

基于双镜头中继结构的笼式光场相机设计与三维重建研究

田杏 曹丽霞

Design and three-dimensional reconstruction of a cage-type light field camera based on a dual-lens relay structure

TIAN Xing, CAO Li-xia

引用本文:

田杏, 曹丽霞. 基于双镜头中继结构的笼式光场相机设计与三维重建研究[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.3724/CO.2026-0118

TIAN Xing, CAO Li-xia. Design and three-dimensional reconstruction of a cage-type light field camera based on a dual-lens relay structure[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.3724/CO.2026-0118

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026-0118>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于转动式二维激光扫描仪和多传感器的三维重建方法

3D reconstruction method based on a rotating 2D laser scanner and multi-sensor

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 663 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0159>

基于插值超分辨的双目三维重建方法

Binocular 3D reconstruction method based on interpolation super-resolution

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 862 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0214>

基于几何估计优化的多线激光三维重建

Multi-line laser 3D reconstruction based on geometric estimation optimization

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 274 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0184>

卫星关键部件智能识别与三维重建方法

Intelligent recognition and 3D reconstruction method for satellite key components

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0091>

伽利略型同心阵列系统的设计与分析

Design and analysis of the Galileo-type Monocentric multiscale system

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1192 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0238>

彩色投影仪光强自适应高动态范围三维测量方法

Color projector light intensity adaptive high dynamic range 3D measurement method

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1219 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0038>

基于双镜头中继结构的笼式光场相机 设计与三维重建研究

田 杏, 曹丽霞*

(中国计量大学 计量测试与仪器学院, 杭州 310018)

摘要: 目的: 笼式光场相机具有光学组件可更换、系统参数可调节等特点, 已逐渐应用于流体三维速度场测量、燃烧诊断等领域。由于笼式光场成像系统引入了中继镜, 光场图像边缘区域容易出现渐晕现象, 进而影响微透镜阵列下子图像形状和光场图像成像质量, 并缩小有效光场成像区域。因此, 为了改善笼式光场相机的渐晕效应, 分析中继镜参数对笼式光场相机成像质量影响至关重要。方法: 本文提出了一种基于大通光孔径双镜头中继结构的笼式光场相机设计思路, 并优化了微透镜阵列位置调试方法。在此基础上, 选取 F1.8 50 mm 和 F1.4 85 mm 两种参数的双镜头中继镜开展对比实验, 研究不同中继镜参数对光场图像渐晕效应的影响, 并对渐晕区域位置、子图像形状以及有效光场成像区域尺寸进行分析。结果: 实验结果表明, 与 F1.8 50 mm 中继镜相比, 采用 F1.4 85 mm 中继镜时, 光场图像边缘区域子图像形变更小, 渐晕范围更小, 有效光场成像区域更大, 综合成像质量更优。因此, 本文采用两枚 F1.4 85 mm 镜头构成双镜头中继结构, 构建了大通光孔径笼式光场相机, 并利用该系统实现静态目标场景的多视角图像提取、深度图恢复与三维点云重建, 同时以 Lytro 商用光场相机的重建结果作为参考。结论: 结果表明, 本文构建的笼式光场相机可以有效获取目标场景的视差信息, 并成功恢复出目标的三维空间结构, 验证了该系统面向静态目标开展深度恢复与三维重建的可行性。

关键词: 笼式光场相机; 中继镜; 渐晕; 深度图; 三维点云

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

doi: 10.3724/CO.2026-0118

CSTR: 32171.14.CO.2026-0118

Design and three-dimensional reconstruction of a cage-type light field camera based on a dual-lens relay structure

TIAN Xing, CAO Li-xia*

(College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: caolx2019@gmail.com

Abstract: **Objective:** Cage-type light field cameras feature replaceable optical components and adjustable system parameters, and have been increasingly applied to three-dimensional (3D) fluid velocity measurement, combustion diagnostics, and other fields. However, the introduction of a relay lens in a cage-type light field imaging system may cause vignetting at the edges of light field images, thereby distorting the sub-images formed by the microlens array, degrading image quality, and reducing the effective imaging area of the system. Therefore, to mitigate the vignetting effect in cage-type light field cameras, it is crucial to analyze the influence of relay lens parameters on the imaging quality of cage-type light field cameras. **Methods:** This pa-

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金(No. 12302370)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12302370)

per proposes a design concept for a cage-type light field camera based on a dual-lens relay structure with a large-aperture lens, and optimizes the method for adjusting the position of the microlens array. Based on this design, comparative experiments were conducted using two dual-lens relay systems, respectively equipped with F1.8 50 mm and F1.4 85 mm lenses, to investigate the effects of different relay lens parameters on vignetting in light field images. The vignetting region, sub-image shape, and effective light field imaging area were analyzed. **Results:** The experimental results show that, compared with the F1.8 50 mm relay system, the F1.4 85 mm relay system produces less distortion of the peripheral sub-images, a smaller vignetting region, and a larger effective imaging area, resulting in superior overall imaging quality. Therefore, a dual-lens relay structure composed of two F1.4 85 mm lenses was adopted to construct a large-aperture cage-type light field camera. The system was then used to extract multi-view images, recover depth maps, and reconstruct 3D point clouds of static target scenes, with reconstruction results from a commercial Lytro light field camera serving as a reference. **Conclusion:** The results demonstrate that the cage-type light field camera developed in this paper can effectively capture disparity information from target scenes and successfully reconstruct the target's 3D spatial structure, demonstrating the feasibility of the proposed system for depth recovery and 3D reconstruction of static targets.

