

文章编号 1004-924X(2013)05-1357-08

多范数混合约束的正则化图像盲复原

李伟红*, 董亚莉, 唐 述

(重庆大学 光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对传统的正则化盲复原方法中图像和点扩散函数(PSF)的保真项和正则项分别采用同范数约束致使复原图像的质量下降,估计出的PSF准确性降低的问题,提出了多范数混合约束的正则化图像盲复原方法。首先,复原图像的保真项和正则项分别采用 L^1 范数和全变分(TV)范数来消除复原图像中的阶梯效应并较好地保护复原图像的边缘。其次,PSF的保真项和正则项分别采用 L^2 范数和 H^1 范数以降低估计PSF时参数调节的难度。最后,通过分裂布雷格曼迭代方法对提出的模型进行最优化求解。在人造模糊图像和真实模糊图像上进行了实验,结果表明:提出的方法能够对运动、散焦等多种模糊类型的图像进行有效复原,并准确地估计出相应的PSF。与近年来一些较好的模糊图像盲复原方法相比,不仅在主观视觉效果上有较为明显的改进,而且在客观的改善信噪比(ISNR)上也提高了0.36 dB到14.66 dB。

关键词:图像盲复原;多范数混合;正则化;分裂布雷格曼

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132105.1357

Regularized blind image restoration based on multi-norm hybrid constraints

LI Wei-hong*, DONG Ya-li, TANG Shu

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

* Corresponding author, E-mail: weihongli@cqu.edu.cn

Abstract: The traditional regularization blind restoration methods employ the same norm of the fidelity term and the regularization term for both the image and the Point Spread Function (PSF), which decreases the quality of restored image as well as the accuracy of estimated PSF. Therefore, this paper proposes a multi-norm hybrid constrained regularization method for image blind restoration. First, the L^1 norm and the Total Variation (TV) norm are respectively adopted as the fidelity term and the regularization term for the image to eliminate the stair-casing effects and preserve the edges. Then, the L^2 norm and the H^1 norm are respectively adopted as the fidelity term and regularization term for the PSF to reduce the difficulty of the PSF estimation. Finally, the split Bregman iteration method is used to address the proposed model. Experiments are conducted on both synthetic and real-life degradations, and the results indicate that the proposed method can effectively restore a variety of artificial blurs

收稿日期:2012-12-03;修订日期:2013-01-22.

基金项目:重庆市重点科技攻关项目(No. CSTC2012-YYJSB40001);重庆市自然科学基金基金资助项目(No. CSTC2010BB2230);国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61105093);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CDJXS1112221)

such as motion blur, out-of-focus blur etc and can estimate the corresponding PSF accurately. Comparing to some other recent blind restoration methods, the proposed method can drastically improve the image quality in term of subjective visual and the Improved Signal-to-noise Ratio (ISNR) is improved from 0.36 dB to 14.66 dB.

Key words: blind image restoration; multi-norm hybrid; regularization; split Bregman

1 引言

正则化方法^[1-6]是解决图像盲复原问题病态性的有效方法。1996年, You等^[1]提出的基于 H^1 范数的正则化图像盲复原方法中, H^1 范数的各向同性扩散特性导致该方法在复原图像的过程中平滑掉了图像的边缘细节。1998年, Chan等^[2]将具有各向异性扩散特性的全变分(TV)范数用于复原图像和点扩散函数(PSF)的正则项中,较好地保护了复原图像的边缘。2008年, James等^[3]则提出一种先对模糊图像进行 shock 滤波器预处理的基于不同范数的半盲模糊图像复原方法,他们初步分析了不同范数对复原图像和 PSF 的影响,提出可根据复原图像和 PSF 各自的特性,分别采用不同的范数约束来提高复原图像的质量。2012年,本文作者^[6]将分裂布雷格曼迭代策略引入传统的 TV 盲复原模型中^[2],提出一种盲逆卷积算法,但复原图像和 PSF 采用同范数约束。

在现有的图像盲复原方法中,针对复原图像和 PSF 几乎都只是采用了同一种范数的保真项,而没有考虑不同范数的保真项对其的影响^[1-2,4-6],因此不能得到较好的复原结果。通过分析 L^1 范数和 L^2 范数对复原图像和 PSF 的不同影响^[3,7-10],本文提出了一种多范数混合约束的正则化模糊图像盲复原方法。首先,为了有效地消除复原图像中常常出现的阶梯效应,较好地保护复原图像的边缘细节,将 L^1 范数和 TV 范数分别作为复原图像的保真项和正则项的约束。然后,为了确保 PSF 估计的准确性,降低估计 PSF 时参数调节的难度,将 L^2 范数和 H^1 范数分别作为 PSF 的保真项和正则项约束。

