

基于噪声分析和稀疏正则化的图像盲复原方法

康致力, 安博文*, 潘胜达, 赵明
(上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306)

摘要:在海事搜救过程中, 机载红外相机拍摄的红外图像由于直升机振动、气流扰动、高速飞行以及红外相机摆动等因素, 严重影响图像质量. 根据直升机载红外相机成像特点, 提出了一种基于噪声分析和稀疏正则化的图像盲复原方法. 该方法首先分析了成像过程中的噪声分布, 并对噪声进行预处理, 再根据稀疏表达理论, 用图像边缘的稀疏先验信息指导点扩散函数复原, 接着通过非盲复原方法得到目标图像, 将目标图像作为下一次迭代的输入图像, 如此循环迭代得到清晰图像. 最后, 对仿真模糊图像和实拍模糊图像进行了复原实验. 实验结果表明这种方法能有效改善图像质量, 并且在处理实拍运动模糊图像时, 相比其他复原方法效果更好.

关键词:海事搜救; 红外图像; 噪声分析; 稀疏正则化; 盲复原

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

A blind restoration method for blurry images based on noise analysis and sparsity regularization

KANG Zhi-Li, AN Bo-Wen*, PAN Sheng-Da, ZHAO Ming
(Dept. of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In the course of maritime search and rescue, infrared image captured by helicopter airborne infrared camera has a poor image quality because of the helicopter vibration, air turbulence, high speed flight and infrared camera sweeping. According to the imaging characteristics of the helicopter airborne infrared camera, a blind restoration method for blurry images based on noise analysis and sparsity regularization was proposed. Firstly, noise distribution in the imaging process is analyzed and the noise is pre-processed. Then, according to the sparse representation theory, sparse prior information of the edges in the images is used to guide the restoration of PSF. After that, we can obtain the target image through non-blind method. The target image will be used in the next iteration. The iteration will not end until a clear image is obtained. Experiments were performed both on simulated blurry images and real blurry images. Experimental results show that our method can effectively improve the image quality. Compared with other methods, our method has a better effect on real blurry images.

Key words: maritime search and rescue, infrared image; noise analysis, sparsity regularization, blind restoration

PACS: 07.05.Pj

引言

机载红外相机在成像过程中会产生模糊, 使图像质量降低, 因此要对其进行复原. 但是, 直升机载红外相机成像受到很多因素影响, 难以用一个具体

的点扩散函数(Point Spread Function, 简称 PSF)来描述图像退化的过程. 这是一类图像盲复原问题, 由于对成像过程的先验知识掌握不足, 所以在求解过程中需要用正则化的方法来增加约束条件. 本文提出了一种基于噪声分析和稀疏正则化的图像盲复原

收稿日期: 2016-08-08, 修回日期: 2016-12-10

Received date: 2016-08-08, revised date: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(61171126); 上海市重点支撑项目(12250501500)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61171126); Key project of Shanghai (12250501500)

作者简介(Biography): 康致力(1992-), 男, 上海市人, 研究生, 硕士, 主要研究领域为图像识别与信息处理, E-mail: kangzhili@stu.shmtu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: anbowen@sina.com

方法来达到改善图像质量的目的。

在图像复原研究中有许多经典算法,比如维纳滤波法、RL (Richardson-Lucy) 迭代法、约束最小二乘方滤波法、估计参数盲复原法等。这些方法各有利弊,但最关键的问题是这些算法都要基于一些先验知识,比如运动模糊角度和尺度。然而在直升机载红外相机成像实验中,即使知道了直升机的飞行速度、高度和角度,红外相机还一直处于摆扫状态,因此难以确定具体的 PSF。

文献[1]提出了一种估计运动模糊参数的方法。首先运用倒频谱和 Radon 变换确定模糊角度,再通过模糊尺度迭代与维纳滤波复原图像后做边缘检测,并累计边缘数从而确定模糊尺度。该方法简单、有效,但是仅适用于匀慢速直线运动造成的模糊图像,不适用于运动速度快而造成的模糊图像。