Key words: cage-type light field camera; relay lens; vignetting; depth map; 3D point clouds

1 引言

光是人类获取客观世界信息的重要载体,承载着物体的形态、亮度、颜色及空间结构等信息^[1]。传统成像系统基于几何光学原理,通过透镜将物体反射的光线会聚在感光介质上,形成清晰的二维影像,实现了“所见即所得”的基本成像需求^[1-2]。传统摄影成像通常只能记录光线的强度和位置分布,难以同时获取光线的传播方向信息,从而限制了对三维场景结构的完整表征能力^[3]。随着三维测量、三维重建及计算成像技术的发展,利用单台光场相机完整地记录场景中的光学信息并恢复目标的三维空间结构,已成为现代光学成像领域的重要研究方向^[2-5]。

光场(Light Field)的概念最早由 A. Gershun^[6]于 1936 年提出,用于描述空间中光线的辐射分布。1908 年, G. Lippmann^[7]提出集成摄影技术,利用微小球面透镜阵列记录不同方向的光线信息,首次提出以透镜阵列离散采集多维光线辐射的光学成像思路。随后, D. Coffey^[8]提出利用大孔径相机将目标成像到微透镜阵列(Micro-lens Array, MLA)上,再经微透镜阵列二次成像到图像传感器上,从而实现多视角、大景深的集成成像,这一结构就是光场相机的初期原型。1992 年,

E. Adelson 和 J. Wang^[9]在集成摄影技术的基础上,首次设计并组装了一台全光相机(Plenoptic Camera)。该相机结构在传统相机主镜头的成像面上引入一薄的微透镜阵列,并进一步在微透镜阵列与图像传感器之间加入中继镜。主镜头汇聚的光线先成像于微透镜阵列所在的虚拟像面(Virtual Image Plane, VIP)上,再由中继镜将 VIP 上的虚拟图像重新成像至图像传感器上。在同一曝光时间下,微透镜阵列的每个微透镜记录光场的位置信息,同时每个微透镜下的像素记录光场的方向信息。微透镜的引入使光场相机可获取目标场景的四维光场数据 $L(u, v, s, t)$ ^[10,11]。随后, R. Ng^[11]等人通过去除了中继成像组件,简化了 E. Adelson 与 J. Wang 设计的光场相机结构,他们将图像传感器布置于微透镜阵列后方焦平面位置。在此基础上, A. Lunsdaine 和 T. Georgiev^[12]提出了聚焦型光场相机,通过调整微透镜阵列与图像传感器之间的相对位置,在空间分辨率与角度分辨率之间实现了更灵活的权衡。目前,光场成像技术已在机器视觉^[13]、流场诊断^[14-16]、燃烧诊断^[17,18]、生物显微成像^[19]及三维测量^[20]等领域得到广泛应用,并在动态三维信息获取方面展现出独特优势^[19]。

目前,商用光场相机主要包括 Lytro 与 Raytrix 等系列产品,具有集成度高、便携性强、精度高等

优点,但其内部微透镜阵列与图像传感器之间的几何结构通常为封装式设计,光学参数固定且难以调整^[21]。因此,封装式结构在一定程度上限制了光场系统在特定应用场景中的参数优化能力与工程适应性。为了提高光场相机光学参数的灵活可调性,研究者开始构建基于中继镜结构的自组装光场相机。M. Broxton 等人^[22]在荧光显微镜原生像面处放置微透镜阵列,并采用头对头安装的摄影镜头作为中继成像结构,将微透镜阵列后焦平面重新成像到相机传感器上,实现了光场显微镜的高速体积成像。在此基础上,Song 等人^[23]提出了基于双镜头对称中继结构的光场显微粒子图像测速系统,在单次曝光下实现了微尺度流场的瞬时三维速度场测量。Liu 等人^[24]采用两枚镜头以头对头方式构成 1:1 对称式中继镜,搭建了面向火焰温度三维测量的笼式光场相机,通过模块化机械结构实现光学组件的灵活调节。Tan 等人^[25]在早期研究中,以微距镜头作为中继成像单元,设计并研制了面向高速三维流场测量的模块化光场适配器(Modular Plenoptic Adaptor, MPA)。该适配器无需对商用高速相机进行内部改装,仅依托外置光路即可完成高速光场成像系统的搭建,在不破坏高速相机的前提下,成功实现了高速相机与光场成像技术的结合。上述研究表明,基于中继镜的笼式光场系统具有结构灵活、光学参数可调及微透镜阵列可更换等优点,在三维成像与测量领域具有较好的应用潜力。然而,由于引入了基于双镜头的中继镜,目前笼式光场相机采集的

光场图像四角存在严重的渐晕效应,渐晕区域内微透镜对应的子图像形状产生了畸变,这不仅会干扰多视角图像的正常提取,还会缩小光场图像有效区域的尺寸。

针对中继镜引起的渐晕效应,本文构建了双镜头中继结构的笼式光场相机,同时优化了微透镜阵列位置调试方法,并对不同中继镜参数条件下的白图像渐晕区域、子图像形状及有效光场成像区域尺寸进行了对比分析,据此确定了渐晕影响较小、有效成像区域较大时的中继镜光学参数。在此基础上,利用所构建的笼式光场相机拍摄静态目标场景的光场图像,提取深度图及三维点云,并以 Lytro 商用光场相机的重建结果作为参考,验证了本文所构建的笼式光场相机面向静态目标开展三维重建的可行性。

2 笼式光场相机的成像原理

笼型光场相机的结构及成像原理示意图如图 1 所示。物空间中的点光源发出的光线经主镜头会聚后,在微透镜阵列平面上形成中间像;微透镜阵列对入射光线进行角度采样,使不同方向的光线在其后方形成对应的子图像,并在虚拟图像平面(VIP)上成像;由两枚光学参数相同的镜头构成的中继镜进一步将 VIP 上的虚拟图像传递至图像传感器,从而完成物空间中目标场景光场信息的采集。

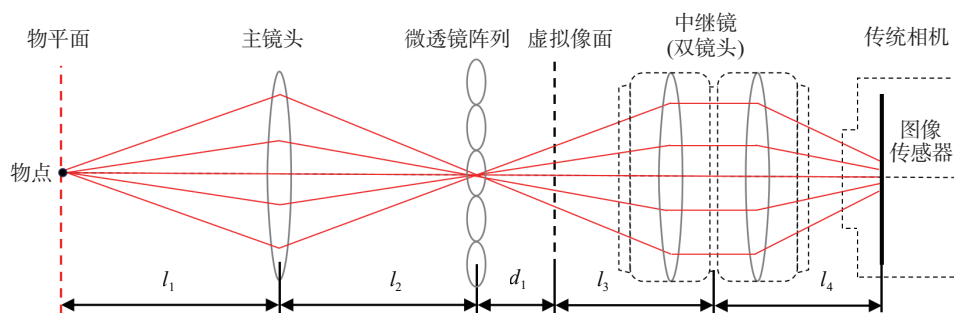


图 1 笼式光场相机的结构及成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure and imaging principle of a cage-type light field camera