本文在人造模糊图像和真实模糊图像上进行相应的实验,结果表明:提出的方法能够较好地复原运动、散焦等多种人造模糊类型的图像,并准确

地估计出相应的 PSF,效果较近年来较好的复原方法,不仅在主观视觉上有较大改善,而且客观的 ISNR 值也提高了 0.36 dB 到 14.66 dB。同时,本文提出的方法对真实模糊图像也有较好的复原效果。

2 多范数混合约束的正则化图像盲复原模型

Chan等^[2]于1998年首次提出模糊图像的 TV 盲复原模型,其代价函数如式(1)所示。

$$\min_{u,k} \frac{1}{2} \|k * u - f\|_2^2 + \lambda_1 \|\nabla u\|_1 + \lambda_2 \|\nabla k\|_1, \quad (1)$$

其中: f 代表已知的退化图像, u 代表原始清晰图像, k 代表 PSF,*表示卷积运算, $\|\cdot\|_2$ 表示 L^2 范数, $\|\cdot\|_1$ 表示 L^1 范数。 $\nabla u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ 、 $\nabla k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$,其中 u_x 和 u_y (或 k_x 和 k_y)分别为图像 u (或 PSF)在 x 方向和 y 方向上的一阶有限差分。式(1)中, $\frac{1}{2} \|k * u - f\|_2^2$ 为保真项, $\|\nabla u\|_1$ 和 $\|\nabla k\|_1$ 为正则项。 λ_1 和 λ_2 为正则化参数,分别控制相应正则项的权重。

上述模型的不足之处,也是现有大多数正则化模糊图像盲复原模型中存在的缺陷,即模型中复原图像和 PSF 的保真项均为 L^2 范数约束。

根据 L^1 范数和 L^2 范数在图像复原、去噪和纹理分解中的应用,可知: L^1 范数具有多尺度分解、对比不变性等特征。当保真项为 L^1 范数时,能够有效地消除复原图像中出现的阶梯效应,更适用于模糊图像的复原;当保真项为 L^2 范数时则更适用于估计 PSF^[3,7-10]。受此启发,本文提出多范数混合约束的正则化模糊图像盲复原方法,达到既有效提高复原图像的质量,又准确估计出 PSF 的目的,其代价函数如式(2)所示。

$$\min_{u,k} \frac{1}{p} \int_{\Omega} \|k * u - f\|^p dx dy + \lambda_1 \|\nabla u\|_1 + \frac{\lambda_2}{2} \|\nabla k\|_2^2, \quad (2)$$

式中: $p=1$ 即复原图像的保真项采用 L^1 范数约束; $p=2$ 即 PSF 的保真项采用 L^2 范数约束,式(2)亦可由式(3)表示。

$$\min_{u,k} (u,k) = \begin{cases} \min_u \|k * u - f\|_1 + \lambda_1 \|\nabla u\|_1 \\ \min_k \frac{1}{2} \|k * u - f\|_2^2 + \frac{\lambda_2}{2} \|\nabla k\|_2^2 \end{cases}, \quad (3)$$

其中: $\|\nabla u\|_1 = \sum \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ 和 $\|\nabla k\|_2^2 = \sum (k_x^2 + k_y^2)$ 分别为图像 u 和 PSF 的正则项, $\sum(\cdot)$ 表示求和操作。由于复原图像的正则项采用具有 L^1 范数特性的 TV 范数,所以可以较好地保护复原图像的边缘;同时,PSF 的正则项采用 H^1 范数,这样可以在不降低 PSF 估计准确性的情况下,减少参数的引入来降低估计 PSF 时参数调节的难度。

为了保证解的物理意义,本文对图像采用非负约束,对 PSF 采用归一化约束和动态阈值约束。

$$u^i(x,y) = \begin{cases} u^i(x,y) & u^i(x,y) > 0 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (4)$$

$$k^i(x,y) = \begin{cases} k^i(x,y) & k^i(x,y) \geq 0.05 \cdot \max(k^i) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\int k^i(x,y) dx dy = 1$$

