

文章编号 1004-924X(XXXX)XX-0001-10

航空可见光摄像机自动调焦系统设计

田浩南, 卜和阳*, 虞林瑶, 张宇鹏, 徐 芳

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 动态光学成像与测量全国重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要: 可见光摄像机是航空光电平台中最广泛使用的光学载荷,其工作环境复杂多变,自动调焦功能是保证其成像质量的关键因素之一。为实现可见光摄像机的自动调焦,构建了一套自动调焦系统,并对该系统所涉及的关键算法进行了研究。首先,从工程设计角度系统地介绍了自动调焦系统的工作原理和组成。然后,提出了一种改进的图像清晰度评价算法,以通过分析图像多尺度频带能量来衡量图像清晰度的变化。最后,使用搭载该调焦系统的光电平台进行实验和分析。实验结果表明,该自动调焦系统能够稳定实现自动调焦功能,且改进算法具有更好的单调性和动态范围,局部峰值点数量为0,自动调焦时间小于2 s,准确率大于98%,能够满足光电平台实时跟踪及事后处理对图像清晰度的要求。

关键词: 光电平台;可见光摄像机;自动调焦;图像清晰度;多尺度频带能量

中图分类号: TP391.4; TP751 **文献标识码:** A

Design of auto-focusing system for airborne visible-light cameras

TIAN Haonan, BU Heyang*, YU Linyao, ZHANG Yupeng, XU Fang

(National Key Laboratory of Dynamic Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: bhy0125@126.com

Abstract: Visible-light cameras are the most widely used optical payloads on airborne electro-optical platforms. Due to their complex and variable operating environments, the automatic focusing function is one of the key factors ensuring imaging quality. To achieve automatic focusing for visible-light cameras, an autofocus system was developed, and the key algorithms involved in the system were investigated. First, from an engineering design perspective, the working principle and overall structure of the autofocus system are systematically introduced. Subsequently, an improved image sharpness evaluation algorithm is proposed, which measures variations in image clarity by analyzing the multi-scale frequency-band energy. Finally, experiments and analyses were conducted using an electro-optical platform equipped with the proposed focusing system. Experimental results show that the autofocus system can stably achieve automatic focusing. The improved algorithm exhibits better monotonicity and a larger dynamic range, with no local peaks. The autofocus time is less than 2 s and the accuracy exceeds 98%, meeting the requirements for image clarity in both real-time tracking and post-processing on electro-optical platforms.

收稿日期:2026-05-11;修订日期:2026-06-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62405310)

Key words: electro-optical platform; visible-light camera; auto focus; image sharpness evaluation; multi-scale frequency-band energy

1 引言

随着无人机在俄乌战争中的屡次亮相,侦察情报在战争中的作用愈显重要。与卫星侦察相比,航空侦察凭借部署灵活、反应迅速、定位精准以及任务指向明确等优势,已发展为现代战争中获取战术情报的主要途径。航空光电平台作为无人机的有效载荷之一,能否高效地获取任务区域的高清晰度的实时影像与决定了侦察效果,这也对航空光电平台的成像系统提出了更高要求^[1]。

近年来,航空光电平台逐渐由小体积、单载荷向大口径、多谱段载荷发展,光学系统也由透射式系统向卡塞格林折反式系统发展,远海远域侦察也是当前高性能光电平台必须具备的能力^[2-5]。为了实现远距离的探测识别和较高的目标分辨率,可见光摄像机的焦距必须设计得足够长。然而,长焦距、大相对孔径的光学成像系统受环境变化的影响十分敏感,微小温度差异、大气压力变化都会引起光学成像载荷的离焦。另外,成像距离的变化也会使光学系统焦面发生变化。一旦光学载荷发生离焦,就会使侦察图像分辨率降低,光学系统传递函数下降,成像质量变差,严重时会导致无法从侦察图像中获取有用的信息,造成时间成本和经济成本的巨大损失。为保证航空光学载荷在外界工作环境发生变化时获得高清晰度、高分辨率的像质,要求成像载荷能够对光学系统参数的变化做出实时调整。因此,长焦距航空光学载荷必须具备自动对焦功能,在不同距离、不同场景下的自动对焦效果影响着航空侦察图像的成像效果,快速、精确的调焦技术是现代航空侦察领域十分重要的一项关键技术,能够为操作手发现并迅速跟踪、识别目标提供有利帮助。

目前,研究人员针对不同成像系统的自动调焦及相关算法开展了大量研究工作^[6-16]。魏桂华等^[6]针对推扫式高光谱相机提出了一种基于四元数小波变换的光谱质量评价函数,但该方法实时性不佳。管雯璐等^[7]针对卡式望远镜系统设计了一