根据图 1,可通过以下公式计算出微透镜阵列前方主镜头的逆放大倍率:

$$M_{\text{mainlens}} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (1)$$

式中 l_1 为物平面与主镜头平面之间的距离, l_2 为主镜头平面与微透镜阵列平面之间的距离。

传统相机前面的中继镜的放大倍率由以下公式计算:

$$M_{\text{relay}} = \frac{l_4}{l_3}, \quad (2)$$

式中 l_3 为 VIP 平面与中继镜之间的距离, l_4 是中继镜与图像传感器之间的距离。

物平面、主镜头和微透镜阵列平面具有以下共轭关系:

$$\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_m}, \quad (3)$$

式中 f_m 为主镜头的焦距。

主镜头、微透镜阵列平面和 VIP 平面具有以下共轭关系:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f_{\text{MLA}}}, \quad (4)$$

式中 f_{MLA} 为微透镜阵列的焦距, d_1 为微透镜阵列平面与 VIP 平面的距离。

3 基于光场相机的深度图与三维点云提取原理

光场相机可以在单次曝光中同时记录场景光线的空间位置信息和方向信息。对光场相机采集的原始图像进行校正与光场重排处理后, 可得到包含空间维度和角度维度的四维光场数据。在四维光场数据中固定角度坐标, 就可以提取不同视角下的子孔径图像。同一场景点在不同子孔径图像中的位置偏移反映了其视差信息, 在等效成像参数确定的条件下, 视差大小与场景深度之间存在确定的几何关系。通常情况下, 近距离目标在不同视角间的像素位置变化较大, 远距离目标变化较小, 因此可通过子孔径图像之间的视差估计恢复场景深度图。在获得深度图后, 结合相机成像模型, 就能将二维图像坐标及其对应深度值映射到三维空间中, 从而生成场景的三维点云。深度图用于表征场景中各像素对应的深度信息, 为后续深度分析与测量提供数据基础; 三维点云以显示三维结构描述目标的空间几何形态, 可用于目标三维重建与可视化分析。基于此, 本章将从四维光场表示、子孔径图像提取、视差与深度的几何关系, 以及深度图到三维点云的转换过程四个方面, 阐述光场相机提取深度图与三维点云的基本原理。

3.1 四维光场与子孔径图像

根据双平面参数化模型, 自由空间中的一条光线由其与两个平面的交点唯一确定, 即

$$L(u, v, s, t), \quad (5)$$

其中, (u, v) 为角度坐标, (s, t) 为空间坐标, L 为对应光线强度。

固定角度坐标 (u, v) , 遍历空间坐标 (s, t) , 可得到对应的子孔径图像 (Sub-Aperture Image, SAI):

$$I_{u,v}(s, t) = L(u, v, s, t), \quad (6)$$

图 2 展示了微透镜阵列下子孔径视图的提取原理。为进一步说明子孔径图像的提取过程, 如图 2 所示, 将微透镜阵列中的微透镜位置记为 (s, t) , 每个微透镜下的局部像素位置记为 (u, v) 。其中, 微透镜阵列中不同微透镜的位置对应光场的空间采样位置, 而每个微透镜下不同局部像素的位置对应光场的角度采样位置。在此基础上, 子孔径图像的提取过程可描述为, 固定某一角度采样位置 (u, v) , 在所有空间采样位置 (s, t) 上提取对应 (u, v) 位置的像素并进行重排, 即可得到同一角度采样位置对应的子孔径图像。例如, 固定每个微透镜下的中心局部像素 (u_3, v_3) , 可得到中心视角图像; 固定偏右上 (u_4, v_4) 或偏左下 (u_2, v_2) 的局部像素, 可分别得到对应方向的子孔径图像。不同的 (u, v) 位置对应不同观察方向, 从而得到一组具有微小视差的多视角图像。

对于微透镜阵列式的光场相机, 原始传感器图像中包含交织排列的空间采样和角度采样信息。经过白图校正、颜色恢复及几何标定后, 可重排得到规则的四维光场数据 $L(u, v, s, t)$ 。若考虑颜色通道, 则可进一步写为 $L(u, v, s, t, c)$, 其中 c 表示颜色通道。最终得到的光场张量可表示为:

$$L \in \mathbb{R}^{N_u \times N_v \times N_s \times N_t \times 3}, \quad (7)$$

式中, N_u 和 N_v 分别表示角度维度在水平和垂直方向上的采样数; N_s 和 N_t 分别表示空间维度在垂直和水平方向上的采样数; 末尾的 3 表示 RGB 三个颜色通道。

由此可见, 无论是 Lytro 商用光场相机还是本文构建的笼式光场相机, 在完成传感器图像校正与光场重排后, 均可统一表示为四维光场数据, 为后续深度恢复和三维重建提供基础。

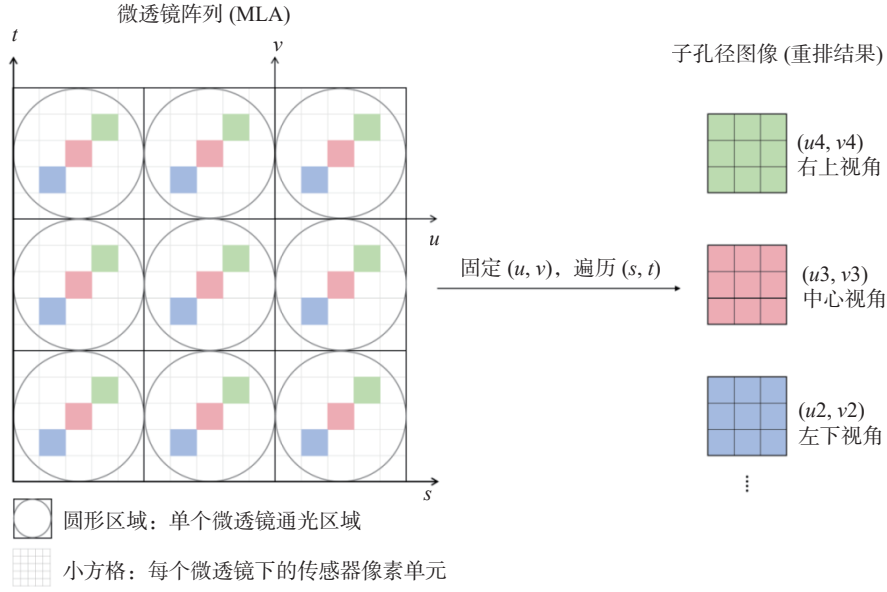


图 2 微透镜阵列下子孔径视图提取原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram illustrating the principle of sub-aperture view extraction under a microlens array

