文章编号:1001-5078(2018)03-0389-07

·图像与信号处理 ·

# 红外视频帧运动模糊复原技术研究

李思俭,樊 祥,程正东,朱 斌

(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:**当前红外空域监测探测系统常用视频的形式存储和传输图像信号,但是视频图像在形成、传输和记录过程中,易受运动模糊和噪声的污染,为了使该系统适用于当前空域形势,提出基于该系统的视频运动模糊复原算法。首先构建基于视频流运动模糊复原模型,综合序列图像各帧之间的互信息,估计有效的点扩散函数,然后描述运动模糊复原流程,提出相应算法,构建各功能模块。操作中视频以降频采样的方式减少计算复杂度,提高图像质量,获取较高复原效果。最后,通过引入主、客观两套评价体系对使用的算法以及其他经典算法作对照,评估复原结果。实验结果表明:复原视频各帧的峰值信噪比达到37,均方误差在9以下,均优于对照算法。基本满足监测系统发现目标,监测空域的要求。

关键词:图像复原;视频;运动模糊;点扩散函数

中图分类号:TP391.4 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2018.03.022

# Restoration technology for infrared video frames with motion blur

LI Si-jian, FAN Xiang, CHENG Zheng-dong, ZHU Bin

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

Abstract: The current infrared detection systems usually use the video to memory and transfer image signals, but when the videos are in the process of formation, transmission and storage, they are easily polluted by motion blur and noise. To solve this problem, a video motion blur restoration algorithm was proposed based on the infrared detection system. Firstly, the video motion blur restoration model was built based on video streaming, and then mutual information of every frame in sequence images is integrated and the effective point spread function (PSF) is estimated. Secondly, the corresponding algorithm is put forward and all the function modules are created through describing the motion blur recovery process. And then, in order to reduce the calculation, the image sequence was sampled with equal interval from the original video, which can enhance the image quality and achieve better restoration effect. Finally, a subjective and an objective evaluation system were introduced to compare this algorithm with two other classical algorithms and evaluate results. The experimental results show that the peak signal-to-noise ratio of each frame in restored video reached 37, and mean square error was below 9, which was superior to the contrast algorithm. The results basically meet the requirements of detection system in discovering targets and monitoring the air-space.

Key words: image restoration; video; motion blur; PSF

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61307025);安徽省自然科学基金项目(No. 1308085QF122)资助。 作者简介:李思俭(1992 -),硕士研究生,主要从事红外图像复原方面的研究工作。E-mail:lisijian000@163.com 收稿日期:2017-06-25;修订日期:2017-08-15

#### 1 引 言

随着各种无人飞行器技术的发展,无人机的武 器化研究愈发重要,针对这类飞行器的红外对空探 测系统的研究和改进工作就日益受到研究人员的重 视<sup>[1]</sup>。该系统以被动方式工作,输出红外视频,利 用图像处理方法从背景中检测并识别图像中的目 标<sup>[2]</sup>。为有效提高红外探测系统的探测距离,需要 为空域检测及目标识别处理提供充分的响应时 间<sup>[3]</sup>。该系统探测的目标多为空中飞行器,运动速 度相对较快,留给系统的探测窗口时间有限,这就要 求系统时刻处于360°全空域运动搜索过程中,使得 探测器与目标之间的相对运动较为剧烈<sup>[4]</sup>。综合 这些因素,红外图像在形成、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<sup>[5]</sup>。运动 模糊图像复原算法大致可以分为时间域、空间域和 频率域三个大的方向,但是应用于红外空域监测系 统时却各有缺陷,红外相机需要始终以较快的速度 扫描空域,使采集到的目标图像产生了较为严重的 运动模糊难以分辨,因此已有的目标检测算法就不 能满足使用条件<sup>[6-8]</sup>;由于近些年空气质量和天气 情况恶化,雾、霾等极端天气在全年天气中占比越来 越高,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,这又对算法的 处理速度提出较高要求;存在运动模糊的目标具有 拖尾效应,目标经常存在中变形的问题,这就给目标 检测造成困难<sup>[9]</sup>。

针对这些问题,本文提出在对采集到的红外视 频处理过程中引入运动模糊复原技术,并利用多帧 图像之间的相关信息,从中提取图像的先验信息并 相互补充以提高复原效果并满足后续算法的使用条 件,从而再对目标图像做滤波处理,进一步地提高目 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似为匀速直线运 动,或者可以分解为多个匀速直线运动<sup>[10-12]</sup>。