其中: (x,y) 表示图像中像素点的坐标, $\max(k^i)$ 为第 i 次迭代所估计得到的 PSF 中最大的像素值。

3 分裂布雷格曼迭代策略用于求解多范数混合约束正则化图像盲复原模型

分裂布雷格曼迭代方法是用于解决 L^1 优化问题的先进算法,该方法求解简单,收敛速度非常快,具有很强的适用性。因此,根据作者前期的研究,本文采用扩展的分裂布雷格曼迭代^[6]Extend-

ed split Bregman iteration, ESBI)方法求解。

3.1 PSF 的求解

求解 PSF 时,其保真项和正则项分别为 L^2 范数和 H^1 范数,根据交互迭代方法,固定 u ,求解 k :

$$k^{i+1} = \arg \min_k \frac{1}{2} \|k * u - f\|_2^2 + \frac{\lambda_2}{2} \|\nabla k\|_2^2, \quad (6)$$

通过傅氏变换求解 k^{i+1} ,如式(7)所示:

$$k^{i+1} = FFT^{-1} \left(\frac{FFT((u^i)^T f)}{FFT((u^i)^T u^i + \lambda_2 \nabla^T \nabla)} \right), \quad (7)$$

其中: FFT 为快速傅里叶变换运算, FFT^{-1} 为快速傅里叶逆变换运算, ∇ 为局部一阶差分算子, ∇^T 为 ∇ 的伴随算子。由于本文提出 PSF 的正则项为 H^1 范数,与作者前期研究^[6]相比,可以降低估计 PSF 时参数调节的难度。

3.2 复原图像 u 的求解

求解复原图像时,其保真项和正则项分别为 L^1 范数和 TV 范数,固定 k ,求解 u 。

$$\min_u \|k * u - f\|_1 + \lambda_1 \|\nabla u\|_1. \quad (8)$$

对式(8)采用 ESBI 方法求解:先引入辅助变量 b 和 b_1 进行算子替换,然后引入惩罚变量 t 和 t_1 ,得到非约束问题,如式(9)所示:

$$\min_{u,b,b_1} \|b\|_1 + \lambda_1 \|b_1\|_1 + \frac{\gamma}{2} \|b - (k * u - f) - t\|_2^2 + \frac{\gamma_1}{2} \|b_1 - \nabla u - t_1\|_2^2 \quad s.t. \quad k * u - f = b, \nabla u = b_1, \quad (9)$$

将式(9)分成若干子问题分别求解 u, b 和 b_1 :

$$u^{i+1} = \arg \min_u \frac{\gamma}{2} \|b^i - (k * u - f) - t^i\|_2^2 + \frac{\gamma_1}{2} \|b_1^i - \nabla u^i - t_1^i\|_2^2, \quad (10)$$

$$b^{i+1} = \arg \min_b \|b\|_1 + \frac{\gamma}{2} \|b - (k * u^{i+1} - f) - t^i\|_2^2, \quad (11)$$

$$b_1^{i+1} = \arg \min_{b_1} \lambda_1 \|b_1\|_1 + \frac{\gamma_1}{2} \|b_1 - \nabla u^{i+1} - t_1^i\|_2^2, \quad (12)$$

相应求解依次为:

$$u^{i+1} = FFT^{-1} \left(\frac{FFT(\gamma \cdot (k^{i+1})^T (b^i + f - t^i) + \gamma_1 \nabla^T (b_1^i - t_1^i))}{FFT(\gamma \cdot (k^{i+1})^T k^{i+1} + \gamma_1 \nabla^T \nabla)} \right), \quad (13)$$

$$b^{i+1} = \max \left\{ \left| ku^{i+1} - f + t^i \right| - \frac{1}{\gamma}, 0 \right\} \cdot \text{sign}(ku^{i+1} - f + t^i), \quad (14)$$

$$b_1^{i+1} = \frac{\nabla u^{i+1} + t_1^i}{\|\nabla u^{i+1} + t_1^i\|_2} \max \left\{ \|\nabla u^{i+1} + t_1^i\|_2 - \frac{\lambda_1}{\gamma_1}, 0 \right\}. \quad (15)$$

t 与 t_1 的更新:

$$t^{i+1} = t^i + (ku^{i+1} - f) - b^{i+1}, \quad (16)$$

$$t_1^{i+1} = t_1^i + \nabla u^{i+1} - b_1^{i+1}, \quad (17)$$

详细求解过程请参考文献[6]。

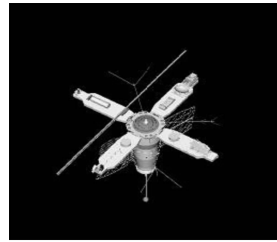
4 实验及分析

本文分别在人造模糊图像和真实模糊图像上进行了实验,并与近年来几种较好的模糊图像盲复原方法^[3,6,11-12]进行了比较。客观评价采用改善的信噪比—ISNR($ISNR = 10 \lg(\|f - u_0\|_2^2 / \|u - u_0\|_2^2)$),其中 f 为观察到的模糊图像, u_0 原始的清晰图像, u 为复原图像。当 $\|u^{i+1} - u^i\|_2 / \|u^{i+1}\|_2 < 0.001$, 实验终止。所有图像的像素值均被归一化到 0~1 之间。

