

基于运动模糊复原技术的红外弱小目标检测方法

李思俭, 樊 祥, 朱 斌, 程正东

电子工程学院脉冲功率技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 在红外对空探测系统中, 由于探测器时刻处于运动状态使得目标图像产生剧烈的运动模糊, 给红外小目标检测造成困难。为了解决运动模糊条件下红外小目标检测的问题, 提出将运动模糊复原技术和图像增强技术引入红外探测系统。先将探测器采集到的原始图像经过维纳滤波, 对运动模糊进行处理并抑制噪声干扰, 再利用梯度法对处理后的图像做锐化处理, 增强目标边缘。实验验证和仿真分析结果都表明, 该方法运动模糊复原效果明显, 并在一定程度上抑制了噪声, 提高了目标对比度, 使目标在背景中更加凸显, 并且能够显著提高目标图像质量。引入的评价参数峰值信噪比和均方差表现良好, 该方法可以增强探测系统的使用性能。

关键词 图像处理; 红外弱小目标; 图像复原; 运动模糊; 点扩散函数

中图分类号 O434.3 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0610001

A Method for Small Infrared Targets Detection Based on the Technology of Motion Blur Recovery

Li Sijian, Fan Xiang, Zhu Bin, Cheng Zhengdong

State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China

Abstract The motion of the infrared detection system always has a significant effect on the imaging process, resulting in the motion blur of the target image, which brings evident uncertainties and difficulties to the infrared small target detection. In order to efficiently detect the infrared small targets whose images have been blurred by the motion of them, the technique of motion blur restoration and image enhancement are introduced into the infrared detection system. The method firstly applies Wiener filter in the processing of original images so as to restrain the noise and reduce the motion blur, then makes the use of gradient method to sharpen and enhance the target edges of processed images. The experiment results and simulation analyses show that such method can obviously reduce motion blur, enhance the contrast of targets, and restrain noise to a certain extent, which improving images' quality and making infrared targets prominent in the background. Finally, the evaluation parameters peak signal to noise ratio and mean square error perform well. The proposed method can enhance the effect of detective system.

Key words image processing; small infrared targets; image restoration; motion blur; point spread function

OCIS codes 100.3008; 040.6808; 200.4560; 330.1800

1 引 言

随着红外技术的发展, 红外对空探测系统发挥着越来越重要的作用, 该系统以被动方式工作, 接收目标和背景固有的红外辐射, 可全天候使用, 在空域监测及目标识别等领域得到了非常广泛的应用。该系统的光学探测原理为通过焦平面接收远距离成像目标及背景辐射信息, 输出红外视频, 通过图像处理器, 利用图像处理从背景中检测并识别图像中的目标。为有效提高红外探测系统的探测距离, 需要在目标很微弱时就实现有效探测, 从而为空域检测及目标识别处理提供充分的响应时间^[1-3]。当目标距离较远时, 目标在光

收稿日期: 2016-12-23; 收到修改稿日期: 2017-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61307025)、安徽省自然科学基金(1308085QF122)

作者简介: 李思俭(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事红外图像复原方面的研究。E-mail: lisijian000@163.com

导师简介: 樊 祥(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电系统方面的研究。E-mail: FanXiangLXL@163.com

学系统中所成的像是小目标形态。图像的对比度比较低,目标在像面上所成的像只占一到几个像素,其成像面积小、信噪比低、背景复杂。综合这些因素,远距离目标在红外探测器上的探测本就非常困难,并且由于成像器件本身存在的缺陷和环境因素的影响,导致红外探测系统采集的图像在形成、传输、存储、记录和显示过程中,不可避免地会存在不同程度的质量退化,尤其是空中目标高速运动造成的运动模糊。这种退化给系统后端的图像处理、航迹关联等增加了许多困难^[4]。

红外小目标检测算法的研究越来越受国内外学者的重视,各种算法层出不穷。当前常见的算法大致可以分为时间域、空间域和频率域三类:时间域算法以时间轴为坐标分析图像信号并处理,这些算法主要用于抑制与目标差别较大的背景,但是对相似背景抑制效果不明显;空间域算法指在图像空间中,借助模板对图像进行邻域操作,此类算法较为简单,运算量较小,因此实时性较好,但是对噪声的抑制不够明显;频率域算法则以图像的傅里叶变换为基础,此类算法对于噪声的抑制效果较好,但是运算较为复杂,需要对图像作正反两次傅里叶变换,很难满足高帧频图像的处理要求^[5]。

