

文章编号:1001-5078(2025)03-0425-05

· 光电技术与系统 ·

基于陀螺的机载光电系统电子稳像技术研究

李超, 雷霏霖, 胥青青, 负平平, 刘长亮
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:针对基于图像的电子稳像不能适应机载光电系统的复杂应用环境,包括载机机动、光电系统调转、目标场景不确定等因素造成不能准确获取抖动量从而难以补偿等问题。本文采用陀螺与图像处理相结合的电子稳像技术,基于陀螺数据估计出稳定平台的抖动像素,通过图像序列帧间实时像素补偿,消除图像抖动。在不需要额外增加硬件的条件下,提高了机载光电系统视频图像的稳定性。该方法目前已在某型飞行员夜视系统上进行了验证。结果表明,在原有硬件条件下,该方法可显著提高夜视系统图像的稳定性。

关键词:机载光电;电子稳像;运动估计;陀螺

中图分类号:V241.5;TP751 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.016

Electronic image stabilization technology of airborne photoelectric system based on gyro

LI Chao, LEI Fei-lin, XU Qing-qing, YUN Ping-ping, LIU Chang-liang
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract:In view of the problem that image-based electronic image stabilization cannot adapt to the complex application environment of airborne photoelectric system, including the factors as aircraft maneuvering, photoelectric system rotation and the uncertainty of target scene, the accurately obtain it difficult to compensate. In this paper, the electronic image stabilization technology combining gyro and image processing is used to estimate the jitter pixels of platform, and the image jitter is eliminated by real-time pixel compensation between image sequence frames. The stability of the video image of the airborne photoelectric system improved without additional hardware. method has been verified. The results show that this method can significantly improve the image stability of the night vision system under the original hardware conditions.

Keywords:airborne photoelectric system; electronic image stabilization; motion estimation; gyro

1 引言

机载光电系统是一种安装在固定翼或直升机载体上用于图像探测、情报获取、态势感知、辅助攻击的重要光电设备,可在夜间与昼间低能见度条件下,为飞行员提供实时稳定的外界红外或可见光视频图像。典型机载光电系统主要由稳定平

台、光学传感器和电子处理单元等组成。光学传感器安装于稳定平台上,稳定平台隔离来自飞机载体的振动,并在飞机飞行姿态变化情况下保持光学传感器视轴稳定,为飞行员提供稳定清晰的外界场景视频。稳定平台通常包含方位和俯仰轴系,通过角速度传感器、角位置传感器的反馈信

号,控制伺服电机对轴系进行稳定,进而稳定光学传感器输出的视频图像,基于这种稳定控制原理,稳定平台不能完全消除图像抖动,为了达到良好的稳定效果,稳定平台一般采用多框架,多级稳定等技术。缺点是控制系统复杂,成本高。

电子稳像技术是现代稳像技术的重要发展方向之一,通过分析图像或其他手段对视频图像进行运动估计,然后画面反向平移补偿图像抖动,最终完成对图像的稳定。相比平台稳像来说,电子稳像只需要更小的体积、更低的成本、更简单的结构,因此拥有广阔的应用前景,缺点是适应性差和运动估计难度大。

2 电子稳像技术概述

摄像机拍摄的视频序列抖动主要由帧内模糊和帧间模糊两种情况导致。对于机载光电系统,其画面抖动主要由飞机的振动和飞行运动引起。一般来说,机载光电传感器观察目标较远,且曝光时间在毫秒级别,与飞机主要振动周期相比,传感器曝光时间足够短,限制了每一帧图像的运动偏移量在一个像素内,因此帧内模糊可被忽略。机载光电系统画面抖动的主要原因为帧间模糊。近些年来,国内外关于帧间序列稳定的研究很多。其基本原理是通过对图像帧序列的分析和识别,提取出图像中所要观察目标的运动信息,或采取其他手段获得目标的运动信息,然后进行反向补偿,达到消除抖动,稳定输出图像的目的^[1-3]。电子稳像技术广泛应用于在机载、车载及船载等光电系统中^[4-5]。

电子稳像技术包括 3 个阶段:运动估计、运动滤波以及运动补偿,运动估计的准确性是电子稳像技术的首要环节。目前运动估计的方法主要有两种:一是通过分析图像帧与帧之间的差异,利用图像特征点的提取和匹配,求解运动参数^[6-8];二是利用速率传感器获得稳定平台的运动量^[9]。