4.1 人造模糊图像实验

人造模糊图像实验为 256 pixel×256 pixel 像素大小的“Satellite”和“Cameraman”灰度级标准测试图

像,如图 1 所示。模糊类型有匀直运动模糊(模糊尺度为 11 pixel,模糊方向为 45°)、高斯模糊(大小为 7 pixel×7 pixel,方差为 25)、散焦模糊(半径为 3 pixel)和自定义模糊($[0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 1; 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0; 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]/20$)等 4 种模糊类型。模糊图像均被加入标准差为 0.001 的加性高斯噪声。所涉及参数调节方法与文献[3][6]相同。



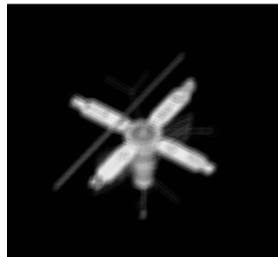
(a)Satellite



(b)Cameraman

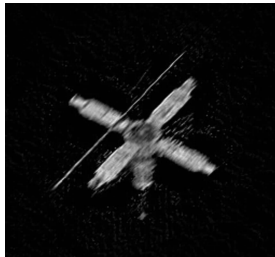
图 1 测试图像

Fig. 1 Tested images



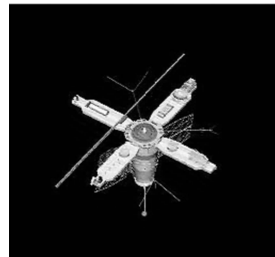
(a)模糊噪声图像

(a)Blurry-noisy image



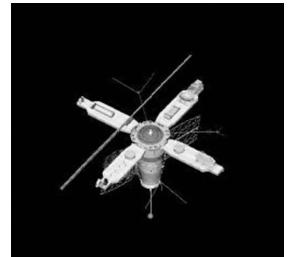
(b)文献[3]的复原图像

(b)Restoration image with the Ref. [3]



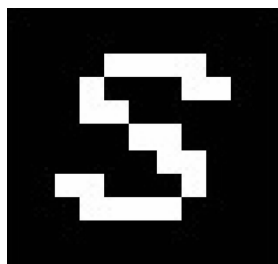
(c)文献[6]的复原图像

(c)Restoration image with the Ref. [6]



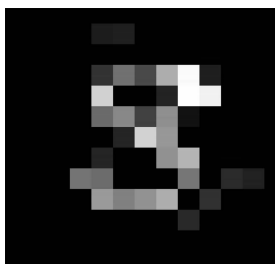
(d)提出方法的复原图像

(d)Restoration image with the proposed method



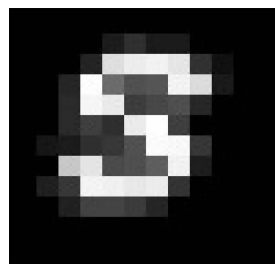
(e)真实的PSF

(e)Real PSF



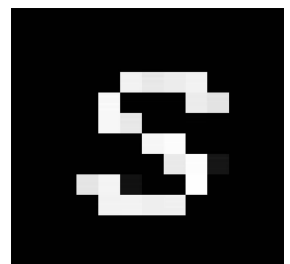
(f)文献[3]估计的PSF

(f)Estimated PSF with the Ref. [3]



(g)文献[6]估计的PSF

(g)Estimated PSF with the Ref. [6]



