步运动,能够补偿前向像移。文献[15]中,基于悬臂结构的三轴成像载荷根据载机实时飞行速度生成指令,控制俯仰照准架补偿前向像移。由于照准架转动惯量相对较大,所受风阻、载机晃动等复杂环境干扰影响,照准架控制回路的带宽很难达到几十 Hz 以上,对随机像移及振动像移的补偿性能有限。考虑像移补偿残差对成像质量的影响,上述系统允许的最大曝光时间为 1.9 ms。

3.1.2 基于光路折转控制的像移补偿

通过控制成像光路中反射镜、双光楔、摆动透镜、旋转多面体及反射棱柱等补偿元件反向运动,使光束按照特定规律改变其传播方向,能够补偿像移造成的成像模糊^[16]。根据补偿执行器在光路中的位置,这类方法又可以细分为物方补偿和像方补偿两种(如图 4)。

3.1.2.1 物方像移补偿

物方像移补偿是指将补偿执行器放置在光学系统的物方,通过控制物方光束的折转补偿像移。这种方法不会引入原理性光学偏差,且后续光路不需要进行适应性改动。美国 KA-112 型航空相机与国内某摆扫型航空相机均采用驱动物方扫描镜的方式补偿载机飞行导致的前向像移^[17-18]。但是,物方补偿器的尺寸一般为像方执行器的几倍,伺服系统宽频带控制的难度相对更

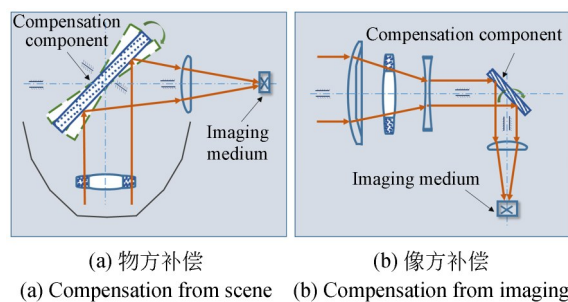


图 4 基于控制光路折转的像移补偿类型

Fig. 4 Optical path folding based image shift compensation

大,为满足航空成像光机约束和环境适应性,还需要考虑像移和像旋补偿执行器的结构轻量化设计问题。

3.1.2.2 像方像移补偿

像方像移补偿是指将补偿执行器放置于成像系统像方平行光路或会聚光路中,通过折转像方光束补偿像移。像方补偿执行器的口径按照光学系统的放大倍率进行缩小,因此尺寸和惯量相对物方补偿执行器更小,其运动范围则需要按放大比例增大。

音圈电机和压电陶瓷驱动的快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是最常见的像方补偿执行器,具有尺寸小、质量轻、频带宽及精度高等特点。将FSM放置于成像光路中,利用其镜面偏转能够改变入射光线方向,补偿步进凝视成像系统连续扫描产生的扫描像移^[19-20]。这种方法不需要照准架的频繁启停,能够提高成像帧频。由于FSM运动行程有限,需要控制其高动态的往复运动实现连续扫描成像过程中像移的有效补偿,对FSM的控制精度和动态特性提出了较高的要求。一些学者应用扩张状态观测器、干扰观测器等估计并补偿FSM结构和环境特征引入的复杂干扰,并设计滑模控制、自适应控制等策略提高其控制精度^[21-22]。文献[23]提出了一种音圈电机驱动快速反射镜的完全跟踪控制方法,将快速反射镜的双十带宽拓展到375 Hz。

但是,基于反射镜折转光路的像移补偿方式存在视场中心与视场边缘不一致、补偿引起

光轴偏差甚至离焦等问题,很难完全消除成像像移。

3.1.3 基于成像介质控制的像移补偿

控制成像介质的反向运动也可以补偿像移。根据补偿原理,这类方法可以进一步分为电子补偿和机械补偿两种。

3.1.3.1 电子补偿

早期的电子补偿是指成像介质的片上分区补偿,通过控制成像介质不同区域的电荷转移速度补偿像移。随着技术的发展,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)的时间延迟积分工作模式能够在不牺牲空间分辨率的前提下,通过控制与像移方向一致的行间电荷转移速度补偿像移。对于推扫型TDI CCD光电成像载荷,通过精确提取载机速高比能够提高前向像移补偿精度^[24]。对于摆扫型TDI CCD光电成像载荷(如图5所示),通过扫描镜与TDI CCD速度的精确匹配能够满足高分辨率光电成像需求^[25]。

