

基于前景移除的合成孔径成像算法

刘严羊硕^{1,2,3}, 刘宾^{2,3}, 潘晋孝^{2,3}

¹中北大学理学院, 山西 太原 030051;

²中北大学信息探测与处理山西省重点实验室, 山西 太原 030051;

³电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051

摘要 在传统合成孔径物面重聚焦成像过程中,前景射线会严重影响目标的重建质量,针对这一问题提出一种基于前景标记的重聚焦成像算法。首先根据 EPI 的边缘特征估计场景深度范围,根据指定待重建物面的参数提取前景边缘特征并进行扩散,从而确定前景遮挡对应的射线;对其进行标记剔除后,利用光场重建算法对特定物面进行重建,从而实现被遮挡目标的高质量重建。利用 Stanford 大学和 Disney 实验室提供的数据集进行仿真,实验结果表明该算法可有效去除场景中的遮挡物信息,提高重聚焦图像的质量。

关键词 成像系统; 计算成像; 合成孔径成像; 前景标记; 遮挡去除; 视差

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0611002

Synthetic Aperture Imaging Algorithm Via Foreground Removing

Liu Yanyangshuo^{1,2,3}, Liu Bin^{2,3}, Pan Jinxiao^{2,3}

¹College of Science, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²Shanxi Provincial Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

³National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract The foreground ray has a serious impact on the quality of reconstruction during the traditional synthetic aperture imaging is refocused on the surface of object. For the above problem, we propose a refocusing imaging algorithm via foreground labeling in this paper. The algorithm first estimates the depth range of the scene based on the edge features of the EPI, extraction of foreground edge features and propagation according to the parameters of the specified surface to be rebuilt, thus determining the foreground occlusion corresponding rays. After labeling and removing those corresponding rays, reconstructing a specific surface with light field reconstruction algorithm to achieve the high quality reconstruction of the occluded object. The paper uses datasets provided by Stanford University and Disney laboratory to simulate, the experimental results show that the proposed algorithm can effectively remove the information of the occlusion in the scene and improve the quality of the refocused image.

Key words imaging systems; computational imaging; synthetic aperture imaging; the foreground labeling; occlusion removing; disparity

OCIS codes 110.1758; 110.2990; 110.3010

1 引 言

遮挡处理对目标识别与跟踪等计算机视觉应用构成了巨大挑战,这是由于单视角成像的机理限制,使得它只能在探测器平面记录光强信息,缺失了光

线的方向信息。因此,当目标被遮挡时,单视角成像不能有效地获取遮挡背后目标的信息。多视角合成孔径成像技术可以同时记录空间中光线的位置信息和方向信息^[1],并将记录的不同方向光线的各视角图像有效地合成为具有极浅景深的图

收稿日期: 2018-01-16; 收到修改稿日期: 2018-01-30

基金项目: 电子测试技术国防科技重点实验室基金(614200010401)

作者简介: 刘严羊硕(1991—),男,硕士研究生,主要从事光信息探测与图像处理方面的研究。

E-mail: 542918861@qq.com

导师简介: 刘宾(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,从事光电信息探测与处理、数字图像处理、信息重建方面的研究。E-mail: liubin414605032@163.com(通信联系人)

像。当探测目标发生遮挡时,它可有效地虚化前景遮挡,实现“透视”探测^[2]。但是,由于传统的合成孔径成像算法在物面重聚焦成像前未移除前景遮挡像素,致使重建图像的质量不高,目标细节仍存在遮挡的情况^[3-5]。

近年来,国内外学者对传统的合成孔径成像算法对目标重建质量不高等问题开展了相关研究,并取得了一定成果。Wilburn等^[6]提出了在一段时间间隔内用摄像机阵列对场景目标进行连续成像的算法,若遮挡物静止而目标在移动,则对一段时间内的多帧图像进行方差计算,并将方差值较小的区域识别为遮挡物。但该算法仅适用于目标移动而遮挡物处于静止状态的场景。Vaish等^[7]提出了使用颜色中值、熵、合成聚焦和立体匹配等4种代价函数重建被遮挡平面的算法,但当遮挡物在每个视角中覆盖了较大区域时,该算法可能会失败。Zhou等^[8-9]提出了基于方向相关性的遮挡物去除算法,假设前景遮挡物为理想的朗伯体,首先将合成孔径成像对焦到遮挡物上,计算合成图像上每个像素方向采样的方差,然后采用设立阈值去除方差较小像素的算法来优化重建结果。但是,该算法不适合用于遮挡物为非朗伯体或复杂场景成像的情况。Zhao等^[10-11]提出了在合成孔径成像前通过使用背景减法来去除动态遮挡的算法。由于这种算法建立在静态背景图像序列减法之上,因此无法处理遮挡物和背景同时静止的场景,并且该算法对复杂背景环境十分敏感。针对这个问题,Zhao等^[12]又提出了适用场景更加广泛的算法——通过能量最小化使用像素来标记的合成孔径成像,但由于该算法基于颜色方差对图像进行分割,因此导致其对各视角图像中因场景光照造成的颜色差异非常敏感,不适合用于室外的复杂场景。另外,该标记方法也不适用于多重前景相互遮挡的情况。Yang等^[13-14]将最大色差法作为能量最小化的数值项对前景像素进行标记。Yang等^[15]提出了基于最优相机选择的被遮挡目标成像算法。然而,Zhao和Yang等的研究利用的是三角仿射变换原理对目标进行合成孔径成像,并未结合光场成像机重建目标,这也影响了对未知场景目标探测的准确性以及时效性。