对于机载光电系统,随着光学传感器的分辨率、图像输出帧频越来越高,通过提取图像特征点来估计平台运动的方法较难保证实时性的要求,同时对成像质量要求较高。机载光电系统由于成像环境的复杂性,精确提取平台运动成为了技术难点,往往影响图像运算的速度和精度;另外,由于载机在飞行过程中自身的振动,如果观察运动目标,通过图像处理方法提取出的目标运动信息

是载机平台运动和目标运动的叠加,反向运动补偿后会得到错误的稳像结果,故方法一不适用于机载光电系统。

随着电子技术和机械加工技术的发展,用于机载光电稳定平台的惯性元件——速率陀螺,体积不断变小,精度和响应带宽得到了极大提升,可以高精度、实时敏感到惯性空间下的载机平台运动,无论观察运动目标和静止目标,均不会影响运动估计的结果。在机载光电系统稳定平台粗稳定的基础上,采用基于陀螺的电子稳像技术进行二级稳像,可以获得更好的稳定效果。

3 基于陀螺的电子稳像方法

3.1 稳定平台和电子稳像的组合稳像原理

机载光电系统组合稳定系统的模型包括整体陀螺稳定平台模型和电子稳像模型,其组合控制框图如图 1 所示。

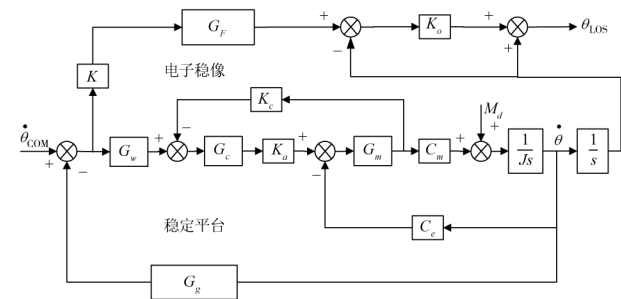


图 1 传统稳定平台稳像和电子稳像的组合控制原理框图

Fig. 1 Block diagram of the combined control principle of traditional stabilized platform image stabilization and electronic image stabilization

图中 G_w 为稳定平台的稳定回路控制器; G_c 为电流环控制器; K_a 为功率放大器增益; G_m 为机电参数; C_m 为力矩系数; J 为负载转动惯量; C_e 为反电势系数; G_g 为陀螺反馈; K_c 为电流反馈; K 为两级组合稳定控制器; G_F 为电子稳像环节闭环传递函数,其输入的运动角速度与陀螺信号有对应关系,输出信号为图像平移像素; K_0 为电子稳像的增益。

由图 1 组合稳定控制框图可知,系统输出的瞄准线角度对输入的角速度命令传递函数为:

$$\begin{aligned} \phi_{pl} &= \frac{\theta_{los}}{\theta_{com}} \\ &= \frac{G_w G_c K_a G_m C_m (1 - K_0) / Js^2 + K G_F K_0}{1 + G_w G_c K_a G_m C_m G_g / Js + G_c K_a G_m K_c + G_m C_m C_e / Js} \end{aligned} \quad (1)$$

系统输出的瞄准线角度对输入扰动传递函数为:

$$\phi_{d1} = \frac{\theta_{los}}{M_d} = \frac{(1 - K_o)/Js^2 + KG_g K_o/Js}{1 + G_w G_c K_a G_m C_m G_g/Js + G_c K_a G_m K_c + G_m C_m C_e/Js} \quad (2)$$

为了实现两级组合稳定回路对于扰动 M_d 的补偿,可令: $\phi_{d1} = 0$

可以求得两级组合稳定控制器:

$$K = (1 - K_o)/sG_g G_f K_o \quad (3)$$

为了对两级组合稳定系统和传统整体稳定系统的带宽和隔离度进行对比分析,求取传统陀螺稳定平台的闭环传递函数和扰动传递函数,因此,传统陀螺稳定平台瞄准线对速度命令传递函数为:

$$\phi_{p2} = \frac{G_w G_c K_a G_m C_m/Js^2}{1 + G_w G_c K_a G_m C_m G_g/Js + G_c K_a G_m K_c + G_m C_m C_e/Js} \quad (4)$$

