

文章编号:1001-5078(2025)03-0414-06

· 红外技术及应用 ·

成像器高速相对运动模糊膨胀效应研究

孙子林¹, 王毅², 李科¹

(1. 天津航技术物理研究所, 天津 300300; 2. 空军驻天津地区第三军代室, 天津 300300)

摘要:针对红外成像器与探测目标发生高速相对运动(靠近或远离)时会造成图像模糊的问题,基于目标辐射特性和光学傅里叶分析,分析推导高速相对运动会造成图像像素之间信息混合带来的模糊效应原理,以全方向变速线性运动模糊为主,增添像素值的膨胀或收缩,依据传统红外成像系统的响应建模,对像素灰度值在曝光时间的变化和成像器速度建立非线性映射关系,建立成像器高速运动膨胀效应数学模型,并给出其点扩展函数,进而绘制调制函数(MTF)曲线。利用理论MTF设计滤波器,对测试红外方靶图像进行降质退化,实现红外图像膨胀效应模糊效果仿真,最后以海上行驶的轮船为例,模拟成像器在高速相对运动时对轮船的成像效果,基于清晰实际图像进行退化模糊,验证实际膨胀效应效果。

关键词:运动模糊;红外成像;膨胀模糊;MTF;红外成像

中图分类号:TN216;TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2025.03.014

Research on the blur expansion effect of high-speed relative motion in imagers

SUN Zi-lin¹, WANG Yi², LI Ke¹

(1. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300300, China;

2. The Third Military Representative Office of the Air Force in Tianjin, Tianjin 300300, China)

Abstract:To address the issue of image blur due to high-speed relative motion (approaching or moving away) between an infrared imager and a detected target, the principle of blurring caused by information mixing between image pixels as a result of high-speed relative motion is analyzed and derived on the basis of the target's radiation characteristics and optical Fourier analysis. Firstly, with omnidirectional variable-speed linear motion blur as the main focus, the expansion or contraction of pixel values is added. Secondly, according to the response modeling of traditional infrared imaging systems, a nonlinear mapping relationship is established between the change in pixel grayscale values during exposure time and the imager speed. And a mathematical model of the high-speed motion expansion effect of the imager is developed and its point expansion function is given, which in turn plots the modulation function (MTF) curve. Further, using the theoretical MTF to design filters, the degradation of the test infrared square target image is performed to achieve the simulation of the blurring effect of the infrared image expansion effect. Finally, taking a ship driving on the sea as an example, the imaging effect of the imager during high-speed relative motion is simulated, and the degradation blurring is performed based on the clear actual images to verify the actual expansion effect.

Keywords: motion blur; infrared imaging; expansion blur; MTF; infrared imaging

作者简介:孙子林,男,硕士研究生,主要从事红外图像方面的研究。E-mail:15620638358@163.com

通讯作者:李科,男,博士,高级工程师,主要从事红外系统方面的研究。E-mail:likesea2003@163.com

收稿日期:2024-06-03

1 引言

现如今,伴随工业技术和信息技术的飞速发展,工业领域特别是航空航天方面其飞行速度愈发迅捷、飞行方向愈发随机,对搭载的红外成像器成像要求也愈发复杂多样。在一般红外成像过程中,探测目标与成像器之间的相对运动造成图像模糊是较为基础的降质退化现象,此外成像器抖动、高温窗口和大气辐射等均会导致图像变模糊^[1-5]。图像模糊的主要分类有运动模糊、高斯模糊和散焦模糊等,本文主要针对运动模糊进行仿真分析。

图像模糊工程可以表示为:

$$B = I \otimes K + N \quad (1)$$

其中, B 表示模糊图像; I 表示清晰图像; K 表示点扩散函数; N 表示噪声; \otimes 表示卷积。

目前,针对运动模糊的研究工作主要集中于红外成像系统数字样机研制和图像运动模糊复原,黄晨曦提出了一种基于对抗网络的盲解卷积图像去运动模糊算法;西安光学精密机械研究所编写了基于调制传递函数(MTF)模型的遥感成像链仿真平台,可以实现图像的模糊仿真;王敏等人以机器学习理论为基础,研究了无监督的运动模糊图像复原方法;朱凯等人提出了一种基于 Transformer 的多阶段去模糊网络,郭红伟等人提出了一种适用于实拍图像退化参数估计的方法^[6-11]。