针对上述算法存在的问题,本文提出了将(极平面图)EPI中的边缘视差进行分层并指定前景深度进行扩散的像素标记算法,并对移除遮挡后的多视角图像进行合成孔径成像,该算法可以准确地识别

和移除前景像素。将所提算法与其他算法的重建结果进行对比后可以看出:所提算法可以准确地识别前景遮挡物,并能在重建时移除遮挡像素,有效地提升目标重建图像的质量。

2 基于前景移除的合成孔径成像算法

2.1 前景标记方法

根据Bolles等^[16]提出的EPI概念及构建EPI的方法可知,EPI中边缘斜率和视差之间的关系为

$$m = \frac{1}{\Delta s} = \frac{z}{f \Delta u}, \quad (1)$$

式中: m 为EPI边缘的斜率; Δs 为相邻图像之间的视差; z 为场景点的深度; Δu 为相邻视角间隔; f 为相机焦距。由(1)式可知,当相机焦距和相邻视角间隔一定时,深度与视差呈反比,与边缘斜率呈正比。基于Kim等^[17]提出的深度估计策略,在Disney真实场景数据集中,按由小到大的顺序对完整光场数据的视差进行排序,构成集合 $d = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$,根据视差的大小对全部EPI边缘视差进行分层,如图1所示。从图1中可知,具有同一视差的点,即相同深度上的点被划分在同一层面上,具有较大视差前景物点位于图中偏上的层面,而具有较小视差的后景物点则位于图中偏下的层面。

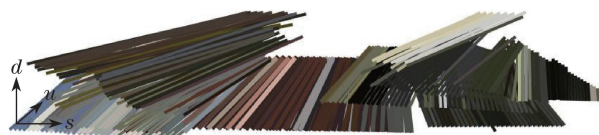


图1 根据视差大小对全部EPI中的边缘视差进行分层表示

Fig. 1 Layered expression for edge disparity in all EPIs according to disparity

在所提算法实施过程中,首先通过一条穿过丰富场景信息区域的扫描线来获得一个边缘信息较多的EPI,计算该EPI中所有边缘线段的视差,以此预估该场景中物点大概的视差范围;然后在每个EPI中进行边缘置信度计算以获取边缘信息^[17],在上述视差范围内精确计算这些边缘的视差,并将它们从小到大排列起来构成集合 d ,通过调节 d 的取值范围来确定前景视差范围 $[d_{\min \text{ foreground}}, d_{\max \text{ foreground}}]$;最后,通过仅对前景视差范围内低分辨率区域进行深度扩散来有效获取将前景作为感兴趣区域的深度信息,而后景作为非感兴趣区域不参与计算,如图2所示。利用 $f_i(m)$ 可对前景深度信息进行二值化标记,进而提取出前景像素,如图3所示。 $f_i(m)$ 的表达式为

$$f_i(m) = D_{\text{foreground}}(m)_i = \begin{cases} 0, & d_{\min \text{ foreground}} \leq d(m) \leq d_{\max \text{ foreground}} \\ 1, & \text{others} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $D_{\text{foreground}}(m)_i$ 为各视角图像中在 m 位置上的前景深度扩散图像； $f_i(m)$ 为各视角图像中在 m 位置上的前景像素标记； i 为视角编号， $i \in N$ ， N 为视角个数。



图 2 相机视角前景深度扩散图像

Fig. 2 Foreground depth propagation image of camera view



图 3 相机视角前景标记图像

Fig. 3 Foreground labeled image of camera view

2.2 前景射线剔除

通过 $\text{Inocc}_i(m) = f_i(m) \cdot I_i(m)$ 可以获得剔除前景遮挡像素的各视角图像 Inocc_i ，如图 4 所示。其中的 $I_i(m)$ 为各视角图像中 m 位置上的像素值。