传统稳定平台瞄准线对扰动传递函数为:

$$\phi_{a2} = \frac{1/Js^2}{1 + G_w G_c K_a G_m C_m G_g/Js + G_c K_a G_m K_c + G_m C_m C_e/Js} \quad (5)$$

对比 ϕ_{d1} 的计算公式(2)和 ϕ_{a2} 的计算公式(5)可知,传统陀螺稳定平台的扰动传递函数由前向通道和反馈通道构成,系统输出和输入是线性响应关系,仅能实现扰动的部分隔离,而两级组合稳定的扰动传递函数,由于两级组合稳定控制器 K 可调,因此合理选择 K 和补偿频带,理论上可以实现对扰动 M_d 的零输出。

在图 1 原理框图中求取输入扰动 M_d 到输出瞄准线 LOS 的闭环传递函数,给出了不采用电子稳像(原稳定平台,曲线 1)和采用电子稳像(曲线 2)的扰动隔离度对比(图 2),图 2 中曲线 2 隔离度明显大于曲线 1。

因此,以稳定平台为粗稳定,使用电子稳像技术进行二级稳像,可得到更好的图像稳定效果。

3.2 运动估计

准确且快速地提取出图像序列间的运动,是电子稳像技术中最为关键的一步。对于机载光电系统来说,安装于稳定平台上的光学传感器对远距离目标成像时,图像的运动主要由光学传感器的角速率变化引起。

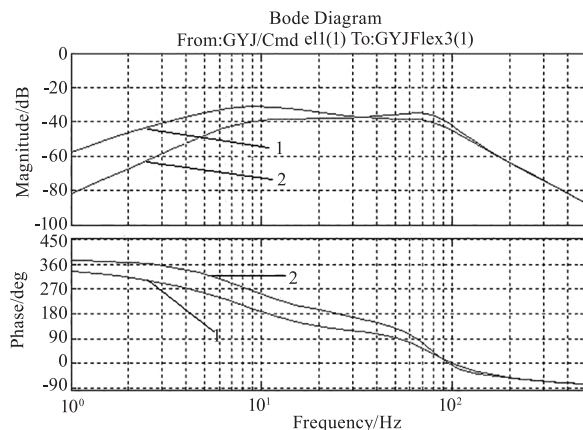


图 2 使用和未使用电子稳像技术的隔离度曲线对比图
Fig. 2 Comparison of isolation curves with and without electronic image stabilization

以典型机载光电系统的光学视场小视场 $1^\circ \times 0.75^\circ$ 为例计算,图像分辨率为 1024×768 个像素,每像素的瞬时视场角为:

$1/1024 \cdot 3.14/180 = 17 \mu\text{rad}$, 图像传输帧频 60 Hz。以机载光电系统常用的光纤陀螺为例,在一帧图像时间内(16.6 ms)可检测到的目标移动角度至少为:

$$0.01^\circ/s \times 0.0166 \text{ s} = 0.000166^\circ = 2.89 \mu\text{rad}$$

远小于一个像素对应的瞬时视场角 $17 \mu\text{rad}$,用于机载光电系统稳定平台伺服控制的角速率传感器陀螺,可以敏感到帧间图像一个像素的移动,因此陀螺的测量范围可以满足电子稳像的使用要求。

实际使用中,电子稳像需要的运动角位移量 θ 是陀螺输出的角速率量 ν 对时间的积分。即:

$$\theta = \int \nu dt \quad (6)$$

机载光电系统的运动通常有方位、俯仰两自由度,分别对应着光学传感器成像平面的水平方向和垂直方向。因此,方位轴系的运动,经方位轴陀螺敏感其运动量,并积分滤波处理后,变为水平方向上的角位移量 θ_{AZ} ;同理,俯仰轴系的运动可对应到垂直方向上的角位移量 θ_{EL} 。