针对上述研究,大部分学者往往对常见运动模糊图像进行复原或退化仿真,其对成像器和探测目标之间的运动都是平面运动($x-y$ 平面),没有充分考虑两者之间 z 平面(靠近或远离)的高速运动会导致图像模糊的问题。本文基于目标辐射特性和光学傅里叶分析,分析高速运动时的成像器成像特点,在传统变速线性运动模糊基础上,加入了随机抖动模糊的全方向性和成像器对目标辐射的响应特性,建立了运动模糊膨胀效应数学模型,以该模型为基础,设计了相关滤波器,对实验图像进行仿真分析,进一步完善了运动模糊的相关理论。

2 运动模糊原理

场景和成像器在曝光时间内进行的相对运动会使图像的空间坐标发生偏移。将成像器在 $x-y$ 平面中的运动进行建模(z 平面中的运动可能会影响像素个数和目标辐射特性,在此先不进行考虑)。成像器在 $x-y$ 平面中运动的一般效果可以写成:

$$g(x,y) = \frac{1}{t} \int_0^t f[x_0 - x(t), y_0 - y(t), t] dt \quad (2)$$

其中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 代表了运动导致的空间偏移。

本文针对两种最常见的平面运动模糊,拖影模糊和抖动模糊进行理论推导和分析。

最简单的运动模糊是物体和相机之间以恒定速度 v 的线性移动。如果运动在 x 轴的方向上,则运动在时间间隔 Δt 内的位移 d 由下式给出:

$$d = v\Delta t \quad (3)$$

拖影模糊是一种方向模糊,会根据方向对图像产生不同的影响(如图1),沿着运动方向的线和边缘不会模糊。

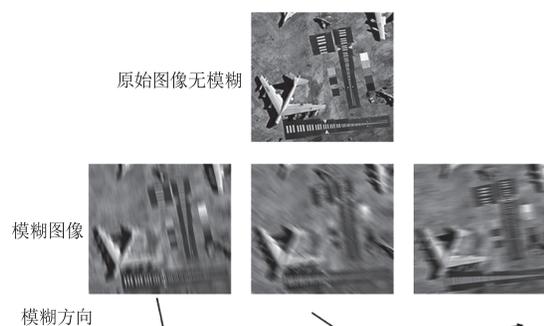


图1 运动方向对拖影模糊影响示意图

Fig. 1 The relationship between smear blur and motion directions

拖影模糊可以建模为在运动方向上具有一维矩形函数的卷积, rect 函数的宽度是涂抹的长度。

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) \quad (4)$$

其中, $h(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right)$

$$\text{rect}\left(\frac{x-x_0}{w_x}\right) = \begin{cases} 1 & |x-x_0| < \frac{w_x}{2} \\ \frac{1}{2} & |x-x_0| = \frac{w_x}{2} \\ 0 & |x-x_0| > \frac{w_x}{2} \end{cases} \quad (5)$$

对于沿着 x 方向的拖影模糊来说,其传递函数就是 $h(x,y)$ 的傅里叶变换,即:

$$H(\xi,\eta) = \text{sinc}(d\xi) \quad (6)$$

其中,

$$\text{sinc}\left(\frac{x-x_0}{w_x}\right) = \frac{\sin\left[\pi\left(\frac{x-x_0}{w_x}\right)\right]}{\pi\left(\frac{x-x_0}{w_x}\right)} \quad (7)$$