2.3 指定深度上的目标进行聚焦成像

在光场成像中，可以通过线性移动式相机或线性排布的相机阵列对光场信息进行探测，假设相机

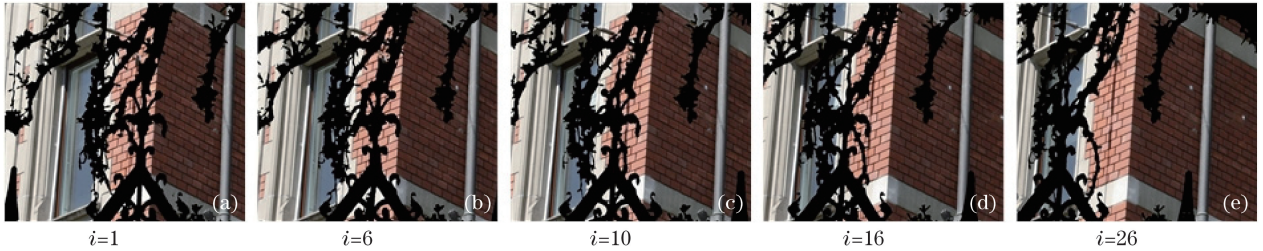


图 4 移除前景遮挡像素的相机视角图像

Fig. 4 Camera view images after removing foreground occlusion

阵列由 $u \times v$ 个相机等间隔排列，每个相机的拍摄图像分辨率均为 $s \times t$ ，该相机阵列中相机光心所在平面为 Π_{uv} ，图像所在平面为 Π_{st} ，所有这些图像按视角位置排列组成一幅多视角图像，它完整地记录了光场的四维信息，可表述为

$$\Pi_{uv} \times \Pi_{st} \rightarrow \mathfrak{R}^3, (u, v, s, t) \rightarrow L(u, v, s, t), \quad (3)$$

式中： $[r = L(u, v, s, t)] \in \mathfrak{R}^3$ ，表示通过二维光心平面 (u, v) 方向处照射在探测器平面 (s, t) 处的光线强度。根据 Vaish 等^[4]提出的合成孔径成像算法可知，各子视角图像可通过(4)式映射到指定深度上。(4)式为

$$L_a(s', t', u, v) = L_a \left[s + (u - u_0) \cdot \Delta x \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), t + (v - v_0) \cdot \Delta y \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), u, v \right] = L(s, t, u, v). \quad (4)$$

式中： α 为对焦系数； (u_0, v_0) 为参考视角的坐标； (u, v) 为各相机视角的坐标； (s, t) 为各子视角图像的坐标； (s', t') 为各子视角图像映射到该深度

上的坐标； L 为 (u, v) 视角下的子图像； L_a 为在 α 深度上的子视角图像； Δx 为水平方向上相邻视角的实际位移； Δy 为竖直方向上相邻视角的实际位移。

本课题组提出利用 EPI 提取光场数据，通过四维 EPI 的剪切变换对剔除前景遮挡像素的四维光场数据进行合成孔径成像。

如图 5 所示，设 EPI 中的中心参考视角为 u_0 ，该视角对应的像素点 E_0 坐标为 (u_0, s_0) ，EPI 中所有与 E_0 对应于同一物点不同视角的像素点 E_i 坐标为 (u_i, s_i) ， $i = 1, 2, \dots$ ，它们位于同一条直线上，该直线与 u 轴夹角为 θ ，任意相邻两幅视角图像之间的投影水平视差 $\Delta s = s_i - s_{i-1}$ ，相邻视角间隔为 $\Delta u = u_i - u_{i-1} = 1$ ，则由三角形关系可知：

$$\tan \theta = \frac{\Delta s}{\Delta u} = \frac{s_i - s_{i-1}}{u_i - u_{i-1}} = \Delta s. \quad (5)$$

更为一般地，当 $u_i - u_0 = i$ 时，在极线图中 $s_i = s_0 + i \Delta s$ ，此时

$$\frac{s_i - s_0}{u_i - u_0} = \frac{i \Delta s}{i} = \Delta s = \tan \theta. \quad (6)$$