盲复原算法就是在 PSF 部分可知或未知的情况下求解出清晰图像的方法,这是一种“病态问题”,在求解过程中经常用正则化的手段增加一些约束条件。You 等人^[2]提出了一种基于 H1 范数的图像盲复原正则化方法。Chan 等人^[3]将全变差范数应用于盲复原中,较好地保护了图像的边缘信息。Fergus 等人^[4]提出了一种基于贝叶斯的单幅运动模糊图像盲复原方法。Krishnan 等人^[5]提出一种基于比值稀疏正则化的方法,可以复原各种退化类型的图像。文献[6]在稀疏表示理论的框架下,提出了多正则优化的方法,使图像复原问题变为一个全局优化问题。文献[7]提出了一种稀疏表示和 Weber 定律相结合的盲复原方法。文献[8]用自然图像边缘稀疏信息作为先验知识,改善了大气湍流影响的天文观测图像的质量。文献[9]针对盲复原方法中出现的振铃、拖尾、阶梯等现象,提出了一种非凸高阶全变差正则化自然光学图像盲复原模型。文献[10]为了使模糊图像边缘区域和平滑区域有更好的复原效果,提出了一种基于 Tikhonov 和全变分正则化混合约束的模型。

在先前的研究中,最突出的问题是复原后的图像会损失一些细节,这与算法本身对噪声的敏感度以及对先验信息掌握不足有关系。由于机载红外相机实际拍摄的图像存在较严重的模糊和噪声,应该首先对图像噪声进行分析与处理。图像盲复原算法的研究是图像复原领域的一个重要方向,因为对实际拍摄的模糊图像,重新构建图像退化的具体过程是非常困难的,我们希望直接从模糊图像入手,根据一些约束条件得到清晰图像。本文根据直升机载红

外相机成像特点,首先对噪声分布进行分析,通过稀疏先验信息复原点扩散函数,再用非盲复原方法得到目标图像,将其作为下一次迭代的输入图像,反复迭代得到清晰图像。

1 实验过程与数据

实验中将红外相机(波长范围 $7.5 \sim 14 \mu\text{m}$)与摆扫平台一起装载在直升机侧边,并用惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,简称 IMU)记录下所有的飞行数据。摆扫平台示意图如图 1 所示:

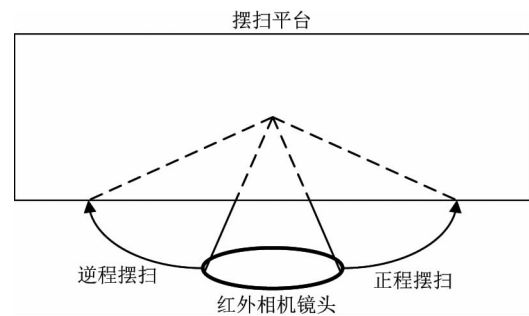


图 1 摆扫平台示意图

Fig. 1 Diagram of sweeping platform

1.1 无摆扫情况下成像数据分析

本次实验的成像系统示意图如图 2 所示,光学系统焦距为 $f = 70 \text{ mm}$,像元大小为 $17 \mu\text{m}$,像元中心距 $d = 17 \mu\text{m}$ 。按照光学系统以及探测器像元大小可计算得出成像系统沿扫描方向上和沿线列方向上的瞬时视场角为:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{d}{2(f + d/2)}\right) = 0.014 \quad (1)$$

直升机前向飞行过程中,飞行高度 $H = 150 \text{ m}$,飞行速度 $v = 90 \text{ km/h}$,长波红外探测器曝光时间为 10 ms ,目标景物在探测器平面上的像移数可按照公式(2)得出:

$$N = \frac{vt}{H} \cdot \frac{f}{d} \approx \frac{vt}{H \tan\theta} = \frac{90 \text{ km/h} \cdot 10 \text{ ms}}{150 \text{ m} \cdot \tan(0.014^\circ)} \approx 7 \quad (2)$$

因此,在无摆扫情况下,运动角度为直升机飞行方向,实测为北偏西 15° ,运动尺度为 7 个像素。

1.2 正程摆扫情况下成像数据分析

正程摆扫情况下,其扫描速度实测为 $W = 18^\circ/\text{s}$,长波红外探测器曝光时间为 $t = 10 \text{ ms}$,在一帧图像曝光时间内,目标景物在探测器平面上的像移数可按公式(3)计算:

$$N = \frac{Wt}{\theta} = \frac{18^\circ/\text{s} \times 10 \text{ ms}}{0.014^\circ} \approx 13 \quad (3)$$

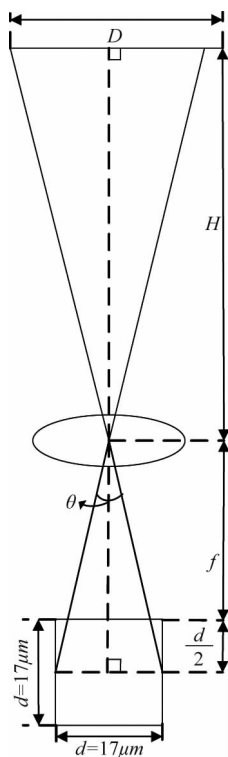


图2 成像系统示意图
Fig.2 Diagram of imaging system

因此,正程摆扫产生的像移量可以按照图3进行合成,其中,运动角度为 28° ,运动尺度为15个像素.