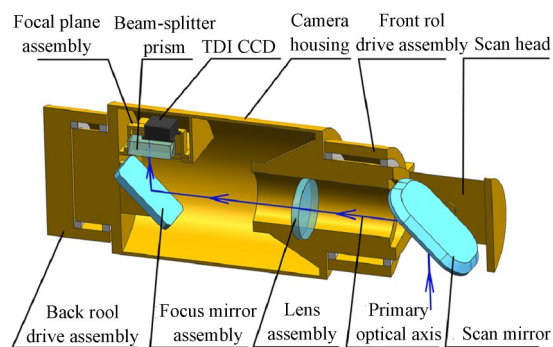


图 5 一种摆扫型TDICCD航空成像载荷结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of a whisk-broom TDI CCD aerial imaging payload

电子补偿方法不需要在光路中额外增加执行器,光机结构相对简单。但是,这种方法的成像效率受限于电荷读取速度和成像帧频,补偿性能受控制系统精度、带宽和传感器分辨率等因素影响,很难实现行间电荷与景物像点之间速度的完全匹配。

3.1.3.2 机械补偿

通过控制与成像介质固连的精密传递机构运动,使成像介质的速度与像移速度保持一致

也能够补偿像移。这种方式具有传动链短、误差传递环节少和像面各点补偿速度一致的优点。

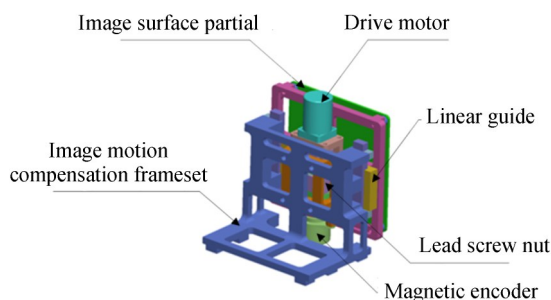


图6 一种像移补偿机械结构

Fig. 6 Mechanical structure for image shift compensation

文献[26]设计了一种直线电机带动滚珠丝杠螺母驱动的机械结构控制成像介质补偿像移(图6)。这种补偿方式对驱动结构的设计、系统装调配准的精度和精密运动可靠性要求较高。

3.2 像旋补偿控制

航空光电扫描成像过程中,扫描镜的摆动会造成扫描像旋,像旋补偿的性能是高分辨率成像的关键^[27]。根据补偿原理,像旋补偿控制可以进一步分为基于光路折转控制和基于成像介质控制两类。

3.2.1 基于光路折转控制的像旋补偿

控制光路中的执行器与扫描镜同步运动,能够补偿光轴的旋转^[28]。根据工作方式不同,可进一步分为折射式消旋和反射式消旋两类。

3.2.1.1 折射式

在成像系统中沿光轴方向安装道威棱镜、阿贝棱镜、别汉棱镜等消旋棱镜(图7),利用其全反射原理按比例旋转光轴能够消除像旋^[29-30]。

这种方式能够在改变光束方向的同时不改变其聚散度,且补偿过程中各反射面不会发生相对运动。但是,光束在棱镜内的折射过程会造成一定的能量损失,影响成像质量,同时棱镜的临界角和光学材料特性还会限制其工作视场和成像波段。

3.2.1.2 反射式

在光路中控制由3个排成K型的平面反射镜组成K镜也能够补偿像旋^[31]。这种方式具有能

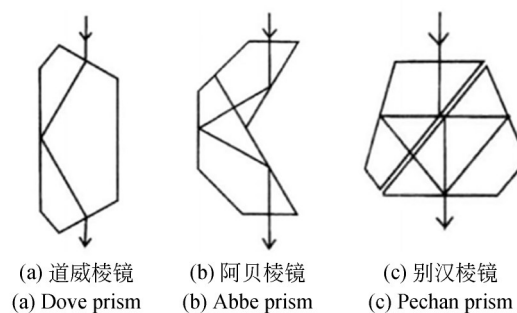


图7 常见消旋棱镜

Fig. 7 Common prisms to compensate for image rotation

量损失小、通光口径大、谱段全的优势。但是,K镜的设计必须充分考虑其支撑结构以减少装调对反射镜面形精度的影响,还需要考虑K镜口径、体积和反射角度对成像系统光机结构设计的约束,因此基于K镜的像旋补偿更适用于大口径成像系统。

