

基于全向总变分最小化的折反射散焦模糊图像复原方法

李永乐 娄静涛 张茂军 王伟 熊志辉

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对折反射全向成像特点,提出了基于全向总变分最小化的折反射散焦模糊图像复原方法。随着高分辨率图像传感器器件和大光圈镜头的采用,光圈和反射面曲率造成的折反射全向成像散焦模糊问题越发突出。由于在折反射全向图像上,具有相邻位置关系的两个点,在真实世界中并不具有相同的依赖关系,因此传统的图像梯度计算方法并不适合折反射全向图像处理。提出结合全向图像成像特点的全向梯度计算方法,将全向总变分最小化作为正则化条件,对散焦模糊全向图像进行复原,得到全局清晰的全向图像。

关键词 成像系统;散焦模糊;全向梯度;全向总变分;图像复原

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0811006

Image Restoration for Catadioptric Defocus Blur Based on Omni-Total Variation Minimization

Li Yongle Lou Jingtao Zhang Maojun Wang Wei Xiong Zhihui

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Combined with the characteristics of catadioptric omnidirectional imaging, the method of image restoration for catadioptric defocus blur based on omni-total variation minimization is proposed. The problem of catadioptric omnidirectional imaging defocus blur, which is caused by lens aperture and mirror curvature, becomes more severe when high resolution sensors and large apertures are applied. In the catadioptric omnidirectional image, the two points near each other do not have the relation in true scene. So the traditional gradient computation cannot fit catadioptric omnidirectional image processing. The omni-gradient computing method combined with the characteristics of omnidirectional imaging is proposed. Then, the omni-total variation minimization is used as the condition of deconvolution regularization, which is used for the defocus blur omnidirectional image restoration to obtain all sharp omnidirectional images.

Key words imaging systems; defocus blur; omni-gradient; omni-total variation; image restoration

OCIS codes 080.2740; 100.1830; 230.4040

1 引 言

由于能够一次性获得 360°的视场范围,折反射全向成像在很多领域都已经得到了广泛的应用,如全景机载摄像侦察、车载智能交通系统(ITS)应用、

智能全景视频监控、移动机器人视觉导航、远程视频会议、天文望远镜以及医学应用等领域^[1-2]。随着高分辨率图像传感器器件和大光圈镜头在折反射全向成像系统的采用,折反射全向成像系统中,反射镜

收稿日期: 2013-03-08; **收到修改稿日期:** 2013-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61175006,61175015,61275016,61271438)

作者简介: 李永乐(1984—),男,博士研究生,主要从事折反射全向视觉、图像处理、多媒体与虚拟现实技术等方面的研究。E-mail: liyongle1984@163.com

导师简介: 张茂军(1971—),男,博士,教授,主要从事全向视觉、图像处理、多媒体与虚拟现实技术等方面的研究。E-mail: zmjbar@163.com

曲率和镜头光圈的大小会导致散焦模糊^[3-4],而且散焦模糊造成的图像清晰度问题显得越发突出。针对散焦模糊图像复原问题,目前已有多种方法^[5-10],如早期经典的 Wiener 滤波法^[11]和 Richardson-Lucy 反卷积算法,都能取得一定的复原效果。近年来,基于正则化理论的图像复原方法逐渐受到广泛关注,如早期的 Tikhonov 模型和经典的总变分(TV)模型^[12-14]。基于 TV 最小化的方法是一种以保存图像细节为目标的规整化复原方法,能够抑制噪声,但并不对解强加平滑作用,即可以保存图像轮廓细节并且可在保证图像清晰度提高的前提下,抑制图像复原所带来的振铃波纹。但是传统的总变分计算方法针对全向图像的操作有其不合理性,折反射全向图像从外围到中心分辨率逐渐降低,由于折反射投影,两个具有相同欧式距离的点,当它们成像在全向图像边缘或中心时,它们之间的像素

距离却并不相同,也就是说在折反射全向图像上具有相邻位置关系的两个点,在真实世界中并不具有相同的依赖关系。因此,传统的图像梯度计算方法并不适合折反射全向图像处理,需要采用新的适应全向图像的梯度计算方法。本文提出结合全向图像成像特点的全向梯度计算方法,将全向总变分(Omni-TV)最小化作为正则化条件,对散焦模糊全向图像进行反卷积复原,得到全局清晰的全向图像。