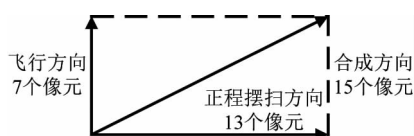


图3 正程摆扫示意图
Fig.3 Diagram of forward sweeping

1.3 逆程摆扫情况下成像数据分析

逆程摆扫情况下,其扫描速度实测约为 $60^\circ/\text{s}$,按照公式(4)可以计算得到逆程摆扫情况下目标景物在探测器平面上的像移数:

$$N = \frac{Wt}{\theta} = \frac{60^\circ/\text{s} \times 10 \text{ ms}}{0.014^\circ} \approx 43 \quad (4)$$

逆程摆扫产生的像移量可以按照图4进行合成,其中,运动角度为 10° ,运动尺度为44个像素.

2 噪声分析

假设直升机振动引起的像移量和直升机振动具有相同的概率分布.通过IMU获得直升机在各个时

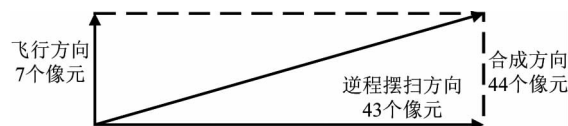


图4 逆程摆扫示意图
Fig.4 Diagram of inverse sweeping

刻的三轴姿态角、角速率与加速度,并通过正态性检验的QQ图法(Quantile Quantile Plot)检验由直升机振动引起的噪声是否近似服从正态高斯分布.

在直升机悬停时选取一点的坐标作为参考坐标,不妨设为 $O(0,0,0)$,在 t 时刻获得坐标 $O'(X_t, Y_t, Z_t)$,计算 O' 与 O 的距离 $\|d\|$, $\|d\|$ 定义为:

$$\|d\|^2 = (X_t, Y_t, Z_t) \cdot (X_t, Y_t, Z_t)^T \quad (5)$$

利用QQ图法检验样本数据是否近似服从正态分布,只需看QQ图上的点是否近似地在一条直线附近,具体算法可以参考文献[11-12].图5是直升机悬停姿态样本数据与标准正态分布QQ图,从图5中可知,样本点为直升机悬停时由于振动造成的坐标偏移量数据分位数,这些样本点分位数近似排列在QQ图中一条直线上.因此,我们认为由于直升机振动造成的噪声近似服从高斯正态分布,进一步可以求得均值为3.0815,方差为1.9538.

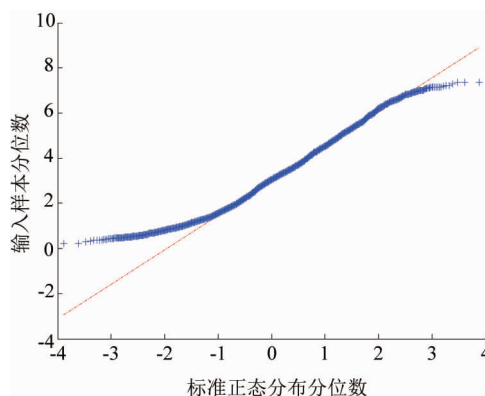


图5 直升机悬停姿态样本数据与标准正态分布QQ图
Fig.5 Sample data of helicopter hover gestures with the standard normal distribution QQ plot

3 稀疏正则化盲复原方法

近几年来,随着图像稀疏表达理论的提出,人们发现自然图像突变场景比重小的特点^[8],用图像边缘的稀疏先验信息指导图像复原,能复原出较多的细节.