3.2.2 基于成像介质控制的像旋补偿

设计旋转机构带动成像介质与扫描镜同步转动,可以消除扫描像旋对成像的影响。文献[32]设计了一种基于干扰观测器的四通道双边控制器,利用成像介质与扫描反射镜同步旋转补偿像旋(图8),最大同步补偿误差为 0.0042° ,像移补偿残差仅为像元大小的6%。

基于成像介质控制的像旋补偿方法无需改造成像光路,并具有良好的装调性能,但这类方法对像旋补偿机构的机械设计提出了较高的要求,必须研究小型化、轻量化的像旋补偿机构设计。

3.3 小节

单一执行器的运动补偿控制方法主要关注通过提升执行器控制指标来改善系统运动补偿性能。但是,一方面这类方法的像移补偿精度严重依赖于载机飞行/扫描镜运动信息的获取,当成像载荷与载机通信的实时性较差或扫描镜运动控制性能较差时,补偿效果有限。另一方面,当成像系统需要同时补偿多个运动维度上的多类成像运动时,为不同执行器单独设计控制器的方式不仅存在设计过程复杂的问题,还会由于缺乏对整体成像效果的考量引入额外的补偿误差^[33]。

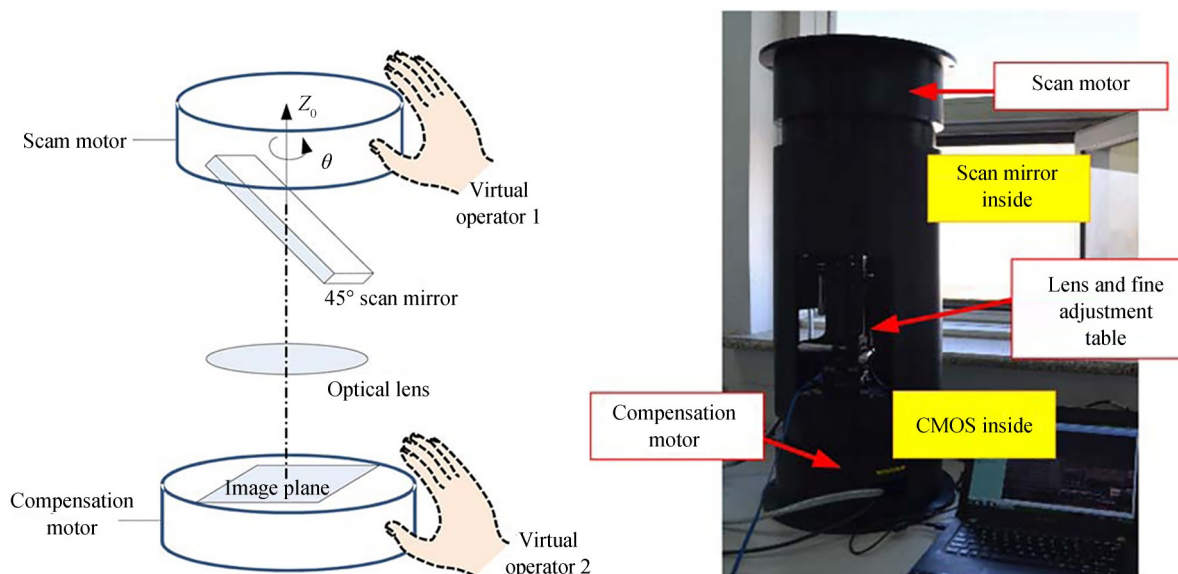


图 8 一种基于成像介质运动的像旋补偿方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of an image rotation compensation scheme based on motion of the imaging medium

4 多执行器协同控制补偿

随着实际应用对航空成像装备成像分辨率、成像效率等性能的要求越来越高,成像运动的补偿控制问题也越来越复杂。这种复杂性体现在成像装备的光机结构设计中引入了越来越多控制光束折转的执行器。即使单独控制的补偿执行器获得较高的控制精度,多个执行器间的协同控制残差仍然会导致景物与成像介质间存在相对运动。随着航空光电成像装备内涉及的成像运动补偿种类越来越多,多执行器协同成像运动补偿问题已成为制约航空成像装备整体性能提升的瓶颈。