2 折反射全向成像散焦模糊分析

如图 1 所示二维笛卡儿坐标系 ROZ ,其中 $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$, o 为双曲面的一个焦点,位于坐标系原点,镜头光心 $p_0(0,0,2c)$ 位于双曲面的另一个焦点处,此时的折反射全向成像系统满足单视点约束^[3,15]。

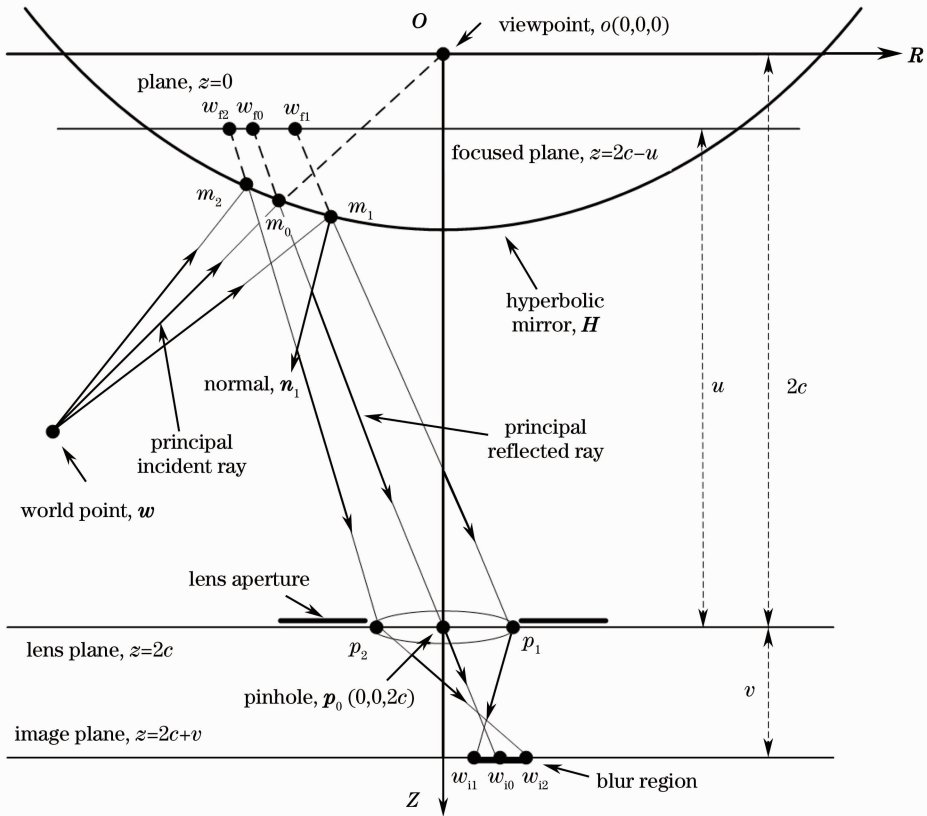


图 1 折反射全向成像系统散焦示意图

Fig. 1 Defocus sketch map of catadioptric omnidirectional imaging system

已知 $m_0(x_0, y_0, z_0)$ 为双曲面反射镜面 H 上的一点, w 为实景空间的一个物点,根据单视点约束,若光线 wm_0 的延长线经过虚拟视点 o ,则光线 wm_0 经镜面上的点 m_0 反射后的光线穿过镜头光心。已知 c 为双曲面参数,则双曲面方程可以表示为

$$\frac{(z-c)^2}{c^2 \left(\frac{k-2}{k}\right)} - \frac{(x^2+y^2)}{c^2 \left(\frac{2}{k}\right)} = 1, \quad (1)$$

其中常数 $k > 2$ 。此外,光心平面位于 $z=2c$ 处,光线 wm_0 称为主入射光线,光线 m_0p_0 称为主反射光线,在像平面 $z=2c+v$ 上成的像为 w_{i0} ,其中 v 为像距。

由 w 发出的另一条光线,经曲面镜上的另一个点 m_1 反射,穿过镜头光圈上的点 p_1 ,最终在像平面上成的像为 w_{11} ;同样地,由 w 发出的光线,经曲面镜上的点 m_2 反射,穿过镜头光圈上的点 p_2 ,最终在像平面上成的像为 w_{12} 。经这两条光线在像平面上成的像跟主光线在像平面上成的像不会是同一个点^[3],于是就导致了散焦模糊^[16]。图 2 为 Zemax 仿真的散焦模糊示意图。

