

基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法研究

钱文彤^{1,2}, 李晖^{1,2,3*}, 吴云韬^{1,2}

¹ 武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;

² 智能机器人湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

³ 华中科技大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430074

摘要 针对光场成像中对焦图像混叠离焦、具有模糊弥散斑的问题, 提出了一种基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法。搭建含微透镜阵列的微型光场单相机系统, 进行原始图像数据采集; 采用合成孔径技术对遮挡物进行数字聚焦, 识别出遮挡物; 选择灰度方差, 对遮挡物和目标物体像素值范围进行划分, 将识别出的遮挡物去除, 并进行二次聚焦, 提取出目标图像。实验表明: 该算法同其他算法相比, 无参考图像质量评价平均提高 18.83%, 提升了图像质量; 同时也呈现了场景的三维信息, 具有较高的对比度和信噪比。

关键词 成像系统; 光场成像; 合成孔径; 数字对焦; 去遮挡

中图分类号 TP394.1; TH691.9

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111027

Synthetic-Aperture Occlusion Removal Algorithm Using Microlens Array

Qian Wentong^{1,2}, Li hui^{1,2,3*}, Wu Yuntao^{1,2}

¹ School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China;

² Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan, Hubei 430205, China;

³ School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To address the overlapping and defocusing of images with blurred diffuse speckles, a synthetic-aperture occlusion removal algorithm using a microlens array (MLA) is proposed. In this study, a single light-field imaging system with an MLA is designed to acquire data of the original image. The synthetic aperture method is utilized to digitally focus for recognizing occlusion objects in a scene. According to the gray variance value, the threshold value is set to distinguish an occlusion object from the target object. Then, the occlusion object is removed when it is recognized, and the target object can be extracted by refocusing. The experiment shows that the no-reference image quality assessment value is improved by at least 18.83% compared with that using other similar algorithms. The proposed method not only improves the image quality, but also presents 3D information of the scene. It also obtains the target image with a high contrast and high signal-to-noise ratio.

Key words imaging systems; light field imaging; synthetic aperture; digital focusing; occlusion removal

OCIS codes 110.3010; 070.6020; 100.2000

1 引 言

解决前景遮挡是计算摄影完成目标物体探测和识别的关键步骤。目前, 国内外众多学者对具有高质量的去遮挡算法进行研究。魏传振^[1]提出一种多聚焦图像的景深增强系统, 提取出有丰富线条纹理信息的极平面图像, 利用极平面计算并提取目标物

体的景深信息, 弱化遮挡物景深信息, 但对场景深度估计的精确度不高; 刘严羊硕等^[2]将极平面中边缘视差分层, 将指定前景深度扩散, 对目标物体的多视角图通过合成孔径技术成像, 此方法仅在合成目标物体图像时采用合成孔径技术, 对遮挡前景物体的识别提取不够彻底; 刘润兴等^[3]提出一种基于滑动窗口图像融合加自适应中值滤波的光场成像方法,

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-10-08; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51703071, 61771353)、湖北省自然科学基金面上项目(2019CFB553)、湖北省教育厅科研重点项目(D20171504)、湖北省重点实验室开放基金(HBIR201901)、武汉工程大学研究生教育创新基金(CX2018214)

* E-mail: lihui00317@163.com

来弥补角度采样的欠缺,该算法虽能实现去遮挡,但计算量较大,灵活度不高、适用性较低;张旭东等^[4]提出了一种基于多线索融合用于提取高精度目标物体深度信息的算法,通过自适应散焦算法提取遮挡区域深度信息,通过加权融合滤波得到目标物体图像,然而此方法计算量较大且散焦后的遮挡物信息仍然残留于目标物体图像中;Vaish 等^[5]使用同型矩阵来扭曲视图图像,并将图像对齐作平均,采用规律的缝隙明显的遮挡物,将遮挡物像素与目标物体像素进行加权平均,获取去遮挡结果图,但其结果图与真实场景色差较大,边缘不清晰,结果呈现彩色块状;陈先锋等^[6]采用区域先验信息匹配,将参考图像区域分割后叠加至遮挡图像,此方法仅适用于静态目标物体信息已知情况,目标物体图像易成马赛克状;张世辉等^[7-8]基于相关特征利用均卡方集距抽取原始图像中部分像素点,构建相似矩阵,估算全部像素点的拉普拉斯矩阵与逼近特征向量,并将全部像素点分为遮挡物信息和目标物体信息两类,进行聚类分析,根据可视化遮挡边界点得到深度图像中的遮挡边界,提取出目标图像,但结果易受到聚类的影响,所得图像易受拍摄光线影响,存在大量杂色;Zhang 等^[9]基于深度和运动聚类的像素,利用全光相机的虚拟相机阵列对零视差平面进行重定位,提取遮挡物深度面的像素值,将目标物体深度面像素覆盖至遮挡物深度面,使其构建的成像系统可提供更好的视觉质量,但便携性较差,不利于广泛使用。

