

基于编码孔径的折反射全向成像去散焦模糊技术

李永乐 王 炜 娄静涛 刘 煜 彭 杨 张茂军

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 折反射全向成像系统中, 反射镜曲率和镜头光圈是导致散焦模糊的主要因素, 随着高分辨率图像传感器器件和大光圈镜头的采用, 散焦模糊造成的图像清晰度问题显得越发突出。提出了一种基于编码孔径的折反射全向成像去散焦模糊技术。理论分析折反射全向成像散焦模糊原因, 提出了一种确定最佳聚焦平面的方法, 通过采取有效的全向图像环带分割和拼接策略, 利用基于图像稀疏先验的反卷积算法对散焦模糊全向图进行复原, 得到全局清晰的全向图像。该方法较好地解决了折反射全向成像散焦模糊问题, 对提高折反射全向成像质量, 促进其在相关领域的广泛应用具有重要意义。

关键词 成像系统; 折反射全向成像; 散焦模糊; 最佳聚焦平面; 编码孔径; 图像复原

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0511004

Defocus Deblurring for Catadioptric Omnidirectional Imaging Based on Coded Aperture

Li Yongle Wang Wei Lou Jingtao Liu Yu Peng Yang Zhang Maojun

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

Abstract In catadioptric omnidirectional imaging systems, defocus blur is mainly caused by lens aperture and mirror curvature. The problem of image definition caused by defocus blur becomes more severe when high resolution sensors and large apertures are applied. One design of catadioptric omnidirectional imaging system for defocus deblurring, which is based on coded aperture, is proposed. The defocus blur of catadioptric omnidirectional imaging is analyzed in theory, and a method of obtaining optimal focused plane is proposed. With strategies of annulus division and stitching of omnidirectional images, a deconvolution algorithm based on image sparse prior is used for the defocus blur omnidirectional image restoration to obtain all sharp omnidirectional images. The method is effective for catadioptric omnidirectional image defocus deblurring, which has an important meaning in improving catadioptric omnidirectional imaging quality and promoting applications in related fields.

Key words imaging systems; catadioptric omnidirectional imaging; defocus blur; optimal focused plane; coded aperture; 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, 如全景车载摄像侦察、车载智能交通系统 (ITS)、智能

全景视频监控、移动机器人视觉导航、远程视频会议、天文望远镜和医学等领域^[1]。但是以往大部分研究工作主要集中在折反射全向成像系统中的反射镜面型设计、空间分辨率和系统应用方面^[2], 相比之

收稿日期: 2012-12-19; **收到修改稿日期**: 2013-01-31

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

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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

下对折反射系统成像质量的研究较少。折反射全向成像系统中,反射镜曲率和镜头光圈是导致散焦模糊的主要因素^[3,4],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,散焦模糊造成的图像清晰度问题显得越发突出。虽然 Baker 等^[3]在 1999 年就指出了折反射全向成像的散焦模糊现象,但是直到 2007 年这个问题才被 Swaminathan^[4]再次提出并强调。Swaminathan 从理论上分析了折反射系统中曲面镜的压缩效应,即无限远的场景深度被压缩到有限的虚像深度上,并提出一种折反射全向成像的最佳聚焦平面位置的估算方法。Kuthirummal^[5]将全向图像分为许多小的图像块,认为在每个小块里点扩展函数(PSF)具有不变性,再利用迭代的 Richardson-Lucy 算法对图像做反卷积复原。张帆^[6]分析了全向图像模糊尺度分布规律,将全向图像分为若干模糊条带,提出了一种径向移变的 PSF 建模方法。冯华君等^[7]讨论了针对空间变化 PSF 图像复原技术的空间坐标变换法。陶小平等^[8]提出了一种基于分块处理的空间变化 PSF 图像复原算法,其中相邻图像块重叠区域的像素需要进行加权叠加。黄艳等^[9]提出了一种基于微分图像自相关的快速自动对焦方法。李铁成等^[10,11]提出了基于调制传递函数计算的图像复原方法。Li 等^[12]通过分析折反射全向成像系统中虚像的空间分布特点,定义出最佳聚焦图像区域的形状是一组相邻的同心圆环,提出了一种基于模型的方法。然而这些方面基本上没有取得本质性突破。可以认为,不改变现有的折反射全向成像系统的成像方式,无法很好地解决折反射全向成像的散焦模糊问题。

