doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202503007

天空红外图像的高斯加权非均匀校正算法

徐倩茹[1],张天序[2],蓬舒迪[1],丁昊文[1]
(1. 武汉工程大学 电气信息学院,湖北 武汉　430205;
2. 华中科技大学 人工智能与自动化学院,湖北 武汉　430074)

摘要:针对天空背景下红外图像的非均匀性噪声对目标检测的干扰问题,提出了一种高斯加权的红外图像非均匀校正算法。通过分析天空背景下非均匀噪声产生的机理,构建红外图像非均匀性的数学模型;采用双边滤波和中值滤波分别提取高、低频偏置,利用高斯加权函数模型,结合前后帧差分信息的调整,实现对高、低频偏置的分离与抑制。实验结果表明,该算法不仅可有效提升图像的均匀性,还可以显著提升图像的质量。

关键词:红外图像;天空背景;高斯加权;非均匀校正
中图分类号:TP391.41　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)03-0042-07

红外成像技术在军事侦察、大气遥感等领域具有重要应用价值,然而由于大气传输、制作工艺的限制和制作材料的不均匀性,天空背景下红外探测器都存在非均匀性,严重制约了红外图像的成像质量[1]。

传统的两点校正法依赖黑体辐射标定,其核心假设是探测器的增益-偏置参数恒定不变。然而在真实的天空背景下,大气透射率的实时波动如云层快速移动、气溶胶浓度变化等将导致场景辐射强度持续变化,使标定参数迅速失效[2]。深度学习方法虽能通过数据驱动建模复杂噪声,但其局限性同样突出,如计算负载过高等,难以满足机载红外系统的实时性要求[3]。

本文结合红外图像非均匀性的数学模型,提出高斯加权校正算法,通过引入高斯函数构建像素空间权重,利用局部邻域相关性优化增益和偏置参数估计,再通过时间序列差分区分噪声,从而提高了对高低频噪音的有效抑制能力,为提升红外成像质量提供了理论与技术支撑。

1　红外图像成像机理

红外成像是一种基于被动检测原理的成像方式,主要依赖于物体自身发出的热辐射及其反射的环境辐射能量。由于所有温度高于绝对零度的物体都会不断地向周围空间散发红外辐射,红外成像设备正是通过高度敏感的探测器捕捉这些红外辐射,并将物体的热量分布和环境反射信息转换为可视化的图像[4]。红外成像过程如图1所示。

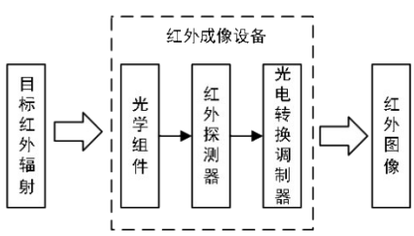


图1　红外成像过程

Fig. 1　Infrared imaging process

红外光谱的波长范围为0.75~1 000 μm,这一波段的电磁辐射超出了肉眼可见光谱的范围,但红外探测设备能感应到红外波长范围内辐射的能量,并将能量转换为电信号,从而产生图像。

2　高斯加权红外图像非均匀校正算法

2.1　红外图像非均匀性数学模型

红外图像非均匀性可表示为像素实际响应与理想响应的偏差。设I_{ij}为原始图像中坐标(i,j)

收稿日期:2025-06-15

作者简介:徐倩茹(2001—),女,陕西渭南人,硕士生,主要研究方向为图像处理与光谱分析。

处的像素值，I_{ij}^{true}为其真实辐射强度，R_{ij}和O_{ij}分别为该像素的增益和偏置系数，n_{ij}为随机噪声，则非均匀性模型为：

$$I_{ij} = R_{ij} \cdot I_{ij}^{\text{true}} + O_{ij} + n_{ij} \tag{1}$$

式(1)中表示像素增益系数的R_{ij}和偏置系数的O_{ij}，对应图像的低频成分，由探测器增益和偏置的系统性偏差及大气传输的区域性衰减（如气溶胶浓度不均）引起，呈现出区域性、大面积的亮度或灰度变化；表示随机噪声的n_{ij}，对应图像的高频成分，主要由探测器热噪声、电子电路干扰及大气湍流引起，表现为图像中密集的随机噪点，会导致像素值的快速波动。