如果 θ 是沿 x 轴的角度,那么 $h(x,y)$ 和 $H(\xi,\eta)$ 旋转 θ 角度即可。

从图像质量的角度来看,根据像素来对拖影模糊分析通常是有帮助的,因为正是像素之间的信息混合导致了数字图像中的模糊效果。图 2 显示了 d 等于 0.5、1.0、2.0 和 4.0 像素的 sinc 函数所描述的传递函数。

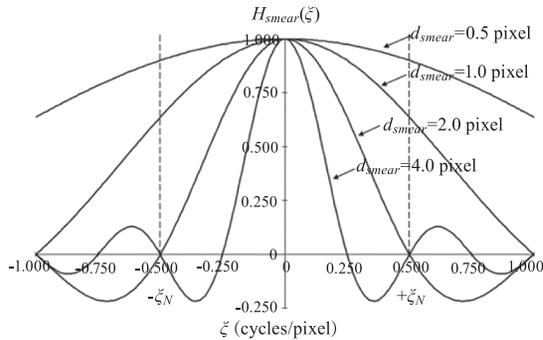


图 2 沿运动方向不同长度的拖影模糊传递函数

Fig. 2 Smear blur transfer functions with different lengths along the direction of motion

图 3 以像素为单位说明了拖影长度的影响。拖影的模糊效应在最低为 1.25 个像素时便开始影响图像的可解释性。注意,如果拖尾长度超过两个像素,则传递函数将拥有最少一个零点在奈奎斯特频率 ($\pm \xi_N$) 之内,并且在那些空间频率上的信息将丢失。

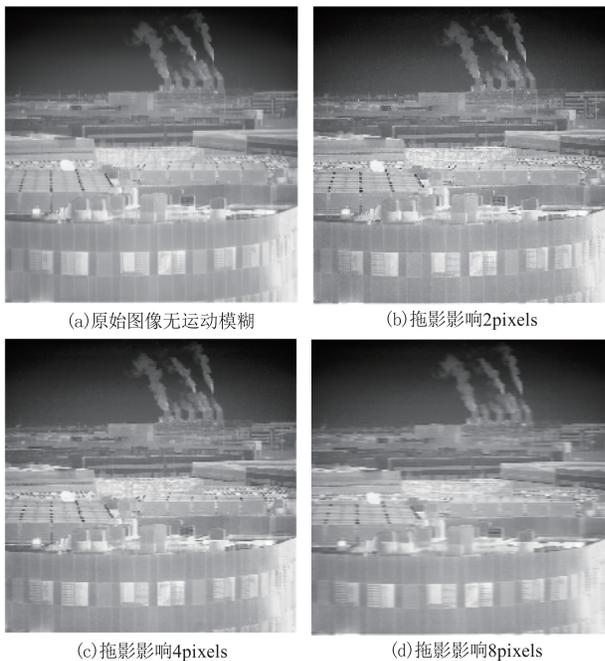


图 3 拖影长度(像素为单位)对图像的影响

Fig. 3 Influence of smear length (in pixels) on image

成像器由于结构或运动原因会导致自身发生随机抖动现象,表现为全方向随机抖动,进而造成图像模糊,这种模糊被叫做抖动模糊。抖动模糊是图像退化的基础模型之一,也是属于成像器在 $x - y$ 平面上

的运动导致的图像模糊,其一般被建模为高斯函数:

$$h(r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

其中, σ 表示抖动模糊的标准差,在计算过程可以视为曝光时间内成像器抖动的最大幅度像素值。

易知,抖动模糊的传递函数为:

$$H(\rho) = e^{-2(\pi\sigma\rho)^2} \quad (9)$$

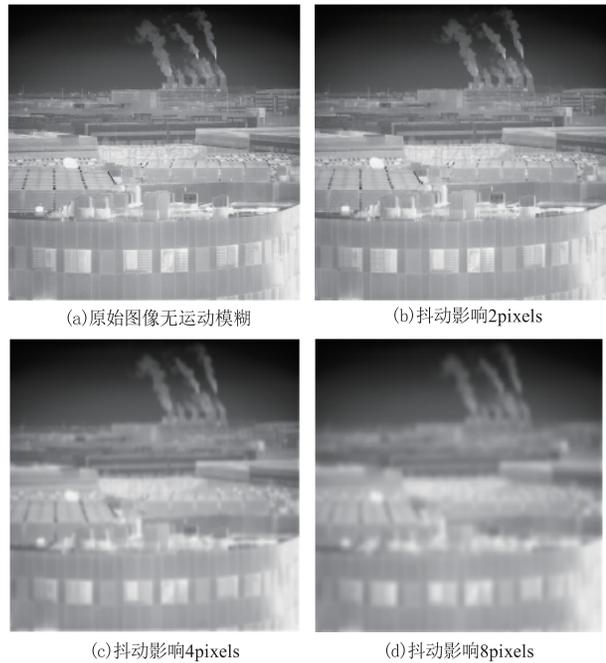


图 4 抖动幅度(像素为单位)对图像的影响

Fig. 4 Influence of jitter amplitude (in pixels) on image

图 4 显示了以像素为单位的不同程度的抖动模糊的影响。在 $\sigma = 0.4$ pixels 时抖动的模糊效果就可以被人眼所观测到。

3 膨胀模糊效应

拖影仅针对成像器相对于探测目标在 $x - y$ 平面的运动,当成像器面向探测目标进行靠近或远离的相对运动(即 z 平面运动),在曝光时间内运动的距离会造成探测目标在成像器上像素个数增多或减少(如图 5 所示),进而导致图像模糊,即膨胀和收缩效应。

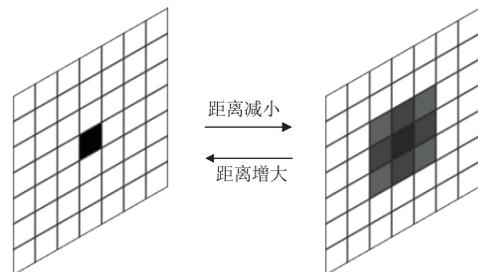


图 5 相对运动导致像素值变化

Fig. 5 Pixel value changes due to relative motion

探测目标在成像器上的像素个数由下式计算得出:

$$\begin{cases} X = D \frac{m_x a_x}{f} \\ Y = D \frac{m_y a_y}{f} \end{cases} \quad (10)$$

其中, X 和 Y 为目标实际尺寸; D 为成像器到探测目标的实际距离; m_x 、 m_y 为 x - y 方向上的像素个数; a_x 、 a_y 为像元尺寸, f 为焦距。

由上式进一步推导:

$$\begin{cases} \Delta m_x = \frac{f \cdot X}{a_x D_1 D_2} \cdot \Delta D \\ \Delta m_y = \frac{f \cdot Y}{a_y D_1 D_2} \cdot \Delta D \end{cases} \quad (11)$$

其中, Δm_x 、 Δm_y 为目标像素个数的改变量, 向上取整。 $\Delta D = D_1 - D_2$ 为运动距离, D_1 为开始曝光时成像器到探测目标的实际距离, D_2 为曝光结束后距离。 Δm 和 ΔD 有正负之分, 当发生膨胀效应, 即成像器和探测目标距离缩减, Δm 为正, 即像素个数增多, 反之发生收缩效应时 Δm 为负, 像素个数减少。

由图 5 得, 发生膨胀或收缩反应时, 目标的成像像素数及其灰度值均会改变。上文拖影模糊和抖动模糊只考虑了像素的平移运动, 未考虑辐亮度的变化, 且拖影模糊只建模了单一方向像素之间的信息耦合, 抖动模糊的建模主要是全方向的随机抖动影响。