3.3 运动补偿

获得帧间序列的位移量后,可将其转换为相应的像素值进行补偿。

假设光学成像的视场为 $F_x \times F_y$,成像图像分辨率为 $P_x \times P_y$ 。以成像平面的水平方向为例,单个像素对应的角位移为:

$$\theta_{per} = F_x/P_x \quad (7)$$

可计算出水平方向电子稳像运动补偿的像素

值为:

$$Pix_{AZ} = \theta_{AZ} / \theta_{per} \quad (8)$$

成像平面上的点 (x, y) , 经方位方向上的角位移量 θ_{AZ} 平移、经垂直方向上的角位移量 θ_{EL} 后, 变为 (x', y') :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta Pix_{AZ} \\ \Delta Pix_{EL} \end{bmatrix} \quad (9)$$

将像素值 Pix_{AZ} 发送给图像处理设备, 将成像画面水平方向整体反向平移 Pix_{AZ} 个像素后送至显示器, 即可得到电子稳像后的成像画面。同理可按如上方法补偿垂直方向上的运动。

3.4 相位匹配

电子稳像按视频序列的帧周期进行补偿。但受机载光电系统的光学传感器成像的积分时间、到图像处理设备的传输延迟、图像处理计算占用的时间等因素的影响, 飞行员获取的视频图像会产生一定延迟。即: 陀螺敏感到的为当前拍摄时刻的运动量, 与显示时刻之间有固定延时。为获得更好的稳像效果, 对每帧图像运动补偿时, 需要进行帧间相位匹配。

将上述几种延时环节简化, 其数学模型如下:

$$G_d = e - \tau s \quad (10)$$

连续存储若干周期的角位移补偿量, 按照实际机载光电系统的总延时, 选取某个周期的位移量进行补偿, 可实现视频图像的相位补偿和匹配。

4 机载平台电子稳像实验

4.1 实验装置

本文所述基于陀螺的电子稳像技术目前已在某型机载夜视系统中得到了应用。机载夜视系统硬件资源包括: 安装于稳定平台上的红外热像仪、综合管理计算机板、图像处理板、伺服控制系统(伺服电机、MEMS 陀螺、伺服控制板等), 实验装置图如图 3 所示。所选的 MEMS 陀螺其动态范围宽, 测量角速度范围在 $0.01^\circ/\text{s}$ 至 $400^\circ/\text{s}$ 之间。

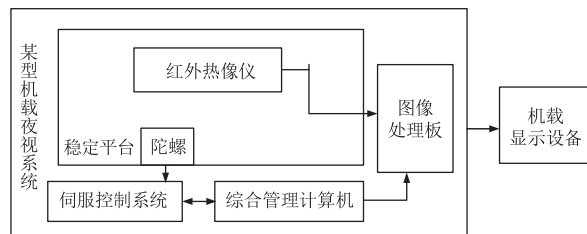


图 3 某型机载夜视系统电子稳像实验装置图

Fig. 3 Electronic image stabilization experimental device of an airborne night vision system

4.2 实验过程

本次电子稳像实验的过程如下:

a) 伺服控制系统采用负反馈控制回路, 采集陀螺等角速率信号、角位置信号等, 驱动伺服电机, 完成稳定平台的粗级稳定;

b) 伺服控制板以 1 ms 为周期, 采集和处理陀螺数据, 估计出稳定平台的角位移抖动量, 并对补偿的相位进行匹配, 送给综合管理计算机板;

c) 综合管理计算机板将需要运动补偿的像素量送给图像处理板, 通讯周期为 20 ms , 图像处理板平移成像画面后, 送至机载显示设备。

4.3 实验结果评价

设置热像十字靶, 将机载夜视系统未加扰动时的静态图像作为基准参考帧, 分辨率为 1024×768 , 如图 4 所示。使用图像处理的方法提取出十字靶的基准像素位置为 $(611, 583)$ 。

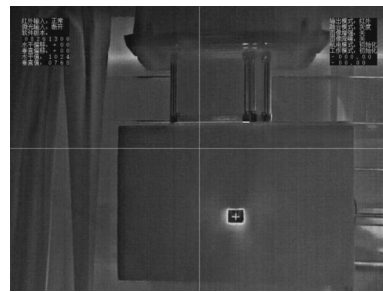


图 4 机载夜视系统热像十字靶参考帧

Fig. 4 Reference frame of airborne night vision system thermal image cross target

给机载夜视系统加入周期 1 Hz 垂直方向的扰动, 图 5 分别给出了一段未使用电子稳像、使用电子稳像和使用相位匹配后电子稳像的抖动视频各帧图像的十字靶垂直方向的像素数据。