如图 1 所示,图像退化过程被建模为一个退化 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f(x,y)。通常, 我们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f(x,y)就会 越接近 f(x,y)。



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由下式给出:

g(x,y) = h(x,y) \* f(x,y) + n(x,y) (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。

因为空间域中的卷积等于频率域中的乘积,因 此可以把式(1)中的模型等价于频率域表示:

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

式(2)中的大写字母表示式(1)中对应项的傅 里叶变换。

# 3 点扩散函数估计方法

3.1 系统运动模糊模型

上文简要阐述了运动模糊的一般原理,具体到本文中的对空侦察系统对飞行器的探测过程时,先 以探测器静止,飞行器运动为例。当飞行器以速度 V在空域中飞行时,如图2所示,飞行器从A点以速 度V运动至B点,则在CCD感光面上A的像点a以 速度v运动到B的像点b,根据成像原理,有:

$$v = \frac{f}{H}V \tag{3}$$

式中,V为飞行器飞行速度;v为飞行器的像在 CCD 感光面移动的速度;H为飞行高度;f为探测器镜头 的焦距。



Fig. 2 Basic model of digital image degradation and restoration

在 CCD 相机的一个积分时间  $\Delta t$  内,像移的距离  $\Delta l = \Delta t \times v$ 。

像移  $\Delta l$  造成了运动模糊,  $\Delta l$  越大则运动模糊 就越严重, 当探测系统工作时, 飞行器的飞行速度 V 是不可控量, 则要降低  $\Delta l$  的一个方法就是尽量减小 积分时间  $\Delta t$ , 这就要选择高帧频的 CCD, 这将会使 整个系统的成本和造价抬高, 而且积分时间减小后 就要求目标的红外辐射足够强, 这就使系统的探测 距离随之降低。以上只是探测器静止的情况, 实际 应用中探测器为了探测整个空域还会以一定的角速 度做 360°的转动, 这就进一步的增大了  $\Delta l$ 。

#### 3.2 点扩散函数的估计

由于图像恢复的过程可以看作图像退化的反过 程,通过已知g(x,y)和有关h(x,y),n(x,y)的一 些先验知识,计算 $\hat{f}(x,y)$ 的过程,所以在对模糊图 像进行复原处理之前首先需要能够准确设置点扩散 函数(PSF)。

当空中目标以图 2 所示的方式运动时,采集到 的运动模糊图像为:

$$g(x,y) = \int_{0}^{1} f[x - x_{0}(t), y - y_{0}(t)] dt \qquad (4)$$

其傅里叶变换为:

$$G(u,v) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} g(x,y) e^{-j2\pi(ux+vy)} dxdy$$
(5)

根据傅里叶变换的位移定理,式(5)变换为:

$$G(u,v) = \int_{0}^{T} F(u,v) e^{-j2\pi [ux_{0}(t) + vy_{0}(t)]} dt$$
$$= \int_{0}^{h} (u,v) \int_{0}^{T} e^{-j2\pi [ux_{0}(t) + vy_{0}(t)]} dt$$
(6)

令:

$$H(u,v) = \int_{0}^{T} e^{-j2\pi [ux_{0}(t) + vy_{0}(t)]} dt$$
 (7)

则有:

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v)$$
(8)

由式可知,当 $x_0$ 和 $y_0$ 已知时,点扩散函数 PSF 可以直接计算出来。由于本文中涉及的探测系统 的工作方式是水平 360°旋转,所以由探测器旋转 所产生的运动模糊只存在于x方向,移动距离为  $\Delta l$ ,有:

$$\begin{cases} x_0(t) = \frac{\Delta l}{T}t \\ y_0(t) = 0 \end{cases}$$
\#\exp\delta\delta(9)\exp\delta\delta\delta\delta\delta\delta)\exp\delta\delta\delta\delta\delta
(9)

$$H(u,v) = \int_{0}^{T} e^{-j2\pi u x_{0}(t)} dt$$
$$= \int_{0}^{T} e^{-j2\pi u \frac{\Delta l}{T}t} dt = \frac{T}{\pi u \Delta l} \sin(\pi u \Delta l) e^{-j\pi u \Delta l}$$
(10)