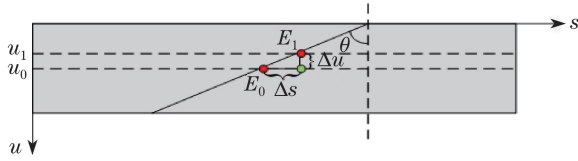


图 5 EPI 中的视差与视角的变换关系

Fig. 5 Relationship between disparity and view shifted in EPI

由文献[4]中采用的双平面法参数化表征光场四维信息可知,空间中同一物点在任意子视角 u_i 下的像点 s_i 和参考视角 u_0 下的像点 s_0 的关系为

$$\frac{s_i - s_0}{u_i - u_0} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Delta x, \quad (7)$$

同理可得

$$\frac{t_i - t_0}{v_i - v_0} = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Delta y. \quad (8)$$

根据(6)式可得

$$\tan \theta = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Delta x = \Delta s. \quad (9)$$

同理可得

$$\tan \theta = \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Delta y = \Delta t, \quad (10)$$

式中: Δt 为竖直视差。

将(10)式和(11)式代入(4)式可得

$$L_{\Delta s, \Delta t}(s', t', u, v) = L_{\Delta s, \Delta t}[s + (u - u_0) \cdot \Delta s, t + (v - v_0) \cdot \Delta t, u, v] = L(s, t, u, v). \quad (11)$$

若 $\Delta x = \Delta y$, 则 $\Delta s = \Delta t$; 若 $\Delta x \neq \Delta y$, 则将

$$(9) \text{式变形为 } \frac{\Delta s}{\Delta x} = 1 - \frac{1}{\alpha}, \text{ 代入(10)式后得 } \Delta t =$$

$$\Delta s \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}, \text{ 再代入(11)式后得}$$

$$L_{\Delta s}(s', t', u, v) = L_{\Delta s}\left[s + (u - u_0) \cdot \Delta s, t + (v - v_0) \cdot \Delta s \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x}, u, v\right] = L(s, t, u, v). \quad (12)$$

(12)式表示通过对四维 EPI 数据的剪切变换可以将光场四维数据映射到指定视差上。其中, L 为 (u, v) 视角下的子图像, $L_{\Delta s}$ 为视差 Δs 对应深度上的子视角图像。若无特殊说明,视差即为水平视差。

通过(12)式可以获得剔除前景遮挡像素的各视角图像 Inocc_i 在指定视差上的图像 $\text{Inocc}_{i, \Delta s}$, i 为视角编号,如图 6 所示。

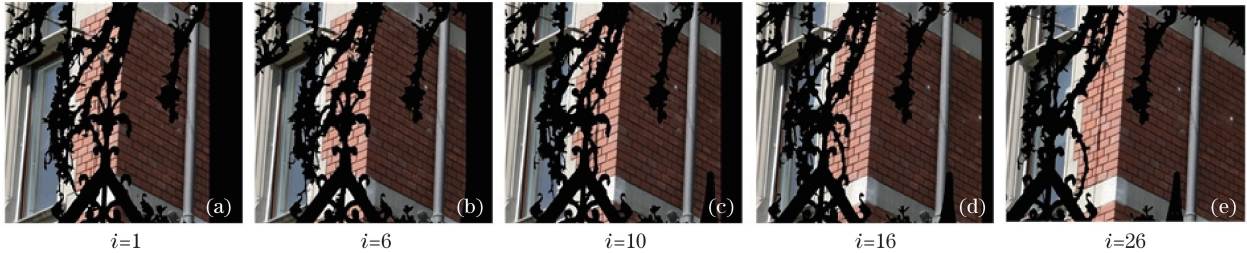


图 6 移除遮挡像素后在指定深度上的相机视角图像

Fig. 6 Camera view images on the specific depth plane after removing occlusion

利用 $\text{Inocc}_{\text{synthetic}}(m)$ 将剔除前景遮挡像素的各视角图像重新进行目标深度上的合成孔径成像,即可获得移除遮挡后该目标区域较为清晰的目标图像信息。 $\text{Inocc}_{\text{synthetic}}(m)$ 的表达式为

$$\text{Inocc}_{\text{synthetic}}(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N \text{Inocc}_{i, \Delta s}(m)}{N_m}, & N_m \neq 0, \\ 0, & N_m = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: Δs 为合成孔径光场成像对焦到目标所在深度上的视差; N_m 为该深度上有效视角采样个数之和。

3 算法主要流程概述

基于前景标记的合成孔径算法(算法流程图见

图 7)主要步骤如下:

1) 确定场景深度范围:将四维光场数据重排成四维 EPI,通过 EPI 中的边缘视差信息估计场景深度范围。

2) 前景标记:通过对 EPI 中的边缘视差进行分层处理,定位前景遮挡物所在视差范围后,仅在该范围内进行深度扩散,以获取前景遮挡物像素的深度信息,并进行二值化标记,不在此范围内的像素不参与计算。