当前算法多注重遮挡物识别准确度,忽略了其局限性,注重去遮挡,忽略了目标图像的图像质量。本文搭建了一种含微透镜阵列的光场成像系统,用于采集四维空间信息,成像所含的信息量极大。利用微透镜阵列特性,采用傅里叶切片定理将四维空间数据转换为二维频域信号^[10],通过多孔径采集遮挡物网格原始图像信息,合成大孔径空间分辨率以达到望远镜效应。最终通过识别提取遮挡物网格信息来还原目标物体完整信息。基于光场图像进行去遮挡处理可得到更加完整清晰的目标物体图像。该系统在三维测量、医疗检测、娱乐体验等领域具有较高的理论和实践的前景。

2 基于微透镜阵列的合成孔径去遮挡算法

本文首先对光场相机进行中心点标定,再采用微透镜阵列数字对焦方法精准采集和识别遮挡物信息,并采用最大类间方差法计算合适的阈值,对遮挡

物信息进行提取;最后,对去除遮挡物信息的目标物体进行成像。具体流程如图 1 所示。

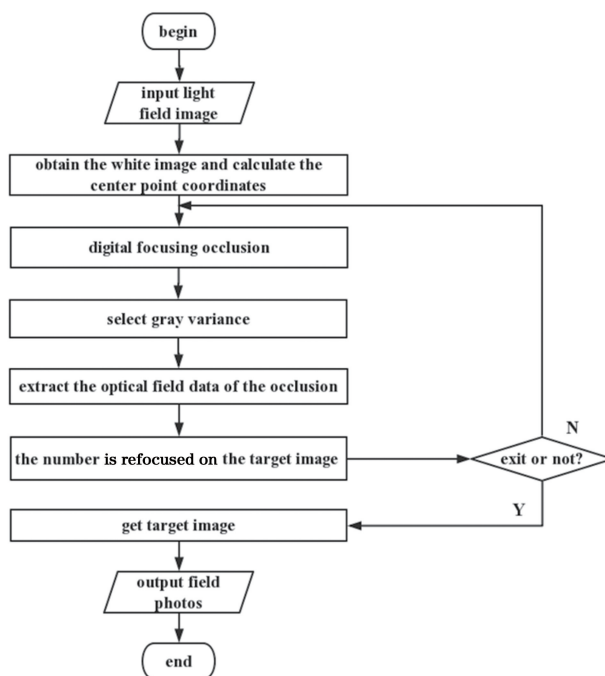


图 1 基于微透镜阵列合成孔径去遮挡的流程图

Fig. 1 Flow chart of synthetic-aperture occlusion removal algorithm based on microlens array

2.1 微透镜阵列

光线从镜头出发,经过每一个微透镜后,投影到探测器平面形成一个子图像。此时,子图像中任意一点都对应于镜头光瞳的一个光场采样。光场的位置采样分辨率由微透镜采样间隔所决定。光场的方向分辨率^[11-12]取决于微透镜阵列在镜头孔径上的采样次数。基于微透镜阵列的光场采样,如图 2 所示。图中, a 表示子孔径到微透镜阵列的距离, b 表示微透镜阵列到传感器的距离, d 表示微透镜阵列单孔径的直径。