以往的算法,分别从各自的角度出发,都能够实现对红外小目标的检测,但是应用于红外空域监测系统时却各有缺陷。因为在空域监测系统的工作过程中,红外相机需要始终以较快的速度扫描整个空域。这就使采集到的目标图像产生了较为严重的运动模糊,从而导致目标和背景相互重叠,变得难以分辨,因此已有的目标检测算法就不能满足使用条件。雾霾等极端天气在全年天气中占比越来越高,受空气质量和天气情况限制,采集到的原始图像普遍存在噪声问题,抑噪成为算法中不可或缺的一环。当跟踪空域中飞行速度较快的飞行器,要求相机的帧频较高,这又对算法效率提出较高要求。由于存在运动模糊的目标具有拖尾效应,普遍面临目标在图像中变形的问題,这就给后续的目标跟踪造成困难。针对以上问题,本文提出在红外弱小目标的检测以及跟踪过程中引入运动模糊复原技术。首先对采集到的图像做运动模糊复原处理,使模糊图像中的红外小目标恢复至其真实的形状及尺寸,并实现背景与目标之间的相互分离,以满足后续算法的使用条件,从而再对目标图像做梯度锐化和滤波处理,进一步地提高红外弱小目标的信噪比,改善图像质量,增强监测系统的作用效能。

2 运动模糊图像复原基本原理

获取图像的瞬间,所拍摄的目标与相机发生相对运动,称为运动模糊。在所有的运动模糊中,由匀速直线运动造成图像模糊的复原问题更具有一般性和普遍意义,非匀速直线运动可近视为匀速直线运动,或者可以分解为多个匀速直线运动^[6-8]。

如图1所示,图像退化过程可以表述为一个退化函数和一个加性噪声项,对一幅输入图像 $f(x, y)$ 进行处理,产生一幅退化后的图像 $g(x, y)$ 。给定 $g(x, y)$ 和关于退化函数 H 的一些信息以及关于加性噪声项 $n(x, y)$ 的一些知识后,图像复原的目的就是获取原始图像的一个近似估计 $\hat{f}(x, y)$ 。通常,希望这一估计尽可能地接近原始输入图像,并且 H 和 n 的信息知道得越多,所得到的 $\hat{f}(x, y)$ 就会越接近 $f(x, y)$ 。

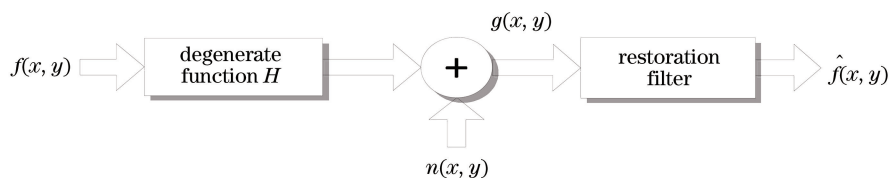


图1 基本图像退化复原模型

Fig. 1 Basic model of digital image degradation and restoration

当 H 是一个线性、空不变的过程时,空间域中的退化图像可表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为原始图像, $g(x, y)$ 是退化图像, $n(x, y)$ 是加性噪声项, $h(x, y)$ 是退化函数的空间表示,符号“*”表示空间卷积^[9]。

因为空间域中的卷积等于频率域中的乘积,因此可以把(1)式中的模型等价到频率域表示为

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v) + N(u, v), \quad (2)$$

式中的大写字母表示(1)式中对应项的傅里叶变换。

3 红外弱小目标图像

在没有运动模糊时,一幅红外小目标图像可简单的描述为

$$f(x, y) = f_T(x, y) + f_B(x, y) + n(x, y), \quad (3)$$

式中 $f(x, y)$ 为原始图像, $f_T(x, y)$ 为目标信号, $f_B(x, y)$ 为背景信号, $n(x, y)$ 为噪声及干扰项。

当红外图像为存在运动模糊退化时,就要将(1)式中的退化模型代入(3)式中,得到

$$g(x, y) = g_T(x, y) + g_B(x, y) + n'(x, y), \quad (4)$$

式中 $g(x, y)$ 为退化后的原始图像, $g_T(x, y)$ 为退化目标信号, $g_B(x, y)$ 为退化背景信号, $n'(x, y)$ 为噪声及干扰信号综合^[10-12]。