Krishnan 等人^[5]研究发现图像的 l_1/l_2 范数比

l_1 范数和 l_2 范数更适合作为盲复原算法中的约束条件,因此本文也选择 l_1/l_2 范数作为图像梯度的稀疏约束项. 图像的退化模型由公式(6)给出:

$$g = f * H + n \quad (6)$$

其中, g 为观测到的模糊图像, f 为需要获得的清晰图像, H 为点扩散函数, n 为噪声. 根据第 2 节的分析, 我们已经得到噪声 n 近似服从高斯分布, 并用均值滤波器对噪声图像做预处理. 在盲复原过程中, 进行稀疏正则化约束相当于对图像做高通滤波处理, 定义正则化算子 $\nabla_x = [1, -1]$ 以及 $\nabla_y = [1, -1]^T$, 用正则化算子得到高频图像 $y = [\nabla_x g, \nabla_y g]$, 该方法的模糊复原模型为:

$$\min_{x,k} \lambda \|x * h - y\|_2^2 + \frac{\|x\|_1}{\|x\|_2} + \psi \|h\|_1 \quad (7)$$

其中, x 为未知的高频锐化图像, h 为未知的点扩散函数, $\|\cdot\|_1$ 与 $\|\cdot\|_2$ 分别表示 l_1 范数和 l_2 范数, λ 和 ψ 为权重, 本文中取 $\lambda = 200$, $\psi = 0.001$, 并且上式中 h 满足 $h \geq 0$, $\sum_i h_i = 1$. 接下来用迭代的方法获得 x 和 h .

3.1 迭代图像 x

迭代图像 x 的目标函数可以用公式(8)表述:

$$\min_x \lambda \|x * h - y\|_2^2 + \frac{\|x\|_1}{\|x\|_2} \quad (8)$$

由于 $\|x\|_1/\|x\|_2$ 使函数非凸, 难以求解最小值. 因此在迭代图像 x 时采用两层循环, 一层循环迭代 $\|x\|_2$, 另一层循环在固定 $\|x\|_2$ 的基础上迭代 $\|x\|_1$, 本文中每一层循环次数设置为 2 次. 在固定分母 $\|x\|_2$ 后就可以将问题转化为求解凸函数问题, 转化后的目标函数为:

$$\min_x \lambda \|Hx - y\|_2^2 + \|x\|_1 \quad (9)$$

用迭代收缩阈值算法^[13] (Iterative Shrinkage Threshold Algorithm, 简称 ISTA) 求解目标函数(9).

3.2 迭代点扩散函数 h

迭代点扩散函数 h 的目标函数可以用公式(10)表述:

$$\min_h \lambda \|x * h - y\|_2^2 + \psi \|h\|_1 \quad (10)$$

其中 h 满足 $h \geq 0$, $\sum_i h_i = 1$. 目标函数(10)可以用迭代加权最小二乘法^[14] (Iterative Re-weighted Least Squares, 简称 IRLS) 求解.

3.3 图像复原

通过迭代得到点扩散函数后, 用非盲复原算法得到复原后的图像. 本文参考了 Krishnan 等人^[5] 的算法, 使点扩散函数较小的估计误差不会产生很大的影响, 算法的代价函数为:

$$\min_u \alpha \|u * h - g\|_2^2 + \|\nabla_x g\|_1 + \|\nabla_y g\|_1 \quad (11)$$

其中, u 是当前估计的复原图像, ∇_x 和 ∇_y 是正则化算子, α 为权重, 本文中取 $\alpha = 3000$. 将得到的图像 u 作为下一次迭代的输入, 重复以上 3 个步骤, 直到满足迭代次数为止, 本文中设置迭代次数为 20 次.

4 实验结果与分析

本文分别做了仿真模糊图像复原实验与实拍模糊图像复原实验. 在仿真模糊图像复原实验中, 由于有清晰图像作为参考, 本文用峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, 简称 PSNR) 作为客观质量评价方法, PSNR 的计算方法如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - \hat{g}(i,j)]^2} \right) \quad (12)$$

其中, M 和 N 分别是图像的长度和宽度, $g(i,j)$ 和 $\hat{g}(i,j)$ 分别是原始图像和被评价图像在点 (i,j) 处的像素值. PSNR 值越大说明图像质量越好.

而在实拍模糊图像复原实验中, 由于没有清晰图像作为参考图像, 本文用灰度平均梯度 (Gray Mean Gradient, 简称 GMG) 作为客观质量评价方法, GMG 的计算方法如下:

$$\text{GMG} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}{2}} \quad (13)$$

其中, M 和 N 分别是图像的长度和宽度, $\Delta x = g(i+1,j) - g(i,j)$, $\Delta y = g(i,j+1) - g(i,j)$. GMG 是将图像长度和宽度方向上的相邻像素灰度值做差后求平方再求均方根值, 它能较好地反映图像的对比度和纹理变化特征, 其值越大表示图像质量越好.

