

去散焦模糊的折反射全向成像系统设计

李永乐 张茂军 娄静涛 王 炜

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 随着高分辨率传感器和大光圈的采用, 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。提出了一种有效去除散焦模糊的折反射全向成像系统设计。理论分析折反射成像散焦模糊的原因, 建立全向图点扩展函数与实景空间物点及成像系统虚像位置的关系; 在一次曝光成像时间内匀速旋转镜头对焦环, 通过累积曝光使全向图散焦模糊核具有期望的空间不变性; 利用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; 点扩展函数; 图像复原

中图分类号 TN911 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0911001

Design of Catadioptric Omnidirectional Imaging System for Defocus Deblurring

Li Yongle Zhang Maojun Lou Jingtao Wang Wei

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

Abstract The defocus blur problem of catadioptric omnidirectional imaging, which is caused by aperture and mirror curvature, becomes more severe along with introducing high-resolution sensors and large aperture. One design of catadioptric omnidirectional imaging system for defocus deblurring is proposed. The defocus blur of catadioptric omnidirectional imaging is analyzed in theory, and the relation between point spread function of omnidirectional image and scene's spatial points or the position of virtual features is established. Then, the defocus blur kernel of omnidirectional image is spatially invariant when image plane is moved in a particular pattern during image integration. A deconvolution algorithm 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, and 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; point spread function; 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, 如全景军事侦察、智能全景视频监控、移动机器人视觉导航、远程视频会议和天文望远镜等领域^[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^[2]和系统应用方面, 相比之下, 对折反射系统的成像质量的研究较少。随着高分辨率图像传感器器件和大光圈在折反射成像系统中的采用, 折反射全向成像系统中, 反射镜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越发突出。虽然

收稿日期: 2012-03-07; 收到修改稿日期: 2012-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61175006, 61175015, 60803101, 60872150)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 and 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, 教授, 博士生导师, 主要从事全向视觉、图像处理 and 多媒体与虚拟现实技术等方面的研究。E-mail: zmjbar@163.com

Baker 等^[3]在 1999 年就提出了折反射全向成像的散焦模糊,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,并推导得到对于折反射成像的最佳聚焦平面位置。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,加权系数与该像素到等晕区边界的距离有关。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,这方面的研究基本上没有取得本质性的突破。可以认为,已知空间变化 PSF,不改变现有的折反射全向成像系统的成像方式,仅靠后期的图像处理无法很好地解决折反射成像的散焦模糊问题。

本文结合计算摄影的相关方法^[13,14],针对折反射全向成像散焦模糊问题,在一次曝光成像时间内使像平面在给定的运动方式下成像,构建基于时间累积曝光的具有空间不变性 PSF 模型,再采用图像反卷积算法对图像进行复原,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

2.1 散焦原因分析

设计的折反射全向成像系统,反射镜面型选择双曲面,对于透视相机,只有双曲面可以满足单视点约束^[3,15]。如图 1 所示二维笛卡尔坐标系 Ro_z ,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,此时的折反射成像系统满足单视点约束条件。