一种基于环境温度反馈的自动调焦装置,通过均方误差和信噪比对图像质量进行评价。杨梦雪等^[8]针对1.2 m望远镜系统提出了一种改进定心精度的半通量直径图像清晰度评价方法。姚曹等^[9]针对跟星转台设计了自动调焦系统,将Brenner函数和方差函数相结合作为图像清晰度函数,但该方法仍然是以传统的梯度评价函数为基础。彭越洋等^[10]针对空间相机提出了基于多个星点图像的空间相位差重建PSF,根据重建后的PSF定量评估相机的离焦状态,通过探测器位置拟合调焦曲线,从而确定探测器合焦位置。Sun等^[11]提出一种多尺度纹理自然度方法,该方法将自然图像统计与多尺度建模结合,通过测量各尺度纹理分布与自然先验的KL散度评价图像清晰度,但该方法需要在大规模数据集上离线拟合。Zhao等^[12]提出多尺度动态调制与退化信息引导框架,在自然图像数据库上表现出了优异性能,但此类方法仍依赖大规模标注数据训练。Ji等^[13]提出基于语义引导的多尺度特征提取方法,首次将语义分割结果引入IQA多尺度特征调制中,但该方法在航空成像中的场景缺乏明确语义边界,且需要标签数据和语义分割标签的双重监督,参数量大且推理延迟高。

综上所述,传统算法仅响应单一空间尺度的图像信息,对航空场景中多尺度地物结构无法均衡评价,在评价曲线上常出现反转极值,导致爬山搜索陷入局部最优。在海面、沙漠及天空等弱纹理场景下,同样容易出现误判,严重影响任务窗口。传统算法缺乏对离焦物理过程的显式建模,仅基于像素邻域的统计、一阶或二阶差分,难以兼顾实时性、准确性与稳定性。基于深度学习的新兴方法依赖于大规模标签训练数据,且可解释性偏弱,部署难度大,在航空成像这类关键任务中,其黑箱式决策存在验证难题。

航空光电设备对调焦实时性、准确性及稳定性要求较高,故本文针对航空光电平台的应用场景和成像特点,提出了一种适用的图像质量评价方法,结合实际的工程项目,系统地介绍了某型航空光电平台可见光摄像机自动调焦系统的设

计过程,梳理了光学、机械、电子及软件等不同学科间的交叉设计逻辑。通过实验室、地面及空中飞行试验,对该自动调焦系统进行了充分地验证,验证结果表明该系统能够快速、高效、准确地实现自动调焦。

2 自动调焦系统的构成及其工作原理

2.1 自动调焦系统的硬件构成

图1为典型的自动调焦系统组成框图。它主要由光学镜头、探测器、图像处理与控制板组成。在该系统中,光学镜头完成光线的收集和聚焦;探测器完成光电信号转换;图像处理与控制板完成对探测器所捕获的原始数据进行处理,完成对光学镜头调焦组件中编码器数据、温度传感器数据及限位信号的采集,并控制调焦电机使调焦组镜片实现调焦。

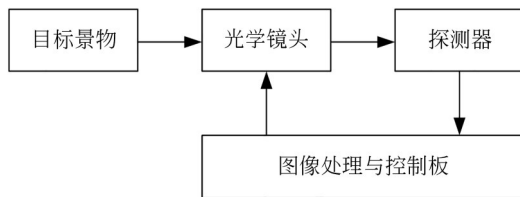


图1 自动调焦系统框图

Fig. 1 Block diagram of autofocus system

2.2 自动调焦系统的工作原理

自动调焦系统通过光学镜头和探测器获取被侦察目标的图像,然后对原始图像数据进行预处理及清晰度值计算,根据系统设计确定离焦量、调焦精度、搜索行程及搜索步长等参数,通过逐帧对比清晰度值确定实焦位置,最后控制调焦电机带动调焦组镜片到达该位置^[17-18]。

3 总体设计

自动调焦系统的设计是一项系统性工程,涉及到光学、机械、电子和软件等多个学科间的协同设计。

3.1 光学设计及分析

某型航空光电平台光学系统采用卡塞格林

折反式光学系统结构形式,如图2所示,其光学系统的主要技术参数如表1所示。

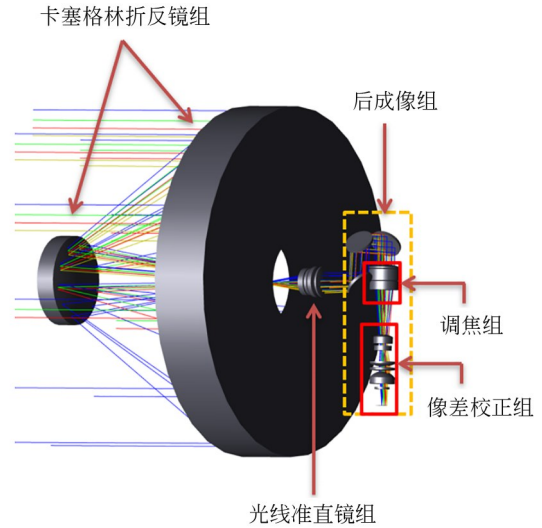


图2 光学系统结构

Fig. 2 Optical system architecture

表1 光学设计参数

Tab. 1 Optical design parameters

参数	值
光谱范围/ μm	0.55~0.75
焦距/mm	2 100
口径/mm	250
F#	8.4
调焦量/mm	± 3

3.1.1 最大离焦量

航空光学载荷离焦主要受到温度、大气压以及成像距离等变化的影响,利用光学设计软件分别对不同温度、不同气压以及不同成像距离条件下光学系统离焦量的变化情况进行计算。以温度变化 $-55\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$,飞行高度不大于18 000 m为边界条件进行计算,由于温度、气压及成像距离改变等因素造成像面最大离焦量为 $\pm 0.85\text{ mm}$ 。