4.1 仿真模糊图像复原实验

仿真模糊图像复原实验选用了红外相机拍摄的清晰建筑物图像. 首先对图像做运动角度为 30° , 运动尺度为 10 个像素的运动模糊处理, 并根据第 2 节的分析对图像添加高斯噪声. 图 6 是仿真运动模糊图像复原实验结果图. 图 7 是用本文方法估计的点扩散函数.

表 1 是红外清晰建筑物仿真模糊图像复原实验中各复原结果的 PSNR 值与 GMG 值. 在仿真模糊图像复原实验中计算 GMG 值是为了给之后进行的实拍模糊图像复原实验做参考. 其中 RL 迭代次数为 15 次.

从 PSNR 值上我们看出, 除了自相关法的维纳

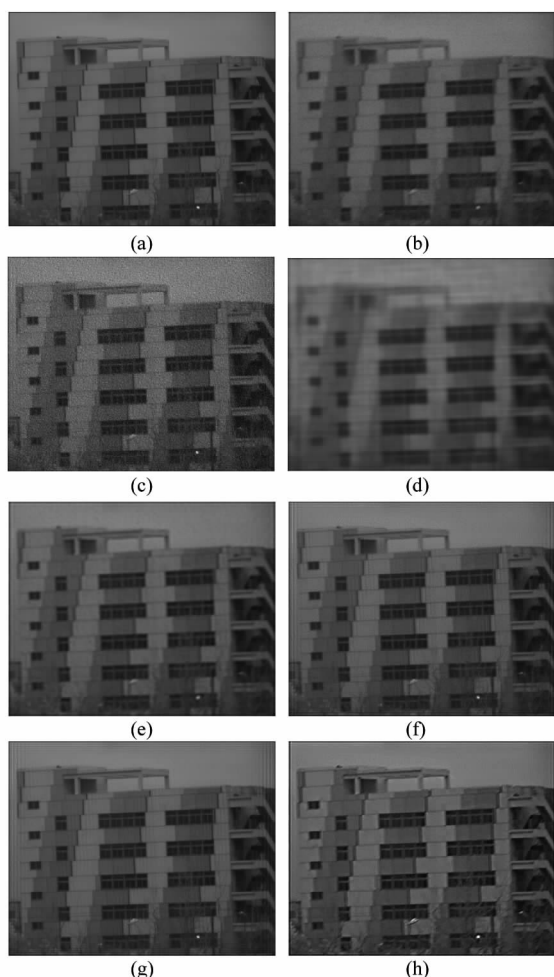


图6 (a)原始图像(b)仿真模糊图像(c)维纳滤波(估计参数法)(d)维纳滤波(自相关法)(e)约束最小二乘方滤波(f)RL迭代(g)估计参数盲复原(h)本文方法

Fig.6 (a) original image (b) simulated blurry image (c) Wiener filter (parameter estimation method) (d) Wiener filter (autocorrelation method) (e) constrained least squares method (f) RL method (g) parameter estimation blind restoration (h) our method

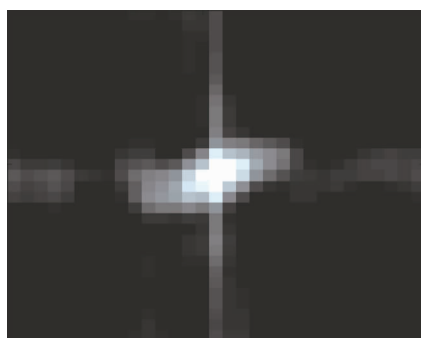


图7 仿真模糊图像点扩散函数估计
Fig.7 PSF estimation of the simulated blurry image

滤波算法不能改善图像质量,其他算法都能获得质量更好的图像.但是图像质量更好不能代表图像轮

表1 仿真模糊图像复原实验各复原结果 PSNR 值与 GMG 值

Table 1 PSNR and GMG values of each method in simulated blurry image restoration

图像	PSNR (dB)	GMG
原始图像	-	3.018 2
仿真模糊图像	31.383 8	1.670 9
维纳滤波(估计参数法)	31.856 6	3.003 0
维纳滤波(自相关法)	25.0889	1.322 8
约束最小二乘方滤波	34.336 8	1.895 4
RL 迭代	37.8597	3.360 0
估计参数盲复原	38.655 4	4.207 9
本文方法	32.209 3	3.024 3

廓越清晰.比如,约束二乘方滤波算法得到的复原图像 PSNR 值大于仿真模糊图像,但 GMG 值却小于原始图像,这说明该方法得到的结果与原始图像相差不大,但是图像细节并没有得到增强.本文方法得到的复原图像 GMG 值与原始图像相差不大,说明大部分细节已经被复原.而 RL 迭代和估计参数盲复原算法得到的复原图像 GMG 值超过了原始图像,这说明复原图像中可能还存在振铃现象.