#### 4 视频图像复原算法

视频图像又称动态图像或者序列图像,它是若 干幅有序排列的静态图像按照一定的关系连续变换 产生的,是二维图像在一维时间轴上构成的序列图 像<sup>[13]</sup>。动态图像中的一帧就是指相对静止的一幅 图像,通过确定每秒钟播放的单帧静止图像数量确 定视频图像的刷新速度,利用视觉暂留原理,使人眼 无法辨别单幅静态图像,看似连续平滑的视觉效果。 运动模糊复原的一个重要的步骤就是构建点扩散函 数(PSF),对于单帧的运动模糊图像由于获取的先 验知识不足,预估的点扩散函数就不准确,复原效果 自然不会很好<sup>[14]</sup>。为了克服这一问题,本文的方案 是先用红外摄像机采集目标视频,然后通过对序列 图像各帧之间的相关信息来估算点扩散函数,再用 点扩散函数进行反卷积运算复原图像。

4.1 视频影像分帧处理

由于摄像机的帧频较高,计算机运算速率难以 满足,本文通过等间隔抽取的方式对视频分帧处理, 从而降低处理数据量,达到用普通计算机模拟高性 能计算机的目的。

目前红外摄影机采集到的图像主要保存为 AVI 格式、MOV 格式和 RMVB 格式,帧频为 30 f/s 或 60fps(frames per second),单帧图像常用格式为 JPEG 格式、BMP 格式、PNG 格式等。本文实验用相 机的图像格式 AVI(Audio Video Interleaved)视频和 BMP(Bitmap)图片,其中 BMP 又叫位图格式,图像 的位深可选,不存在任何压缩,最大限度保留图像原 始信息。AVI 格式的全称为音频视频交错格式,其 中包括文件头、数据块和索引块,每帧数据按时间顺 序存储,调用方便且图像质量很高,缺点就是每帧的 数据量大且帧频较高导致短视频占用很大的体积, 对此,我们在复原过程中采用等间隔采样分帧,将视 频降频处理为序列图像再复原,从而满足计算机处 理条件<sup>[15]</sup>。

# 4.2 图像预处理

视频影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项,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<sup>[16]</sup>。

维纳滤波是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 *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,这种误差度量由式(11)给出:

$$e^{2} = E\{(f - \hat{f})^{2}\}$$
(11)

其中, *E*{·} 是参数的期望值。误差函数的最小值 在频率域中由式(12)给出:

$$\begin{split} \hat{F}(u,v) &= \bigg[ \frac{H^*(u,v)S_f(u,v)}{|S_f(u,v)| + K_n(u,v)} \bigg] G(u,v) \\ &= \bigg[ \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + S_n(u,v)/S_f(u,v)} \bigg] G(u,v) \\ &= \bigg[ \frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + S_n(u,v)/S_f(u,v)} \bigg] G(u,v) \end{split}$$

$$(12)$$

当处理白噪声时,谱 |N(u,v)|<sup>2</sup> 是一个常数, 当未退化图像的功率谱未知或不可估计时,用式 (13)来近似式(12):

$$\hat{F}(u,v) = \left[\frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + K}\right] G(u,v)$$
(13)

式中,K是一个加到  $|H(u,v)|^2$  的所有项上的特定 常数。

4.3 算法设计流程

视频图像是静止图像每秒连续变换特定帧数, 因此对视频模糊图像的处理,可以转换为静止图像 的处理,我们将视频模糊图像处理过程分为三个具 体的步骤,具体算法设计流程如图3所示。



图 3 算法设计流程 Fig. 3 Flow chart of calculation

①将视频图像转化为一序列单帧静止图像进行 保存;

②利用上文中测得的 PSF,依次对单帧图像序 列进行复原处理;

③对处理完成的单帧图像序列,采用函数转化

为视频,实现视频模糊图像复原的效果。

#### 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的四旋翼无人机来模拟大型 飞行目标(文中以美国的"捕食者"无人侦察机为 例),具体参数对比如表1所示。

表1 参数对照表

Tab. 1 Control of parameters

	实验场地	翼展/m	实验距离/m
四旋翼(实测)	某小学	0.45	366
"捕食者"(模拟)	某空域	14. 85	12078

实验中,以焦距为 100 mm、像元尺寸为 17 μm 的长焦红外摄影机作为视频采集设备,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。 无人机起飞位置距摄影机为 366 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 379 m,根据相机成像原 理可以算得无人机在感光元件上成像大小约为 0.1187 mm,约占 7 个像元。

利用本文算法对采集到的红外视频进行处理, 视频的帧频为30 f/s,编码格式为 RGB(32bit),其中 单帧图像尺寸为640×480 像素,通过两组不同背景 下包含目标的红外图像序列来对本文算法进行处理 实验。图4 为两组不同天空背景红外目标的原始图 像序列与复原处理后的图像序列的效果图,其中白 色光斑为无人机目标。