3.2 基于视差的深度恢复几何模型

光场深度恢复的关键在于估计同一场景点在不同子孔径视图中的投影位置差异, 该差异定义为视差。经过几何校正后, 子孔径图像在几何上等效为一组光轴平行的针孔相机阵列, 从而将光场成像转化为多视角几何问题。在该模型下, 视差可分解为水平与垂直两个方向分量。为简化推导过程, 本文选取水平方向视差为例说明视差与深度之间的几何关系。

图 3 展示了水平方向视差与场景深度之间的几何关系。图中, O_c 和 O_u 分别表示中心子孔径视图和相邻子孔径视图对应的等效相机中心, 二者之间的距离为等效基线 B 。场景点 $P(X, Y, Z)$ 在两个视图中的投影位置分别为 s_c 和 s_u , Z 表示该场景点到参考成像平面的深度, s_c 和 s_u 之间的位置差即为水平方向视差 d_s 。

根据针孔成像模型, 场景点 P 在中心子孔径视图中的水平投影位置为

$$s_c = \frac{fX}{Z}, \quad (8)$$

式中, f 为等效焦距, X 为空间点在水平方向上的坐标。在相邻子孔径视图中, 由于视点发生平移, 点 P 的水平投影坐标为

$$s_u = \frac{f(X - B)}{Z}, \quad (9)$$

因此, 两视图之间的水平视差为

$$d_s = s_c - s_u = \frac{fX}{Z} - \frac{f(X - B)}{Z} = \frac{fB}{Z}, \quad (10)$$

由此可得深度与视差之间的关系:

$$Z = \frac{fB}{d_s}. \quad (11)$$

当等效焦距 f 和等效基线 B 一定时, 该式表明深度与视差呈反比例关系。当目标距离相机较近时, 其在不同视角中的投影偏移较大, 对应视差较大; 而距离较远的目标视差较小。因此, 光场深度恢复首先通过不同子孔径视图获得视差信息, 再利用视差与深度之间的几何关系得到深度图。

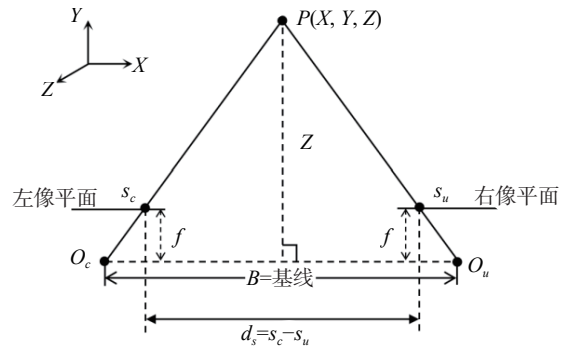


图 3 水平视差与场景深度的几何关系图

Fig. 3 Diagram of the geometric relationship between horizontal parallax and scene depth

3.3 基于 EPI 的深度信息表达

光场中的深度信息还可通过极平面图像

(Epipolar Plane Image, EPI)进行描述。固定一个角度坐标 $v=v_0$ 和一个空间坐标 $t=t_0$, 可从四维光场中获得二维切片:

$$E(u, s) = L(u, v_0, s, t_0) \quad (12)$$

EPI 中直线斜率与场景深度的对应关系如图 4 所示。同一场景点在不同角度视图中的投影位置 s 随角度坐标 u 近似线性变化, 因此在 EPI 中表现为一条直线。对于空间中同一点, 其在参考视角 u_0 下的投影位置记为 s_0 , 当视角由 u_0 变化至 u 时, 投影位置沿空间坐标 s 方向产生相应偏移。该偏移量与角度坐标变化量近似成正比, 因此可表示为

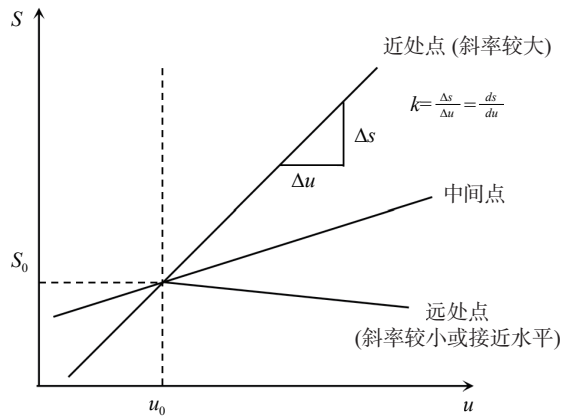


图 4 EPI 中直线斜率与场景深度的对应关系

Fig. 4 The relationship between line slope and scene depth in EPI

$$s(u) = s_0 + k(u - u_0) \quad (13)$$

式中, $s(u)$ 表示该场景点在角度坐标 u 下的空间投影位置, k 为 EPI 中直线的局部斜率, 反映空间位置随角度变化的变化率。对式 (13) 进行求导可得:

$$k = \frac{ds}{du} \quad (14)$$

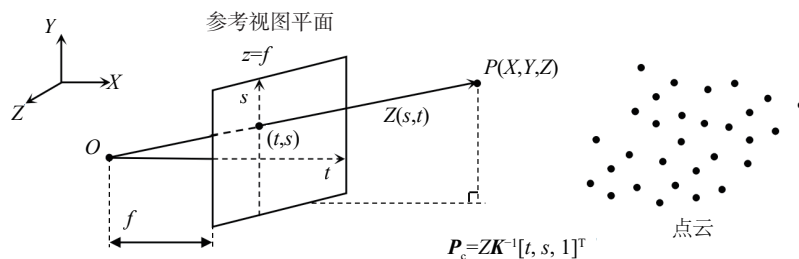


图 5 深度图反投影生成三维点云示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 3D point clouds generation via depth map backprojection

在局部线性近似条件下, 同一场景点在不同角度采样之间的水平视差可表示为:

$$d_s = k \cdot \Delta u \quad (15)$$

式中, Δu 表示角度采样间隔。

结合式 (10) 和式 (15), 可得到深度与 EPI 斜率之间的关系:

$$Z \approx \frac{fB}{k \cdot \Delta u} \quad (16)$$

式中, f 为等效焦距。

在角度采样均匀分布的条件下, 角度间隔 Δu 可映射为等效空间基线间距 ΔB_u , 则深度可进一步表示为:

$$Z \approx -\frac{f\Delta B_u}{k} \quad (17)$$

式中, ΔB_u 为相邻角度采样对应的等效基线变化量。

由此可见, 当目标距离相机较近时, 其在不同视角下的投影变化较大, 对应直线的斜率也较大; 而距离较远的目标, 其投影变化较小, 对应直线斜率较小或趋于水平。因此, 不同深度目标在 EPI 中表现为不同斜率的线结构特征, 从而为深度恢复提供几何依据。