本文结合计算摄影的相关方法^[13-15],针对折反射全向成像散焦模糊问题,提出了一种确定最佳聚焦平面的方法;在此基础上,应用编码孔径技术,提出了全向图像相邻环带分割和拼接策略;利用图像稀疏先验的反卷积算法对图像进行复原,最后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

2.1 散焦原因分析

不失一般性,折反射全向成像系统选择双曲面作为反射镜面型。如图 1 所示二维笛卡尔坐标系 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

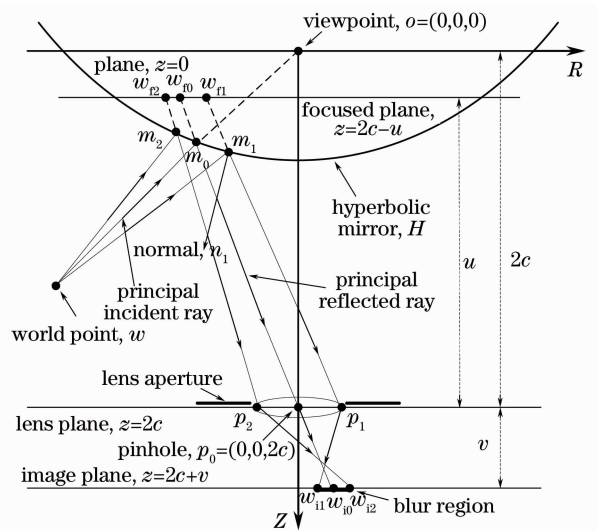


图 1 折反射全向成像系统散焦示意图

Fig. 1 Defocus sketch map of catadioptric omnidirectional imaging system

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^[3,16]。

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

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

式中常数 $k > 2$ 。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_{10} ,其中 v 为像距。

假定由 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

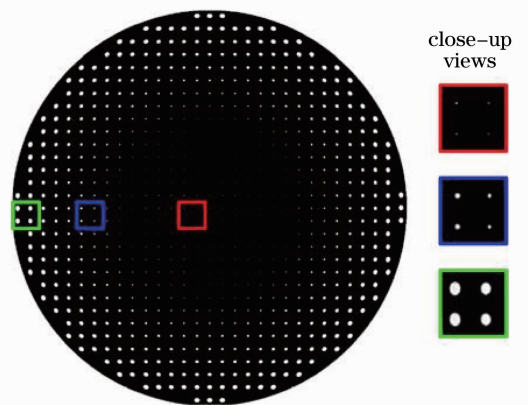


图 2 折反射全向成像系统散焦仿真结果

Fig. 2 Defocus simulation results of catadioptric omnidirectional imaging system

平面上成的像为 w_{i1} ；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_{i2} 。一般而言，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是同一个点^[3]，于是就导致了散焦模糊。图 2 所示

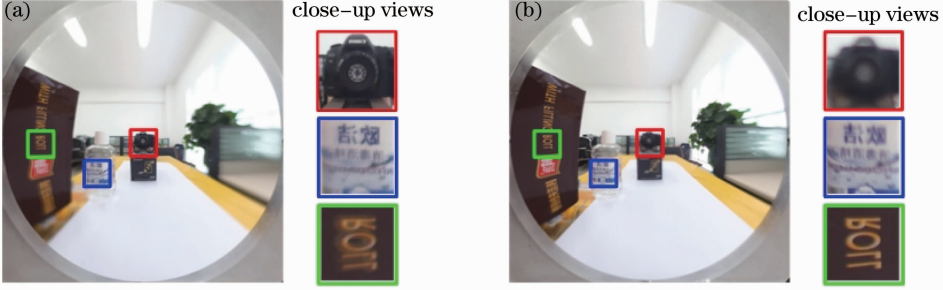


图 3 折反射全向成像系统散焦模糊实际效果图。(a)内环清晰,外环模糊;(b)外环清晰,内环模糊

Fig. 3 Actual defocus blur images of catadioptric omnidirectional imaging system. (a) Center of image is sharp and periphery is blurry; (b) center of image is blurry and periphery is sharp

2.2 模糊区域大小

根据文献[3],实景空间的一个物点,经折反射全向成像,在像平面成像的模糊区域可以近似看成一个圆。如图 1 所示,线段 $w_{i1} w_{i2}$ 的长度可以近似为模糊圆的直径。根据高斯薄透镜成像原理^[18],有