Fig. 4 The comparison of the image sequence restoringeffect

通过图 4 中模糊图像和复原图像的对比,凭肉 眼可以看出,经过运动模糊复原处理之后的序列图 像中的目标相对于背景更加凸显,边缘更加清晰,并 且复原处理后的背景边缘形状也更加分明。为了进 一步验证复原处理对图像质量的提升效果,鉴于以 上图像评价较为主观,使用峰值信噪比 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)和均方差 MSE(Mean Square Error)这一对判定指标对复原处理效果做进一步证 明,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<sup>[17]</sup>。

若模糊图像为*I*,复原图像为*K*,那么它们的均 方差 MSE 定义为:

$$E_{MS} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i,j) - K(i,j)\|^2 \quad (12)$$

峰值信噪比 PSNR 定义为:

$$R_{\rm PSN} = 10 \times \log_{10}\left(\frac{\rm MAX_{I,K}}{\rm MSE}\right)$$
(13)

其中, MAX<sub>1,K</sub> 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。

结构相似性(Structural Similarity)是衡量两幅 图像相似度的指标,自然图像具有极高的结构性,表 现在图像的像素间存在着很强的相关性,尤其是在 空间相似的情况下。这些相关性在视觉场景中携带 着关于物体结构的重要信息。我们假设人类视觉系 统主要从可视区域内获取结构信息。所以通过探测 结构信息是否改变来感知图像失真的近似信息。

完整的相似测量函数为:

SSIM(x,y) = f[I(x,y),c(x,y),s(x,y)](14)

结构相似性 SSIM 的范围是(-1,1),当两张 图-模-样时,SSIM = 1。

根据经验公式,我们应用平均 SSIM 指数 (MSSIM)作为整个图像的估计质量评价:

$$\mathrm{MSSIM}(x,y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{i=1}^{N} \mathrm{SSIM}(x_{i},y_{i}) \quad (15)$$

为了验证运动模糊复原技术对视频图像序列的 作用效果,将本文所用方法与常用的传统检测方法, 即高通滤波算法(high pass filtering, HPF),作对比 实验如下<sup>[18]</sup>。 以红外相机静止状态下采集的视频,抽取同一序列图像为标准图像,对相机以 30°/s 的速度旋转 产生的两对模糊图像分别用本文算法和高通滤波算 法处理后求出各自 MSE 和 PSNR 值,测得的两组图 像序列的 MSE 和 PSNR 曲线如图 5 所示。



图 5 PSNR 对照曲线及 MSE 对照曲线 Fig. 5 The PSNR control curves and the MSE control curves

图 5 为这两种方法分别应用于同一图像序列的 复原效果参数对比,其中图(a)中的实线为本文算 法的 PSNR 曲线,曲线上的每一个点均高于对照组 的 HPF 算法,图(b)中的实线为本文算法的 MSE 曲 线,曲线上的每个点都低于对照组的 HPF 算法。

从图 5 中的数据可以看出,相机以 30°/s 的转速 工作时,使用本文的复原算法的 PSNR 值都大于高通 滤波算法的 PSNR 值,MSE 值都小于对照算法的 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,因此可以证明实 验采集的运动模糊的视频序列图像经去模糊复原处 理后,绝大多数的帧图像质量得到了提高。

下面我们换一个评价参数,用前文介绍过的 MSSIM 对复原图像进行评价,观测复原效果如图 6 所示。



Fig. 6 The MSSIM control curves

从图 6 中的数据可以看出,相机以 30°/s 的转 速工作时,使用本文的复原算法的 MSSIM 值基本稳 定在[0.95,0.96]中,并且使用对照的全局维纳滤 波算法复原后图像序列的 MSSIM 值波动较大,波动 范围在[0.91,0.94],均小于本文算法,这就说明经 本文算法复原后的图像与清晰图像的相似度更高, 复原效果更好,绝大多数的帧图像质量得到了提高, 这也与图 4 中人眼的观察结果相匹配。

# 6 结 论

本文在分析了红外空域监测系统工作过程中遇 到的问题和困难后,针对当前算法中存在的缺陷,提 出将多帧信息融合与点扩散函数估计的方法引入该 空域监测系统的视频运动模糊复原问题中,并将维 纳滤波算法用于原始图像序列的预处理,实现去除 运动模糊、增强目标的效果,从而提高系统对空域目 标的监测效果。通过搭建模拟实验平台,将视频数 据处理后做对比分析以及引入 PSNR 和 MSE 等评 价参数与传统算法相互验证等方法来探索解决方 案,验证算法。实验结果表明:(1)与采集到的原始 视频相比,经过运动模糊复原技术处理后的图像序 列中目标与背景的边缘更加清晰,同时目标的亮度 更高;(2)在与高通滤波算法的对比中,本文算法在 转台转速为 30°/s 的实验条件下, PSNR 值达到 37 以上, MSE 值不高于 9, 均优于高通滤波算法, 且 MSSIM 值也均高于对照组。因此将改进后的运动 模糊复原技术引入空域监测系统能够提高图像质 量,对于提高系统的作用距离和监测效果具有现实 意义和应用前景。