3.4 深度图到三维点云的反投影

获得深度图后, 可进一步基于相机成像模型将二维像素反投影至三维空间, 从而生成三维点云。图 5 展示了由深度图反投影生成三维点云的几何过程。通常选取中心子孔径图像作为参考视图。在参考视图中, 像素点 (t, s) 与相机光心 O 确定一条空间成像射线, 当该像素对应的深度 $Z(t, s)$ 已知时, 便可沿此射线确定其三维空间位置 $P(X, Y, Z)$ 。对深度图中所有有效像素执行上述反投影过程, 即可得到场景的三维点云。

设参考视图的相机内参矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中, f_x 和 f_y 分别表示水平方向上和垂直方向上的等效焦距, 单位为像素, c_x 和 c_y 为主点坐标。对于参考视图中像素点 (t, s) , 其齐次像素坐标为

$$\mathbf{p} = [t, s, 1]^T, \quad (19)$$

对应的归一化相机坐标为

$$[x_n, y_n, 1]^T = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{p}, \quad (20)$$

结合深度值 $Z(s, t)$, 即可得到该像素对应的三维坐标:

$$\mathbf{P}_c(s, t) = Z(s, t) \mathbf{K}^{-1} [t, s, 1]^T, \quad (21)$$

展开可得

$$\begin{cases} X(s, t) = \frac{(t - c_x)Z(s, t)}{f_x} \\ Y(s, t) = \frac{(s - c_y)Z(s, t)}{f_y} \\ Z(s, t) = Z(s, t) \end{cases}, \quad (22)$$

若将参考视图中的颜色信息赋予对应的三维点, 则可获得彩色点云:

$$\mathbf{Q}(s, t) = [X(s, t), Y(s, t), Z(s, t), R(s, t), G(s, t), B(s, t)]^T, \quad (23)$$

式中, $R(s, t)$ 、 $G(s, t)$ 、 $B(s, t)$ 分别为参考视图在像素位置 (s, t) 处的颜色分量。当深度图仅包含相对尺度信息时, 生成的点云对应相对空间坐标; 若结合相机内参、系统标定参数以及尺度信息, 则可进一步恢复具有真实物理尺度的三维点云。

4 基于双镜头中继镜笼式光场相机的设计

图 6 展示了基于双镜头中继镜笼式光场相机的系统装置图。如图 6 所示, 该系统主要由主镜头、微透镜阵列、中继镜及传统相机四部分构成。主镜头选用尼康 100 mm 定焦镜头, 放大率 $M_{\text{mainlens}}=1:1$; 中继镜采用两个尼康 85 mm、 $F1.4$ 定焦镜头, 以头对头方式构成 1:1 对称中继结构; 微透镜阵列为正方形排列, 焦距 $f_{\text{MLA}}=800 \mu\text{m}$, 单个微透镜尺寸为 $100 \mu\text{m}$; 图像传感器采用尼康 Zf 相机, 其传感器尺寸为 $24 \text{ mm} \times 35.9 \text{ mm}$, 分辨率为 4032×6048 像素, 像素尺寸为 $5.95 \mu\text{m} \times 5.95 \mu\text{m}$ 。全部光学组件安装在笼板上, 由四根不锈钢笼杆连接, 各组件之间的轴向距离可通过精密移位台独立调节, 以保证各个光学元件光轴共轴。

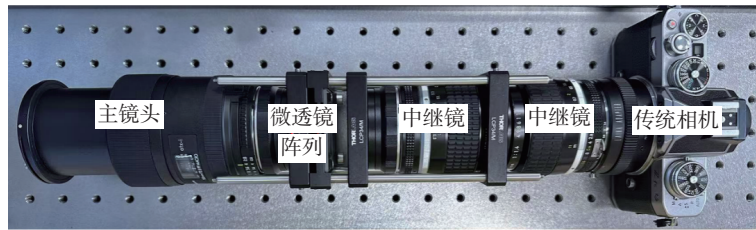


图 6 基于双镜头中继镜笼式光场相机的系统装置

Fig. 6 System diagram of a dual-lens relay cage-type light field camera

4.1 笼式光场相机系统调试

在使用笼式光场相机拍摄前, 需要先对设备进行调试, 使主镜头成像面、微透镜阵列与图像传感器之间满足光学成像匹配关系, 以保证每个微透镜对应的子图像都能清晰成像在传感器平面, 最终采集得到清晰准确的白图像与光场图像。调试步骤如下:

1)、**安装中继镜:** 先将两块笼板分别固定在中继镜的两端, 再把四根笼竿依次穿过两块笼板四角的通孔, 调整至合适位置后拧紧螺丝固定。

接着通过转接环将中继镜的一端与传统相机连接, 再在中继镜另一端的前方安装微透镜阵列, 最后整体安装到精密移位台上。

2)、**搭建平行光束:** 在微透镜阵列前方安装两个透镜和一个平行光源, 光路结构如图 7 左侧红色方框所示, 平行光路示意图如图 8 所示。平行光源发射的平行光束经两组透镜扩束后, 垂直入射到微透镜阵列表面。将一张白纸放置在透镜组右侧, 沿光轴方向往复移动白纸, 同时调整透镜位置, 直至白纸上平行光源形成的光斑大小不再