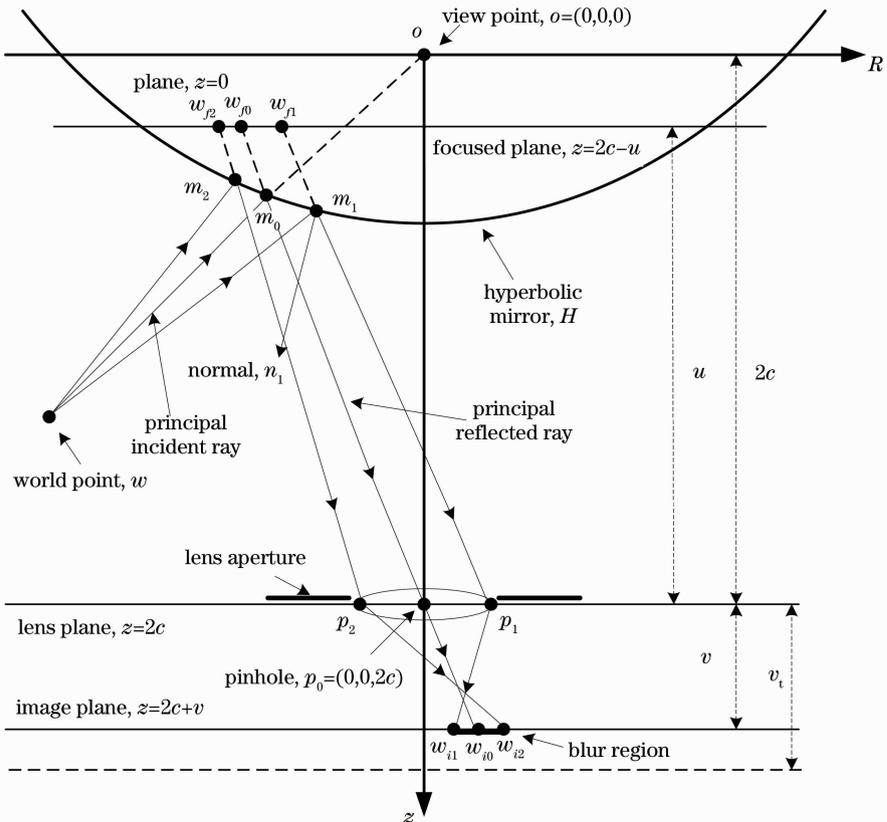


图 1 折反射全向成像系统散焦示意图

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, ω 为实景空间的一个物点, 根据单视点约束, 若光线 ωm_0 的延长线经过虚拟视点 o , 则光线 ωm_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 ωm_0 称为主入射光线, 光线 $m_0 p_0$ 称为主反射光线, 在像平面 $z = 2c + v$ 上成的像为 ω_{i0} , 其中 v 为像距。

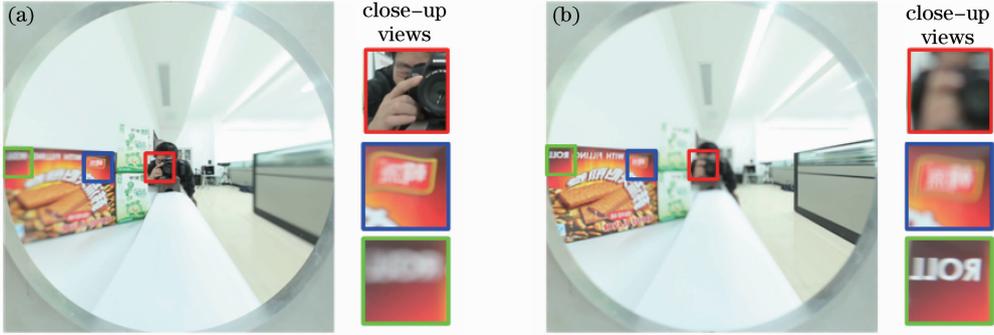


图2 折反射全向成像散焦模糊实际效果图。(a)内环清晰,外环模糊;(b)外环清晰,内环模糊

Fig. 2 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 $|\omega_{i1} \omega_{i2}|$ 的长度可以近似为模糊圆的直径。根据薄透镜成像原理^[16], 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, ω 共线, 则 ω 的坐标可以表示为

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

式中 l_{om_0} 为点 m_0 到点 o 的距离, q 为正常数, 且 $q > l_{om_0}$ 。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。

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

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

假定由 ω 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 ω_{i1} ; 同样地, 由 ω 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 ω_{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。所设计的实际系统获得的折反射成像散焦模糊如图2所示, 全向图像要么内环聚焦较好, 而外环模糊; 要么外环聚焦较好, 而内环模糊。

直线 ωm_1 和直线 $m_1 p_1$ 的方程分别为

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

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

为了简化问题的描述, 将直线 $\omega m_1, m_1 n_1$ 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 满足三个约束条件:

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,再根据薄透镜成像原理,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_{f1} ,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_{f1} 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_{i1} 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 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 构建具有空间不变性 PSF 的折反射成像方式

3.1 基于时间累积的 PSF

空间点光源经镜头光圈,在像平面上成像的强度分布就是 PSF。通常情况下,PSF 的表达形式较为复杂,图像中不同区域的模糊程度也是不同的,即 PSF 是空间移变的。对于普通相机成像系统而言,图像散焦的模糊程度跟场景中物体的深度有关。散焦模糊的退化模型为

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y, s, t) + n(x, y), \quad (16)$$

式中 $g(x, y)$ 为实际采集到的图像, $f(x, y)$ 为清晰图像, $h(x, y, s, t)$ 为 PSF, $*$ 为卷积运算, $n(x, y)$ 为加性噪声。采用 PSF 圆盘模型,认为模糊区域是一块均匀分布的圆形光斑,函数为

$$h(r, v) = \frac{1}{\pi d^2} \Delta\left(\frac{r}{d}\right), \quad (17)$$

式中 $\Delta\left(\frac{r}{d}\right) = \begin{cases} 1, & r \leq d/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$, d 为模糊圆的直径, r

为模糊圆中的点到模糊中心的距离。

折反射全向成像系统的 PSF 是空间移变的,即在图像不同的地方,PSF 是不同的。考虑在相机一次曝光时间内时,像平面的移动对 PSF 产生的影响。如图 1 所示,当像平面沿着光轴的方向移动时,其中 v_t 是时间 t 的函数,表示像平面到镜头光圈的直径。定义基于时间累加的点扩展函数 (APSF) 为

$$f_{\text{AP}}(r, v_t) = \int_0^T h(r, v_t) dt, \quad (18)$$

式中 T 为曝光时间。考虑像平面沿光轴方向匀速运动为

$$v_t = v_0 + st. \quad (19)$$

式中 v_0 为像平面初始位置, s 为正常数,表示运动速度。

3.2 具有空间不变性的 APSF

为说明所构建的 APSF 与空间物点的关系,需要定义折反射全向成像系统中的实景空间的物点位置。如图 3 所示,定义 L_w 为实景空间的一个物点 w 到虚拟视点 o 的距离,俯仰角 θ 为由 w 发出的主入射光线与 z 轴(光轴)的夹角。

根据(15)式和(18)式,已知双曲面参数 $c = 402.10 \text{ mm}$, $k = 2.8748$,镜头焦距 $f = 30.0 \text{ mm}$,光圈直径 $D = 10.0 \text{ mm}$, $v_0 = 30.00 \text{ mm}$, $s = 1 \text{ mm/s}$,曝光时间 $T = 0.36 \text{ s}$ 。1) 固定 $L_w = 400 \text{ mm}$,当俯仰角 θ 变化时,如图 4 所示,不同实景空间物点的 APSF 几乎是相同的;2) 固定俯仰角 $\theta = \pi/4$,当 L_w 变化时,如图 5 所示,不同实景空间物点的 APSF 几乎是相同的;3) 当俯仰角 θ 和 L_w 都变化时,如图 6 所示,不同实景空间物点的 APSF 仍然几乎是相同的。

根据上面的分析可知,对双曲面面型的折反射全向成像系统而言,基于像平面匀速直线运动和时间累积曝光成像的全向图的 APSF 几乎是空间不变的。也就是说,这种方式得到的全向图像在全局上的模糊