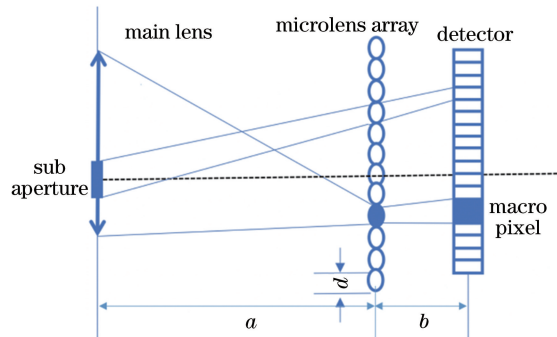


图 2 基于微透镜阵列的光场采样

Fig. 2 Light field sampling based on microlens array

2.2 数字重聚焦

重聚焦过程是将采集到的光场重新投影到新的

像平面上并进行积分。对于相同孔径的镜头而言,景物所处深度不同,其聚焦面也不同,通过重聚焦可以获知各景深所对应的聚焦像。重聚焦原理如图3所示。 $L(u, v, s, t)$ 表示光场的一个采样,其中: L 为光线强度, (u, v) 和 (s, t) 分别为光线与两个平面(U 面和 S 面)的交点坐标。

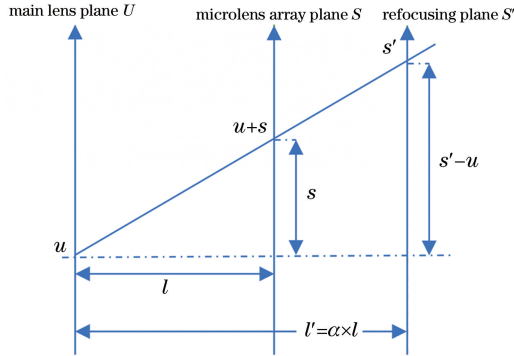


图3 重聚焦原理

Fig. 3 Principle of refocusing

像面 S 处的光照强度为

$$I(x, y) = \iint L(u, v, x, y) du dv. \quad (1)$$

两个聚焦平面形成相似三角形, α 为相似三角形的比例系数。通过调整 α 可以任意选择新的对焦平面 S' ,与 U 面间的距离为 l' ,令 $l' = \alpha \times l$ 。 S' 面所成的像等于主镜头面 U 和新的对焦平面 S' 之间光场的积分,可表示为

$$I(s) = \int L\left[u, \frac{s}{\alpha} + u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right] du, \quad (2)$$

式中: α 为遮挡物平面所对应的对焦深度系数,数值等同上述三角形比例系数。

2.3 重聚焦合成孔径去遮挡算法

当光线聚焦在新的平面 S' 时,新平面 S' 与原平面 S 共轴,四维空间位置坐标 $[u, v]$ 可表示为

$$\begin{aligned} [u', v', s', t'] = \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & l' - l & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l' - l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [u, v, s, t]^T. \end{aligned} \quad (3)$$

微透镜中心点坐标为 (g_x, g_y) , CCD的像素点的偏移量为 (p_x, p_y) 。光场的方向信息 (s, t) 、位置信息 (u, v) 可分别表示为

$$\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = \frac{p_w}{f_m} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = p_w \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: p_w 表示像素的大小; f_m 表示微透镜的焦距。

对重聚焦后的光场数据进行四维傅里叶变换可

得切片算子:

$$B_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l' - l)/f_m & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (l' - l)/f_m \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} g_{x'} \\ g_{y'} \\ p_{x'} \\ p_{y'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (l' - l)/f_m & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (l' - l)/f_m \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ p_x \\ p_y \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $g_{x'}$ 和 $g_{y'}$ 分别为重聚焦平面上微透镜阵列中心点的横纵坐标; $p_{x'}$ 和 $p_{y'}$ 分别为重聚焦平面上CCD镜头的像素点偏移量的横纵坐标。

在四维的光场数据集中取二维切片。微透镜阵列对同一像素点成像采样,并转换为二维频谱:

$$i(s) \rightarrow i(g_{x'}, g_{y'}). \quad (7)$$

对遮挡平面的二维切片进行傅里叶逆变换,即

$$I(s) = \frac{1}{N} L\left(u, \frac{s}{\alpha} + u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)\right), \quad (8)$$

式中: N 表示聚焦在遮挡网格的方向采样数。

根据光场方向维度的相关性,计算每个位置上光场方向采样方差,即

$$v(s) = \frac{1}{N} \int_1^N (L(u, s) - I(s))^2 du. \quad (9)$$

可设置的遮挡网格像素应具有较小的方差值。设定合适的遮挡网格阈值 t ,并将其提取并消除可得

$$L'(u, s_j) = \begin{cases} L(u, s_j), & v(s) > t \\ \text{null}, & v(s) \leq t \end{cases}. \quad (10)$$