3.1.2 调焦精度

根据航空光学载荷的半焦深计算公式^[1],该光学系统F数为8.4,工作谱段为0.55~0.75 μm ,中心波长 $\lambda=0.6\text{ }\mu\text{m}$,可得到光学系统的焦深为:

$$\delta = \pm 2\lambda F^2 = \pm 0.085(\text{mm}). \quad (1)$$

3.1.3 调焦方案

光学系统如图2所示。根据光学系统的结构特点,可将光学系统分为卡塞格林折反镜组、光线准直组及后成像组。其中,卡塞格林折反镜组需要和光线准直组进行组合优化,形成无焦光路。然后,根据无焦系统的缩束比、出瞳口径及位置计算后成像组的系数,并对后成像组进行单独优化。后成像又分为调焦组和像差校正组,将无焦系统的出瞳与后成像组的入瞳对接,再对系统进行整体优化,最终形成像方远心成像光路。通过光学仿真分析计算,调节调焦组使其沿光轴方向位移可以与光学系统的焦平面位移有较好的线性对应关系,同时调焦范围不会对调焦机构的刚性造成影响。该光学系统的最大离焦量为 ± 0.85 mm时,对应的最大调焦量为 ± 0.49 mm,考虑装调误差,最终将该系统的调焦范围定为 ± 3 mm,图中的调焦组置于无焦光路中,适合作为调焦对象实现整机调焦功能。

3.2 调焦组件设计

调焦组件设计采用成熟的凸轮结构,由调焦镜组、调焦凸轮、调焦电机、调焦编码器及限位板组成,电机驱动小齿轮带动大齿轮转动,大齿轮与凸轮为一体式结构,凸轮回转带动导钉沿其螺旋线平滑运动,从而带动光学元件线性转动,导向机构能够保证调焦具有良好直线性,位移通过电机带动的电位计测量,实现调焦过程的闭环控制,调焦点极限位置安装电限位元件,防止导钉冲击结构限位。调焦组件如图3所示。

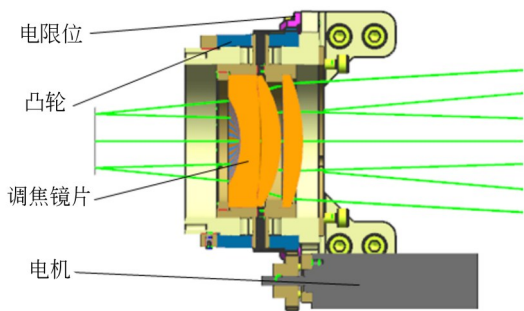


图3 调焦组件

Fig. 3 Focusing assembly

调焦组件设计完成后,由焦深、调焦量即可

确定自动对焦流程中的每帧视频对应的最大扫描速度 S_c 为:

$$S_c = \frac{\delta}{2m} \times L, \quad (2)$$

其中: δ 为焦深, m 为调焦量, L 为光学元件位移行程所对应的电位计值。

3.3 电子学硬件设计

图像处理与控制板是自动调焦系统的核心,该电路板由FPGA和ARM两个核心处理器组成。其中,FPGA负责实现传感器CMOS的配置、触发、LVDS解码、图像ISP、串口通信及DDR缓存控制等;ARM负责实现电机控制、传感器采集及串口通信等。图像处理与控制板总体框图如图4所示。

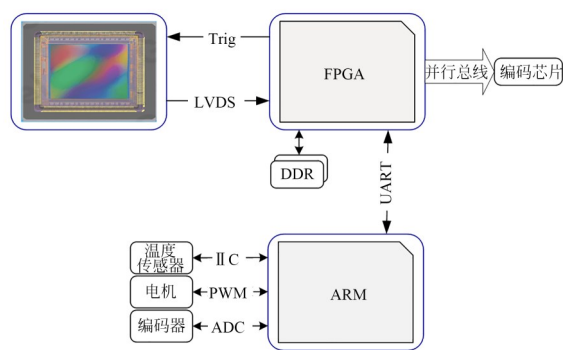


图4 电路框图

Fig. 4 Block diagram of circuit

4 关键算法设计

4.1 预处理

航空光学载荷的任务场景复杂,成像效果受到大气能见度、太阳高度角及目标成像距离等多方面因素的共同影响。为了提高长焦距光学系统对远距离目标的探测识别能力,当探测器的积分时间达到上限后,会通过继续提高探测器的增益来应对外部环境光照不足的场景,这种处理方式能够显著提升图像的亮度和对比度,但与此同时也会放大图像噪声,这种噪声是成像系统噪声的主要来源,会对后续从图像中提取有用信息带来负面影响。清晰度评价函数通常依赖于图像的边缘信息,而边缘的检测和提取对噪声较为敏感。因此,应在对图像进行清晰度评价之前进行滤波降噪预处理,减少噪声带来的干扰。