4.2 实拍模糊图像复原实验

本文第一节中已经估计了无摆扫、正程摆扫和逆程摆扫三种情况下拍摄到的红外图像运动模糊角度和尺度.根据估计结果用维纳滤波,约束最小二乘方滤波等方法对模糊图像进行复原.而本文方法通过稀疏先验信息得到 PSF,再根据 PSF 恢复模糊图像.图 8 是无摆扫运动模糊图像复原结果.图 9 是正程摆扫运动模糊图像复原结果.图 10 是逆程摆扫运动模糊图像复原结果.

表 2 是实拍模糊图像复原实验中各结果的 GMG 值.根据公式 13,GMG 越大说明图像质量越好.表 2 中“—”代表无法辨识复原图像中的目标,计算该方法得到的复原图像 GMG 值无意义.其中 RL 迭代次数为 15 次.

表2 实拍模糊图像复原实验各结果 GMG 值

Table 2 GMG values of each method in real blurry image restoration

图像	无摆扫	正程摆扫	逆程摆扫
实拍模糊图像	3.728 7	4.252 5	3.280 3
维纳滤波(估计参数法)	-	-	-
维纳滤波(自相关法)	2.377 6	1.997 4	1.260 7
约束最小二乘方滤波	2.209 2	1.893 1	1.210 2
RL 迭代	5.0247	11.916 2	7.716 8
估计参数盲复原	3.563 8	12.113 5	-
本文方法	5.763 8	12.313 1	8.132 5

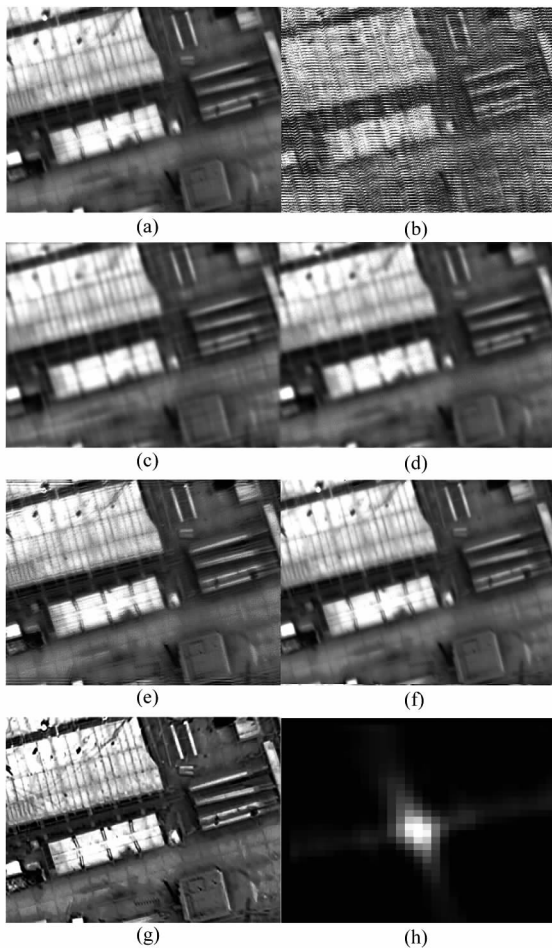


图8 (a)无摆扫实拍模糊图像(b)维纳滤波(估计参数法)(c)维纳滤波(自相关法)(d)约束最小二乘方滤波(e)RL迭代(f)估计参数盲复原(g)本文方法(h)点扩散函数

Fig.8 (a) real blurry image without sweeping (b) Wiener filter (parameter estimation method) (c) Wiener filter (autocorrelation method) (d) constrained least squares method (e) RL method (f) parameter estimation blind restoration (g) our method (h) PSF

从实验结果中,我们可以看出本文方法能够改善图像的质量,尤其是在先验条件不足的情况下,本文提出的方法能够明显改善图像的质量.从 PSNR 值与 GMG 值中不难发现,其他算法都依赖于模糊角度和模糊尺度的估计,稍有一点误差都会影响图像复原的效果,而本文方法通过稀疏先验信息得到 PSF,再根据 PSF 恢复模糊图像,有效地改善了图像质量.