将删除遮挡网格区域后的光场重新对焦到被遮挡平面,可获得消除遮挡网格混叠后的目标图像为

$$v(s_j) = \frac{1}{N_j} \int_1^{N_j} L(u_i, s'_j) du, \quad (11)$$

式中: $s'_j = \frac{s_j}{\alpha_2} + u_i\left(1 - \frac{1}{\alpha_2}\right)$, α_2 为目标平面所对应的对焦深度系数, N_j 表示在新的成像面上积分时的采样数。

3 结果与讨论

本实验采用仪器有华腾威视公司的MV-SUA500C-T型号CCD(像元尺寸 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 5×10^6 pixel, 传感器 $1/2.5''$ CMOS, 分辨率 $3180 \text{ pixel} \times 3180 \text{ pixel}$), THORLABS公司的MLA150-5C微透镜阵列(节距 0.15 mm , 焦距为

5.2 mm,阵列数 60×60 。其中,微透镜阵列具体参数如表 1 所示。遮挡网格的参数如下:开孔直径为 0.5 mm、孔径数为 50×50 。处理软件为 MATLAB 2018。计算机处理器为 2.7 GHz Intel Core i7,安装内存(RAM)为 16 GB。

表 1 MLA150-5C 微透镜阵列参数

Table 1 Parameters of MLA150-5C microlens array

Pitch	Radius of curvature	Focal length	Pupil
0.15 mm	2.4 mm	5.2 mm	Chrome

在场景示意图(图 4)中,目标物体距离镜头大约 65 cm,遮挡网格距离镜头大约 10 cm。实现算法中,基于最大类间方差法计算得到的阈值 t 为 62;

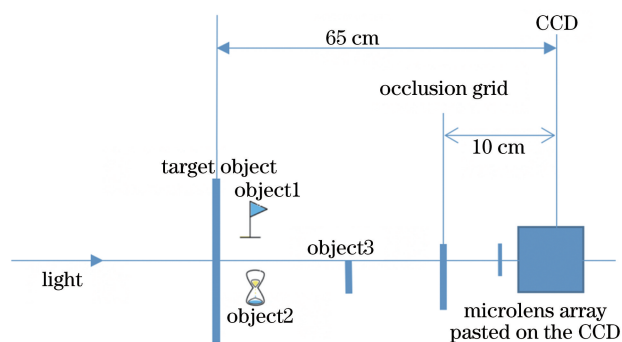


图 4 场景示意图

Fig. 4 Scene diagram

目标平面的对焦深度为 1.2;方向采样数 N 为微透镜阵列数和遮挡网格孔径数相乘,为 3600×2500 ;去除遮挡后的方向采样数 N_j 为微透镜阵列孔径数 60×60 ;微透镜阵列距离探测器 2 mm。图 5 为原始图像。

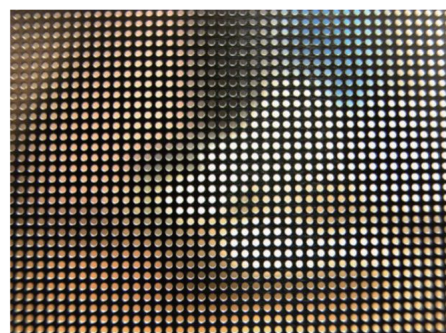


图 5 原始图像

Fig. 5 Original image

光场强度在遮挡网格所对应的空间位置和投影方向上具有最强的相似性和最小的方差。沿光场的投影方向,通过(9)、(10)式提取遮挡物网格,并对提取的遮挡物进行二值化处理。真实上未被遮挡的目标图像包含更多细节信息,所以本文通过(8)式采用合成孔径技术,避免了整体信息量的大量弥散。本文所提出的基于微透镜阵列合成孔径去遮挡算法的各步骤处理图,如图 6 所示。