发生变化,此时说明光束发散程度极低,平行光束 拥有较高平行准确度,即代表平行光束调试成功。

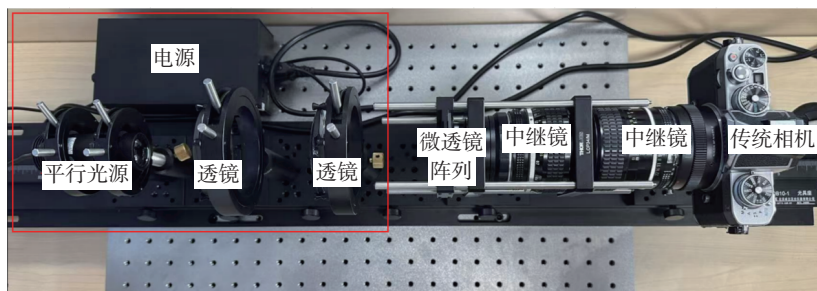


图 7 搭建平行光束系统装置图

Fig. 7 Schematic diagram of a parallel beam system setup

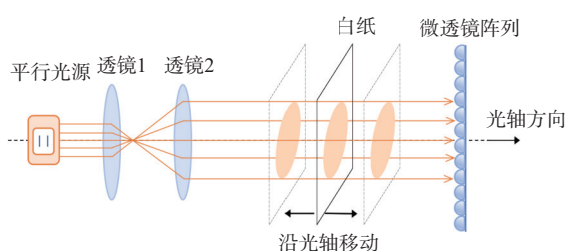


图 8 平行光路示意图

Fig. 8 Schematic diagram of a parallel optical path

3)、**微透镜阵列位置校准:** 平行光束搭建完成后,将平行光垂直入射至微透镜表面上,将微透镜阵列沿笼杆前后移动,通过相机观察其成像效果。当观察到微小圆点尺寸达到最小时(如图 9 所示),说明微透镜阵列后方某一焦距处的平面经中继镜成像于相机图像传感器上,此时微透镜阵列与中继镜之间的位置校准完成。

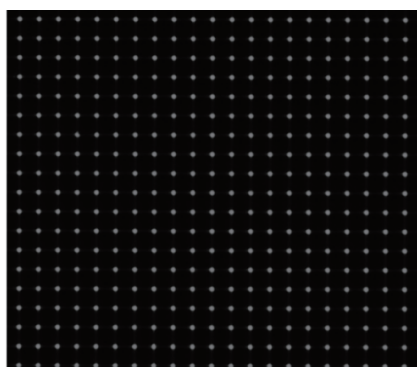


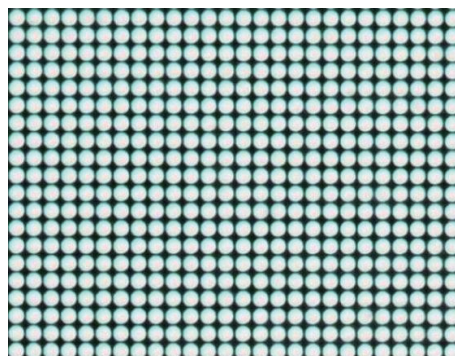
图 9 微透镜阵列的成像效果

Fig. 9 Imaging performance of microlens arrays

4)、**调整微透镜子图像之间的位置:** 移除平行光束和两个透镜,将主镜头安装在微透镜阵列前方,如图 6 所示。在主镜头前放置一张白纸,用白光垂直照射该白纸,通过沿笼竿前后调整主镜头与微透镜阵列之间的距离,在相机上观察实时

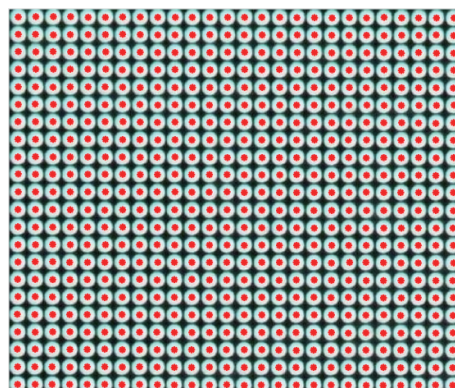
图像,当发现微透镜下方的相邻子图像相切时,停止移动,并将各组件位置固定,完成调试。

将微透镜子图像刚好相切时采集的图像作为该笼式光场相机的白图像,该白图像包含一系列圆形子图像,其中部分子图像如图 10(a) 所示。使用中心拟合算法计算白图像中每一个子图像的中心位置,得到的中心坐标对应图 10(b) 中红色“*”号标记的位置。图 10(c) 展示了子图像内部像素的灰度值分布,可以观察到每个子图像中心区域的灰度分布相对均匀,边缘区域的像素灰度值则低于中心区域。



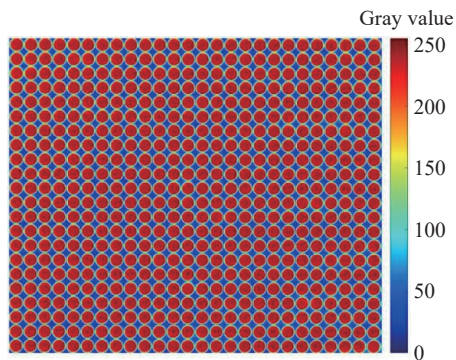
(a) 光场白图像的部分子图像

(a) Sub-images from the white image of the light field



(b) 每个子图像的中心

(b) The center of each subimage



(c) 子图像内部像素的灰度值分布

(c) Distribution of grayscale values of pixels within a subimage

图 10 光场白图像的部分子图像、子图像的中心和子图像内部的灰度值分布

Fig. 10 Subimages of the white image in the light field, the centers of the subimages, and the grayscale value distributions within the subimages

4.2 不同中继镜参数对光场图像质量的影响

完成系统调试后,可得到排列规整的微透镜子图像及对应的白图像,为后续开展实验奠定了基础。为进一步优化笼式光场相机的成像质量,本文研究了不同参数的中继镜对白图像质量的影响。实验以光场白图像的渐晕尺寸、子图像形状以及有效光场成像区域的尺寸作为评价指标,对比分析了中继镜参数分别为 F1.8 50 mm 和 F1.4 85 mm 时,对白图像渐晕效应的影响。图 11 所示为 F1.8 50 mm 和 F1.4 85 mm 双镜头结构的中继镜,两种结构均聚焦于无限远,中继放大率 M_{relay} 为 1:1。

(a) F1.8, $f=50$ mm(b) F1.4, $f=85$ mm

图 11 不同参数的中继镜

Fig. 11 Relay lens with different parameters

图 12 展示了不同中继镜参数下,笼式光场相

机原始白图像的灰度值分布,以及不同区域内子图像的形状。由图 12(a) 和图 12(b) 可见,两组中继镜参数下的白场图像都呈现出灰度由中心向边缘逐渐衰减的分布特征,区域 (1) 处的子图像也都接近标准圆形;但当中继镜参数为 F1.8 50 mm 时,白场图像的灰度衰减速度更快,仅中心小范围区域灰度值较高,边缘区域灰度快速跌落至较低水平,渐晕覆盖范围也更广。当中继镜参数为 F1.4 85 mm 时,区域 (2) 处子图像的轮廓接近圆形,而参数为 F1.8 50 mm 时,该位置的子图像出现了较为明显的纵向拉伸,原有圆形形貌被破坏。对于靠近边缘的区域 (3),两种参数下都存在一定程度的形变: F1.4 85 mm 参数下子图像仅发生轻微的纵向拉伸,呈现椭圆形畸变; F1.8 50 mm 参数下子图像的拉伸畸变更更为显著,形状退化严重,有效成像质量大幅下降。