3) 前景射线剔除:根据各视角图像前景标记结果,移除各视角图像被标记位置上的像素。

4) 通过四维 EPI 的剪切变换进行合成孔径成像:根据目标所在深度指定视差,沿 EPI 边缘方向进行剪切变换,对目标进行聚焦成像。

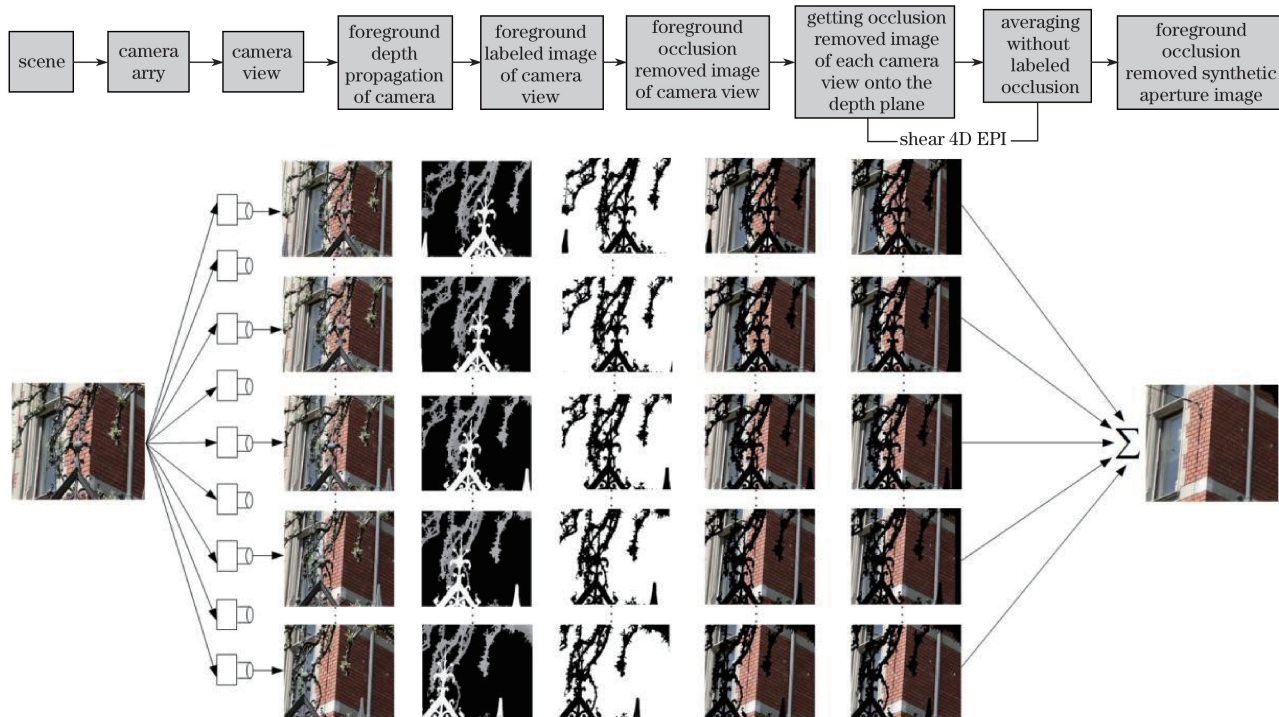


图 7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm workflow

4 实验结果与分析

实验环境为:Core i7-6700k @4.00 GHz 四核, 32 G内存, MATLAB 2015b 编程环境。采用 Disney 实验室提供的线性移动式相机拍摄室外环境的数据集,采用 Stanford 大学提供的相机阵列拍摄室内场景数据集对算法进行测试,验证其可行性和适用性。

实验 1 选用 Disney 实验室的数据集,该数据由 1 台安装在线性移动平台上配备 50 mm 镜头的 Canon EOS 5D Mark II 拍摄获取。该户外场景中包括了一座被树枝和栏杆遮挡的居民楼。本课题组选取了该数据集中的 51 个视角,呈 1 行 51 列排布,单个视角图像分辨率为 901 pixel \times 1086 pixel。在此场景中,栏杆和树枝作为前景覆盖在一个较宽的深度范围,并且在各相机视角下,它们都对楼房部分细节存在遮挡。所提算法可以在各子视角图像中准确地标记前景像素信息,并在合成孔径成像前有效地移除这些前景遮挡像素,从而获得较清晰的楼房墙面和窗户等细节信息,如图 8 所示。