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{u}, \quad (2)$$

式中 f 为镜头焦距, u 为物距, 聚焦平面的位置即为 $z=2c-u$ 。由于点 o, m_0, w 共线, 则 w 的坐标可以表示为

$$w = \frac{q}{|om_0|} (x_0, y_0, z_0), \quad (3)$$

式中 $|om_0|$ 为点 m_0 到点 o 的距离, q 为正常数, 且 $q > |om_0|$ 。考虑镜面上的反射点 $m_1(x_1, y_1, z_1)$, $p_1[D\cos\alpha/2, D\sin\alpha/2, 2c]$ 和 $p_2[D\cos(\alpha+\pi)/2, D\sin(\alpha+\pi)/2, 2c]$ 分别位于镜头光圈的边缘, 其中 D 为光圈的直径, α 为镜头平面上点的方位角。

需先求出点 m_1 的坐标。根据反射定律, 已知双曲面方程, 可得到反射镜面上的点 m_1 处的法线 $m_1 n_1$ 的直线方程为

$$\frac{2}{kx_1}(x-x_1) = \frac{2}{ky_1}(y-y_1) = \frac{2-k}{k(z_1-c)}(z-z_1). \quad (4)$$

直线 wm_1 和直线 $m_1 p_1$ 的方程分别为

$$\frac{x-x_1}{\frac{q}{|om_0|}x_0-x_1} = \frac{y-y_1}{\frac{q}{|om_0|}y_0-y_1} = \frac{z-z_1}{\frac{q}{|om_0|}z_0-z_1}, \quad (5)$$

$$\frac{x-x_1}{D\cos\alpha/2-x_1} = \frac{y-y_1}{D\sin\alpha/2-y_1} = \frac{(z-z_1)}{2c-z_1}. \quad (6)$$

为 ZEMAX^[17] 仿真的散焦模糊示意图, 所设计的实际系统获得的折反射全向成像散焦模糊效果如图 3 所示, 当全向图像内环聚焦清晰时, 外环必然模糊; 外环聚焦清晰时, 内环必然模糊。

为了简化问题的描述, 将直线 $wm_1, m_1 n_1$ 和 $m_1 p_1$ 分别记为 L_1, L_2 和 L_3 , 且方程为

$$L_1: \frac{x-x_1}{r_1} = \frac{y-y_1}{s_1} = \frac{z-z_1}{t_1}, \quad (7)$$

$$L_2: \frac{x-x_1}{r_2} = \frac{y-y_1}{s_2} = \frac{z-z_1}{t_2}, \quad (8)$$

$$L_3: \frac{x-x_1}{r_3} = \frac{y-y_1}{s_3} = \frac{z-z_1}{t_3}. \quad (9)$$

m_1 满足以下三个约束:

1) 直线 L_1, L_2 和 L_3 共面, 即

$$\begin{vmatrix} r_1 & s_1 & t_1 \\ r_2 & s_2 & t_2 \\ r_3 & s_3 & t_3 \end{vmatrix} = 0. \quad (10)$$

2) 入射角等于反射角, 即 L_1 与 L_2 的夹角等于 L_2 与 L_3 的夹角:

$$\frac{r_1 r_2 + s_1 s_2 + t_1 t_2}{\sqrt{r_1^2 + s_1^2 + t_1^2} \sqrt{r_2^2 + s_2^2 + t_2^2}} = \frac{r_3 r_2 + s_3 s_2 + t_3 t_2}{\sqrt{r_2^2 + s_2^2 + t_2^2} \sqrt{r_3^2 + s_3^2 + t_3^2}}. \quad (11)$$

3) 点 m_1 在双曲面 H 上, 即

$$\frac{(z_1-c)^2}{c^2 \left(\frac{k-2}{k}\right)} - \frac{x_1^2 + y_1^2}{c^2 \left(\frac{2}{k}\right)} = 1. \quad (12)$$

结合以上三个约束条件, 就可以求出点 m_1 的坐标。

求得点 m_1 的坐标后, 再求出像平面上的点 w_{i1} 的位置。设反射光线 $m_1 p_1$ 的反向延长线与聚焦平面交于点 w_{i1} , 由于聚焦平面上的点在像平面上都是精确聚焦的, 因此连接 w_{i1} 与光心 p_0 的直线与像平面的交点 w_{i1} , 即为点 w 经反射镜面上的点 m_1 反射在