非均匀性校正就是通过获取校正参数，利用校正系数不断地调整R_{ij}和O_{ij}，从而去除图像中的噪声。其校正流程如图2所示。

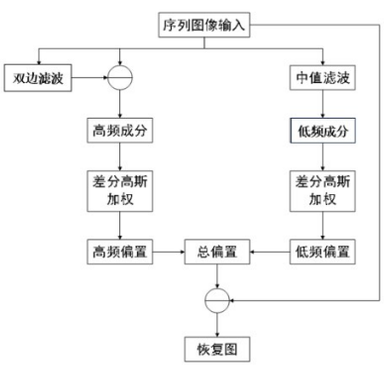


图2　非均匀性校正流程

Fig. 2　Non-uniformity correction process

2.2　红外图像的滤波

在红外图像的非均匀校正中，经常需要进行滤波操作。在天空红外图像的高斯加权非均匀校正中，主要进行中值滤波和双边滤波。

中值滤波是一种非线性滤波方式，对高频噪声有显著的抑制作用。对于待滤波图像中的每个像素，中值滤波将像素及周围领域内的像素按照灰度值大小进行排序，然后选择排序后灰度值的中间值作为该像素的值，如图3所示。

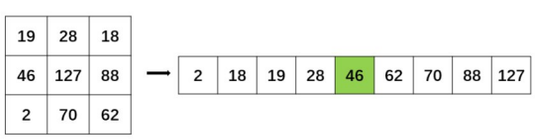


图3　中值滤波原理图

Fig. 3　Schematic diagram of median filtering

对于图像$f(x,y)$，滤波后像素值$g(x,y)$满足

$$g(x,y) = \text{med}\{x - i, y - il(i,j) \in W\} \tag{2}$$

式中：W是滤波窗口；med{ }表示对窗口内像素灰度取中值操作。

双边滤波也是一种非线性的滤波方法，它能有效地保留图像的边缘和细节，避免高斯滤波造成的边缘模糊[5]。其数学表达式为：

$$g(x,y) = \frac{\sum_{(i,j)\in W} f(i,j) \cdot w_{\text{spatial}}(i,j) \cdot w_{\text{range}}(i,j)}{\sum_{(i,j)\in W} w_{\text{spatial}}(i,j) \cdot w_{\text{range}}(i,j)} \tag{3}$$

式中：$f(i,j)$是窗口W中(i,j)处的原始像素值；$w_{\text{spatial}}(i,j)$是空间距离权重；$w_{\text{range}}(i,j)$是像素值差异权重。

式(3)中的$w_{\text{spatial}}(i,j)$、$w_{\text{range}}(i,j)$通常都由高斯函数定义，如下所示。

$$w_{\text{spatial}}(i,j) = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \tag{4}$$

$$w_{\text{range}}(i,j) = \exp\left(-\frac{\left|f(x,y) - f(i,j)\right|^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{5}$$

式中：σ_s和σ_r分别是控制空间衰减和灰度相似性的高斯参数。

2.3　高斯加权模型构建

传统的红外图像非均匀性校正方法通常对图像中的所有像素均采用相同的处理方式，而忽略了像素间的空间相关性。在实际的红外图像中，相邻像素往往具有相似的响应特性，因为它们受到的辐射源和传输路径相近。高斯加权模型的引入，正是为了充分利用像素间的这种空间相关性，进而提高校正的准确性和鲁棒性[6]。

双边滤波结果和原始序列的差分可以有效提取图像中的高频成分，这些高频成分包含着高频偏置信息和图像中的实时信息，这些信息在运动条件下，其细节信息会实时变化，而真实偏置则会相对稳定，因此，通过前后两帧的高频差来构建高斯加权值，即可有效去除真实细节带来的影响。高斯加权的表达式如下：

$$w = e^{-\frac{(I_i - I_{i-1})^2}{\sigma^2}} \tag{6}$$

式中：w表示相邻像素值差异的权重系数；σ表示可调参数，一般设置为2~5；I_i和I_{i-1}分别表示当前帧信息和上一帧信息，该信息可以是高频分量，也可以是低频分量上的梯度信息。