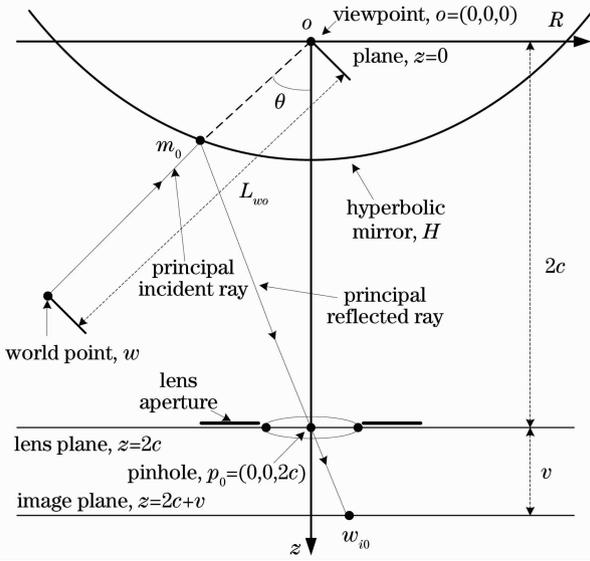


图3 折反射全向成像系统实景空间物点位置定义示意图

Fig. 3 Position definition sketch map of scene's spatial points in catadioptric omnidirectional imaging system

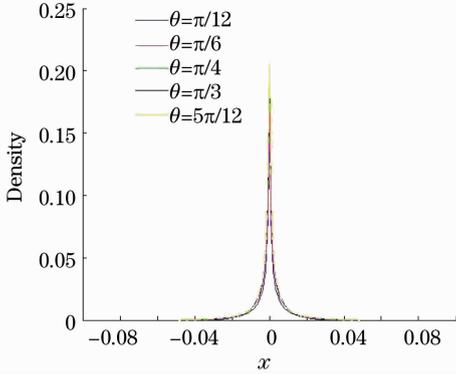


图4 $L_{w_0} = 400$ mm时,不同俯仰角 θ 的实景空间物点的APSF

Fig. 4 Computed APSF of object's spatial point for different θ under the condition $L_{w_0} = 400$ mm

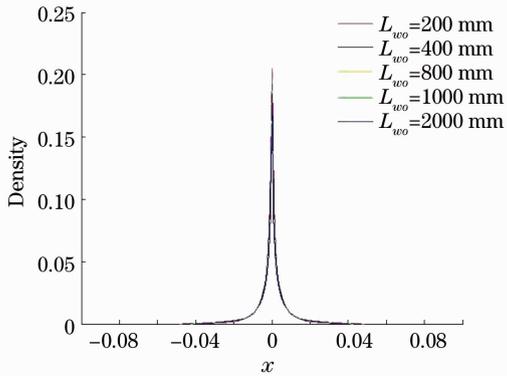


图5 θ 固定时,不同 L_{w_0} 的物空间点的APSF

Fig. 5 Computed APSF of object's spatial point for different L_{w_0} under the condition that θ is fixed

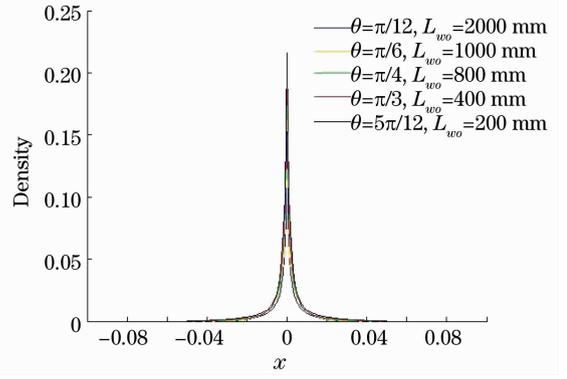


图6 不同 θ 时,不同 L_{w_0} 的实景空间物点的APSF
Fig. 6 Computed APSF of object's spatial point for different θ and L_{w_0}