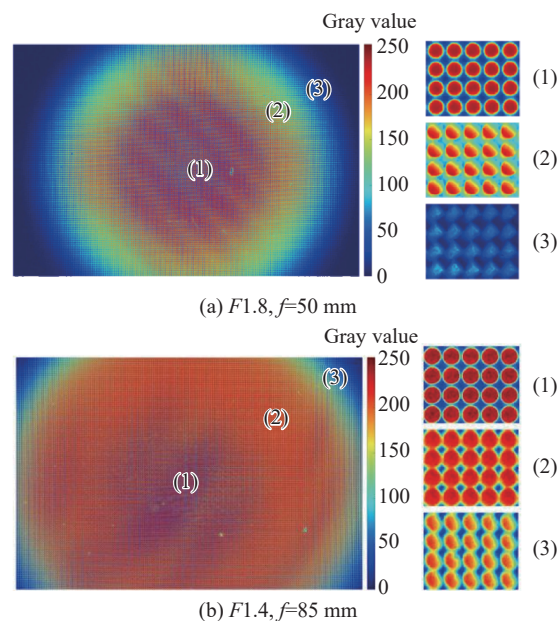
(a) F1.8, $f=50$ mm(b) F1.4, $f=85$ mm

图 12 不同中继镜参数下原始白图像的灰度值分布

Fig. 12 Gray-scale value distribution of raw white images under different relay lens parameters

图 13 展示了不同参数的中继镜对笼式光场相机有效光场成像区域尺寸的影响。如图 13(a) 所示,当中继镜参数为 F1.8 50 mm 时,有效光场成像区域尺寸约为 $7.5 \text{ mm} \times 7.5 \text{ mm}$; 当中继镜参数更换为 F1.4 85 mm 时,有效光场成像区域扩大至约 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。结合图 12 的结果可知,采用 F1.4 85 mm 中继镜时,系统的渐晕效应得到明显抑制,边缘区域子图像的拉伸畸变也得到有效改善,同时还能获得尺寸更大的有效光场成像区

域。因此,与 F1.8 50 mm 的中继镜相比,采用 F1.4 85 mm 的中继镜可以获得更优的综合成像性能,后续实验将采用该参数的中继镜开展三维点云重建实验。

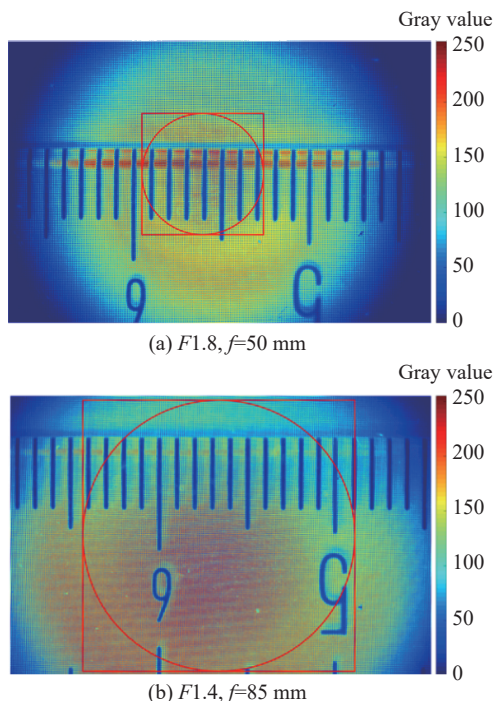


图 13 不同参数中继镜下笼式光场相机的有效光场成像区域

Fig. 13 Effective optical field imaging area of a cage-type light field camera under different parameter relay lens

5 光场相机光场图像的深度图与三维点云提取

完成基于双镜头中继镜的笼式光场相机系统的搭建与调试后,本文利用该系统采集目标场景的光场图像,开展了深度图与三维点云的提取实验。首先对光场图像进行校正和光场重排,获得多视角子孔径图像;随后利用不同视角间的视差信息恢复场景深度;最后根据式 (21) 所示的深度图反投影模型及式 (22) 所示的三维坐标展开形式,将有效深度像素映射至三维空间,生成对应的三维点云。为验证所构建系统应用于静态三维重建的可行性,本文同时选取了 Lytro 商用光场相机的重建结果作为参考。

本文构建的笼式光场相机主镜头物像比为 1:1,适用于尺寸约 7 mm 的小尺度目标成像。Lytro 光场相机的物像比为 1:3,且光学结构固

定,其成像倍率和有效工作范围与笼式光场相机不同。若采用同一小尺寸目标,该目标在 Lytro 相机图像中所占的有效像素范围较小,能够提供的目标空间采样信息有限。因此,本文根据两套系统各自的成像倍率和工作范围,分别选取尺寸适配的实验对象。此外需要说明的是,Lytro 光场相机的重建结果仅用于参考性验证,不作为两套系统之间重建精度和性能优劣的直接比较依据。

5.1 深度图与三维点云的提取结果

图 14 展示了笼式光场相机和 Lytro 商用光场相机采集的两组目标场景原始光场图像。其中,图 14(a) 为笼式光场相机采集的花朵场景原始光场图像,图 14(b) 为 Lytro 商用光场相机采集的橘子场景原始光场图像。分别对两组光场图像进行多视角子孔径图像提取,并基于提取结果实现深度图恢复与三维点云重建,两组场景对应的处理结果分别如图 15 与图 16 所示。