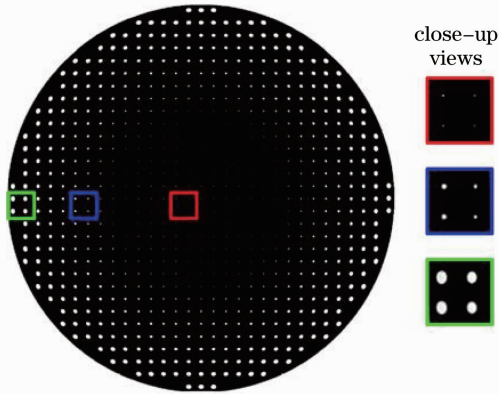


图 2 折反射全向成像系统散焦仿真结果

Fig. 2 Simulation results of catadioptric omnidirectional imaging defocus

3 基于全向总变分最小化的图像复原方法

3.1 图像复原基本模型

图像散焦模糊退化模型可以表示为

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y), \quad (2)$$

其中 g 为观测到的退化图像, f 为清晰图像, h 为点扩展函数 (PSF), $*$ 为卷积运算, n 为图像噪声。在 PSF 已知的情况下,求解图像的反卷积问题属于数学中的“反问题”的研究领域,而反问题最重要的特点就是具有病态(不适定)性^[17]。求解这类不适定反问题的方法称为正则化方法。很多学者提出了不同的正则化方法,其目标都是将不适定问题转化成邻近的适定问题来求解。通常的做法是根据图像先验知识,改变求解方法或添加约束条件,将问题的解转化成唯一的且稳定的解。

总变分最小化是一种以保存图像细节为目标的规整化复原方法。总变分最小化方法能够抑制噪声,但并不对解强加平滑作用,即可以保存图像轮廓细节并且可在保证图像清晰度提高的前提下,抑制图像复原所带来的振铃波纹^[14,18]。总变分定义为图像梯度幅值之和:

$$J_{TV}(f) = \sum_{(x,y)} |\nabla f(x, y)| =$$

$$\sum_{(x,y)} \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sum_{(x,y)} \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}, \quad (3)$$

其中 $G_x = \frac{\partial f}{\partial x}, G_y = \frac{\partial f}{\partial y}, \nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}$ 为图像 f

在像素位置 (x, y) 处的梯度, $|\nabla f(x, y)|$ 为梯度幅值,遍历整个图像每个像素即可计算总变分。利用 Lagrange 法则,总变分最小化图像复原问题即为求解下面的最小化问题^[14]:

$$f^* = \operatorname{argmin}[\|h * f - g\|^2 + \lambda J_{TV}(f)], \quad (4)$$

其中 λ 是控制算法收敛的常量。 $\lambda J_{TV}(f)$ 为约束条件,即图像先验知识,通过最小化重构误差 $\|h * f - g\|^2$,求得清晰图像 f^* 。

3.2 全向总变分

需要特别指出的是,由于折反射全向成像特点,传统的图像处理方法在全向图像中的操作便有其不合理性^[19-20]。折反射全向图像从外围到中心分辨率逐渐降低,由于折反射投影,两个具有相同欧式距离的点,当它们成像在全向图像边缘或中心时,它们之间的像素距离却并不相同,也就是说在折反射全向图像上,具有相邻位置关系的两个点,在真实世界中并不具有相同的依赖关系。传统的梯度计算方法在全向图像中不能符合折反射全向成像的特点,不