相比于传统的合成孔径成像算法,所提算法可以显著提升遮挡背后目标重建图像的质量,较好地保留了目标的细节信息,并且能够较好地适用于室外复杂环境中遮挡目标的识别。

实验 2 选用 Stanford 大学相机阵列拍摄的室内场景数据集,它是一个由被植物部分遮挡的 2 个 CD 盒和 1 张海报组成的场景。这组数据集有 105 个视角,呈 5 行 21 列分布,单个视角图像分辨率为 515 pixel \times 650 pixel。在各单一子视角图像中,目标被部分遮挡,很难获取到遮挡背后的目标的全部信息。首先,通过本研究所提算法对该数据集场景进行前景标记,前景视差范围约为[11.77, 12.89],如图 9 所示。为了进一步验证所提算法的性能,使用该数据集将所提算法、传统合成孔径成像算法与目前行业内对前景遮挡物处理较为完善的算法^[12]的重建结果,与该数据集中移除遮挡物后拍摄相同场景图像的目标区域(见图 10)进行对比实验,结果如图 11 所示。

实验中,3 种算法对焦在左侧 CD 盒的视差约为 7.19,右侧 CD 盒的视差约为 7.41。由图 11 可以看到,第 1 列中左侧 CD 盒与右侧 CD 盒的重建图像效果不佳,目标区域模糊,部分细节信息仍然被遮挡,这是因为在合成孔径成像前没有剔除前景遮挡物的像素,导致重建的目标区域像素信息既有来自目标本身的像素信息,也有来自前景遮挡物的像素信息。与第 1 列重建结果比较,所提算法和文献^[12]中的算法均可有效地剔除前景遮挡物的像素信息,提升了目标区域的成像质量。对比两种算法

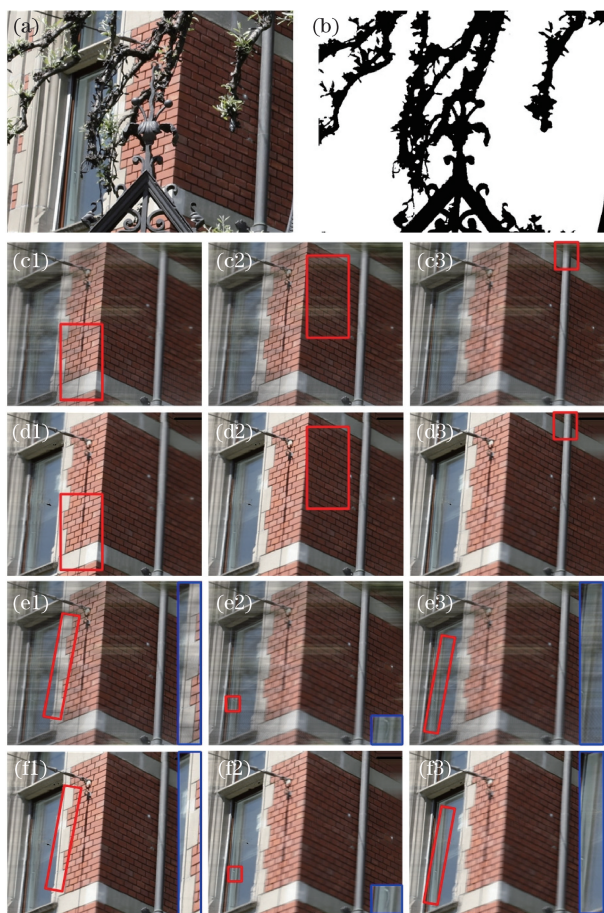


图 8 传统合成孔径成像算法与所提算法对户外场景遮挡目标的重建结果。(a) Disney 数据集中相机视角图像；(b)相机视角图像的前景标记图像,前景视差范围约为 $[10.5, 13.2]$; (c)传统合成孔径成像算法的重建结果,分别对焦到指定红框区域; (d)所提算法的重建结果,分别对焦到红框区域,从左到右对焦视差分别约为 6.17、6.08、5.82; (e)传统合成孔径成像,分别对焦到红框区域,蓝框内为该区域的细节; (f)所提算法的重建结果,分别对焦到红框区域,蓝框内为该区域的细节,从左到右对焦视差分别约为 5.99、5.82、5.73

Fig. 8 Reconstructed results of outdoor occluded objects with the traditional synthetic aperture imaging and our algorithm.