根据运算特性的差异,图像滤波方法通常被划分为线性滤波与非线性滤波两大类。其中,线性滤波器在处理高斯噪声时表现出良好的平滑性能,但面对其他类型噪声时抑制能力有限,同时往往伴随图像边缘的模糊化问题。非线性滤波器中的中值滤波是一种典型的非线性滤波算法,它采用统计排序的方法把目标像素邻域中的像素灰度值按照大小排列顺序,然后选择中间值作为输出像素灰度值,该算法可以消除孤立的噪声点,能够在去除随机噪声的同时有效保护边缘轮廓信息,这一特性非常符合清晰度函数对边缘信息的高度需求,因此本文采用中值滤波器对图像进行滤波降噪。

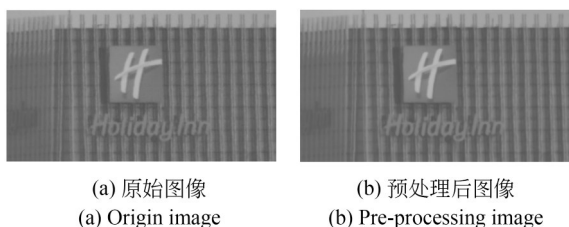


图5 预处理前后对比

Fig. 5 Comparison before and after pre-processing

4.2 图像清晰度评价函数

图像法是航空光学载荷常用的自动调焦方法,依赖于图像清晰度评价函数,通过评价函数来判定调焦镜组是否处于合焦位置。图像清晰度评价函数应具有如下几个特点:单峰性;高灵敏度;强鲁棒性;计算高效性。

典型的清晰度评价函数主要分为空域类函数、频域类函数、信息熵类函数、统计学类函数及模型学习类函数^[19]。其中空域类函数是以梯度计算为基础的,具有计算复杂度低、适合嵌入式实时系统的优点,但依赖于图像的对比度;频域类函数抗噪性能较好,但计算复杂度高,实时性较差;信息熵类函数利用信息熵衡量图像信息量,对图像内容能够自适应,但对噪声敏感且计算较慢;统计类函数分析像素间的统计特性,对图像灰度变化敏感,但灵敏度不高。基于模型学习的函数依赖于大量的训练数据,精度和复杂度都很高。

在实际的工程应用中,空域类函数得到了广泛的应用,典型的代表有 Tenengrad、Brenner 和

Laplacian 等,但在远距离复杂场景下,大气吸收、散射及湍流等物理过程都会引发图像降质^[20],对比度信息锐减,从而导致自动调焦的准确度骤降。为了解决该问题,本文提出了一种基于多尺度频带能量分析的图像清晰度评价方法。

4.2.1 设计思路

对于一个理想的光学系统,离焦可以被建模为图像与点扩散函数的卷积,故离焦可以等价于对图像做低通滤波,会显著衰减中高频带能量,而清晰图像则在中高频带保留较强的能量分布。因此,图像清晰度可以通过不同频带上的能量分布来表征。然而,若采用傅里叶频域分析存在以下两个明显问题:缺乏空间局部性:傅里叶变换是全局变换,难以反映图像局部纹理结构;难以工程实现:在嵌入式系统中实现 FFT 代价较高,对实时性不友好。

为了解决以上问题,本文提出基于多尺度频带能量分析的图像清晰度评价算法,其核心思想是通过拉普拉斯金字塔将图像表示为不同尺度上的带通细节信息,其中低频成分主要对应背景和缓慢变化区域,中高频成分表征图像的有效细节信息。如果图像出现离焦,高频信息会首先被削弱,进一步会导致中频结构能量下降。虽然最细尺度的高频层对清晰度变化很敏感,但易受噪声影响,通过统计中频层的能量占比,将图像清晰度的变化等效地表示为图像细节能量在不同频带间分布关系的变化。相比于直接在原始图像上计算梯度或二阶导数,该分解方式能够有效分离低频背景信息与不同尺度的细节信息,更有针对性地构造出一个无参考的清晰度评价方法。

4.2.2 与主流多尺度方法的对比

为充分说明本文方法的独特性,将本文方法与三类主流多尺度方法(小波变换、SIFT 和 LP-based S3)进行对比,从原理上阐明本文所提方法在理论上的独特性。

4.2.2.1 小波变换方法

小波变换是通过低通和高通分解,将图像分为:LL(低频)、LH/HL(水平/垂直高频)和HH(对角高频),各自带能量常用作图像清晰度评价。小波变换方法方向选择性强,但对离焦这种各向同性退化而言,其方向特性反而带来不必要的复杂度,且其常以最高频子带作为清晰度判