像平面上成的像。联立直线 L_3 方程和聚焦平面方程 $z = 2c - u$, 求得 w_{f1} 的坐标; 再联立直线 $w_{f1} p_0$ 方程和像平面方程 $z = 2c + v$, 便可求得 w_{f1} 的坐标。根据

$$\begin{cases} \frac{x - x_1}{D \cos \alpha/2 - x_1} = \frac{y - y_1}{D \sin \alpha/2 - y_1} = \frac{z - z_1}{2c - z_1}, \\ z = 2c - u \end{cases} \quad (13)$$

求得 $w_{f1} = (w_{f1x}, w_{f1y}, w_{f1z})$ 。再根据

$$\begin{cases} \frac{x}{w_{f1x}} = \frac{y}{w_{f1y}} = \frac{z - 2c}{w_{f1z} - 2c}, \\ z = 2c + v \end{cases} \quad (14)$$

求得 $w_{i1} = (w_{i1x}, w_{i1y}, w_{i1z})$ 。

同样可以求出由 w 发出的光线经反射镜面上的点 m_2 反射, 穿过光圈另一个边缘上的点 p_2 , 在像平面上成的像 $w_{i2} = (w_{i2x}, w_{i2y}, w_{i2z})$ 。易知, $w_{i1z} = w_{i2z}$, 则所定义实景空间的一个物点 w , 经折反射成像, 在像平面上成像的模糊圆的直径为

$$d_{\text{blur}} = \sqrt{(w_{i1x} - w_{i2x})^2 + (w_{i1y} - w_{i2y})^2}. \quad (15)$$

3 基于编码孔径的去散焦模糊

3.1 使用编码孔径的优势分析

采用编码孔径技术解决散焦模糊, 考虑主要有三个方面的优势。

1) 装置设计简单易操作。根据文献[19], 在相机一次成像曝光时间内, 通过控制像平面运动的方式, 构建具有空间不变性的点扩展函数, 这种实现折反射全向成像去散焦模糊的方法, 虽然克服了对全向图像进行分块处理的缺陷, 但是系统装置实现复杂。而编码孔径的实现方式简单易操作, 在镜头中间添加一块事先设计好的掩模即可, 如图 4 所示。



图 4 编码孔径镜头装置图

Fig. 4 Setup of coded aperture lens

2) 增加通光量。相比通过缩小光圈的方式来增大景深, 以达到消除散焦模糊的方法, 采用编码孔径的方法无需缩小光圈, 而且通常将光圈值调至最大, 这样能更好地处理低照度条件下的散焦模糊问题[20]。而缩小光圈的做法在光照条件一般或不好时, 反而会增加更多的噪声。

3) 提高模糊尺度的辨识能力。如图 5 所示, 左

边是普通孔径模式下的反卷积仿真结果, 分别用三个不同尺度的散焦模糊核对模糊图像作反卷积, 发现正确尺度和较小尺度的 PSF 都可以得到较好的结果。而右边是编码孔径模式下的反卷积仿真结果, 可以清晰地看出, 只有运用正确尺度的散焦模糊核才能得到较理想的反卷积结果。

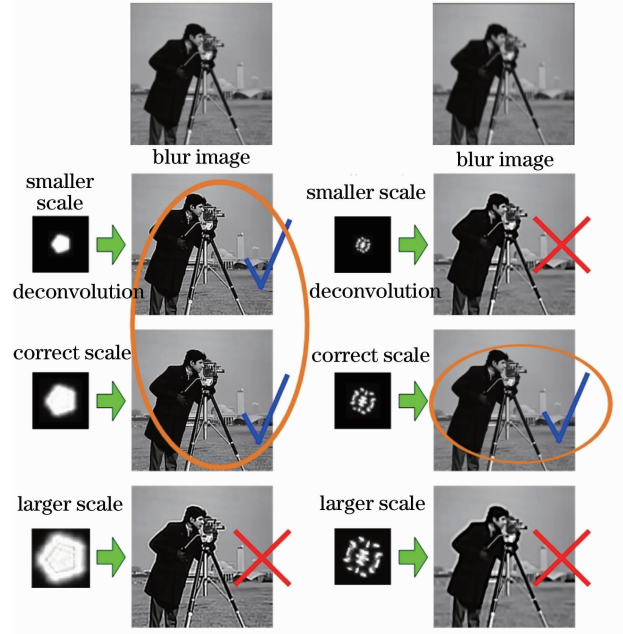


图 5 编码孔径和普通孔径反卷积结果

Fig. 5 Deconvolution results of coded aperture and conventional aperture

3.2 确定最佳聚焦平面

理想情况下, 为了尽可能少地丢失图像中的高频信息, 相机应该聚焦在使得 PSF 尽可能紧凑的位置。针对折反射全向成像系统, 相机应该聚焦在光线反射成像到全向图像中的中心和边缘之间的位置[5]。在利用编码孔径的折反射成像系统获取全向图像前, 为了获取具有更多高频信息的全向图像, 需要确定最佳聚焦平面。全向图像散焦模糊圆面积和 S_{sum} 定义为