5 结论

直升机载红外相机拍摄的运动模糊图像复原问题是一种病态问题.由于缺少成像过程的先验知识,经典的图像复原方法在图像处理过程中受到限制.

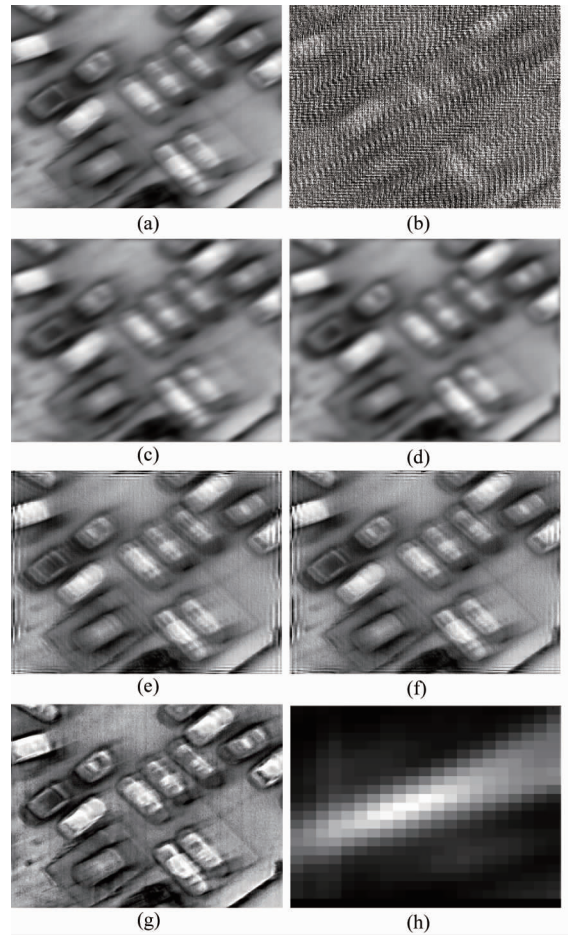


图9 (a)正程摆扫实拍模糊图像(b)维纳滤波(估计参数法)(c)维纳滤波(自相关法)(d)约束最小二乘方滤波(e)RL迭代(f)估计参数盲复原(g)本文方法(h)点扩散函数

Fig.9 (a) real blurry image with forward sweeping (b) Wiener filter (parameter estimation method) (c) Wiener filter (autocorrelation method) (d) constrained least squares method (e) RL method (f) parameter estimation blind restoration (g) our method (h) PSF

本文提出了一种将噪声分析和稀疏正则化相结合的运动模糊图像盲复原方法,有效地利用了红外相机成像过程中的噪声特点和自然图像边缘所服从的稀疏先验信息.实验结果证明本文提出的方法在仿真模糊图像复原实验和实拍模糊图像复原实验中能有效改善图像质量.尤其是在实拍模糊图像复原实验中,本文方法的复原效果和其他经典方法相比图像边缘更清晰,效果更好.

References

[1] BAI Xiang-En, YI Jia. Parameter estimation method for infrared motion-blur images[J]. *Transducer and Microsystem Technologies* (白响恩, 易佳. 红外运动模糊图像参数估计方法. *传感器与微系统*), 2015, 34(9): 27-29.