4.1 基于指令协调的协同补偿控制

成像运动补偿系统中存在多个可控执行器时,分别计算执行器控制角度及角速度,通过指令协调的方式能够实现多个补偿执行器间的协同控制^[34]。美国 CA-295 航空光电相机通过转动卡塞格林式主次镜与子反射镜的方式补偿前向像移,利用成像介质分区像移补偿功能扫描方向的像移^[35]。这种方法不需要额外增加机械结构,光机系统设计简单,但是不同执行器结构形式、驱动方案、工作环境不同,还受到自身机械结构带来的轴系摩擦、不平衡力矩等干扰的影响,只通过指令的方式很难实现多执行器间的严格协同。

4.2 基于机械联动的协同补偿控制

一些学者通过机械联动的方式,通过齿轮、齿条、钢丝绳等机械结构实现扫描镜与补偿执行器间的同步运动,实现了多执行器协同运动控制。文献[36]在某遥感扫描系统上提出双电机驱动、独立控制回路的钢丝绳传动消旋方案对进行消旋(如图9所示),实现同步精度0.5 mrad。

机械联动的补偿方案具有成本低、操作简单、易维护等优点,多应用于大型光电成像装备。但对机械连接部分精密性要求较高,长期使用后上述机械联动结构会存在机械磨损、结构空回、

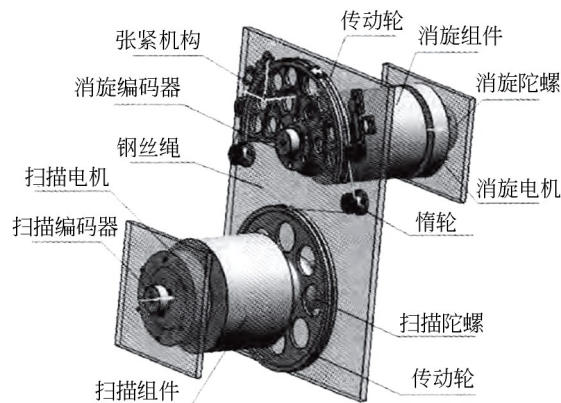


图 9 基于钢丝绳精密传动的像旋补偿方案

Fig. 9 Image rotation compensation scheme based on wire rope precision driving

弹性形变和传动摩擦等问题,给补偿控制带来额外非线性干扰。文献[37]建立了包含钢丝绳变形成量和摩擦系数的钢丝绳数学模型,基于此设计模糊自适应PID控制器,在成像载荷重量为21.3 kg的前提下将某机载平台稳定精度提升到0.2 mrad。

由于引入传动机构,光电成像系统的光机结构设计受传动机构的结构及传动比的约束,需要牺牲一定的系统体积和重量,进而影响成像系统性能。当系统中存在多个需要协同控制的执行器时,光电成像载荷有限空间内机械联动方案实施难度较大。

在控制器设计方面,基于指令协调和机械联动的补偿控制方案与单一执行器补偿控制相同,控制器设计过程是独立的,由于没有不同运动补偿执行器间信息交互,这类方法很难实现理想的协同控制。

4.3 基于多执行器信息交互的协同补偿控制

运动补偿的最终目标是景物在成像介质上

高质量成像。虽然影响成像质量的各类成像运动产生原因和表现形式各不相同,其本质上都是景物的像与成像介质间的相对运动。因此,从光学成像机理出发,分解不同成像运动数学模型,将不同执行器的运动统一在一个坐标系下,基于信息交互的方法协同控制多个成像运动补偿执行器同步运动,能够获得更好的成像运动补偿效果。

针对全景式TDICCD摆扫航空相机像旋问题,文献[38]提出了一种基于干扰观测器的双电机驱动同步补偿控制方法,位置同步误差优于 0.0043° ,静态成像时对鉴别率板的图像分辨力可达55 lp/mm。为进一步提高多执行的同步性能,文献[39]设计了位置-力矩混合多边控制器同步补偿扫描像移和像旋。在此基础上,文献[40]提出基于模态切换的多执行器成像运动补偿方法(图10),解决像移补偿执行器行程有限、需要往复运动的切换控制问题。