$$S_{\text{sum}} = \sum_{r_i=0}^R \sum_{\theta_j=0}^{2\pi} \pi \left[\frac{d_{r_i, \theta_j}(u)}{2} \right]^2, \quad (16)$$

式中 r_i, θ_j 分别为全向图像中像素的极坐标位置参数, $d_{r_i, \theta_j}(u)$ 为像素位置 (r_i, θ_j) 对应的模糊圆直径, 是关于聚焦平面位置 u 的函数, 用 2.2 节中的方法计算得到。 S_{sum} 随 u 变化的曲线图如图 6 所示。

由

$$u_{\text{focused}} = \underset{u}{\operatorname{argmin}} S_{\text{sum}} = \underset{u}{\operatorname{argmin}} \sum_{r_i=0}^R \sum_{\theta_j=0}^{2\pi} \pi \left[\frac{d_{r_i, \theta_j}(u)}{2} \right]^2 \quad (17)$$

解得当 S_{sum} 取得最小值时,即求得最佳聚焦平面的位置 $u_{focused}$,式中 argmin 表示目标函数取最小值时的变量值。已知双曲面参数 $c=402.10\text{ mm}$, $k=2.8748$,镜头焦距 $f=30.0\text{ mm}$,求得当 $u=820.15\text{ mm}$ 时, S_{sum} 取得最小值,这时的 u 即为最佳聚焦平面位置。

图 7 为不同聚焦位置的折反射全向成像实验效果图,图 7(a)和图 7(c)分别是聚焦在全向图像内环和外环的实际效果图,图 7(b)是聚焦在最佳聚焦平面位置的实际效果图。

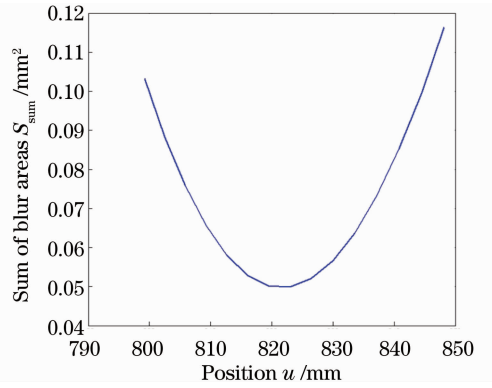


图 6 S_{sum} 随 u 变化曲线图

Fig. 6 Graph of S_{sum} when u varies



图 7 不同聚焦位置的实验效果图。(a)聚焦在全向图像内环;(b)聚焦在最佳聚焦平面;(c)聚焦在全向图像外环

Fig. 7 Real images captured at different focused planes. (a) Focused at the center of omnidirectional image; (b) focused at the optimal focused plane; (c) focused at the periphery of omnidirectional image

为了定量说明基于最佳聚焦平面捕获的全向图像保存了最多的高频信息,采用计算比较平均梯度的方法。平均梯度是指图像的边界附近灰度的差异,即灰度变化率。这种变化率的大小可用来表示图像清晰度,它反映了图像微小细节反差变化的速率,即图像多维方向上密度变化的速率,表征图像的相对清晰程度。平均梯度越大,图像层次越多,也就越清晰,其计算公式为

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{d_x^2(i,j) + d_y^2(i,j)}{2}}, \quad (18)$$

式中 $d_x(i,j) = I(i+1,j) - I(i,j)$, $d_y(i,j) = I(i,j+1) - I(i,j)$, \bar{G} 为图像的平均梯度, $I(i,j)$ 表示图像在 (i,j) 位置的灰度值, M 、 N 分别为图像的总行数和总列数。如表 1 所示,对图 7 中的全向图像分别计算平均梯度,可以明显地看出,基于最佳聚焦平面得到的全向图像的清晰度最好,如图 7(b)所示。