该加权值同时对高频信息和低频信息都有

效,由此,对应像素的实际高频偏置或低频梯度信息可以描述为:

$$b_i = b_{i-1} \cdot \left(K - w_i\right) + I_i \cdot w_i \tag{7}$$

式中:b_i是第i步的偏置估计值,b_{i-1}是上一步的偏置估计值;K是预设的总加权值,可设定为20;w_i表示第i步相邻像素值差异的权重系数。

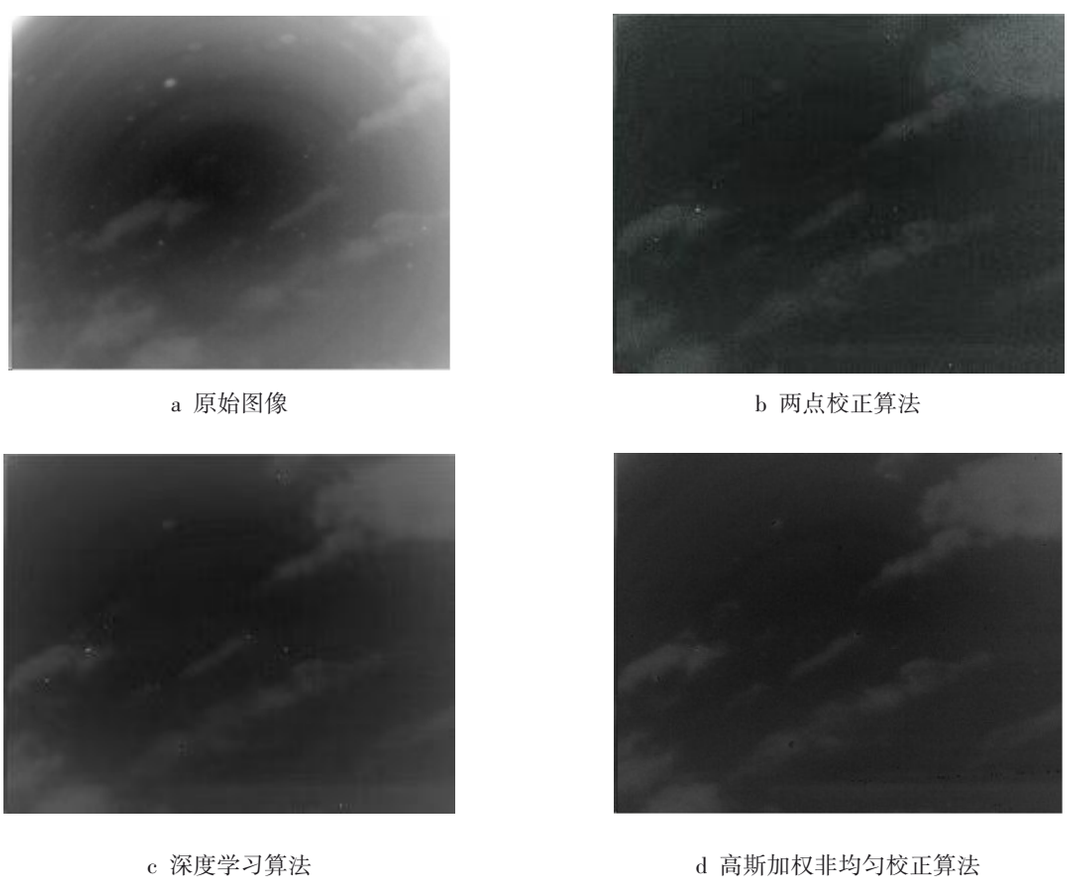
通过式(7)连续统计得到的梯度信息或高频偏置信息,会随着加权的累加,不断更新到正确数值。

3　实验结果与分析

为验证高斯加权非均匀校正算法的性能,基于天空背景下的红外图像,选取了传统的两点校正算法和深度学习算法与高斯加权非均匀校正算法进行对比,结果如图4所示。

由图4可知,图4a中的原始图像整体亮度不均,表现为左上角区域偏亮,右下角区域明显较暗,局部区域也有随机分布的"雪花状"高频噪声。这些显著的非均匀性噪声掩盖了目标,导致图像对比度和信噪比低,直接影响目标检测精度。从图4b可以看出,两点校正算法校正后图像虽有明显的改观,但还存在明显的条纹,淹没了很多图像的细节。从图4c可以看出,深度学习算法有一定的校正结果,但图中仍然有明显的高频噪声。图4d表明高斯加权非均匀校正算法对图像的校正效果较为显著,图5展示高斯加权非均匀校正过程中关键环节的图像对比。