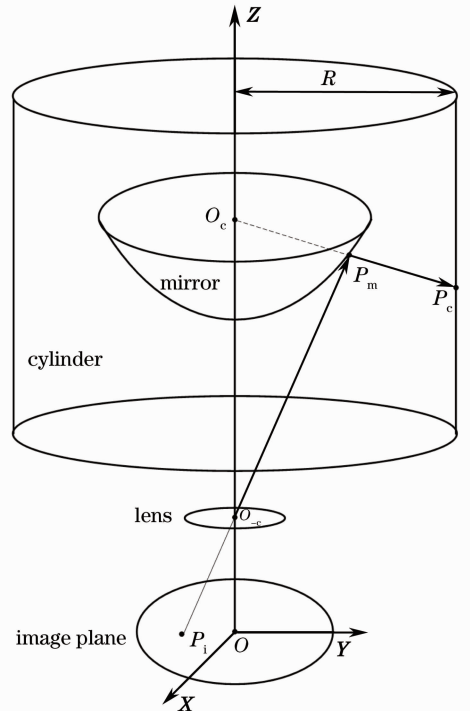


图 3 全向图像反投影示意图

Fig. 3 Sketch map of omnidirectional image backward projection

能体现实际的相邻像素强度的变化率。因此,将全向图像中的像素点反投影到柱面全景图像中,在柱面全景图像中根据梯度计算方法确定水平和垂直方向的相邻像素点,再正投影到全向图像中,找到对应像素点的相应位置,然后计算该像素点的梯度值大小。

如图 3 所示,根据折反射全向成像单视点约束以及光路跟踪方法,全向图像中的点 P_i 经镜面上的点 P_m ,反投影到柱面全景图像中的点 P_c 。图中, O_c

和 O_c 分别为双曲面的两个焦点, R 为展开柱面的半径。如图 4 所示,全向图像中的点 $I(i, j)$ 反投影到柱面全景图像中的点 $P(u, v)$,根据总变分计算方法,找到柱面全景图像中水平和垂直方向的相邻点 $P(u+1, v)$ 和 $P(u, v+1)$,再根据正投影找到全向图像中对应的点 $I(i+s_1, j+t_1)$ 和 $I(i+s_2, j+t_2)$,则全向图像中点 $I(i, j)$ 处的梯度幅值为

$$|\nabla I(i, j)| = \sqrt{[I(i+s_1, j+t_1) - I(i, j)]^2 + [I(i+s_2, j+t_2) - I(i, j)]^2}, \quad (5)$$

全向图像 I 的全向总变分定义为

$$J_{\text{Omni-TV}}(I) = \sum_{(i, j)} |\nabla I(i, j)| = \sum_{(i, j)} \sqrt{[I(i+s_1, j+t_1) - I(i, j)]^2 + [I(i+s_2, j+t_2) - I(i, j)]^2}. \quad (6)$$

最后根据(4)式,可以复原得到清晰的全向图像。

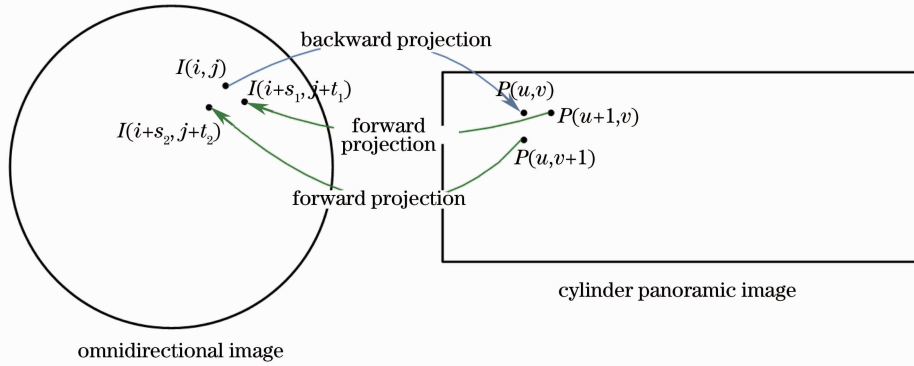


图 4 全向总变分计算示意图

Fig. 4 Computation sketch map of omni-total variation

4 实验结果与分析

4.1 全向梯度计算实验结果

为了验证全向总变分的合理性和有效性,将传统梯度计算结果与全向梯度计算方法得到的结果进行对比。图 5 所示为折反射全向成像 3ds Max 仿真测试图像,采用双曲面单视点折反射成像系统,模拟仿真场景为 Cameraman 图像、视力表的局部、Lena 图像和 Peppers 图像,将场景贴到一个指定半径的圆柱面上构建折反射成像的仿真场景空间。从图 6 可以看出,由于传统的梯度计算方法不符合折反射全向成像的特点,全向梯度计算方法更准确地体现了实际相邻像素间的强度变化,对于全向图像中径向方向的相邻像素也是反映了真实世界中对应像素间的相邻位置关系,因此得到的梯度计算结果能够更好地表示图像的边缘,特别是在图像的内环部分,图像的边缘更清晰,而且在图像的径向方向更加规则和均匀。