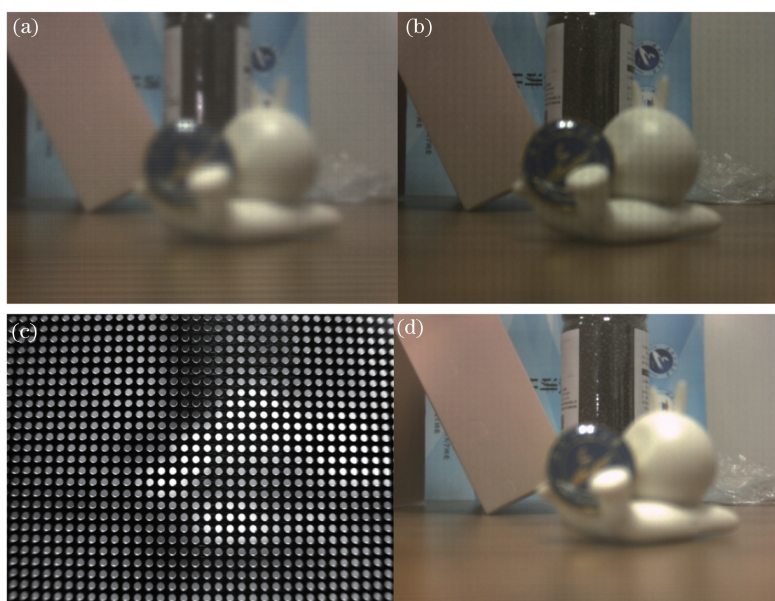


图 6 算法各步骤处理图。(a)微透镜采样图像;(b)二值化提取遮挡网;(c)未采取合成孔径结果图;(d)去遮挡结果图

Fig. 6 Processing images of algorithm for each step. (a) Sampling image of microlens; (b) binary extracted occlusion grid;

(c) result without using synthetic aperture; (d) occlusion removal result

图 6(c)所示为对原始图像直接进行数字对焦,然后对遮挡网格进行识别和去除得到的目标物体图

像。可看出图 6(c)的清晰度较低,带有显著的干扰信息,且目标图像的多处细节信息仍被覆盖。这是

因为:图像中遮挡物的数据没有将遮挡物完全弥散开,所以未采用合成孔径的结果图与真实未遮挡图像存在较大偏差,像素分布更加离散;直接进行数字对焦遮挡了基于网格识别和去除得到的目标物体图像,且细节信息大量损失,混叠度较高。采用微透镜阵列数字对焦时可以保留较多的光通量,避免了图像细节的大量丢失,通过将合成孔径光场相机对焦在目标上,离焦虚化遮挡网格,将目标物体从遮挡网

格的离焦背景中凸显出来,得到图 6(d)。通过图 6(c)、(d)对比可看出,使用合成孔径技术能够更加完整保留微透镜采样的光通量和细节信息。

将本文微透镜阵列合成孔径算法(Synthetic aperture of microlens array)、多线索融合提取深度信息算法(Multi-cue fusion extraction depth)^[4]和基于区域先验信息匹配方法(Base on regional prior information)^[6]进行对比,结果如图 7 所示。

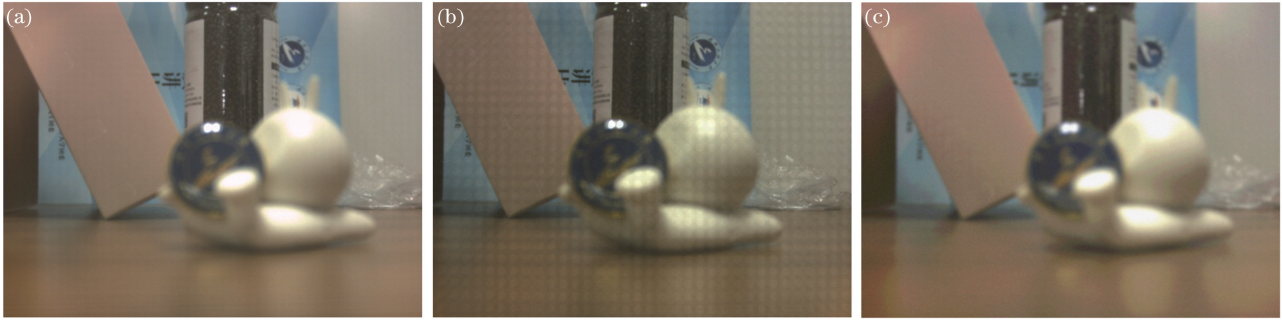


图 7 三种方法获取的结果图。(a)微透镜合成孔径算法;(b)多线索融合提取深度算法;(c)基于区域先验信息匹配方法
Fig. 7 Results of three algorithms. (a) Microlens synthetic aperture algorithm; (b) multi-cue fusion extraction depth algorithm; (c) prior information matching based algorithm