(h)提出方法估计的PSF

(h)Estimated PSF with the proposed method

图 2 “Satellite”人造自定义模糊图像盲复原的结果

Fig. 2 Blind restoration of linear motion blurred “Satellite” image

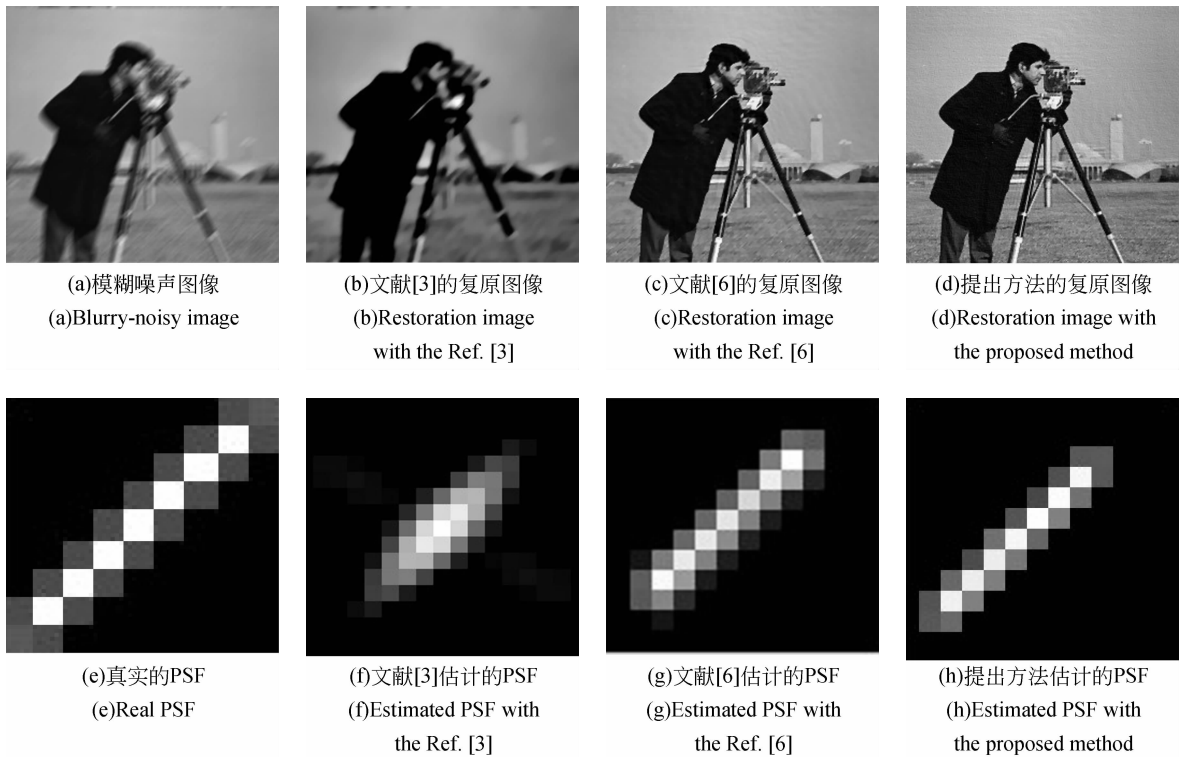


图 3 “Cameraman”人造运动模糊图像盲复原结果

Fig. 3 Blind restoration of linear motion blurred “Cameraman” image

图 2 和图 3 为本文提出方法与文献[3]、[6]得到的复原图像和 PSF 的比较。可以看出,由于 shock 滤波器对噪声十分敏感,因此文献[3]得到的 shock 滤波器预处理图像会引入较大的噪声干扰,从而破坏原始图像的内在特性,导致复原得到的图像存在明显的噪声瑕疵,如图 2(b)和图 3(b)所示;同时也不能够准确地估计出 PSF,如图 2(f)和图 3(f)所示。由于正则化方法中,保真项采用 L^2 范数约束有时会导致复原图像出现阶梯效应。可以看到,文献[6]中,复原图像有明显的阶梯效应瑕疵,如图 2(c)中轮廓的锐化和图 3(c)中草地的平滑;同时,从图 2(g)和图 3(g)也可以看到对 PSF 估计准确性的影响。由于本文综合考虑了 L^1 范数和 L^2 范数对复原图像和 PSF 的影响,采用了多范数混合约束的思想,因此较好地消除了复原图像的阶梯效应,提高了复原图像的质量,如图 2(d)和图 3(d)所示;并且还可以较精确地估计出 PSF,如图 2(h)和图 3(h)所示。

表 1 和表 2 为本文提出方法与文献[3][6]方法得到 ISNR 值的比较。可以看出,本文提出方法得到最高的 ISNR 值,优于文献[3][6]中的方法。

表 1 提出方法与文献[3][6]方法所得到的 ISNR 值
Tab. 1 ISNRs obtained by proposed method and Ref. [3],[6]

测试图像	模糊类型	文献[3]	文献[6]	提出方法
Satellite	匀直运动	-1.47 dB	7.09 dB	11.46 dB
	散焦	0.76 dB	3.55 dB	7.01 dB
	高斯	0.70 dB	5.81 dB	6.24 dB
	自定义	1.21 dB	8.68 dB	15.87 dB