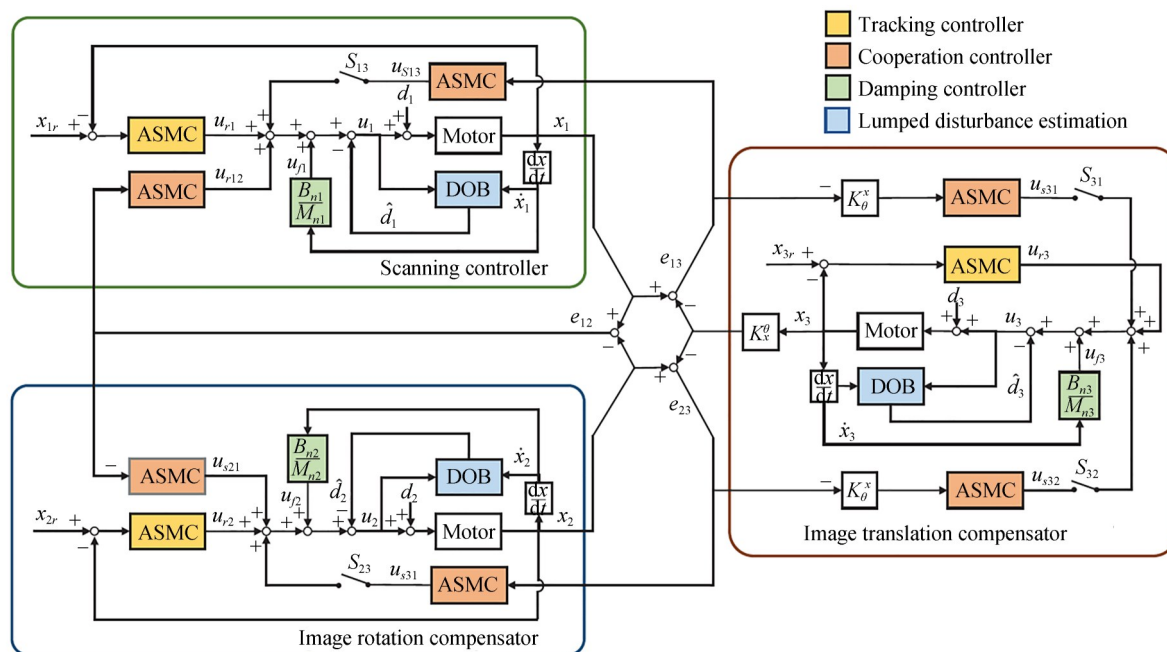


图10 基于模态切换的扫描成像系统成像运动补偿控制框架

Fig. 10 Image motion compensation control frame of a scanning imaging system based on modal switching

4.4 小节

航空光电成像系统中存在多个维度、多种类成像运动时,不同运动在成像介质上的耦合和叠

加影响成像分辨率。像移和像旋运动补偿过程中必须考虑多个补偿执行器之间的协同控制。多执行器协同控制补偿是在单一执行器高精度

控制的基础上,考虑成像系统光机结构约束、几何光学约束、复杂干扰约束、通信结构约束,通过协同控制策略提高成像运动补偿精度。

5 挑战和展望

5.1 像移和像旋运动补偿系统整体建模与解耦

当航空光电成像系统中引入多个执行器补偿像移、像旋等运动时,不同执行器根据几何成像原理布置在成像光路中的不同位置进行成像运动补偿,对多个执行器分别建模和控制的方案已无法满足高分辨率成像的需求。

因此,从几何成像原理出发,考虑不同执行器间不同的驱动原理、动态特性、运动尺度、运动维度等特征,分析多执行器对光学系统光路的影响,基于多体动力学、运动学和矩阵论等基础理论,精确地构建多执行器成像运动补偿系统整体模型,实现从节点到整体对成像运动补偿系统的全面认识和理解,再进行合理的数学解耦,是进一步提升成像运动补偿系统性能的前提。

5.2 执行器高性能运动控制

现有的控制策略多侧重于对执行器稳态控制精度的提升,执行器动态响应能力有限,要求成像系统曝光前预留足够长的调节时间,降低了成像效率。

当系统对成像效率要求较高时,要求扫描镜、反射镜等执行器往复运动的控制指令从相对平缓的梯形波越变为高频矩形波,对执行器的动态性能和控制精度要求也随之更高^[41]。同时,搭载无人机、有人机、飞艇等的航空成像系统工作几千米以上的高空,系统输出功率受到严格约束,还必须考虑输入饱和、执行器故障等非线性干扰。如何在有限的驱动能力下,控制存在一定故障概率的执行器完成高动态成像运动补偿,是一个需要深入探索的问题。