图5a、图5b分别为高斯加权非均匀校正前提取的红外图像的低频偏置和高频偏置图像,图5c为运用高斯加权非均匀校正后去除低频偏置的图像,图5d为进一步去除高频偏置后的图像。由图5a可知,低频偏置图像中有明显的明暗斑块;由图5b可知,高频偏置图像中的噪声分布较为均匀;由图5c可知,运用高斯加权非均匀校正去除低频偏置后,图像整体亮度及均匀性均显著提升,大面积明暗斑块基本消除,天空背景呈现一致的灰度等级;由图5d可知,再进一步去除高频偏置后,图像中的随机噪点明显减少,云层纹理等细节得以保留,中部偏右的微弱云团轮廓清晰可见。

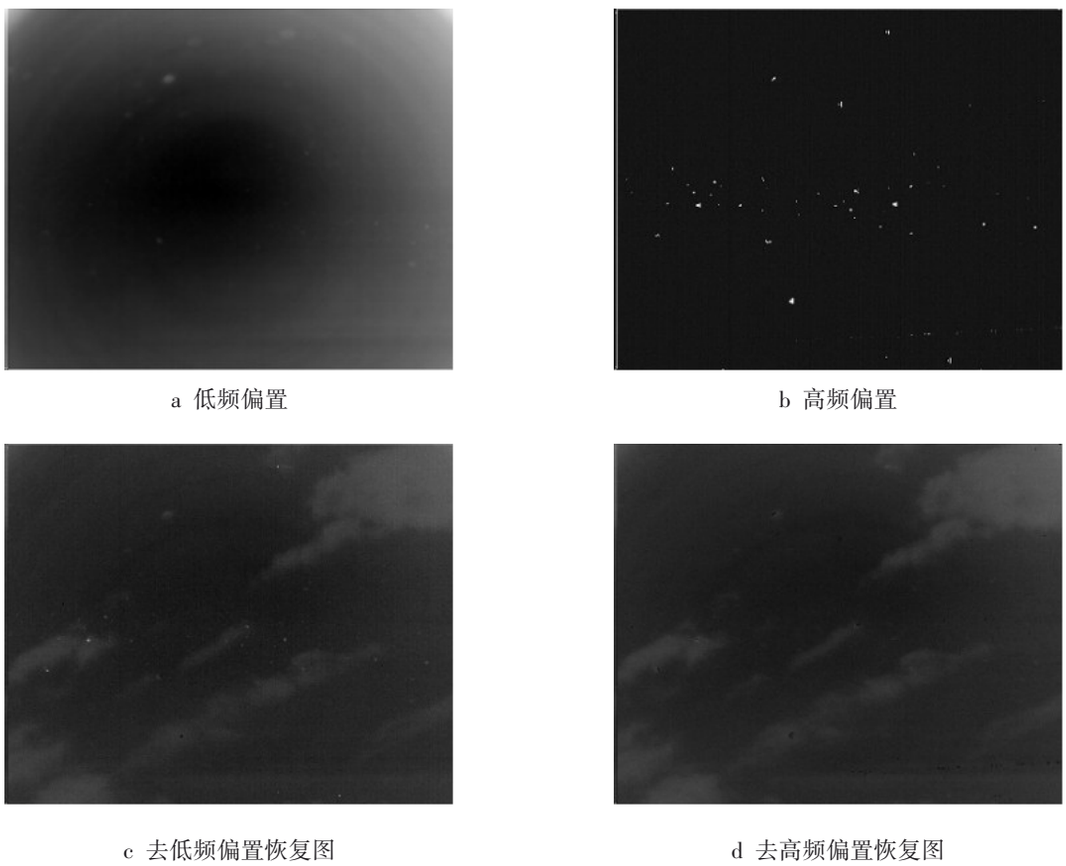


a 原始图像　　b 两点校正算法

c 深度学习算法　　d 高斯加权非均匀校正算法

图4　天空背景图像不同方法校正结果

Fig. 4　Correction results of different methods for sky background images



a 低频偏置　　b 高频偏置

c 去低频偏置恢复图　　d 去高频偏置恢复图

图5　天空背景条件下非均匀性校正图

Fig. 5　Non-uniformity correction map for sky background condition

由上可知，在运用高斯加权非均匀校正之前，图像的部分真实细节与噪声难以区分；运用高斯加权非均匀校正之后，通过高斯加权机制可以很好地区分噪声与真实信号。

高斯加权算法通过引入时间序列信息（当前帧信息和上一帧信息的差值），避免了传统滤波中对动态细节的过度平滑，在降噪的同时也能维持图像的对比度和边缘锐度。这表明高斯加权模型通过动态调整邻域权重，有效补偿了区域性增益和偏置差异，可以在合适条件下有效去除画面中的高低频非均匀性偏置，验证了算法对非均匀性的抑制能力。