4 红外弱小目标处理算法

4.1 最小均方误差(维纳)滤波

红外弱小目标图像的采集依赖于红外 CCD,在采集的过程中会不可避免地引入噪声,而且在发生运动模糊退化时,加性噪声项也会随之退化,变得更加复杂。维纳滤波算法是在逆滤波的基础上针对噪声项加以改进的算法,它可以在复原过程中较好地抑制噪声,提高处理效果^[13-15]。

维纳滤波是在假设图像信号可以近似看成平稳随机过程的前提下,按照使复原图像 $\hat{f}(x, y)$ 与原始图像 $f(x, y)$ 之间的均方误差达到最小的准则函数来实现图像恢复的方法,这种误差度量为

$$e^2 = E\{(f - \hat{f})^2\}, \quad (5)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 是参数的期望值。误差函数的最小值在频率域中为

$$\begin{aligned} \hat{F}(u, v) &= \left[\frac{H^*(u, v)S_f(u, v)}{S_f(u, v)|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)} \right] G(u, v) = \left[\frac{H^*(u, v)}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v) = \\ &= \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + S_n(u, v)/S_f(u, v)} \right] G(u, v). \end{aligned} \quad (6)$$

对于白噪声,谱 $|N(u, v)|^2$ 是一个常数,当未退化图像的功率谱未知或不可估计时,用下式来近似(6)式,即

$$\hat{F}(u, v) = \left[\frac{1}{|H(u, v)|^2 + k} \right] G(u, v), \quad (7)$$

式中 k 是一个加到 $|H(u, v)|^2$ 的所有项上的特定常数。

4.2 梯度锐化

梯度锐化是用来对图像边缘进行增强的技术,能够达到锐化、增强图像的目的,进而提取目标物体^[16-18]。

对于任意图像,可用函数 $f(x, y)$ 表示,则在 (x, y) 处的梯度表示为

$$\nabla f(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

于是,梯度的幅度为

$$|\nabla f(x, y)| = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

在处理离散数字图像时,将一阶微分近似为差分运算,表示为

$$|\nabla f(x, y)| = \{ [f(x, y) - f(x + 1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y + 1)]^2 \}^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

为了计算方便,将上式作进一步简化,表示为

$$|\nabla f(x, y)| = |f(x, y) - f(x + 1, y)| + |f(x, y) - f(x, y + 1)|, \quad (11)$$

则由(11)式得到的梯度值为阈值做锐化处理,使红外小目标进一步增强^[19]。

4.3 算法设计流程

红外弱小目标图像经红外 CCD 采集后得到运动模糊退化的原始图像 $g(x, y)$, 先通过滤波算法去除运动模糊并降低噪声, 再引入目标增强技术, 最后输出复原图像 $\hat{f}(x, y)$ 。通过比较原始图像 $f(x, y)$ 与复原图像 $\hat{f}(x, y)$ 来评价复原处理效果。算法流程图如图 2 所示。

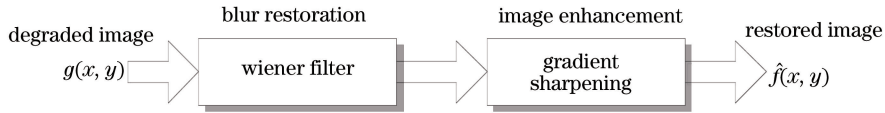


图 2 算法设计流程

Fig. 2 Flow chart of calculation

5 实验结果与分析

为了验证研究思路并比较复原前后图像效果, 设计并进行了如下实验。

以尺寸为 450 mm 的四旋翼无人机作为红外小目标, 焦距 100 mm、像素尺寸 $17 \mu\text{m}$ 的长焦红外镜头作为 CCD 采集设备。实验过程中无人机悬停于空中, 红外镜头架设在地面的云台上, 云台高度相对于无人机的悬停高度可以忽略不计。无人机起飞位置距镜头 880 m, 垂直起飞的悬停高度为 100 m, 由勾股定理可知悬停的无人机与红外镜头的直线距离 l 约为 885 m。根据相机成像原理可以算得无人机在感光 CCD 上成像大小为 $51 \mu\text{m}$, 恰好占 3 个像素, 满足小目标条件。