表 1 图像质量评价

Table 1 Image quality evaluation

	Fig. 7(a)	Fig. 7(b)	Fig. 7(c)
Average gradient	2.9734	3.2305	2.7850

3.3 环带分割策略

一个合理的假设是,在全向图像中一个小的区域内,图像模糊程度可以认为是空间不变的^[5]。根据折反射全向成像原理,物距在景深范围内的虚像,对应的是空间俯仰角之间的景物,对应在全向图像中是一个环带,且该环带是清晰的;调焦能改变清晰环带的位置。由于成像系统的镜面是旋转对称的,最佳聚焦区域的形状是一组相邻的同心环面,并且不依赖于 3D 场景结构。如图 8 所示,成像区域(I_1, I_2, I_3)分别对应于虚像区域(V_1, V_2, V_3),根据成像分布特点,将全向图像分为若干相邻环带,认为在每个环带中的散焦模糊核是空间不变的^[6]。

根据模糊圆的大小,给定一个可接受模糊圆大小的阈值,小于这个阈值认为图像区域是清晰的,大于这个阈值则认为图像区域是模糊的。基于如图 9 所示的最佳聚焦平面的模糊圆直径大小分布示意图,依据模糊圆的大小,将全向图像分为相邻的三个环带。为了能在拼接时改善边界灰度的不连续性,保证环带边界区域的平滑性,分环带时相邻环带之间保持一定的重叠区域,将重叠区域宽度设为 20 pixel,图 10 为实际的环带分割实验结果图。

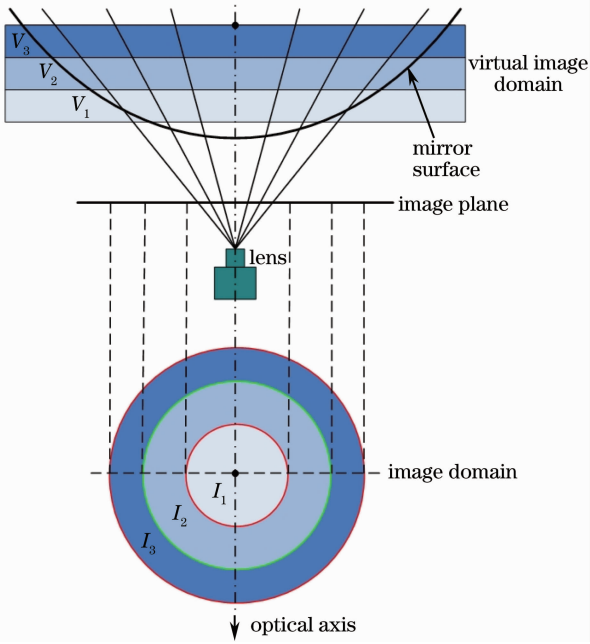


图 8 折反射全向成像环带示意图

Fig. 8 Sketch map of annuluses in catadioptric omnidirectional imaging

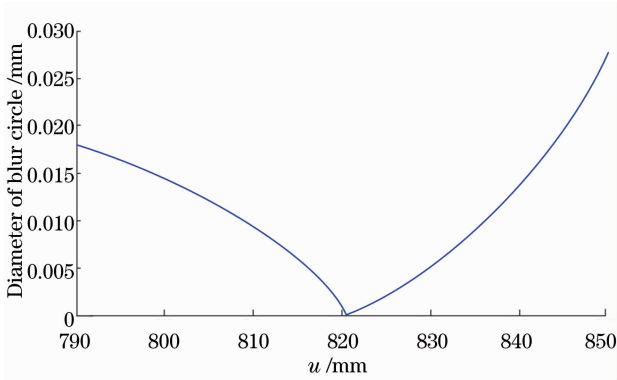


图 9 基于最佳聚焦平面的模糊圆直径大小分布示意图

Fig. 9 Sketch map of diameter of blur circles based on optimal focused plane

3.4 环带拼接策略

为了改善环带边界灰度的不连续性,保证环带边界区域的平滑性,图像环带保留的重叠区域像素值以其到相邻环带边界的距离构成的加权系数叠加计算完成渐进拼接,如图 11 所示。