表 2 提出方法与文献[3][6]方法所得到的 ISNR 值
Tab. 2 ISNRs obtained by proposed method and Ref. [3],[6]

测试图像	模糊类型	文献[3]	文献[6]	提出方法
Cameraman	匀直运动	3.15 dB	6.59 dB	8.03 dB
	散焦	4.03 dB	6.45 dB	7.79 dB
	高斯	3.08 dB	7.03 dB	7.55 dB
	自定义	3.03 dB	8.91 dB	9.27 dB

4.2 真实模糊图像实验

本文对真实模糊图像做了进一步的实验,并与文献[11][12]的方法进行比较。图 4(a)和图 5(a)的退化图像分别来源于文献[11-12];图 6(a)和图 7(a)中的退化图像为本文用 Sony A200 相机拍摄的学校主教学楼和钟塔的真实模糊图像。文献[11-12]中的方法是目前针对真实退化图像复原较先进的算法,均采用自然图像梯度的拖尾分布(Heavy-tailed distributions)作为先验假设。其中

文献[11]首先利用图像子块迭代估计出 PSF,然后再利用所估计的 PSF 复原整个退化图像;而文献[12]的方法则是采用联合的方法同时估计复原图和 PSF。

从图 4、图 5、图 6 和图 7 可以看到,本文提出的方法同样能够有效地用于真实模糊图像的盲复原。与文献[11-12]相比,提出方法可以得到更加清晰的细节以及更加锐化的复原图像,使复原图像的质量有很大提高。



图 4 真实模糊图像盲复原结果和对应图像的局部放大图

Fig. 4 Blind restoration results of the real-life blurred image and their zoomed images in regions

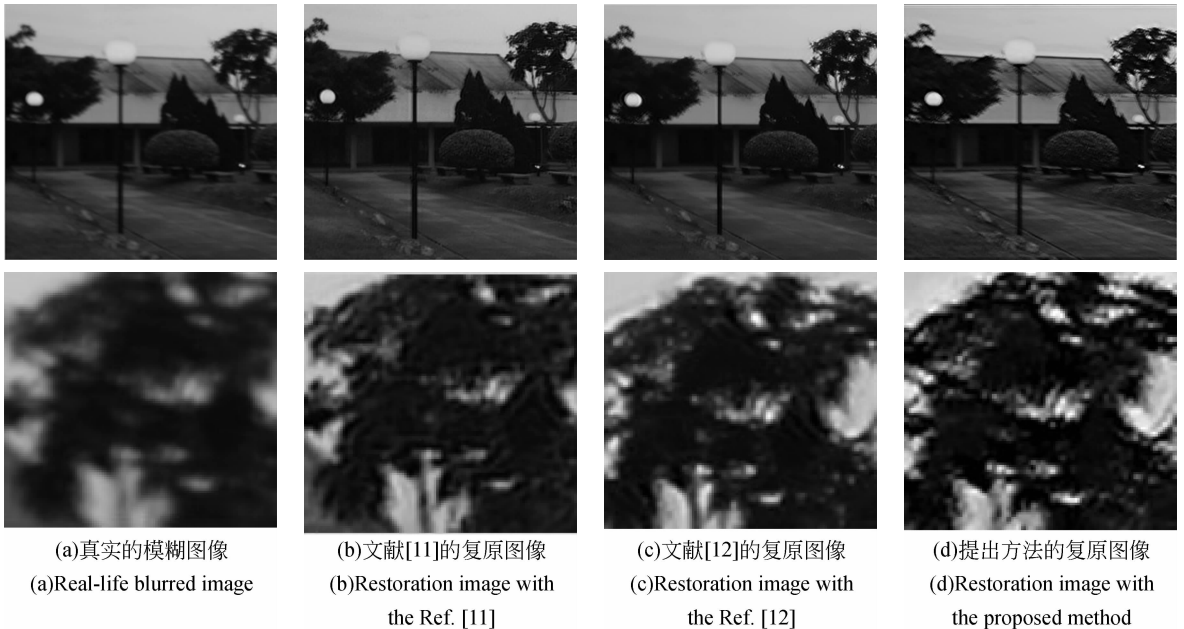


图 5 真实模糊图像盲复原结果和对应图像的局部放大图

Fig. 5 Blind restoration results of the real-life blurred image and their zoomed images in regions