4.2 图像复原实验结果

为了验证基于全向总变分最小化的反卷积算法的有效性,采用 TwIST 算法^[21]分别运用普通总变分和全向总变分为图像先验知识,做反卷积复原,对比最终的去散焦模糊效果。

然后计算信噪比(SNR),SNR 的定义为 $10\log(\|f\|^2 / \|f - f^*\|^2)$,并以此作为客观评价指标。如图 7 所示,图 7(a)为仿真的折反射全向图像(Ground truth);图 7(b)为模糊的全向图像;图 7(c)为基于普通梯度计算的总变分最小化的反卷积去模糊结果(TwIST),SNR=22.87;图 7(d)为基于全向总变分最小化的反卷积去模糊结果(Omni-TV),SNR 为 24.47。图 8 为实际装置采集的全向图像去散焦模糊实验结果,由于没有参考图像,采用平均梯度(AG)^[16]作为去模糊效果的客观评价指标,图 8(b)中 AG 为 5.8919,图 8(c)中 AG 为 5.9806。为了便于观察细节,图 7 和图 8 中标出了局部放大显示的部分,可以看出,全向总变分方法在视觉效果和客观

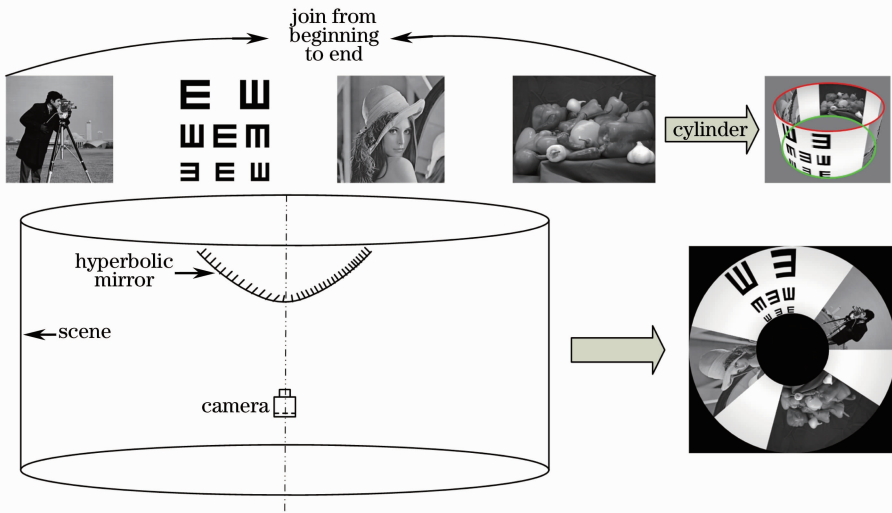


图 5 折反射全向成像仿真测试图像

Fig. 5 Simulation test image of catadioptric omnidirectional imaging

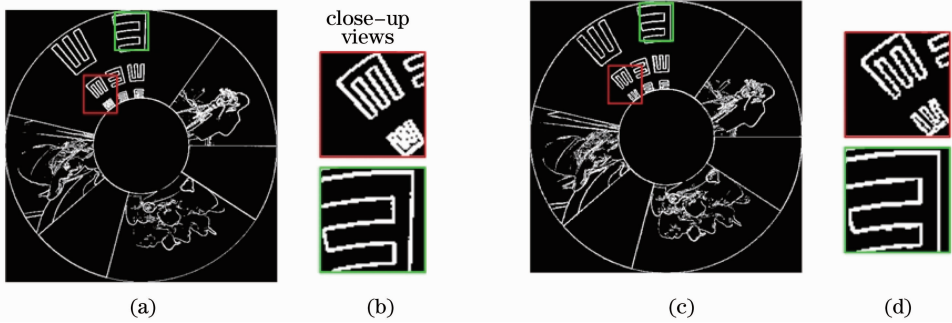


图 6 仿真图像梯度计算对比结果。(a)传统梯度计算结果；(b)传统梯度计算结果局部放大图；(c)全向梯度计算结果；(d)全向梯度计算结果局部放大图

Fig. 6 Gradient computation results of test image. (a) Traditional gradient computation result; (b) close-up views; (c) omni-gradient computation result; (d) close-up views