利用上述算法对采集到的运动模糊红外图像进行处理, 图像大小为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$, 结果如图 3 所示。图 3(a) 为相机以 $30^\circ/\text{s}$ 的速度旋转产生的模糊图像, 图 3(b) 为图 3(a) 模糊图像对应的复原图像, 图 3(c) 为相机以 $60^\circ/\text{s}$ 的速度旋转产生的模糊图像, 图 3(d) 为图 3(c) 模糊图像对应的复原图像。

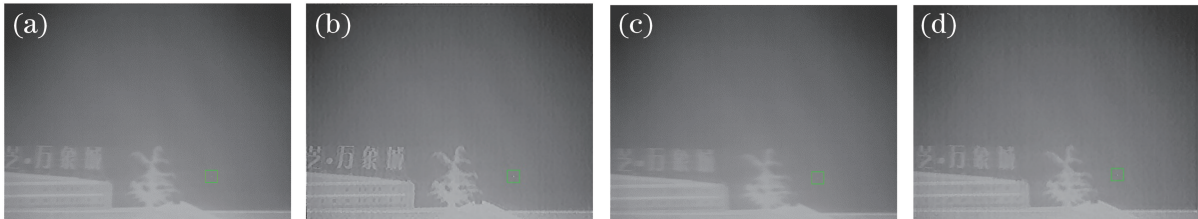


图 3 原始图像及其复原图像。(a) 30° 原始图像; (b) 30° 复原图像; (c) 60° 原始图像; (d) 60° 复原图像

Fig. 3 Original image and restored image. (a) 30° original image; (b) 30° restored image; (c) 60° original image; (d) 60° restored image

通过图 3 中两对模糊图像和清晰图像的对比, 凭肉眼可以看出, 经过运动模糊复原处理之后的图像中的小目标相对于背景更加凸显, 为了进一步验证复原处理对红外小目标检测的效果, 将图像的灰度值绘制成三维图, 如图 4 所示。图 4(a) 和 (b) 是相机以 $30^\circ/\text{s}$ 的速度旋转产生的模糊图像和复原图像; 图 4(c)、(d) 是相机以 $60^\circ/\text{s}$ 的速度旋转产生的模糊图像和复原图像。

鉴于以上图像评价较为主观, 故使用峰值信噪比 (PSNR) 和均方差 (MSE) 这一对判定指标对复原处理效果做进一步评估。PSNR 和 MSE 是两种常见的、广泛使用的图像质量客观评测参数, 根据 PSNR 和 MSE 的定义, PSNR 值越大或 MSE 值越小, 则该处理后的图像与标准图像匹配效果越好, 即该处理方法效果越好。

若模糊图像为 I , 复原图像为 K , 那么它们的 MSE 为

$$E_{\text{MS}} = \frac{1}{pq} \sum_{i=0}^{p-1} \sum_{j=0}^{q-1} \| I(i, j) - K(i, j) \|^2, \quad (12)$$

PSNR 为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg_{10} \left[\frac{\max(I, K)^2}{E_{\text{MS}}} \right], \quad (13)$$