图 7(a)、(b)和(c)分别是采用微透镜合成孔径算法、多线索融合提取深度算法和基于区域先验信息匹配方法对本文设定的遮挡场景进行去遮挡所得的结果图。将遮挡区域自适应散焦后的深度信息与目标物体的景深信息进行加权融合,并进行信息提取,所得结果如图 7(b)所示。针对本实验中密集度较高的多孔径遮挡网格,结果图[图 7(b)]中存在较为明显的遮挡网格信息。将参考图像区域进行分

割,并将多个参考图像区域像素点像素逐一匹配至遮挡网格对应像素点,得到图 7(c)。图 7(c)中目标物体边缘模糊,图像分辨率不高,像素值分配呈色块状。

为了更加明确地分析采用合成孔径对去遮挡结果图像质量的影响,根据图像各像素点之间存在微小细节反差和纹理变化的特点,采用平均梯度来反映图像的清晰度,对应表达式为

$$\bar{g} = \frac{1}{(m-1)(n-1)} \times \sum_{p=1}^{m-1} \sum_{q=1}^{n-1} \sqrt{\frac{[F(p,q) - F(p+1,q)]^2 + [F(p,q) - F(p,q+1)]^2}{2}}, \quad (12)$$

式中: $F(p,q)$ 表示图像的第 p 行,第 q 列的灰度值; m,n 分别表示图像的总行数和总列数。平均梯度值越大,说明遮挡物的提取越精准,边缘越清晰,目标图像的清晰度越高。利用(12)式对图 7(a)、图 7(b)和图 7(c)进行平均梯度计算,结果如表 2 所示。从表 2 中可知,采用微透镜合成孔径去遮挡算法可以明显降低图像的噪声干扰,图像层次更加丰富,同时意味着微透镜合成孔径去遮挡算法保留了更多区域的深度信息,目标物体的细节信息凸显得更加完整。

分别对微透镜合成孔径算法、多线索融合提取深度算法和基于区域先验信息匹配算法得到的去遮

挡结果图进行图像处理分析,结果依次如图 8 所示。

表 2 三种算法结果图的平均梯度值

Table 2 Average gradient value of results of three algorithms

Group	Algorithm	Average gradient
Group1	Synthetic aperture of microlens array	0.0476
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	0.0212
	Base on regional prior information ^[6]	0.0182
Group2	Synthetic aperture of microlens array	0.0324
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	0.0238
	Base on regional prior information ^[6]	0.0129
Group3	Synthetic aperture of microlens array	0.0387
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	0.0232
	Base on regional prior information ^[6]	0.0202