据,对噪声敏感。

4.2.2.2 SIFT方法

SIFT是通过高斯尺度空间和DoG极值点检测来构造尺度不变的特征点,通常用于特征匹配,也被少数文献用于清晰度评价。SIFT主要面向特征检测与匹配,将其用于清晰度评价时,需要构造关键点统计量作为间接指标,过程冗长,且对参数敏感。

4.2.2.3 LP-based S3方法

LP-based S3方法是无参考清晰度评价中的代表方法,通过结合局部频谱斜率与局部对比度得到融合的清晰度图。该方法在自然图像评价中表现出色,但其依赖局部FFT与谱斜率拟合,对实时航空成像系统而言计算代价较大。

综上所述,本文方法以拉普拉斯金字塔等价带通滤波器为基础,通过频带能量直接衡量离焦影响,理论上等价但实现复杂度大幅降低,更适合嵌入式部署。本文方法与以上三种方法的综合对比表如下表所示。

表2 多尺度方法对比

Tab.2 Comparison of multi-scale methods

方法	频带选择	计算复杂度	硬件实现	契合度
小波变换	方向频带	高	中	中
SIFT	关键点尺度	高	弱	弱
LP-based S3	局部谱拟合	中高	弱	较强
本文方法	频带能量比	低	强	强

4.2.3 具体实现

设输入图像为 I ,首先构造其高斯金字塔 $\{G_k\}_{k=0}^K$,其中 $G_0=I$,第 $k+1$ 层由第 k 层经高斯平滑和下采样得到,相邻两层高斯图像之间的残差构成拉普拉斯金字塔 $\{L_k\}_{k=0}^{K-1}$,即:

$$L_k = G_k - \text{pryUp}(G_{k+1}), k=0, 1, \dots, K-1, (3)$$

其中: $\text{pryUp}(\cdot)$ 代表上采样操作, L_k 表示图像在第 k 个尺度上的带通细节信息。

为了量化各尺度层的细节强度,定义第 k 层拉普拉斯分量的能量为:

$$E_k = \sum_{x,y} L_k^2(x,y), (4)$$

其中: $L_k(x,y)$ 表示第 k 层在位置 (x,y) 处的系数值。

定义中频细节总能量和总细节能量为:

$$\begin{cases} E_{\text{mid}} = \sum_{k \in \Omega_m} E_k \\ E_{\text{all}} = \sum_{k=0}^{K-1} E_k \end{cases}, (5)$$

其中: Ω_m 为中频层集合,本文中取 $k=4$,中频层取 $k=1$ 和 $k=2$ 。金字塔各层对应不同归一化频带, $k=4$ 完整覆盖了清晰度敏感的中高频和中低频区间;PSF频域衰减特性也决定了衰减最快的归一化频率区间对应于 $k=1$ 和 $k=2$ 两层;在常用的航空图像分辨率下, $k=4$ 是顶层图像尺寸 $\geq 32 \times 32$ 的最小安全层数,避免顶层能量统计稳定性下降。在不同程度的离焦下,各层级的判别能力如下表所示。

表3 判别能力对比

Tab.3 Comparison of discriminative abilities

金字塔层	中心频率	频带含义	轻度 $r=2$	中度 $r=4$	重度 $r=8$	判别能力
0	0.250	高频	0.033	0.005	0.001	弱
1	0.125	中高频	0.521	0.033	0.005	强
2	0.0625	中频	0.855	0.521	0.033	强
3	0.0313	中低频	0.962	0.855	0.521	弱

最后,得到图像清晰度函数为:

$$Q = \alpha \times \frac{E_{\text{mid}}}{E_{\text{all}}}, (6)$$

其中: α 为比例因子,依赖于应用场景,本文取 $\alpha=10^4$ 。

4.3 调焦策略设计

自动调焦的工作流程主要包括三个步骤:复位、扫描和对焦。其中,扫描流程是最为耗时的,若扫描行程过大会使整个对焦过程耗时变长,但加快扫描速度会使对焦准确率降低。在保证对焦准确率的前提下,要尽可能地缩短对焦时间,本文采用基于温度反馈的搜索策略。根据长期的工程实践经验,温度^[21]是导致长焦可见成像系统离焦最重要的因素,可通过采集光学载荷上的温度传感器数据,同时利用系统参数,如激光测距值、平台姿态信息估算目标距离,结合光学设计的仿真结果,可确定对焦复位点及扫描行程,

避免对整个调焦行程进行搜索,从而大幅缩短对焦时间。具体的工作流程如下:

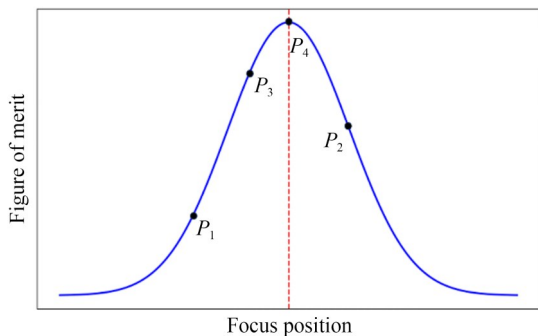


图6 调焦流程示意图

Fig. 6 Diagram of the focusing process

步骤1:获得温度数据,确定当前温度下的扫描初始点位置,对应图中 P_1 点,以最大速度 $S_{\max}$ 到达该位置,记此时计算的清晰度值为 F_1 ;

步骤2:由初始位置 P_1 以速度 S 开始扫描, S 通常不大于半焦深,记录扫描行程内每帧图像的清晰度值 F 及对应的编码器值 P ;

步骤3:如果满足连续 $N(N \geq 3)$ 帧图像的清晰度值持续下降,即可退出扫描流程,对应图中 P_2 点,可得出最大清晰度值 $F_{\max}$ 所对应的编码器值 $P_{\max}$;

步骤4:先到达图中 P_3 ,消除换向空回;

步骤5:到达对焦位置 $P_{\max}$,对应图中 P_4 点,自动调焦结束。

5 实验与结果

为了充分验证所设计的自动调焦系统的性能,本文的实验均在真实场景下展开,进行了实验室成像测试、地面成像测试及飞行试验测试。

5.1 实验室及地面成像测试

在实验室,使用平行光管和鉴别率板,在六足摇摆台上测试自动调焦功能,测试结果如图7所示。

在地面对距离5 km处场景进行自动调焦测试,测试结果如图8所示。

为了进一步验证算法的有效性,选取距离16 km的目标场景进行测试,如图9所示,并将本文算法与传统的Tenengrad函数、Brenner函数、

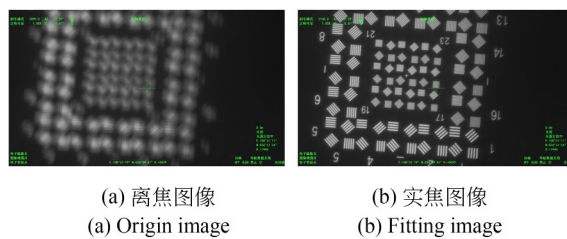


图7 实验室测试结果

Fig. 7 Result of laboratory test

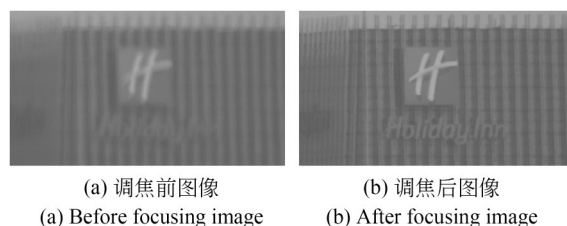


图8 地面成像测试结果

Fig. 8 Ground imaging test results



图9 16 km成像测试

Fig. 9 16 km imaging test

基于拉普拉斯能量的函数、方差函数、梯度能量函数、高频能量(FFT-HF)、高频系数(DCT-HF)及图像灰度熵法进行对比,图像都进行预处理,计算区域均选择图像中心50%,九种评价函数计算值经归一化后的结果如图10所示。通过图10可以看出,传统函数均存在不同程度的局部峰值,梯度方向出现了反复,对自动调焦会造成干扰。

为全面评估九种清晰度评价方法的性能,本文从单调性、判别能力和稳定性三个方面构建评价指标体系。单调性评价采用Spearman秩相关系数衡量评价价值与真实模糊退化顺序之间的一致性,秩相关系数越大代表单调性越好;判别能力评价采用动态范围衡量不同清晰度之间的可分性,动态范围越大代表判别能力越强;稳定性