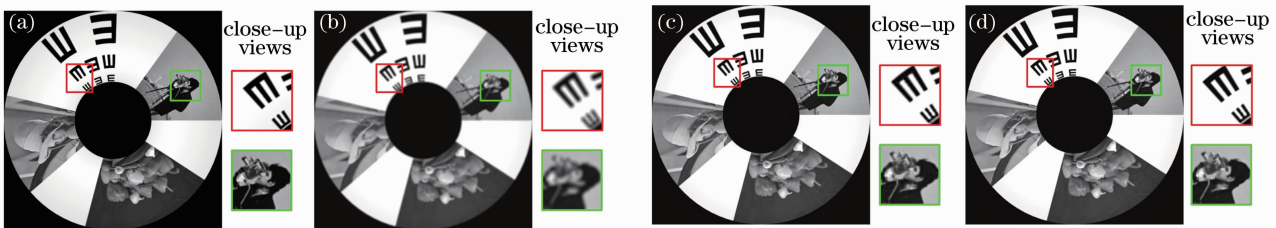


图 7 仿真图像去散焦模糊实验结果。(a)仿真的折反射全向图像(Ground truth)；(b)模糊的全向图像；(c) TwIST 算法实验结果, SNR 为 22.87；(d)全向总变分方法的实验结果, SNR 为 24.47

Fig. 7 Defocus deblurring results of test image. (a) Simulation omnidirectional image (Ground truth); (b) blur image; (c) deblurring results using TwIST algorithm, SNR is 22.87; (d) deblurring results using Omni-TV, SNR is 24.47

数值评价上都取得了很好的实验效果。

5 结 论

提出一种基于全向总变分最小化的折反射散焦

模糊图像复原方法。传统的梯度计算方法在全向图像中不能符合折反射全向成像的特点,为此提出全向梯度的计算方法,并将全向总变分最小化作为反卷积正则化条件,复原得到清晰的全向图像。实验

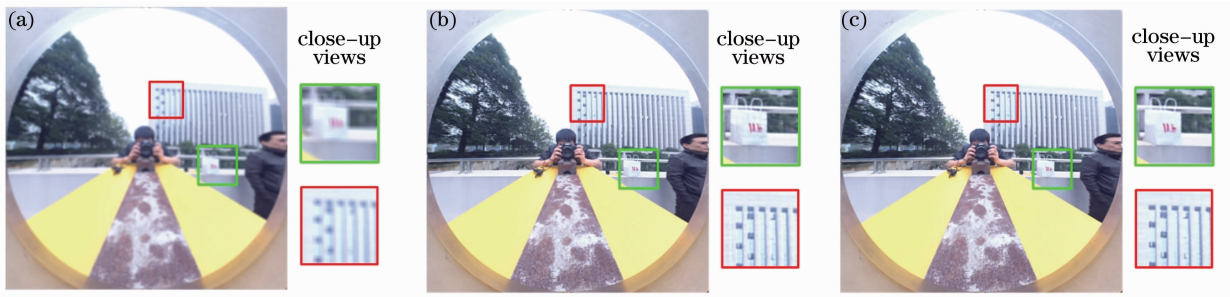


图 8 实际装置采集的全向图像去散焦模糊实验结果。(a)实际装置采集的模糊全向图像;(b) TwIST 算法实验结果, AG 为 5.8919;(c)全向总变分方法的实验结果,AG 为 5.9806

Fig. 8 Defocus deblurring results of omnidirectional image captured by experimental setup. (a) Blur omnidirectional image; (b) deblurring results using TwIST algorithm, AG is 5.8919; (c) deblurring results using Omni-TV, AG is 5.9806