5.3 多执行器协同控制拓扑结构分析与设计

现有的研究更多的关注控制器本身的设计,缺乏对表征航空成像执行器间信息交互的拓扑结构的考量。在其他的应用领域中,已有研究证明连通性不同的拓扑结构会造成执行器间的信息交互量和信息交互效率不同,进而对系统性能产生影响。文献[42]认为对于高阶线性系统,拓扑结构和执行器动力学都会影响一致性收敛。

一些学者将提出的控制方法在不同拓扑结构上进行验证,取得了不同的控制效果^[43-44]。

随着航空成像应用需求的进一步提升,像移和像旋补偿系统的执行器数量越来越多,如何面向成像需求设计多执行器拓扑结构成为一个新的问题。

5.4 多执行器高动态协同

航空成像装备内、外工作环境较为复杂,各执行器受到载体晃动、发动机振动、气流扰动、轴系摩擦、线绕、力矩波动等机理和量级差异较大的复杂多源干扰的综合影响。同时,受成像系统总体重量和体积的严格约束,航空成像装备机械结构设计时的轻量化手段会使各执行器的刚度下降、寄生动态特性增加、非线性特性凸显,使以上干扰对执行器运动的影响更为明显。动态特性不同的执行器对干扰的抑制能力不同,低动态执行器如扫描镜会在较宽的动态范围内存在干扰补偿残差,影响多执行器大动态范围内的协同精度。

因此,如何能够通过多执行器协同控制,在不影响系统鲁棒稳定性的前提下,提升运动补偿系统整体动态性能,也是一个值得深入研究的问题。

5.5 成像运动补偿效果评估

运动补偿控制要求执行器的运动位置和速度在进行空间折算后与产生成像运动的载机或扫描镜的运动信息严格匹配,其核心是曝光时间内景物在成像介质上清晰的成像。有学者通过光学成像质量的评价指标调制传递函数定量的衡量了成像运动补偿控制效果对成像的影响^[45]。但目前尚没有研究开展不同成像分辨率需求约束下成像运动补偿控制策略的设计问题,也没能根据成像运动补偿系统时间和空间控制指标直观地预测成像性能。因此,建立成像运动补偿系统效果与成像效果之间的双向评估链路,为系统设计全过程提供指导是一项极具挑战的工作。

6 总 结

像移和像旋运动是影响航空光电成像大幅宽、高分辨率成像的关键,运动补偿是高性能航空光电成像的核心保障。随着航空光电成像系统越来越复杂,像移和像旋运动补偿系统不再仅

仅是对某一种成像运动、单一执行器的控制,还需要关注多执行器间的协同控制,以从整体上提升系统成像性能。

本文有针对性地分析了载机前向运动和扫描成像带来的像移和像旋产生机理。从单一执行器控制和多执行器协同控制两个角度系统地剖析了像移和像旋运动补偿控制策略。对于未

来的运动补偿控制,一方面需要从单一执行器入手,提高执行器在高动态环境和复杂非线性约束下的动态性能和抗扰能力;另一方面也要从多执行器协同运动出发,从多执行器信息交互的拓扑结构合协同控制策略上进一步提升像移和像旋补偿性能,并从控制和成像等多个视角对补偿效果进行整体评估。

参考文献:

- [1] SHIMONI M, HAELTERMAN R, PERNEEL C. Hyperspectral imaging for military and security applications: combining myriad processing and sensing techniques[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, 7(2): 101-117.
- [2] DUTTA T, SONI A, GONA P, *et al.* Real tested for autonomous anomaly detection in power grid using low-cost unmanned aerial vehicles and aerial imaging [J]. *IEEE MultiMedia*, 2021, 28(3): 63-74.
- [3] ZHANG H W, YUAN G Q, LIU X J. Precise calibration of dynamic geometric parameters cameras for aerial mapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 149: 106816.
- [4] KIM J I, CHI J, MASJEDI A, *et al.* High-resolution hyperspectral imagery from pushbroom scanners on unmanned aerial systems [J]. *Geoscience Data Journal*, 2021:1-14.
- [5] ZHANG H D, WANG L Q, TIAN T, *et al.* A review of unmanned aerial vehicle low-altitude remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1221.
- [6] CHANG C Y, BENDER P A. Global hawk integrated sensors suite-recent upgrades and images [C]. 26 September 2005-29 September 2005, Arlington, Virginia. Reston, Virginia: AIAA, 2005: 7006.
- [7] RUSSO M J, LOBIONDO S, COON B, *et al.* Beryllium optics and beryllium-aluminum structures for reconnaissance applications [C]. *Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 6666, Optical Materials and Structures Technologies III, San Diego, California, USA*. 2007, 6666: 238-251.
- [8] LANGE D, IYENGAR M, MAVER L, *et al.* The Goodrich 3rd generation DB-110 system: successful flight test on the F-16 aircraft [C]. *Defense and Security Symposium. Proc SPIE 6546, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IV, Orlando, Florida, USA*. 2007, 6546: 38-53.
- [9] 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI-CCD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, *et al.* Digital implementation of forward motion compensation in TDI-CCD panoramic aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2465-2472. (in Chinese)
- [10] 吴雄雄, 栾亚东, 王惠林, 等. 航空光电成像系统像移补偿技术研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 424-429.
- WU X X, LUAN Y D, WANG H L, *et al.* Image motion compensation technology of aerial photoelectric imaging system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 424-429. (in Chinese)
- [11] 张继超, 周九飞, 张雷. 摆扫式航空遥感器像旋补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(9): 2396-2400.
- ZHANG J CH, ZHOU J F, ZHANG L. Image spin compensation on scanning frame remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2396-2400. (in Chinese)
- [12] 王平, 田大鹏, 徐宁, 等. 航空光电侦察平台内藏式扫描系统像旋分析及补偿[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 66-74.
- WANG P, TIAN D P, XU N, *et al.* Analysis and compensation of image rotation in internally mounted scanning system for aerial electric-optical reconnaissance platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 66-74. (in Chinese)
- [13] WANG K D, SU X Q, LI Z, *et al.* ADRC system of FSM for image motion compensation [C]. *Proc SPIE 10256, Second International Conference on Photonics and Optical Engineering*, 2017, 10256: 17-23.

- [14] RAMACHANDRAN M P, AGARWAL M K, DANIEL D A. Efficient onboard image motion compensation for orbital inclination and eccentricity of geostationary weather satellites[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2020, 234(7): 1311-1325.
- [15] YANG Y M, YU C F, WANG Y C, *et al.* Imaging attitude control and image motion compensation residual analysis based on a three-axis inertially stabilized platform [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(13): 5856.
- [16] DAUTT-SILVA A, DE CALLAFON R A. Multivariable dynamic input shaping for two-axis fast steering mirror [J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2020, 53(2): 8644-8649.
- [17] WANG D, JIA X Z. Design and experimental research of a new type focus mechanism used in space-based telescope[C]. 2012 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, China*. IEEE, 2012: 1597-1601.
- [18] 田海英, 刘明. 基于扫描反射镜的航空相机前向像移补偿[J]. *光电工程*, 2014, 41(9): 20-24.
- TIAN H Y, LIU M. The forward image motion compensating scheme of aerial camera based on scanning mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(9): 20-24. (in Chinese)
- [19] SUN J J, DING Y L, ZHANG H W, *et al.* Conceptual design and image motion compensation rate analysis of two-axis fast steering mirror for dynamic scan and stare imaging system[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2021, 21(19): 6441.
- [20] YUAN G, WANG D H, LI S D. Single piezoelectric ceramic stack actuator based fast steering mirror with fixed rotation axis and large excursion angle [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 235: 292-299.
- [21] CHANG T Q, WANG Q D, ZHANG L, *et al.* Battlefield dynamic scanning and staring imaging system based on fast steering mirror[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(1): 37-56.
- [22] WANG L, LIU X L, WANG C Y. Modeling and design of fast steering mirror in image motion compensation for backscanning step and stare imaging systems [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58: 103105.
- [23] 王福超, 王昱棠, 田大鹏. 音圈快速反射镜的完全跟踪控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1997-2006.
- WANG F CH, WANG Y T, TIAN D P. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(9): 1997-2006. (in Chinese)
- [24] CAI S, ZHANG X, ZHU Y J, *et al.* Integration time interpolation control of space-borne TDICCD [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1607(1): 012087.
- [25] ZHANG J, DING Y L, ZHANG L H, *et al.* Precise alignment method of time-delayed integration charge-coupled device charge shifting direction in aerial panoramic camera[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 125101.
- [26] CHEN W N, LEI Y J, TAO Y H. Research on the fast image motion compensation technology of aerial digital camera[C]. *Proceedings of the 2nd International Conference on Control and Computer Vision - ICCCV 2019. June 15-18, 2019. Jeju, Republic of Korea. New York: ACM Press*, 2019: 71-74.
- [27] BALCAEN R, REU P L, LAVA P, *et al.* Influence of camera rotation on stereo-DIC and compensation methods [J]. *Experimental Mechanics*, 2018, 58(7): 1101-1114.
- [28] SHAPAR V. Principles of compensation of optical rays' rotation and multi-channel optical rotary connectors[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 8023-8033.
- [29] SANDO Y, BARADA D, YATAGAI T. Optical rotation compensation for a holographic 3D display with a 360 degree horizontal viewing zone[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8589-8595.
- [30] ABDO M, BADILITA V, KORVINK J. Spatial scanning hyperspectral imaging combining a rotating slit with a Dove prism [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20290-20304.
- [31] WANG B, HONG P. A design of area array infrared panoramic imaging system based on position closed loop[C]. *Proc SPIE 11338, AOPC 2019: Optical Sensing and Imaging Technology*, 2019, 11338: 240-247.
- [32] TIAN D P, WANG Y T, WANG F C, *et al.* Bilateral control-based compensation for rotation in imaging in scan imaging systems[J]. *Optical Engi-*