程度几乎是相同的,因此可以考虑用实景空间某一个物点的APSF对散焦模糊的图像做反卷积复原。

4 实验结果与分析

根据理论推导,设计如图7所示的实际折反射成像系统。这里需要指出的是,通过手动旋转对焦环的特殊成像方式获取一幅具有空间不变性APSF的全向图像,并对其做反卷积复原。在曝光时间内移动像平面得到的效果可以等价于调整相机的聚焦平面位置,实际上,在很多相机里面当系统聚焦时已经体现了这种运动方式^[14]。在曝光时间内,近似匀速地手动旋转对焦环,这样得到的模糊图像的APSF基本上可以近似为不随实景空间物点的变化而变化的。采用文献[17]的反卷积复原算法,APSF选用3.2节中俯仰角 $\theta = \pi/4$, $L_{w_0} = 800$ mm的空间物点对应的APSF,去散焦模糊实验结果如图8所示。图8(a)中的对焦位置在全向图像的内环,因此图像沿径向方向从里往外越来越模糊;图8(b)中对焦位置在全向图像的外环,因此图像沿径向方向从外往里越来越模糊;图8(c)为本文设计的成像系统实际获得的全向图像,内环部分没有图8(a)中的清晰,而外环部分没有图8(b)中的清晰;图8(d)是反卷积复原后全局清晰的全向图像,可以看出,复原后的图像在全局上都较清晰,较好地解决了折反射全向成像散焦模糊的问题。

为了进一步验证折反射全向成像系统去散焦模糊方法的有效性,采用熵和平均梯度对实验结果进行客观、定量地评价。图像熵值的大小反映了图像所包含的平均信息量的多少,其定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \lg p_i, \quad (20)$$