图 11 中 $r_{overlap}$ 为环带边界重叠区域宽度的一半, r_0 为重叠区域中心到全向图像中心的距离, r 为重叠区域像素 $I(i, j)$ 到全向图像中心的距离,定义一个基于 r 的权重:

$$\alpha = (r - r_0 + r_{overlap}) / (2r_{overlap}), \quad (19)$$

则重叠区域像素 $I(i, j)$ 的值可以表示为

$$I(i, j) = (1 - \alpha)I_{middle}(i, j) + \alpha I_{outer}(i, j), \quad (20)$$

式中 $I_{middle}(i, j)$ 为像素位置 (i, j) 在中间环带中的



图 10 环带分割结果图

Fig. 10 Annuluses division results

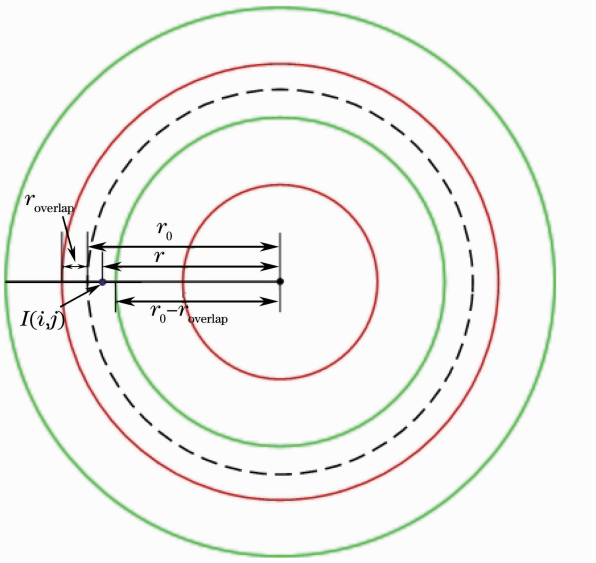


图 11 相邻环带拼接示意图

Fig. 11 Sketch map of neighboring annuluses stitching
像素取值, $I_{outer}(i, j)$ 为像素位置 (i, j) 在外环带中的像素取值。

4 实验结果与分析

根据前面的去散焦模糊的技术分析,将基于最佳聚焦平面捕获的全向图像分为相邻的环带后,需要得到每个环带的散焦模糊核,即 PSF。利用 ZEMAX 光学仿真工具,根据实际装置设计仿真环境,从而得到相对位置的 PSF^[14],如图 12 所示。

确定了观测图像的散焦模糊核后,需要去除散焦模糊,恢复得到全局清晰的全向图像。将去散焦模糊表示为以下的最优化问题:

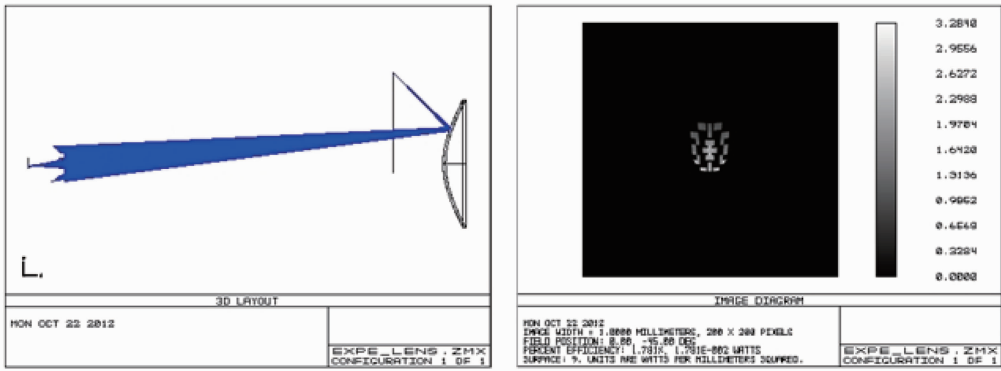


图 12 PSF 仿真结果

Fig. 12 Simulation results of PSF

$$f^* = \operatorname{argmin} |h * f - g|^2 + \lambda \sum_i \rho(\nabla f_i), \quad (21)$$

式中 f 为原始清晰图像, g 为观测图像, h 为 PSF, $\lambda \sum_i \rho(\nabla f_i)$ 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^* 。采

用图像稀疏先验^[14], 分别对每个环带作反卷积复原, 将环带拼接成完整的全向图像。实验结果如图 13和图 14 所示, 分别为室内和室外的去散焦模糊实验结果。