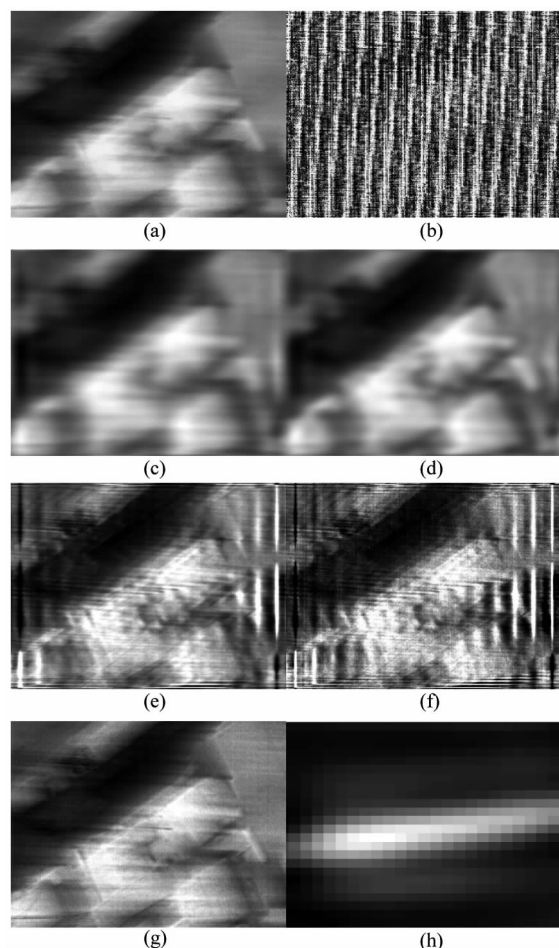


图 10 (a) 逆程摆扫实拍模糊图像 (b) 维纳滤波 (估计参数法) (c) 维纳滤波 (自相关法) (d) 约束最小二乘方滤波 (e) RL 迭代 (f) 估计参数盲复原 (g) 本文方法 (h) 点扩散函数

Fig. 10 (a) Real blurry image with inverse sweeping (b) Wiener filter (parameter estimation method) (c) Wiener filter (autocorrelation method) (d) constrained least squares method (e) RL method (f) parameter estimation blind restoration (g) our method (h) PSF

- [2] Yu-Li You, M. Kaveh. A Regularization Approach to Joint Blur Identification and Image Restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, **5**(3):416-428.
- [3] Tony F. Chan, Chiu-Kwong Wong. Total Variation Blind Deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1998, **7**(3):370-375.

- [4] Rob Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann et al. Removing Camera Shake from a Single Photograph [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **25**(3):787-794.
- [5] Dilip Krishnan, Terence Tay, Rob Fergus. Blind Deconvolution Using a Normalized Sparsity Measure [J]. *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, **42**(7):233-240.
- [6] XIAO Su, ZHENG Ying. Sparse representation based multi-regularized image deconvolution [J]. *Computer Engineering and Applications* (肖宿, 郑颖. 基于稀疏表示的多正则优化图像复原. *计算机工程与应用*), 2015, **51**(12):203-207.
- [7] LIU Cheng-Yun, CHANG Fa-Liang. Blind moving image restoration based on sparse representation and Weber's law [J]. *Optics and Precision Engineering* (刘成云, 常发亮. 基于稀疏表示和 Weber 定律的运动图像盲复原. *光学精密工程*), 2015. 2, **23**(2):600-608.
- [8] LI Hui-Hui, QIAN Lin-Hong, YANG Ning, et al. Turbulence degraded image blind restoration based on sparsity regularization and edge prediction [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (李晖晖, 钱林弘, 杨宁, 等. 基于边缘检测和稀疏约束的湍流图像盲复原. *仪器仪表学报*), 2015. 4, **36**(4):721-728.
- [9] GUO Cong-Zhou, QIN Zhi-Yuan. Blind restoration of nature optical images based on non-convex high order total variation regularization [J]. *Optics and Precision Engineering* (郭从洲, 秦志远. 非凸高阶全变差正则化自然光学图像盲复原. *光学精密工程*), 2015. 12, **23**(12):3490-3499.
- [10] LI Jian-Bing, MA Ren, LI Dan-Yang, et al. Tikhonov and total variation regularization method for blind image restoration [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)* (李俭兵, 马忍, 李丹阳等. 基于 Tikhonov 和全变分正则化混合约束盲去模糊方法. *南京邮电大学学报(自然科学版)*), 2016. 6, **36**(3):68-73.
- [11] WANG Bin-Hui, XU Yong-Yong. Test for the normality on the probability plots and its application [J]. *Mathematical Statistics and Applied Probability* (王斌会, 徐勇勇. 正态性检验的图示方法及其应用. *数理统计与应用概率*), 1996. 9, **11**(3):249-255.
- [12] LI Yu-Mei. The methods for testing normal distribution of data [J]. *Journal of Huaihua University* (李玉梅. 数据的正态性检验方法. *怀化学院学报*), 2015. 11, **34**(11):81-82.
- [13] Amir Beck, Marc Teboulle. A Fast Iterative Shrinkage-Thresholding Algorithm for Linear Inverse Problems [J]. *SIAM on Imaging Sciences*, 2009, **2**(1):183-202.
- [14] Anat Levin, Rob Fergus, Frédo Durand et al. Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3):70.