结果表明,全向梯度计算方法得到的梯度结果能够更好地显示图像的边缘,特别是在图像的内环部分,图像的边缘更清晰;基于全向总变分最小化的反卷积复原效果也更好。

参 考 文 献

- Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622005.
许伟才, 黄 玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622005.
- Chen Lidong, Wang Wei, Zhang Maojun, *et al.*. Design analysis of a complementary double mirror catadioptric omnidirectional imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3487—3494.
陈立栋, 王 伟, 张茂军, 等. 双反射面互补结构的折反射全向成像系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3487—3494.
- S Baker, S K Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. International J Computer Vision, 1999, 35(2): 1—22.
- R Swaminathan. Focus in catadioptric imaging systems[C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision, 2007. 2919—2925.
- Feng Huajun, Tao Xiaoping, Zhao Jufeng, *et al.*. Review and prospect of image restoration with space-variant point spread function[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1): 1—7.
冯华君, 陶小平, 赵巨峰, 等. 空间变化 PSF 图像复原技术的研究现状与展望[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 1—7.
- Tao Xiaoping, Feng Huajun, Lei Hua, *et al.*. A splicing method of sectioned restoration algorithm for images with space-variant point spread function[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 648—653.
陶小平, 冯华君, 雷 华, 等. 一种空间变化 PSF 图像分块复原的拼接方法[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 648—653.
- Huang Yan, Xu Qiaoyu, Ye Dong, *et al.*. Auto-focus method based on autocorrelation of derivative image[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3435—3440.
黄 艳, 徐巧玉, 叶 东, 等. 基于微分图像自相关的自动对焦法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3435—3440.
- Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.*. Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891—2897.
李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891—2897.

- Li Tiecheng, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al.*. New analytical line spread function fitting model for modulation transfer function calculation[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3454—3459.
李铁成, 冯华君, 徐之海, 等. 一种可用于调制传递函数计算的新型线扩展函数拟合模型[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3454—3459.
- Zhao Lin, Jin Weiqi, Chen Yinan, *et al.*. Blind restoration for defocus blurred image based on autocorrelation of derivative image[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1703—1708.
赵 琳, 金伟其, 陈翼男, 等. 基于微分图像自相关的离焦模糊图像盲复原[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1703—1708.
- Liu Xiaohui, Guo Cheng'an, Hu Jiasheng. A modified Wiener filtering for restoration of ring-coded aperture images in inertial confinement fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1045—1050.
刘晓辉, 郭成安, 胡家升. 惯性约束聚变中环孔编码图像恢复的改进维纳滤波方法[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1045—1050.
- Chen Xinbing, Yang Shizhi, Wang Xianhua, *et al.*. Satellite image blind restoration based on surface fitting and generalized total variation[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2009, 30(9): 1896—1901.
陈新兵, 杨世植, 王先华, 等. 基于曲面拟合与广义总变分的卫星图像盲复原术[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9): 1896—1901.
- Shi Mingzhu, Xu Tingfa, Zhang Kun. Total variation image restoration for mixed blur in moving image[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1973—1980.
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—1980.
- Tao Xiaoping, Feng Huajun, Zhao Jufeng, *et al.*. A total-variation majorization-minimization sectioned restoration algorithm with gradient ringing metric image quality assessment[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3025—3030.
陶小平, 冯华君, 赵巨峰, 等. 结合基于梯度的振铃评价算法的总变分最小化图像分块复原法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3025—3030.
- Zeng Jiyong, Su Xianyu. Hyperboloidal catadioptric omnidirectional imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1138—1142.
曾吉勇, 苏显渝. 双曲面折反射全景成像系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1138—1142.
- Li Yongle, Zhang Maojun, Lou Jingtao, *et al.*. Design of catadioptric omnidirectional imaging system for defocus deblurring[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0911001.
李永乐, 张茂军, 娄静涛, 等. 去散焦模糊的折反射全向成像系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0911001.
- Jose M Bioucas-Dias, Mario A T Figueiredo, Joao P Olivei. Total variation-based image deconvolution: a majorization-minimization

- approach[C]. IEEE ICA ASSP, 2006, 2: 861–864.
- 18 L Rudin, S Osher, E Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Physica D, 1992, 60(1-4): 259–268.
- 19 C Demonceaux, P Vasseur, Y Fougerolle. Central catadioptric image processing with geodesic metric [J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(12): 840–849.
- 20 F Jacquy, F Comby, O Strauss. Fuzzy edge detection for omnidirectional images[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(15): 1991–2010.
- 21 Jose M Bioucas-Dias, Mario A T Figueiredo. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2992–3004.

栏目编辑：李文喆