式中 $\max(I, K)$ 表示图像点灰度的最大数值, 由于上述实验中已将图像位数设置为 8 位, 所以该值为 255。

为了验证运动模糊复原技术对红外小目标检测的作用效果, 将本文所用方法与两种常用的传统检测方

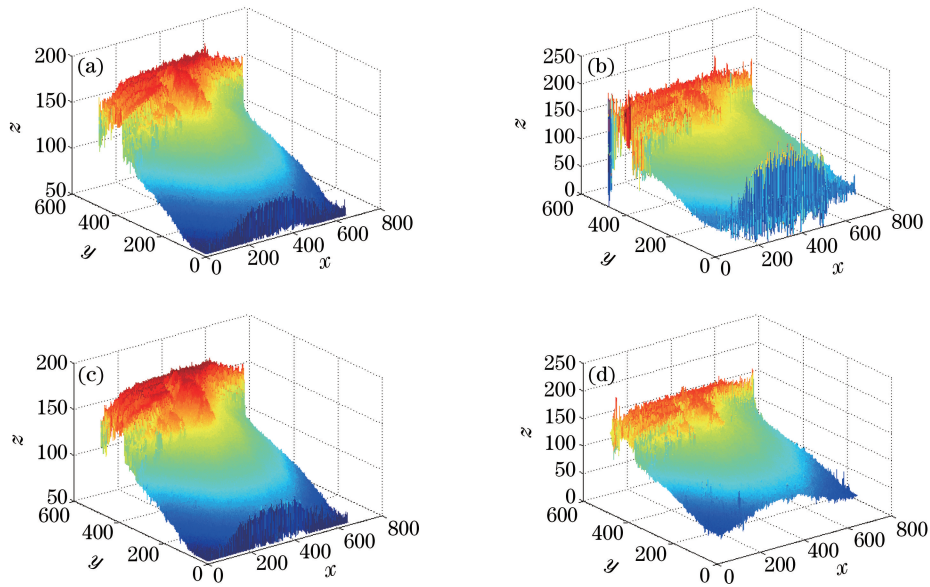


图4 原始图像及其复原图像3D仿真图。(a) 30°原始图像(b) 30°复原图像;(c) 60°原始图像(d) 60°复原图像

Fig. 4 3D simulation diagram of the original image and the restored image

(a) 30° original image (b) 30° restored image; (c) 60° original image; (d) 60° restored image

法,即高通滤波算法(HPF)和小波变换法(WT),作对比实验如下。

以红外相机静止状态下采集的红外小目标图像为标准图像,对相机以 $30(^{\circ})/s$ 和 $60(^{\circ})/s$ 速度旋转产生的两对模糊图像分别用本文算法和高通滤波算法、小波变换方法处理后求出各自 MSE 和 PSNR 值,表 1 为这三种方法分别在两种不同旋转速度下的性能对比,其中 Blurred 为原始的存在运动模糊的目标图像,Restored 为经过运动模糊复原后的目标图像,HPF 和 WT 分别是原始图像经过高通滤波算法和小波变换的结果。

表 1 效果评价参数表

Table 1 Evaluation of effect parameters

Rotate speed	Target image	MSE	PSNR
$30(^{\circ})/s$	Blurred	2.4146	44.3024
	Restored	1.5647	46.1864
	HPF	2.0174	45.0828
	WT	2.1657	44.7749
$60(^{\circ})/s$	Blurred	3.1825	43.1031
	Restored	2.0613	44.9894
	HPF	2.8586	43.5693
	WT	3.0761	43.2508

从表 1 中的数据可以看出,不论相机是以 $30(^{\circ})/s$ 还是 $60(^{\circ})/s$ 的转速工作时,作为空白对照组的原始模糊图像的 PSNR 值最小,MSE 值最大,并且使用本文的复原算法的 PSNR 值都大于高通滤波算法和小波变换算法的 PSNR 值,MSE 值都小于两种对照算法的 MSE 值。根据 PSNR 和 MSE 的定义,PSNR 越大则图像质量越高,MSE 越小则图像质量越高,因此可以证明带有运动模糊的目标图像经过去模糊复原处理后,红外小目标的图像质量得到了提高。这也与图 3 中肉眼的观察结果以及图 4 的三维仿真结果相匹配,并且表 1 中的 PSNR 和 MSE 数值显示本文算法的效果要优于高通滤波算法和小波变换算法。

6 结 论

在分析了红外弱小目标检测过程中的问题和困难后,针对当前算法在红外空域监测系统中存在的缺陷,提出将运动模糊复原技术应用于红外弱小目标检测中。通过维纳滤波以及边缘增强等算法,实现去除运动模

糊、突显目标提高对比度的效果,从而提高目标的检测概率。通过具体实验图像对比验证、仿真分析以及引入 PSNR 和 MSE 等评价参数与传统算法作对比验证。实验结果表明:1)与采集到的原始图像相比,经过运动模糊复原技术处理后的图像中目标形状更加逼真,在背景中更清晰,亮度更高;2)在与高通滤波算法和小波变换算法的对比中,本算法在转台转速为 $30(^{\circ})/s$ 和 $60(^{\circ})/s$ 的实验条件下,PSNR 值最高,MSE 值最低。因此将运动模糊复原技术引入红外小目标检测能够增强检测效果,对于提高红外空域监测系统的作用距离和增加预警时间具有现实意义和应用前景。本方法在处理速度上还有所欠缺,日后将其应用于视频图像处理时需改进程序,提高运算速度。