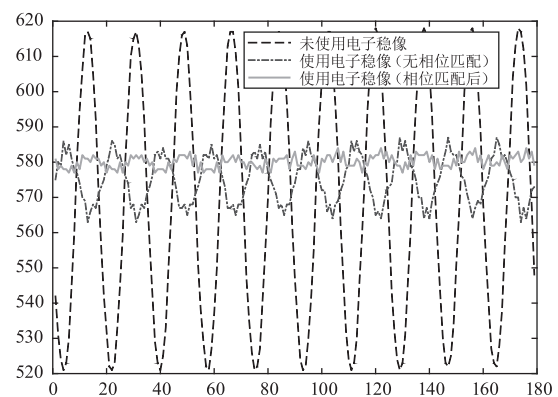


图 5 使用和未使用电子稳像技术的十字靶像素位置对比图

Fig. 5 Comparison of cross target pixel positions with and without electronic image stabilization

未使用电子稳像时,垂直方向的抖动量 rms 达到 34.69 像素;使用无相位匹配的电子稳像技术后,垂直方向的抖动量为 6.69 像素,而使用了相位匹配后的电子稳像技术对抖动进行补偿后,垂直方向的抖动量 rms 仅为 1.81 像素。

由试验可知,使用基于陀螺的电子稳像技术,对机载夜视系统稳定平台进行二级稳像,可以获得更稳定的图像效果。

5 结论

基于陀螺的机载光电系统电子稳像技术,通过陀螺敏感稳定平台的残余抖动,然后采用图像处理进行第二级补偿,可以显著提高稳像效果。相比传统的平台稳定技术,具有实现简单、无额外成本等优点,可广泛应用于机载光电系统中。

参考文献:

- [1] Wang Zhimin, Xu Xiaogang. A survey on electronic image stabilization[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 470 - 479. (in Chinese)
王志民, 徐晓刚. 电子稳像技术综述[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 470 - 479.
- [2] Yousaf A, Khurshid K, Khan M J, et al. Real time video stabilization methods in IR domain for UAVs-a review [C]//Fifth International Conference on Aerospace Science & Engineering (ICASE), 2017: 1 - 9.
- [3] PANT S, NOORALISHAHI P, A VDELIDIS N, et al. Evaluation and selection of video stabilization techniques for UAV-based active infrared thermography application [J]. Sensors, 2021, 21(5), 1604.
- [4] Li Baozhong, Chen Hongliang, Bian Shuancheng. Study on electronic image stabilization technology for EO system[J]. 2010, 26(4 - 1): 184 - 185. (in Chinese)
- [5] Zhang Yongxiang. Study on electronic image stabilization technology for the image sequences of the ship-borne camera system base on the gyro[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. 2006. (in Chinese)
张永祥. 基于陀螺仪的船载电子稳像技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2006.
- [6] Wang Shiman, Xu Wenhai, Dong Lili, et al. Electronic image stabilization of airborne infrared images based on improved Harris corner detection[J]. Infrared Technology, 2020, 42(6): 573 - 579. (in Chinese)
王施曼, 许文海, 董丽丽, 等. 基于改进的 Harris 角点的机载红外图像电子稳像[J]. 红外技术, 2020, 42(6): 573 - 579.
- [7] Wang Dongliang, Xu Xiaokang, Bai Hongyang, et al. Research on multi-channel video image stabilization method [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 79 - 87. (in Chinese)
王栋梁, 徐啸康, 白宏阳, 等. 一种基于 Star 算法的多路视频稳像方法研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 79 - 87.
- [8] Yin Lihua, Li Fanming, Liu Shijian. Electronic image stabilization method based on adaptive compensation[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(11): 1438 - 1445. (in Chinese)
尹丽华, 李范鸣, 刘士建. 基于自适应补偿的电子稳像方法[J]. 激光与红外, 2017, 47(11): 1438 - 1445.
- [9] Zhao Sai, Kang Baosheng, Wang Li. The video stabilization algorithm based on MEMS gyroscope[J]. Journal of Northwest University, 2018, 48(3): 355 - 361. (in Chinese)
赵赛, 康宝生, 王力. 基于 MEMS 陀螺仪的电子稳像算法[J]. 西北大学学报, 2018, 48(3): 355 - 361.