综上考虑, 膨胀效应其原理和影响近似于全方向的拖影模糊, 并需结合目标的辐射特性, 计算得出红外成像器上像素点的辐照度。

目前典型红外热成像系统接收辐射主要分为三种: 目标辐射、背景辐射和环境辐射(主要为红外热成像系统自发辐射)。背景辐射和环境辐射是影响红外热成像系统探测性能的重要因素, 其主要影响体现在对系统噪声和输出灰度的增加。红外成像器接收到的总辐射照度为:

$$E_\lambda = A_0 D^{-2} [\tau_{a\lambda} \varepsilon_\lambda L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_\lambda) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)] \quad (12)$$

式中, ε_λ 为表面辐射率; α_λ 为表面对环境辐射的吸收率; A_0 为成像器最小空间张角对应目标的可视面积; D 为该目标到测量仪器的距离; $\tau_{a\lambda}$ 为大气透过率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气发射率; $L_{b\lambda}(T_0)$ 为辐射亮度; T_0 、 T_u 、 T_a 分别为被测物体温度、背景环境温度和大气温度。

在工程应用中, 目标辐射、背景辐射和环境辐射

三者较难区分, 简化得:

$$E_\lambda = \tau_1(D) \cdot L_{b\lambda} + \tau_2(D) \cdot L_{out} \quad (13)$$

其中, $\tau_1(D)$ 为距离为 D 时的目标辐射光学传输综合效应系数; $\tau_2(D)$ 为大气杂光辐射光学传输综合效应系数; $L_{b\lambda}$ 和 L_{out} 分别为目标和大气杂光辐射亮度。

假定红外成像系统是线性响应, 则由式(13)可得其辐射响应灰度模型在实验条件下如式(14)所示:

$$Y = \tau_{b\lambda}(D) \cdot G \cdot L_{b\lambda}(T_0) \cdot t + \tau_{a\lambda}(D) \cdot G \cdot L_{out} \cdot t + K_t \cdot t + D_{dark} \quad (14)$$

式中, L_{out} 为杂光干扰, 一般情况下可视为镜头温度 T_{optic} 的函数; D_{dark} 暗电流引起的响应偏移; t 为积分时间; K_t 为与积分时间相关的转换系数; Y 表示成像灰度值; G 为探测器响应系数; $\tau_{b\lambda} = A_0 D^{-2} \tau_{a\lambda} \varepsilon_\lambda$ 为光学传输综合效应系数; $\tau_{a\lambda}$ 为光学杂光综合效应系数。

综合考虑辐亮度和成像像素数的变化, 结合式(11)和式(14)可以计算得出目标的像素数及其像素的辐射亮度:

$$Y(x, y) = \sum Y(D)(x, y) \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (15)$$

其中, $Y(x, y)$ 为图像在坐标为 (x, y) 处实际灰度值; $\sum Y(D)(x, y)$ 为改变距离前后, 在像素个数不变的情况图像在 (x, y) 点的灰度值之和。

4 膨胀模糊仿真分析

由上述原理分析可得, 膨胀效应的效果为全方向的拖影模糊, 并需结合目标的辐射特性, 计算得出红外成像器上像素点的辐照度。为更好的显示仿真效果, 本文基于制冷型红外成像器, 采用 MTF 法对膨胀效应进行建模仿真。图 6 为不同程度的膨胀效应点扩展函数曲线, 图 7 为其 MTF 曲线。

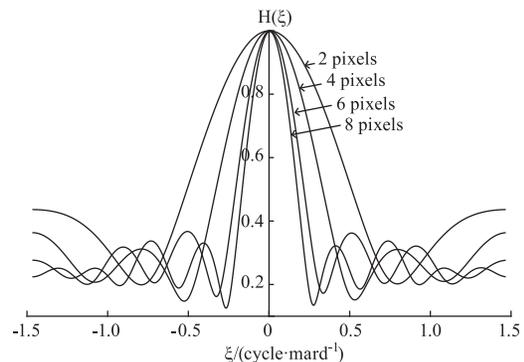


图 6 不同长度的膨胀模糊传递函数 x 轴方向频谱
Fig. 6 X-axis spectrum of expansion fuzzy transfer function with different lengths