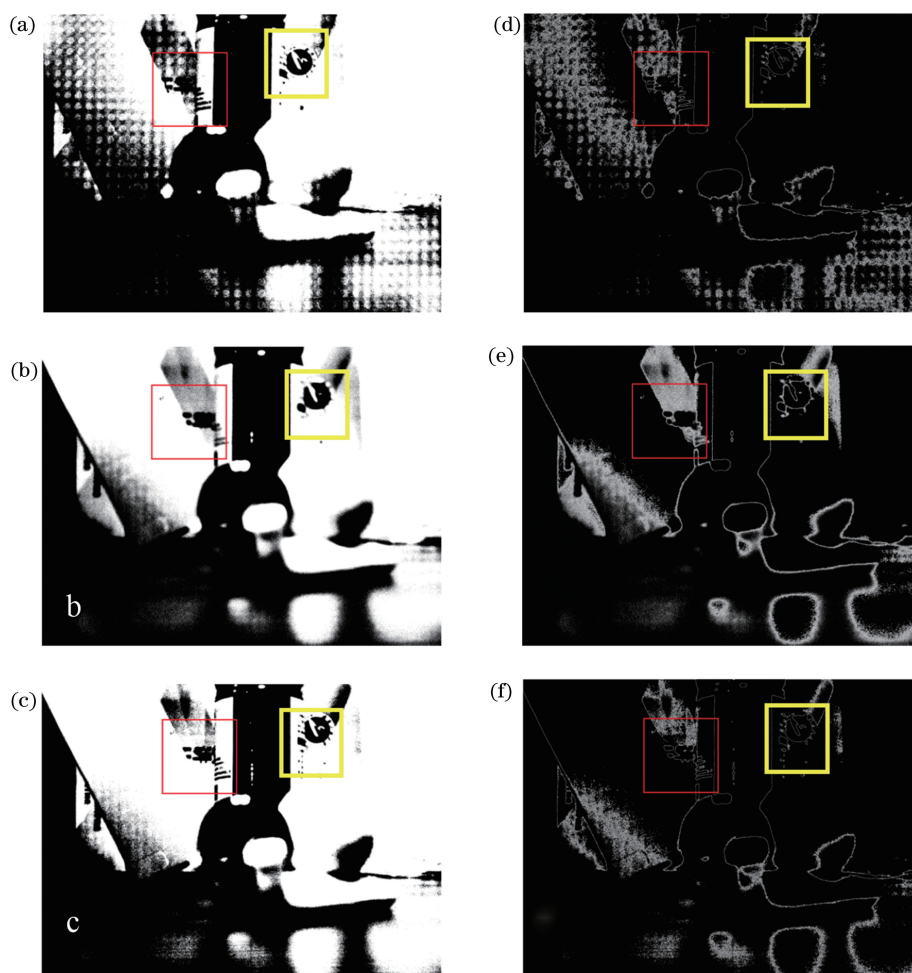


图 8 三种算法结果图像处理图。(a)~(c)对图 7(a)~(c)进行二值化后结果图;(d)~(f)分别是对图 7(a)~(c)轮廓提取后结果图

Fig. 8 Images processed by three algorithms. (a)-(c) Binarization images of Figs. 7(a)-(c); (d)-(f) contour extraction images of Figs. 7(a)-(c)

观察图 8(a)~(c)和图 8(e)~(g)方框内的“讲”文字部分和右上角武汉工程大学校徽部分,可以看出微透镜合成孔径算法对遮挡网格的检测移除更加彻底,在去除遮挡网格的同时,目标物体的边缘细节更加清晰,图像分辨率更高。这主要因为微透镜合成孔径去遮挡算法是基于 CCD 镜头获取的原始数据,将四维空间中遮挡物网格像素面区别于其他像素面,进行独立计算重构,目标物体像素面像素不受影响;而多线索融合提取深度去遮挡算法,在计算重构目标物体的同时,将遮挡物网格像素点进行了加权运算,所以对遮挡物网格的像素信息提取不充分,图 8(b)中仍存在大量的遮挡网格信息;基于先验信息匹配方法是将目标物体像素匹配至遮挡区域,而不是去除遮挡网格信息,因此图 8(c)和(f)中文字部分基本被色块所覆盖,整体图像呈色块堆积状,细节损失较大,边缘模糊。

本文使用多种无参考图像质量评价函数^[14]进行图像质量分析。包括: Brenner 梯度函数、Tenengrad 梯度函数、灰度方差函数(SMD)、灰度方差乘积函数(SMD2)、能量梯度函数(Energy function)。

本文从多组场景中选取了 3 组复杂场景进行结果展示,用图像质量评价函数处理三种不同去遮挡方法得到的目标图像,得到的实验数据如表 3 所示。图 7(a)~7(c)处理结果如表 3 中 Group1 所示。

表 3 表明,采用本文所提算法得到的目标物体图像的边缘和细节信息更加清楚,信噪比更高,提升了整个成像效果。在遮挡网格精确识别和提高目标图像的质量方面,已作折中考虑。但是,微透镜阵列合成孔径去遮挡算法暂时仅适用于静态多孔隙遮挡物,算法的运行过程有待提升,整体计算量较大,目前不适用于高速移动过程中的遮挡物移除。

表 3 不同算法所得图像质量对比表
Table 3 Comparison of image qualities obtained by different algorithms