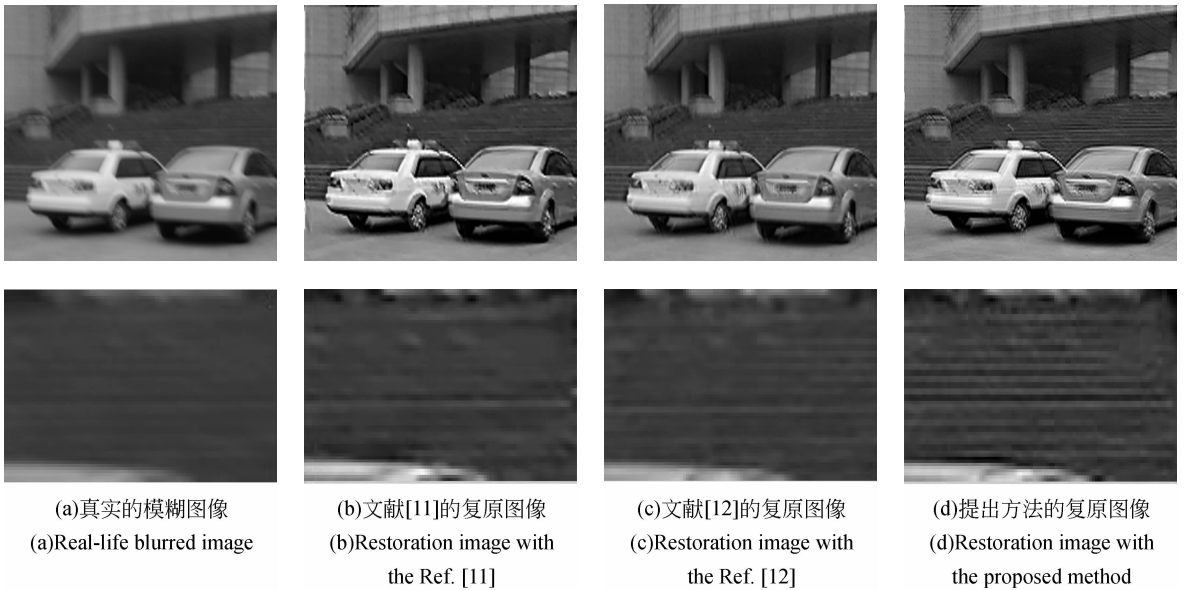


图 6 真实模糊图像盲复原结果和对应图像的局部放大图

Fig. 6 Blind restoration results of the real-life blurred photo and their zoomed images in regions

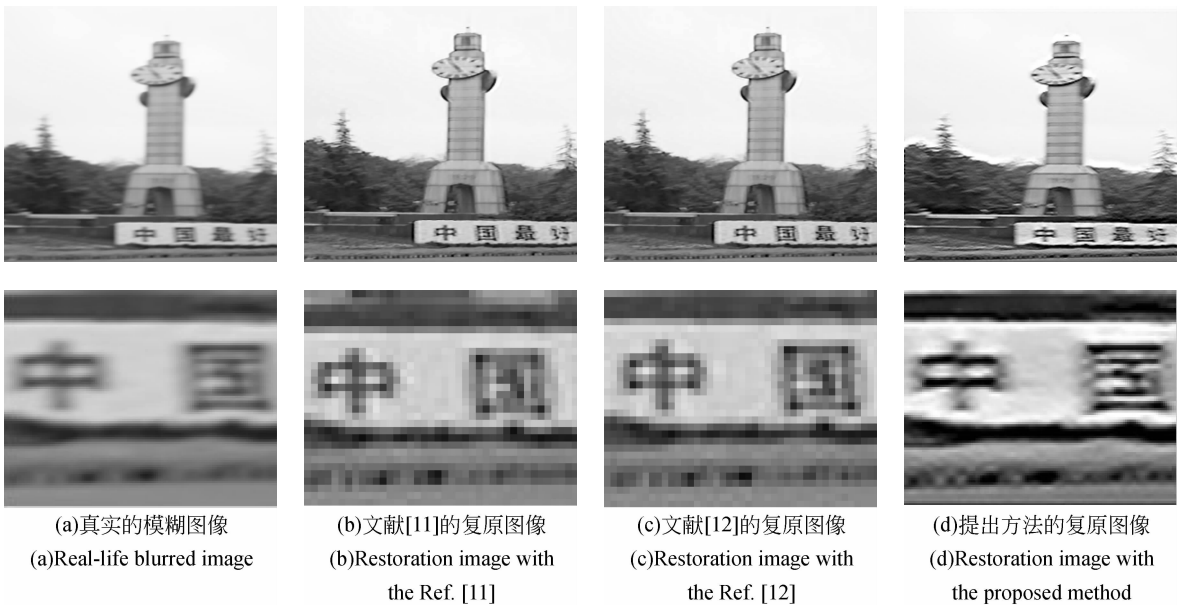


图 7 真实模糊图像盲复原结果和对应图像的局部放大图

Fig. 7 Blind restoration results of the real-life blurred photo and their zoomed images in regions