(a) Image of camera view in the Disney dataset; (b) an foreground labeled image of camera view, the foreground disparity range is about $[10.5, 13.2]$; (c) reconstructed images with the traditional synthetic aperture imaging, focusing on the red frame areas, respectively; (d) reconstructed images with our algorithm, focusing on the same red frame areas, respectively, and the disparity is about 6.17, 6.08, 5.82 from left to right; (e)reconstructed images with the traditional synthetic aperture imaging, focusing on the red frame areas, respectively, and the blue frame is the detail of the areas; (f) reconstructed images with our algorithm, focusing on the red frame areas, respectively, the blue frame is the detail of the areas, and the disparity is about 5.99, 5.82, 5.73 from left to right

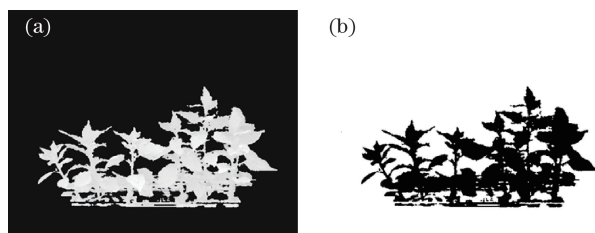


图 9 (a)相机视角前景深度扩散图像；(b)相机视角前景标记图像

Fig. 9 (a) Foreground depth propagation image of camera view; (b) foreground labeled image of camera view



图 10 移除前景植物的场景拍摄图像

Fig. 10 Images after removing foreground plants from scene

重建结果中绿框内的细节可以看出:所提算法的重建结果具有较好的颜色一致连续性,并且在细节上更加接近真实场景,边缘信息更加精准;文献[12]中的算法的重建结果失真较多,在部分细节上仍存在遮挡像素的现象。

最后,参考图 9 中移除遮挡物后拍摄的目标图像效果,对比所提算法和文献[12]中的算法对目标区域重建图像的效果可以看出,由于合成的虚拟大孔径具有极浅的景深,若重建目标不在同一深度上或对不同深度上的多个目标进行重建时,对单一孔径较大的景深而言,不在对焦视差上的目标区域会出现部分失焦或完全失焦的情况。图 12 所示为不同算法对 CD 盒重建的峰值信噪比 (PSNR)。由图 12 可见,所提算法在测试数据集中不同的目标上均取得了较好的重建效果,PSNR 比传统合成孔径成像算法平均提高了 13.11 dB,比文献[12]算法平均提高了 1.935 dB,表明所提算法的重建结果相比于其他两种算法的重建结果更接近于实际移除遮挡后的拍摄图像的效果,失真较少。

5 结 论

针对传统合成孔径成像算法重建目标质量不高的问题,利用对 EPI 边缘视差进行分层,并在前景

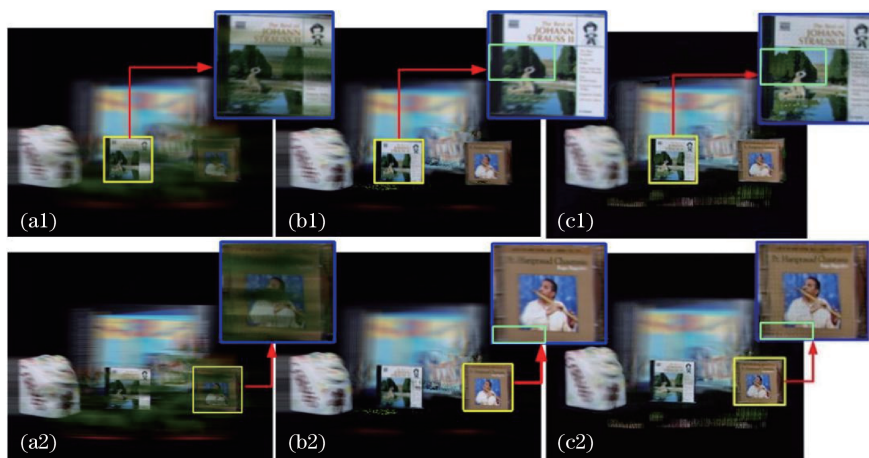


图 11 不同算法对植物背后 CD 盒重建结果的细节对比。(a1)传统合成孔径成像算法,对焦到左侧 CD 盒;
(a2)传统合成孔径成像算法,对焦到右侧 CD 盒;(b1)所提算法,对焦到左侧 CD 盒;(b2)所提算法,对焦到右侧 CD 盒;
(c1)文献[12]中的算法,对焦到左侧 CD 盒;(c2)文献[12]中的算法,对焦到右侧 CD 盒

Fig. 11 Details of reconstructed CD cases behind the plant with different algorithms. (a1) The traditional synthetic aperture imaging, focusing on the left CD case; (a2) the traditional synthetic aperture imaging, focusing on the right CD case; (b1) our algorithm, focusing on the left CD case; (b2) our algorithm, focusing on the right CD case; (c1) the algorithm in ref. [12], focusing on the left CD case; (c2) the algorithm in ref. [12], focusing on the right CD case