Group	Algorithm	Brenner	Tenengrad	SMD	SMD2	Energy
Group1	Synthetic aperture of microlens array	21.638	346.2426	187.6392	4.8237	102.392
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	17.2057	297.1573	121.8329	4.7923	82.4373
	Base on regional prior information ^[6]	9.1939	240.0381	83.2398	3.4908	42.9048
Group2	Synthetic aperture of microlens array	32.814	392.8423	239.8478	5.2394	124.324
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	28.932	242.7176	131.2366	4.3082	58.6362
	Base on regional prior information ^[6]	8.2309	224.8539	78.4905	2.0745	39.7248
Group3	Synthetic aperture of microlens array	27.8409	279.8045	95.7356	6.0139	97.4584
	Multi-cue fusion extraction depth ^[4]	15.897	239.7401	82.3147	5.2253	61.4399
	Base on regional prior information ^[6]	9.2347	134.5629	63.4759	4.8269	57.2825

4 结 论

以四维光场目标被遮挡图像为研究对象,提出了合成孔径数字重聚焦去遮挡算法。在 CCD 和镜头之间加入微透镜阵列,避免了光场位置信息和光通量的损失,增强了传感器的捕光率;结合合成孔径在同步相位的前提下,在对焦平面形成干涉光,形成大孔径空间光学分辨率望远镜效应,不仅提高了合成图像的信噪比,还增加了合成图像的细节信息和对比度;在细节上,目标图像的边缘轮廓、光影较为清晰地显示。本文提出的光场相机去遮挡算法仍具有一定局限,本文所提出的使用阈值可作为识别遮挡物与目标物体的重要参数,但此方法对于灰度分布差异较大的遮挡物场景的目标图像恢复质量有待提高。另外,计算效率方面还可以进一步优化,光场图像的先验信息可以被挖掘并运用于光场图像的去遮挡处理过程。

参 考 文 献

- [1] Wei C Z. Research on depth of field enhancement and de-occlusion in integrated imaging [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
魏传振. 集成成像中景深增强及去遮挡问题研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [2] Liu Y Y S, Liu B, Pan J X. Synthetic aperture imaging algorithm via foreground removing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0611002.
刘严羊硕, 刘宾, 潘晋孝. 基于前景移除的合成孔径成像算法[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0611002.
- [3] Liu R X, Ren M J, Xiao G B. A method of eliminating artifacts in focused light field imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0611001.
- [4] Zhang X D, Li C Y, Wang Y Z, et al. Light field depth estimation for scene with occlusion[J]. Control and Decision, 2018, 33(12): 2122-2130.
张旭东, 李成云, 汪义志, 等. 遮挡场景的光场图像深度估计方法[J]. 控制与决策, 2018, 33(12): 2122-2130.
- [5] Vaish V, Garg G, Talvala E, et al. Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform [C] // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)-Workshops, September 21-23, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE, 2005.
- [6] Chen X F, Guo Z H, Wu J L, et al. De-occlusion stereo matching algorithm based on regional prior information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(19): 191001.
陈先锋, 郭正华, 伍俊龙, 等. 基于区域先验信息去遮挡立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(19): 191001.
- [7] Zhang S H, Yang M, Dong L J. Occlusion boundary detection of deep image by using spectral clustering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0915002.
张世辉, 杨萌, 董利健. 利用谱聚类实现深度图像遮挡边界检测[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0915002.
- [8] Zhang S H, Liu J X, Kong L F. Using random forest for occlusion detection based on depth image [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0912003.
张世辉, 刘建新, 孔令富. 基于深度图像利用随机森林实现遮挡检测 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0915003.
- [9] Zhang H, Jin X, Dai Q H. Synthetic aperture based on plenoptic camera for seeing through occlusions

- [M]//Hong R, Cheng W H, Yamasaki T, et al. Advances in multimedia information processing-PCM 2018. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2018, 11164: 158-167.
- [10] Liu L R. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladar [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0128001.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达的二维傅里叶变换成像算法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0128001.
- [11] Ding J H, Han X, Sun F S. Depth map estimation of micro lens array light field photography [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(17): 71-75.
丁江华, 韩燮, 孙福盛. 基于微透镜阵列的光场图像深度估计[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(17): 71-75.
- [12] Wei X F, Geng Z X, Song X. Detection and removal of ringing artifact for optical synthetic aperture restoration image [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 3091-3099.
魏小峰, 耿则勋, 宋向. 光学合成孔径复原图像的振铃探测与消除[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3091-3099.
- [13] Zhang X J, Fan Y C, Bao H, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(11): 2613-2626.
张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626.
- [14] Zhang M. No-reference image quality assessment and the application[D]. Xian: Xidian University, 2018.
张满. 无参考图像质量评价及其应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.