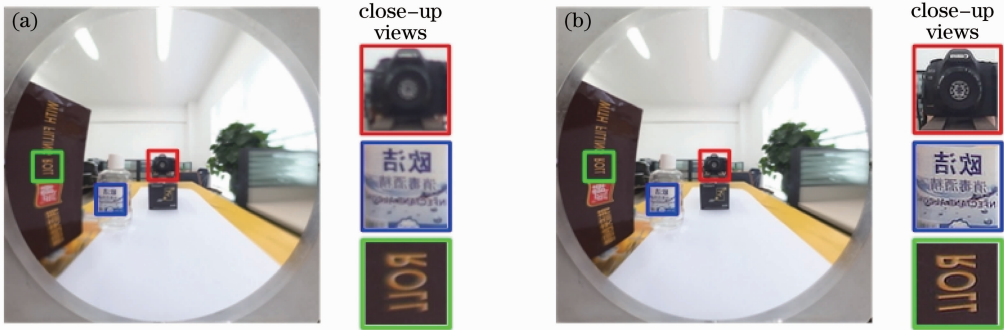


图 13 编码孔径去散焦模糊室内实验结果图。(a)模糊图像；(b)反卷积复原结果

Fig. 13 Indoor experimental result for defocus deblurring based on coded aperture. (a) Blurry image; (b) deconvolution recovery result

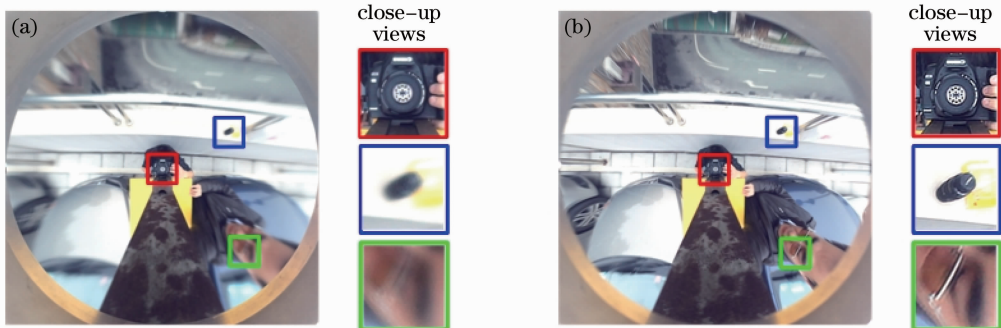


图 14 编码孔径去散焦模糊室外实验结果图。(a)模糊图像；(b)反卷积复原结果

Fig. 14 Outdoor experimental result for defocus deblurring based on coded aperture. (a) Blurry image; (b) deconvolution recovery result

5 结 论

在折反射全向成像系统产生散焦模糊原因理论

分析的基础上, 依据折反射光学成像模型, 提出了一种基于最佳聚焦平面的编码孔径折反射全向成像去

散焦模糊方法,并利用图像稀疏先验反卷积复原得到全局清晰的全向图像。实验结果表明,通过采取有效的全向图像相邻环带分割和拼接策略,处理空间变化 PSF 的散焦模糊全向图像,达到了很好的去散焦模糊效果。

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 炜, 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): 175~196
- R. Swaminathan. Focus in catadioptric imaging systems [C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision, 2007, 2919~2925
- S. Kuthirummal. Flexible Imaging for Capturing Depth and Controlling Field of View and Depth of Field [D]. America: Columbia University, 2009. 83~101
- Zhang Fan. On Some Optimal Methods for Improving Omnidirectional Vision Image Quality [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010. 52~72
张 帆. 全景视觉图像质量优化方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010. 52~72
- 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
- W. Li, Y. Li, Y. Wu. A model based method for overall well focused catadioptric image acquisition with multi-focal images [C]. Proceedings of International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, 2009, **5702**: 460~467
- S. K. Nayar. Computational cameras: redefining the image [J]. *Computer*, 2006, **39**(8): 30~38
- A. Levin, R. Fergus, F. Durand *et al.*. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3):
- C. Zhou, S. Lin, S. K. Nayar. Coded aperture pairs for depth from defocus and defocus deblurring [J]. *Int. J. Comput. Vis.*, 2011, **93**: 53~72
- 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
- Huan Yifan, Li Lin. Optics Design Tutoria [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 59~81
黄一帆, 李 林. 光学设计教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 59~81
- E. Hecht. Optics [M]. 4th edition. Boston: Addison-Wesley, 2003
- 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
- O. S. Cossairt, M. Gupta, S. K. Nayar. When does computational imaging improve performance? [J/OL]. <http://academiccommons.columbia.edu/item/ac:151252>

栏目编辑: 李文喆