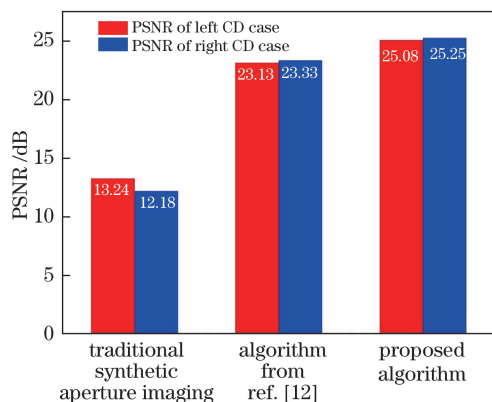


图 12 各种算法重建 CD 盒图像的峰值信噪比
Fig. 12 PSNR of reconstructed CD cases images with different algorithms

边缘视差范围内局部深度扩散的思想,提出了一种基于前景遮挡移除的合成孔径算法。实验结果表明:所提算法在室外环境和室内环境测试集上均表现出了良好的适用性;相比于其他算法,所提算法的重建效果具有更好的图像辨识度以及更高的 PSNR。在 Stanford 大学数据集实验中,所提算法重建目标的 PSNR 分别为 25.08 dB 和 25.25 dB,优于传统合成孔径成像算法和文献[12]所提算法重建目标的 PSNR。但是,由于合成的虚拟孔径景深极浅,在对具有一定深度范围的被遮挡目标或不同深度上被遮挡的多个目标进行重建时,会导致不在景深范围内的目标部分失焦。因此,课题组将在后续工作中利用对边缘视差进行分层的思想,重建出不

同深度上的目标并融合,以形成目标所在深度范围上的全景深图像。

参 考 文 献

- [1] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]// Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1996: 31-42.
- [2] Isaksen A, McMillan L, Gortler S J. Dynamically reparameterized light fields[C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 2000: 297-306.
- [3] Joshi N, Avidan S, Matusik W, *et al.* Synthetic aperture tracking: tracking through occlusions[C]. Proceedings of IEEE 11 th International Conference on Computer Vision, 2007: 9849062.
- [4] Vaish V, Wilburn B, Joshi N, *et al.* Using plane+parallax for calibrating dense camera arrays[C]. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004: 8161383.
- [5] Vaish V, Garg G, Talvala E, *et al.* Synthetic aperture focusing using a shear-warp factorization of the viewing transform[C]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005: 537.
- [6] Wilburn B, Joshi N, Vaish V, *et al.* High performance imaging using large camera arrays[J].

- ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765-776.
- [7] Vaish V, Levoy M, Szeliski R, *et al.* Reconstructing occluded surfaces using synthetic apertures: stereo, focus and robust measures[C]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Patter Recognition, 2006, 2: 2331-2338.
- [8] Zhou Z L, Yuan Y, Xiang L B, *et al.* Enhanced reconstruction of partially occluded objects with occlusion removal in synthetic aperture integral imaging[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 9(4): 30-33.
- [9] Zhou Z L. Research on light field imaging technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
- [10] Pei Z, Zhang Y, Yang T, *et al.* A novel method for detecting occluded object by multiple camera arrays[C]// International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Washington: IEEE, 2012: 1673-1677.
- [11] Pei Z, Zhang Y, Yang T, *et al.* A novel multi-object detection method in complex scene using synthetic aperture imaging[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(4): 1637-1658.
- [12] Pei Z, Zhang Y, Chen X, *et al.* Synthetic aperture imaging using pixel labeling via energy minimization[J]. Pattern Recognition, 2013, 46(1): 174-187.
- [13] Yang T, Zhang Y, Yu J, *et al.* All-in-focus synthetic aperture imaging[C]// Proceedings of European Condeference on Computer Vision-ECCV 2014. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014: 1-15.
- [14] Yang T, Li J, Zhang J, *et al.* Multiple-layer visibility propagation-based synthetic aperture imaging through occlusion[J]. Sensors, 2015, 15: 18965-18984.
- [15] Yang T, Zhang Y, Tong X, *et al.* High performance imaging through occlusion via energy minimization-based optimal camera selection[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10: 393.
- [16] Bolles R C, Baker H H, Marimont D H. Epipolar-plane image analysis: an approach to determining structure from motion[J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1(1): 7-55.
- [17] Sorkine-Hornung A, Kim C, Zimmer H, *et al.* Scene reconstruction from high spatio-angular resolution light fields: US20140327674[P]. 2013-07-17.