### 参考文献:

[1] LU Huimin, XU Ming, LI Xun. Image deblurring with adaptive signal-noise ratio estimation for computation imaging system [J]. Acta Optica Sinica,2014,34(8):119 – 126. (in Chinese)

卢惠民,徐明,李迅.用于计算成像系统的基于信噪比 自适应估计的图像去模糊研究[J].光学学报,2014, 34(8):119-126.

[2] HOU Jie, XIN Yunhong. Detection of infrared small targetbased on the wavelettransformation and image enhancement technology[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(6):683 - 688. (in Chinese)
侯洁,辛云宏. 基于小波变换与图像增强技术的红外

小目标检测[J]. 激光与红外,2013,43(6):683-688.

- [3] 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. (in Chinese)
  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.
- [4] LIU Zhenguo, HU Xiaomei, LUJin. An improved neural network non-uniformity correction for IRFPA [C]. SPIE, 2009,7383:788330.
- [5] ZHANG Jiao, LI Junshan, SUI Zhongshan, et al. Blind turbulence degraded image restoration algorithm basedon hybrid regularization constraint[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7):884-888. (in Chinese)
  张姣,李俊山,隋中山,等. 混合正则化约束的湍流退
  化图像复原算法[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 884-888.
- [6] ZHANG Dongxiao, et al. Study on background radiation measurementin the adaptive infrared stealth[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(8):964 969. (in Chinese) 张冬晓,等. 自适应红外隐身背景辐射测量研究[J]. 激光与红外,2015,45(8):964 969.
- [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. (in Chinese) 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]. Infrared Millim. Waves, 2014, 43 (5): 1690 1696. (in Chinese)

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, 2014, 43 (5):1690-1696.

- [9] Bar, ABrook, NSchen, et al. Deburring of color images corrupted by salt-and-peppernoise [J]. IEEE Trans. Image Process, 2007, 16:1101 – 1111.
- [10] J Cai, R Chan, M Nikolova. Two-phase methods for deburring images corrupted by impulse plus gaussian noise
   [J]. AIMS Journal on Inverse Problems and Imaging, 2008,2(2):187-204.
- [11] TXiao, XXu, and KLiao. Characterization of non-linearelasticityandinstability in single-walled carbonNano tubes
   [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95:8145.
- [12] ZHANG Ning, XIN Yunhong. Infrared small target detection based on wavelet transformand improved Top-Hat filter[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7):884 888. (in Chinese)
  张宁,辛云宏. 基于小波变换和改进 Top-Hat 滤波的红 外小目标检测[J].激光与红外, 2016, 46(11):
- 外小百标位测[J]. 激光与红外, 2016, 46 (11): 1432 – 1436. [13] Hek, Rhemhan C, Rother C, et al. A global sampling
- method for alpha matting[C]. Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), IEEE, 2011;2049 – 2056.

- [14] Shahren E, Rajan D, Prince B, et al. Improving image matting using comprehensive sampling sets[C]. Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), IEEE, 2013:636 – 643.
- [15] Gastal E S L, Oliver M M. Shared sampling for realtime alpha matting [C]. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, 2010, 29(2):575 - 584.
- [16] Levin A, Weiss Y, Durand F, et al. Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms [C]. IEEE, 2009:1964 – 1971.
- [17] NAN Yibing, GAO Kun, NI Guoqiang. Hyperspectral image blind correction method based on band selection and PSF estimation [J]. Infrared Millim. Waves, 2016, (6): 715 722. (in Chinese)
  南一冰,高昆,倪国强. 基于波段选择估计 PSF 的高光 谱图像运动模糊盲校正方法[J]. 红外与毫米波学报, 2016,(6):715 722.
- [18] FENG Yunsong, LU Yuan, FAN Bin, et al. Realizationand analysis of a dynamic infrared stealth technique[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7):884-888. (in Chinese) 冯云松, 路远, 范彬, 等. 一种动态红外隐身技术的实 现与分析[J]. 激光与红外, 2007, 37(6):558-560.