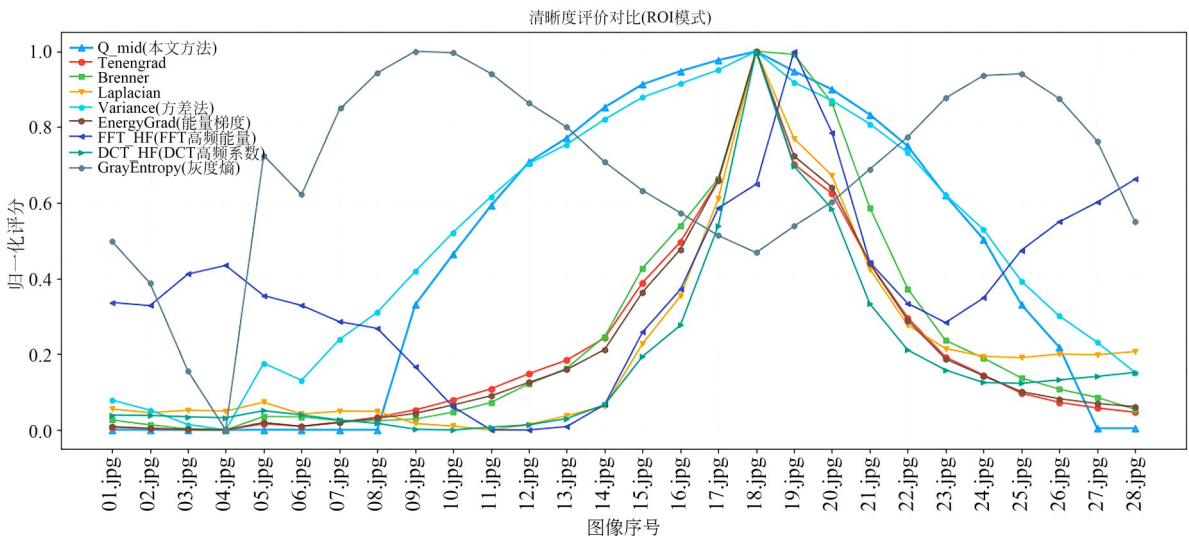


图 10 不同函数的评价结果
Fig. 10 Evaluation results of different functions

评价采用局部峰值数量衡量评价函数的波动程度,局部峰值数量越小代表稳定性越高。九种评价函数的评价指标对比结果如表 4 所示。

表 4 评价指标
Tab. 4 Evaluation index

参数	单调性	动态范围	局部峰值数
本文方法	1	1.59	0
Tenengrad	0.977 0	1.47	1
Brenner	0.951 8	1.35	2
Laplacian	0.590 0	1.22	2
Variance	0.974 3	1.19	2
EnergyGrad	0.970 4	1.15	1
FFT-HF	0.117 7	1.06	1
DCT-HF	0.627 8	1.43	1
GrayEntropy	-0.011 5	1.07	3

为了测试算法的稳定性,对设备所采集的图像序列引入受控的随机波动,测试各个算法在扰动下的波动程度,波动越小代表算法稳定性越强。在每次重复实验中,向图像引入不同随机种子的高斯噪声,取噪声强度为 5,对应典型工况下传感器噪声等级,重复次数 $N=10$,设图像序列中每幅图像、各种方法在 10 次重复下的均值为 μ 、标准差为 σ ,则变异系数 $CV=\sigma/\mu$,该指标能够有效反映算法的稳定性,测试结果表 5 所示。

表 5 稳定性分析
Tab. 5 Stability analysis

方法	平均 CV	稳定性排名
本文方法	0.000 31	1
Tenengrad	0.000 42	2
Brenner	0.001 26	3
Variance	0.001 42	4
EnergyGrad	0.001 44	5
GrayEntropy	0.001 48	6
FFT-HF	0.001 55	7
DCT-HF	0.001 67	8
Laplacian	0.001 71	9

5.2 飞行试验验证

在外场进行了 20 余次飞行试验,对自动调焦功能开展了验证工作,测试场景覆盖海面、陆地及空中目标,分别在不同工况下进行了约 300 次测试,统计结果表明调焦准确率大于 98%。在能见度低、距离过远、目标过小等场景下,受目标能量大幅退化的限制,自动调焦失败率提高。

6 结 论

本文根据航空光电设备自动调焦快速、高效、准确的要求,针对远距离复杂成像场景下图像质量退化、梯度细节弱化的情况,提出了一种基于多尺度频带能量分析的图像清晰度评价方

法,并从光、机、电、算等方面介绍了自动调焦系统的结构、工作原理及设计流程。结合实际工程项目,开展了实验室、地面及飞行成像测试,实验结果证明本文所提出的图像清晰度评价算法单调性强,动态范围大于1.5,局部峰值点为0。应用该算法的自动调焦系统能够实现稳定的自动调焦功能,调焦时间小于2 s,准确率大于98%,能够满足光电平台实时跟踪及事后处理对图像清晰度的要求。

但是本文的研究仍然有提升改进的空间,在面对极度复杂的工况,如能见度差、弱小目标时,低对比度、弱纹理仍会导致调焦失败,仅依

赖于图像特征会限制其适用边界。在今后的研究中,应面向航空遥感复合退化场景,构造退化机理模型,结合光学系统的特性开展综合性研究,进一步提升航空光电设备自动调焦的可靠性。

作者贡献声明:

田浩南:论文构思和撰写;

卜和阳:数据整理和分析;

虞林瑶:提供资源,指导;

张宇鹏:提供资源,指导;

徐 芳:资助获取。

参考文献:

- [1] 贾平. 无人机系统光电载荷技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
JIA P. *Photoelectric Payload Technology for Unmanned Aerial System*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019. (in Chinese)
- [2] 侯旺, 李涛, 李翀伦, 等. 航空光电转塔技术发展综述[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(9): 20240203.
HOU W, LI T, LI CH L, *et al.* Overview of the development of aviation electro-optical turret and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(9): 20240203. (in Chinese)
- [3] 李剑, 赵祥杰, 张大勇. 国外转塔式光电瞄准吊舱技术发展分析[J]. 光学精密工程, 2024, 32(16): 2474-2491.
LI J, ZHAO X J, ZHANG D Y. Development analysis of overseas EO targeting turret technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(16): 2474-2491. (in Chinese)
- [4] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. 航空兵器, 2017(6): 3-12.
JI SH P. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies[J]. *Aero Weaponry*, 2017(6): 3-12. (in Chinese)
- [5] 沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. 中国光学, 2012(1): 20-29.
SHEN H H, HUANG M, LI J Q, *et al.* Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012(1): 20-29. (in Chinese)
- [6] 魏桂华, 肖亮, 郑志忠. 推扫式高光谱相机自动调焦[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 450-457.
WEI G H, XIAO L, ZHENG ZH ZH. Auto-focusing method of push-broom hyperspectral camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(2): 450-457. (in Chinese)
- [7] 管雯璐, 谭逢富, 靖旭, 等. 基于环境温度反馈的卡塞格林望远镜自动调焦[J]. 光学精密工程, 2021, 29(8): 1832-1838.
GUAN W L, TAN F F, JING X, *et al.* Automatic focusing of Cassegrain telescope based on environmental temperature feedback[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1832-1838. (in Chinese)
- [8] 杨梦雪, 李祝莲, 李荣旺, 等. 基于1.2m望远镜系统实时自动调焦的清晰度评价算法[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 250-260.
YANG M X, LI ZH L, LI R W, *et al.* Sharpness evaluation algorithm based on real-time automatic focusing of 1.2 m telescope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 250-260. (in Chinese)
- [9] 姚曹, 朱文越, 徐文清, 等. 结合跟星系统成像特征的自动调焦系统设计[J]. 光学精密工程, 2023, 31(14): 2009-2018.
YAO C, ZHU W Y, XU W Q, *et al.* Design of auto-focusing system combining imaging characteristics of follow star system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(14): 2009-2018. (in Chinese)
- [10] 彭越洋, 傅紫源, 贺玉坤, 等. 高鲁棒性空间相机自动调焦算法设计与试验[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(11): 82-91.
PENG Y Y, FU Z Y, HE Y K, *et al.* Design and experiment of automatic focusing algorithm for high ro-

- bustness space camera[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(11): 82-91. (in Chinese)
- [11] SUN Z T, HUA G, XU Y G. No-reference image sharpness assessment *via* multi-scale texture naturalness[C]. *2023 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*. August 18-19, 2023, Dalian, China. IEEE, 2024: 908-914.
- [12] ZHAO Y C, ZHANG Y H, XIA T F, *et al.* No-reference image quality assessment based on multi-scale dynamic modulation and degradation information[J]. *Displays*, 2026, 91: 103207.
- [13] JI P, WANG W J, LV Z Y, *et al.* No-reference image quality assessment *via* semantic-guided multi-scale feature extraction[J]. *IET Image Processing*, 2025, 19(1): e70221.
- [14] ZACHAR P, WILK Ł, PILARSKA-MAZUREK M, *et al.* Assessment of UAV image quality in terms of optical resolution[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025, XLVIII-1/W4-2025: 139-145.
- [15] FAN C L, CAO M P, HUNG C C, *et al.* Optical model-driven sharpness mapping for autofocus in small depth-of-field and severe defocus scenarios[C]. *2025 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. October 19-25, 2025, Honolulu, HI, USA. IEEE, 2026: 6426-6435.
- [16] ZHANG J P, KANG T B, ZHAO X, *et al.* Efficient two-stage autofocus for micro-assembly based on joint spatial-frequency image quality assessment[J]. *Journal of Imaging*, 2026, 12(3): 137.
- [17] 黄垒, 辛立平, 韩旭辉, 等. 广角天文望远镜的自动调焦[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 174-183.
- HUANG L, XIN L P, HAN X H, *et al.* Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 174-183. (in Chinese)
- [18] 罗其俊, 葛宝臻. 基于圆边响应离焦估计的望远物镜自动调焦方法[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 760-769.
- LUO Q J, GE B ZH. An automatic focusing method of a telescope objective lens based on the defocusing estimation of a circular edge response[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2020, 13(4): 760-769. (in Chinese)
- [19] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3401-3408.
- HONG Y ZH, REN G Q, SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3401-3408. (in Chinese)
- [20] 赵志康. 基于降质机理的遥感图像超分辨率重构技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2025.
- ZHAO ZH K. *Research on Super-Resolution Reconstruction Technology of Remote Sensing Image Based on Degradation Mechanism* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese)
- [21] 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[J]. *光学精密工程*, 2020(6): 1226-1235.
- LIU W Y, XU Y L, SHI L, *et al.* Influence of aviation low temperature on auto-collimating focusing system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020(6): 1226-1235. (in Chinese)

作者简介:

田浩南(1987—),男,吉林长春人,硕士,副研究员,2010年、2013年于天津大学获得学士和硕士学位,主要从事航空光电成像与测量方面的研究。E-mail: tianhaonan@ci-

omp. ac. cn