5 结 论

本文根据 L^1 范数和 L^2 范数对复原图像和 PSF 的影响,提出一种多范数混合约束的正则化模糊图像盲复原方法。首先,为了能够有效地消除复原图像中出现的阶梯效应以及较好地保护复原图像的边缘细节,将 L^1 范数和 TV 范数分别引入到复原

图像的保真项和正则项中;然后,为了能够在保证 PSF 估计准确性的情况下,有效地降低估计 PSF 时参数调节的难度,又将 L^2 范数和 H^1 范数分别引入到 PSF 的保真项和正则项中;最后,在前期研究的基础上,运用一种 ESBI 迭代方法对提出的模型进行最优化求解。实验结果表明,提出方法能够对运动、散焦等多种模糊类型的图像进行有效地复原并准确地估计出相应的 PSF,复原效果较近年来一

些较好的图像盲复原方法,不仅在主观视觉上有很大提高,而且客观上 ISNR 提高 0.36 dB 到 14.66

dB。同时,该方法对一些真实的模糊图像仍有很好的复原效果。

参考文献:

- [1] YOU Y, KAREH M. A regularization approach to joint blur identification and image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1996, 5 (3): 416-428.
- [2] CHAN T F, WONG C K. Total variation blind deconvolution [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998, 7(3): 370-375.
- [3] MONEY J H, KANG S H. Total variation minimizing blind deconvolution with shock filter reference [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(2): 302-314.
- [4] 石明珠,许廷发,张坤. 运动成像混合模糊的全变分图像复原 [J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(8): 1973-1981.
SHI M ZH, XU T F, ZHANG K. Total variation image restoration for mixed blur in moving image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (8): 1973-1981. (in Chinese)
- [5] 黄德天,吴志勇. 基于非负支撑域受限递归滤波器的自适应图像盲复原 [J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(9): 2078-2086.
HUANG D T, WU ZH Y. Adaptive blind image restoration based on NAS-RIF algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2078-2086. (in Chinese)
- [6] LI W H, LI Q L, GONG W G, *et al.*. Total variation blind deconvolution employing split Bregman it-

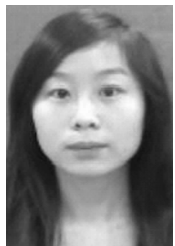
eration [J]. *ELSEVIER Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2012, 23 (3): 409-417.

- [7] FU H Y, NG M K, NIKOLOVA M, *et al.*. Efficient minimization methods of mixed L^2 - L^1 and L^1 - L^1 norms for image restoration [J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2006, 27 (6): 1881-1902.
- [8] BAR L, SOCHEN N, KIRYATI N. Image deblurring in the presence of salt-and-pepper noise [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3459: 107-118.
- [9] NIKOLOVA M. A variational approach to remove outliers and impulse noise [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2004, 20 (1): 99-120.
- [10] YIN W, GOLDFARB D, OSHER S. Image cartoon-texture decomposition and feature selection using the total variation regularized L^1 functional, Variational, Geometric, and Level Set Methods [J]. *Computer Vision*, 2005, 3752: 73-84.
- [11] FERGUS R, SINGH B, HERTZMANN A, *et al.*. Removing camera shake from a single photograph [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 787-794.
- [12] QI SH, JIA J Y, AGARWALA A. High-quality motion deblurring from a single image [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 10.

作者简介:



李伟红(1962—),女,四川自贡人,博士,副教授,2006年于重庆大学光电工程学院获得博士学位,现为重庆大学光电工程学院副教授,主要从事模式识别、图像处理等方面的研究。E-mail: weihongli@cqu.edu.cn



董亚莉(1986—),女,河南开封人,硕士研究生,2011年于重庆大学光电学院获得学士学位,主要从事模式识别、图像处理等方面的研究。E-mail: 20110813118@cqu.edu.cn



唐述(1981—),男,重庆人,博士研究生,讲师,2004年于重庆邮电大学获得学士学位,2007年于重庆邮电大学获得硕士学位,现为重庆大学光电工程学院博士研究生,主要从事信息获取与处理、图像处理等方面的研究。E-mail: tangshujay@163.com