- neering, 2015, 54: 124104.
- [33] XU, YAN, GU, *et al.* Analysis of dynamic modulation transfer function for complex image motion [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23): 5142.
- [34] HAYAKAWA T, WATANABE T, SENOO T, *et al.* Gain-compensated sinusoidal scanning of a galvanometer mirror in proportional-integral-differential control using the pre-emphasis technique for motion-blur compensation [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(21): 5640-5646.
- [35] LAREAU A G, PARTYNSKI A J. Dual-band framing cameras: technology and status[C]. *International Symposium on Optical Science and Technology. Proc SPIE 4127, Airborne Reconnaissance XXIV, San Diego, CA, USA*. 2000, 4127: 148-156.
- [36] 张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 钢丝绳传动在航空光学遥感器上的应用[J]. *激光与红外*, 2013, 43(4): 418-422.
- ZHANG H W, CAO G H, LI Y W, *et al.* Application of wire rope gearing in aerial optical remote sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 418-422. (in Chinese)
- [37] 王凯, 孔德杰, 宋悦铭, 等. 钢丝绳传动的三轴转台伺服控制的设计[J]. *红外技术*, 2022, 44(1): 54-60.
- WANG K, KONG D J, SONG Y M, *et al.* Design of a three-axis turntable servo control using wirerope transmission [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(1): 54-60. (in Chinese)
- [38] 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): 82-90.
- LI X Y, ZHANG T, LIU Z H M, *et al.* High accuracy compensation for image surface rotation of panoramic TDICCD scanning aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 82-90. (in Chinese)
- [39] TIAN D P, WANG Y T, WANG Z S, *et al.* Long integral time continuous panorama scanning imaging based on bilateral control with image motion compensation [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(16): 1924.
- [40] GAO Y, XU R, WANG Y T, *et al.* Multi-actuator control with modal switching and different disturbance for scanning imaging motion compensation [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2021, 15(15): 1931-1941.
- [41] WANG Y T, TIAN D P, XU R. Multiactuators control for prototype panorama scanning imaging with input saturation [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(3): 2117-2126.
- [42] WANG Q L, GAO H J, ALSAADI F, *et al.* An overview of consensus problems in constrained multi-agent coordination [J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2014, 2(1): 275-284.
- [43] XU W Y, HO D W C, LI L L, *et al.* Event-triggered schemes on leader-following consensus of general linear multiagent systems under different topologies [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(1): 212-223.
- [44] ZHANG H, GURFIL P. Distributed control for satellite cluster flight under different communication topologies [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2015, 39(3): 617-627.
- [45] YANG F, WU Z C, ZENG J S, *et al.* Study on the influence of image motion on image radiation quality [C]. *Communications, Signal Processing, and Systems*, 2020.

作者简介:



王昱棠(1987—),女,内蒙古呼伦贝尔人,副研究员,硕士生导师,2012年于北京理工大学获得硕士学位,2019年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航空光电成像装备运动控制方面的研究。E-mail: ytwang@ciomp.ac.cn

作者简介:



田大鹏(1984—),男,辽宁铁岭人,研究员,博士生导师,国家优青,中国科学院青年创新促进会优秀会员,2007年于北京理工大学获得学士学位,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