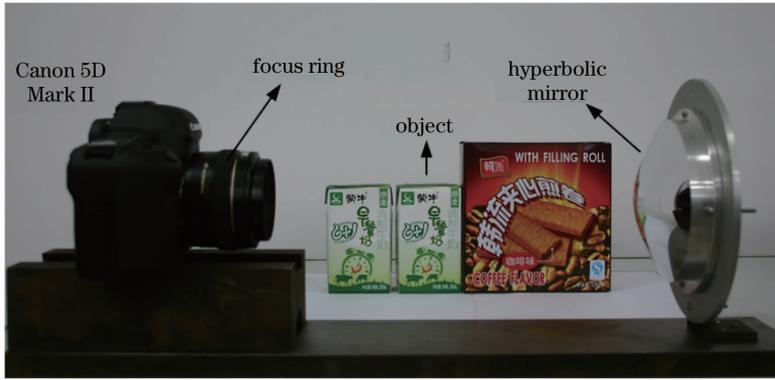


图 7 折反射成像系统实物图

Fig. 7 Experimental equipment of catadioptric imaging system

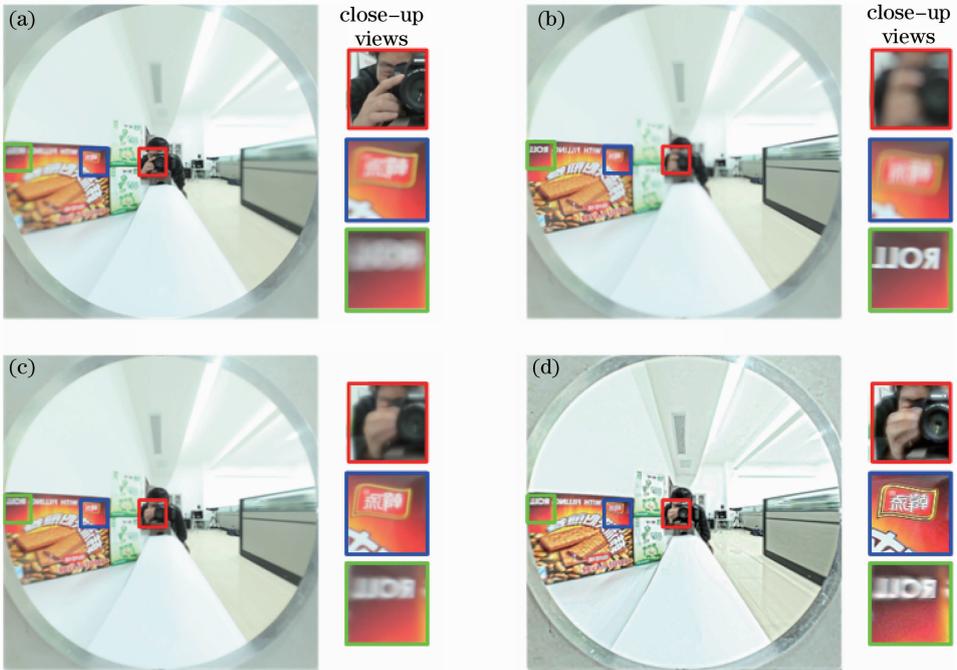


图 8 去散焦模糊实验结果对比图。(a)内环清晰图像;(b)外环清晰图像;(c)系统实际获得的模糊图像;(d)反卷积复原结果

Fig. 8 Experimental results for defocus deblurring. (a) Center of image is sharp; (b) periphery is sharp; (c) actually obtained blur image; (d) deconvolution restoration results

式中 H 为图像的熵, L 为图像总的灰度级, 例如, 灰度图像的 L 为 256, p_i 为灰度值为 i 的像素数与图像总像素数之比。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以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

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{d_x^2 + d_y^2}{2}}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} d_x(i, j) &= I(i+1, j) - I(i, j), \\ d_y(i, j) &= I(i, j+1) - I(i, j), \end{aligned} \quad (22)$$

式中 \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 8 中的全向图像分别计算熵和平均梯度, 可以明显地看出, 反卷积复原得到的图像[图 8(d)]的清晰度明显好于直接获得的局部清晰的全向图像[图 8(a)和图 8(b)]。

表 1 实验结果图像质量评价

Table 1 Image quality evaluation of experimental results

	Fig. 8 (a)	Fig. 8 (b)	Fig. 8 (c)	Fig. 8 (d)
Entropy	6.4696	6.4301	6.4833	6.6399
Average gradient	1.6534	1.5498	1.7194	6.2476

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,提出了一种新型适用于反卷积复原的具有空间不变性 PSF 的折反射全向成像方法,是一种全新的解决折反射全向成像散焦模糊问题的系统性方案,并利用反卷积复原算法得到全局清晰的全向图像。实验结果表明,该方法避免了以往通过图像分块的方法来处理空间变化 PSF 的散焦模糊图像,而且达到很好的去散焦模糊效果。另外需指出,因为手动旋转对焦环的精度很难达到理论分析描述的运动要求,所以该实验结果会存在一定的误差。但即使这样,肉眼观察到的结果已经足以令人信服。下一步可以考虑更加精确的实验装置,如用微米定位台控制像平面的精确运动方式等;此外,该方法目前只考虑了应用于静态场景的全向图像去散焦模糊,对于非静态场景或全向视频的散焦问题有待进一步研究。为了得到更好的图像复原结果,更加有效的符合全向图像成像特点的反卷积算法也是下一步需要继续研究的问题。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 S. Baker, S. K. Nayar. A theory of single-viewpoint catadioptric image formation[J]. *International J. Computer Vision*, 1999, **35**(2): 175~196
- 4 Rahul Swaminathan. Focus in catadioptric imaging systems[C]. Proceedings of International Conference on Computer Vision, 2007, 2919~2925
- 5 Sujit Kuthirummal. Flexible Imaging for Capturing Depth and Controlling Field of View and Depth of Field[D]. America: Columbia University, 2009. 83~101
- 6 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
- 7 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
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 12 Weiming Li, Youfu Li, Yihong 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, ICCAIP, 2009, 460~467
- 13 Shree K. Nayar. Computational cameras; redefining the image [J]. *IEEE Computer Society*, 2006, 30~38
- 14 Hajime Nagahara, Sujit Kuthirummal, Changyin Zhou *et al.*. Flexible depth of field photography[C]. Proceedings of European Conference on Computer Vision, ECCV, 2008, 60~73
- 15 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
- 16 E. Hecht. Optics[M]. Addison-Wesley. 4th Edition, 2003
- 17 K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, *et al.*. Image restoration by sparse 3D transform-domain collaborative filtering [C]. Proceedings of the International Society for Optical Engineering, SPIE Electronic Imaging, 2008

栏目编辑: 李文誌