4　结论

运用高斯加权模型对天空红外图像中局部邻域的空间相关性进行建模，又通过实验验证，发现高斯加权非均匀校正算法在去除图像中的高低频偏置后，随机噪点明显减少，同时还保留了云层纹理等细节，维持了图像对比度和边缘锐度，成功校正了由探测器非均匀性和大气传输引起的高低频偏差，显著提升了图像均匀性，进而提升了图像质量与目标检测可靠性。

参考文献：

[1] 陆红红，李振华. 基于引导滤波的红外图像非均匀性校正[J]. 信息对抗技术，2023(1)：87-96.

[2] 徐世伟，关恬恬，吴卓昆. 基于红外图像的天空检测算法研究[J]. 光电技术应用，2022，37(3)：28-31，66.

[3] 张宇苏. 基于深度学习的图像融合算法研究[D]. 无锡：江南大学，2024.

[4] 任伟. 海面红外成像系统盲元补偿及非均匀校正技术研究[D]. 大连：大连海事大学，2022.

[5] 李佳. 低慢小无人机目标红外成像探测关键技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.

[6] 何柯辰，刘奇，邓小波，等. 基于双重暗通道结合与高斯加权的去雾改进算法[J]. 半导体光电，2021，42(5)：754-759.

Gaussian Weighted Non-uniformity Correction Algorithm for Sky Infrared Images

XU Qianru[1], ZHANG Tianxu[2], PENG Shudi[1], DING Haowen[1]

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei 430205, China;
2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Aiming at the interference problem of non-uniform noise in infrared images against the sky background on target detection, a Gaussian-weighted infrared image non-uniform correction algorithm is proposed. By analyzing the mechanism of non-uniform noise generation in the sky background, a mathematical model for the non-uniformity of infrared images is constructed; Bilateral filtering and median filtering are adopted to extract high and low frequency biases respectively.Bilateral filtering and median filtering are used to extract high-frequency and low-frequency offsets respectively. A Gaussian weighting function model is employed, and adjustments based on inter-frame difference information are integrated to achieve the separation and suppression of high-frequency and low-frequency offsets. The experimental results show that this algorithm can not only effectively improve the uniformity of the image, but also significantly enhance the quality of the image.

Keywords: infrared image; sky background; Gaussian weighting; non-uniformity correction

(责任编辑:李华云)

(上接第32页)

Quantitative Study on the Contribution Degree of Dynamic Characteristics of Multi-flexible Component Coupling in Industrial Robots

HUANG Wen[1], WEI Ping[1], KAI Yajun[1,2], GAO Feng[1]

(1. School of Aeronautics and Materials, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu Anhui 241002, China;
2. EFORT Intelligent Robot Co. Ltd., Wuhu Anhui 241002, China)

Abstract: To address the issues of complex dynamic characteristic simulation models and high computational costs in industrial robots, a contribution degree analysis method based on the Pareto Principle is proposed.Taking the ER20C six-axis robot as the research object, a rigid-flexible coupling model including 13 flexible components (7 rods and 6 joints) is established, and 17 groups of comparative experiments are designed to quantify the impact of component flexibility on the trajectory accuracy of the entire machine.The results show that the contribution degree of joint flexibility is significantly higher than that of rods. The contribution rate of the second-axis joint flexibility to the trajectory error reaches 38.04%, and that of the large-arm casting reaches 34.00%. By conducting flexible modeling on key components (the 1st-axis, 2nd-axis, and 3rd-axis joints + base + swivel base + large arm), the simulation accuracy can reach 97.79% of that of the full-flexible model.

Keywords: industrial robot; rigid-flexible coupling; contribution analysis; dynamic characteristics

(责任编辑:邵 茗)