为定量分析膨胀效应的模糊效果,本文分别使用频域强度直接衰减方法以及数字滤波器方法对图像进行模糊化操作,结果分别如图 8 和图 9 所示。

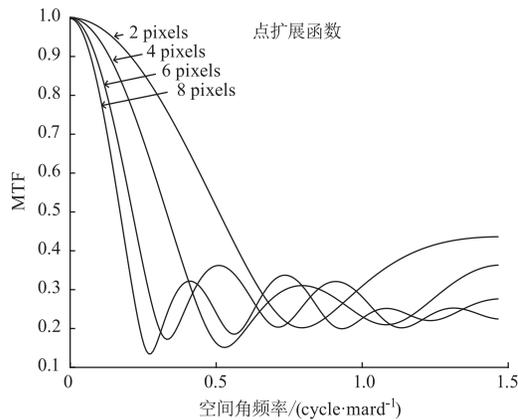


图 7 不同长度的 x 轴方向膨胀 MTF 曲线

Fig. 7 Expansion MTF curves in x -axis direction with different lengths

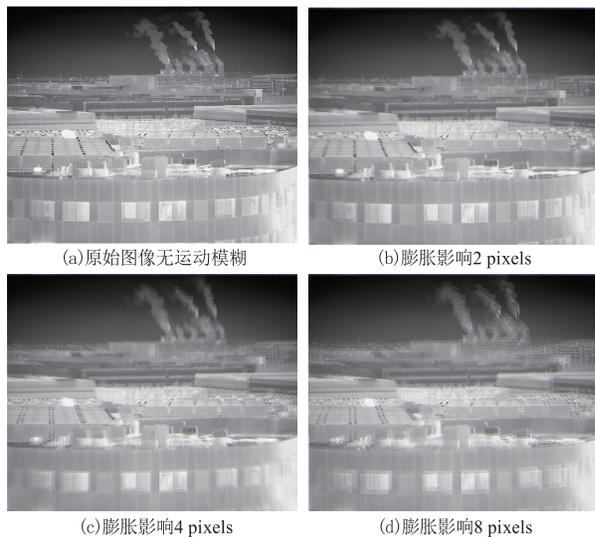


图 8 频域衰减法不同长度的膨胀模糊影响

Fig. 8 Influence of different length expansion ambiguity in frequency domain attenuation method

由图易知,两种方法模糊效果基本一致,且当成像器运动速度越快,其膨胀模糊效果越明显,整体图像像素呈现向外扩散的趋势,图像中心区域凸显,即高速相对运动下物体“膨胀”现象。

基于 MTF 针对实际轮船图像进行仿真分析,可以看出,在成像器高速靠近轮船时,其成像的像素范围会扩大,周边会变模糊,而整体海水像素的变化趋势为向中心偏移。

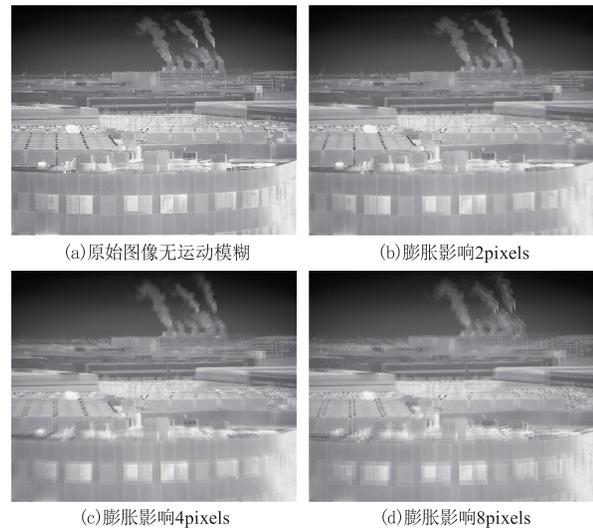


图 9 滤波法不同长度的膨胀模糊影响

Fig. 9 Influence of different length of filter method on expansion ambiguity

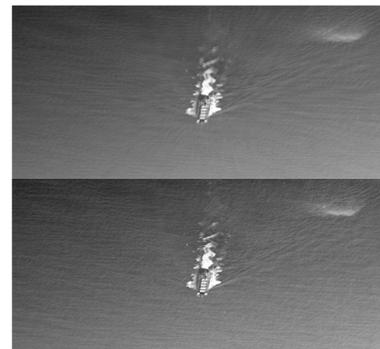


图 10 膨胀效应仿真图(上图为原始清晰图)