参 考 文 献

- [1] Zhao Chunhui, Yao Xifeng, Zhang Lili. Target detection sparse algorithm by recursive dictionary updating and GPU implementation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0828002.
赵春晖,姚浙峰,张丽丽.采用字典递归更新的目标检测稀疏算法及 GPU 实现[J].*光学学报*, 2016, 36(8): 0828002.
- [2] Liu Yongjin, Zhu Hong, Zhao Yigong. Interframe prediction based algorithm for non-uniformity correction in infrared focal plane arrays[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(4): 997-1000.
刘永进,朱红,赵亦工.基于帧间预测的红外焦平面阵列非均匀校正算法[J].*光子学报*, 2009, 38(4): 997-1000.
- [3] Liu Ruming, Liu Erqi, Yang Jie, *et al.* Detection infrared point targets based on kernel fukunaga-Koontz transform[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2008, 27(1): 47-50.
刘瑞明,刘尔琦,杨杰,等.核 Fukunaga-Koontz 变换检测红外小目标[J].*红外与毫米波学报*, 2008, 27(1): 47-50.
- [4] Liu Z G, Hu X M, Lu J. An improved neural network non-uniformity correction for IRFPA[C]. *SPIE*, 2009, 7383: 788330.
- [5] Meng Wei, Jin Longxu, Li Guoning, *et al.* Application of MTF in remote sensing image restoration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1690-1696.
孟伟,金龙旭,李国宁,等.调制传递函数在遥感图像复原中的应用[J].*红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1690-1696.
- [6] Zhou Huixin, Wei Yajiao, Qin Hanlin. Kalman filtering non-uniformity correction algorithm based on nonlinear model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 378-381.
周惠鑫,魏亚姣,秦翰林.基于非线性模型的卡尔曼滤波非均匀性校正算法[J].*光学学报*, 2009, 29(2): 378-381.
- [7] Zhang Ning, Shen Xiangheng, Ye Lu, *et al.* Influence of high frequency spectrum of photoelectric measurement equipment images to the subjective evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0411002.
张宁,沈湘衡,叶露,等.光电测量设备图像高频频谱对主观评价的影响[J].*光学学报*, 2016, 36(4): 0411002.
- [8] Wu Bin, Ji Hongbing, Li Peng. New method for moving dim target detection based on third-order cumulate in infrared image[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2006, 25(5): 364-367.
吴斌,姬红兵,李鹏.基于三阶累积量的红外弱小运动目标检测新方法[J].*红外与毫米波学报*, 2006, 25(5): 364-367.
- [9] Bar L, Brook A, Sochen N, *et al.* Deblurring of color images corrupted by salt-and-pepper noise[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16: 1101-1111.
- [10] Cai J F, Chan R H, Nikolova M. Two-phase methods for deblurring images corrupted by impulse plus Gaussian noise [J]. *Inverse Problems and Imaging*, 2008, 2(2): 187-204.
- [11] Xiao T, Xu X, Liao K. Characterization of non-linear elasticity and in stability in single-walled carbon nano tubes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, 95(12): 8145-8148.
- [12] Fergus R, Singh B, Hertzman A, *et al.* Removing camera shake from a single photograph[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 787-794.
- [13] He k, Rhemhan C, Rother C, *et al.* A global sampling method for alpha matting[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011: 2049-2056.
- [14] Shahren E, Rajan D, Prince B, *et al.* Improving image matting using comprehensive sampling sets [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013: 636-643.
- [15] Gastal E S L, Oliver M M. Shared sampling for real time alpha matting[C]. *Computer Graphics Forum*. 2010, 29(2): 575-584.

-
- [16] Levin A, Weiss Y, Durand F, *et al.* Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1964-1971.
- [17] Chui C K, Wang J. Wavelet-based minimal energy approach to image restoration [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2007, 23(1): 114-130.
- [18] Pankajakshan P, Kumar V. Detail preserving image information restoration guided by SVM based noise mapping [J]. Digital Signal Processing, 2007, 17(3): 561-577.
- [19] Shang Ling, Liu Chaohui, Zhe Wenji. Optimizing design of baffle in the ground-based IR optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1158-1162.
尚 玲, 刘朝晖, 折文集. 陆基红外探测系统遮光罩优化设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1158-1162.