Fig. 10 Simulation diagram of expansion effect

5 结论

本文针对大部分现有运动模糊的研究往往都是 $x-y$ 平面的分析,对成像器在 z 平面高速运动时造成图像运动模糊的相关原理研究不充分,在此基础上,本文系统梳理了两种常见的运动模糊,拖影模糊和抖动模糊,在两种模糊的基础分析上,引入了膨胀效应模糊。之后使用全方向变速线性运动模糊,结合目标辐射特性和光学傅里叶分析,引入图像像素之间的信息混合,在图像复频域内进行了相关仿真分析,频域强度直接衰减方法以及数字滤波器方法对图像进行模糊化操作。

限于器材和复现成像器高速运动的成本,本文的膨胀效应图像退化操作是在传统运动模糊的基础上引申假设而来,未完成实际效果的验证,本人在后期的学习工作中将继续完善该理论,并完成实际的验证,进一步提升运动模糊仿真效果。

参考文献:

- [1] Lou Shuli, Zhang Jian, Ren Jiancun, et al. Research progress in modeling and simulation technology for infrared imaging detectors[J]. *Infrared*, 2014, 35(7): 1-4, 15. (in Chinese)
娄树理, 张健, 任建存等. 红外成像探测器建模与仿真技术研究进展[J]. *红外*, 2014, 35(7): 1-4, 15.
- [2] Tao Fei, Qi Qinglin. New IT driven service-oriented smart-manufacturing: framework and characteristics [J]. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2017, 49(1): 81-91.
- [3] Liu Datong, Guo Kai, Wang Benkuan, et al. Overview and prospects of digital twin technology[J]. *Journal of Instrumentation*, 2018, 39(11): 1-10. (in Chinese)
刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 1-10.
- [4] Marcotte F, Farley V, Pauli M, et al. High-dynamic range imaging using FAST-IR imagery [C]//*Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXV*. International Society for Optics and Photonics, 2014: 90710E.
- [5] Zhang Dongyang. Development of IR imaging system simulator and its application in performance evaluation[D]. Xi'an: Xidian University, 2016. (in Chinese)
张冬阳. 红外成像系统模拟器研制及其在系统性能评估中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- [6] 黄晨曦. 基于盲解卷积的图像去运动模糊算法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [7] Zhao Chen. Research on digital performance prototype technology of infrared imaging system[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
赵辰. 红外成像系统数字化性能样机技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [8] Bu Fan. Modeling and simulation of optical remote sensing system and image processing technology[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2014. (in Chinese)
卜凡. 光学遥感系统的建模仿真及图像处理技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院, 西安光学精密机械研究所, 2014.
- [9] Wang Min. Research and application of motion blurred image restoration algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
王敏. 运动模糊图像复原算法研究及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [10] Zhu Kai, Li Li, Zhang Tong, et al. A multi-stage motion blur image restoration network based on transformer[J]. *Computer Engineering*, 2024, 50: 1-11. (in Chinese)
朱凯, 李理, 张彤, 等. 基于 Transformer 的多阶段运动模糊图像修复网络[J]. *计算机工程*, 2024, 50: 1-11.
- [11] Guo Hongwei, Fu Bo, Tian Yimin, et al. Degradation parameter estimation and restoration of motion blurred images captured in real time[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(5): 559-564. (in Chinese)
郭红伟, 付波, 田益民, 等. 实拍运动模糊图像的退化参数估计与复原[J]. *激光与红外*, 2013, 43(5): 559-564.