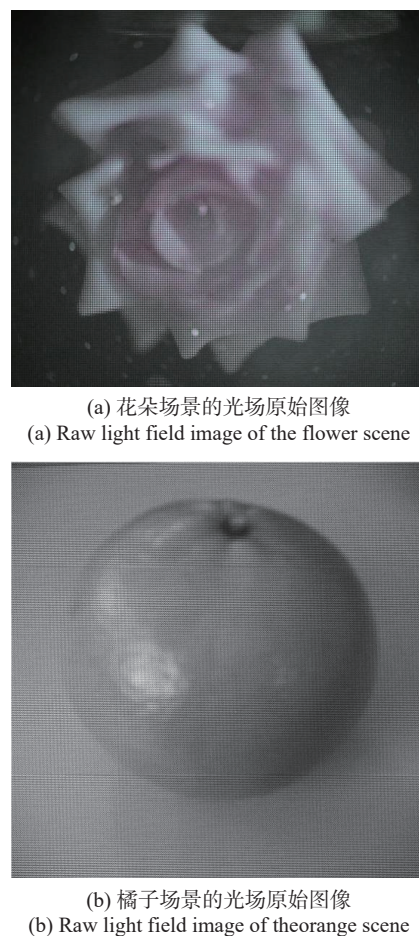
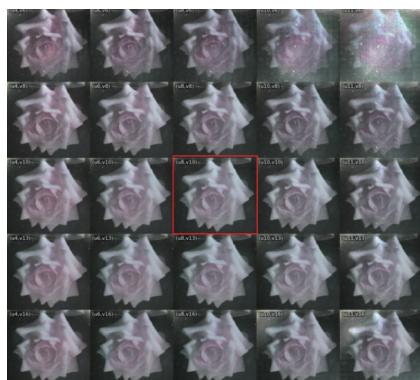


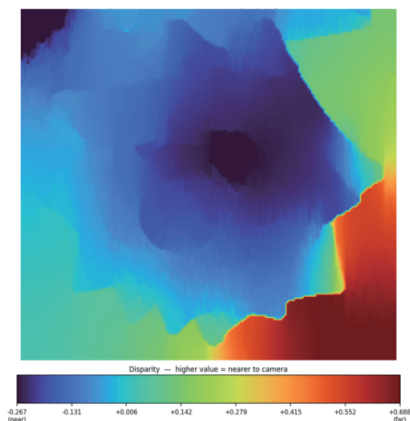
图 14 笼式光场相机和 Lytro 商用光场相机采集目标场景的原始光场图像

Fig. 14 Cage-type light field cameras and Lytro commercial light field cameras capture raw light field images of the target scenes

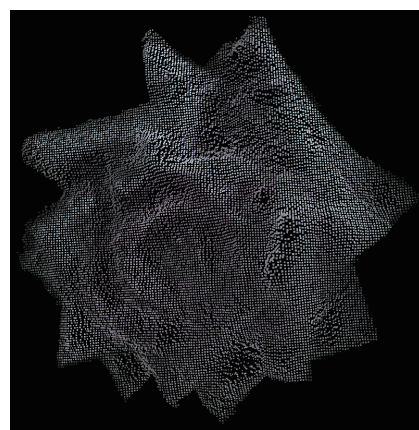
图 15 展示了笼式光场相机针对花朵场景得到的多视角子孔径图像、深度图及三维点云重建结果。其中, 图 15(a) 为原始光场图像经校正与光场重排后得到的多视角图像, 红框标记的是中心视角。由不同子孔径视图可见, 随着观察视角的变化, 花瓣边缘及背景区域的位置发生轻微偏移, 反映出不同视角之间存在视差信息。基于多视角图像的对应关系恢复得到深度图, 如图 15(b) 所示。从图中的伪彩色分布可以看出, 花朵不同区域呈现出连续的深度变化特征, 花朵主体与背景之间存在深度分层。进一步对深度图进行反投影, 得到花朵的三维点云, 并分别从正视和侧视方向进行展示, 如图 15(c) 和图 15(d) 所示。从图中可以看出, 本次重建得到的三维点云较好地还原了花朵的整体轮廓与层次结构。正面视图中能够清晰识别各花瓣的形状特征, 侧面视图则呈现出不同花瓣之间的起伏变化和空间深度分布。点云整体分布较为连续, 能够较好地恢复花朵的三维形貌, 这表明本文所构建的笼式光场相机在该场景下具备获取场景深度信息和进行三维重建的能力。



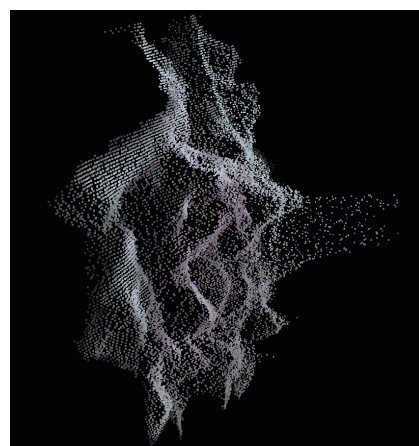
(a) 多视角子孔径图像
(a) Multi-view sub-aperture images



(b) 深度图
(b) Depth map



(c) 三维点云正面视图
(c) The front view of 3D point clouds



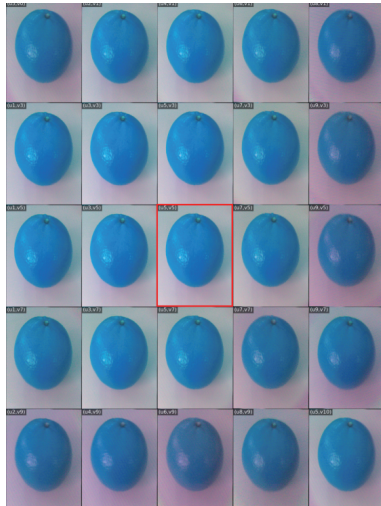
(d) 三维点云侧面视图
(d) The side view of 3D point clouds

图 15 笼式光场相机光场图像的多视角图像、深度图及三维点云结果

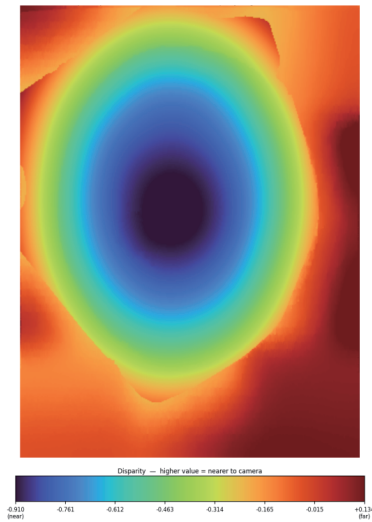
Fig. 15 Multi-view images, depth map, and 3D point clouds results from a cage-type light field camera

图 16 展示了 Lytro 商用光场相机针对橘子场景得到的多视角子孔径图像、深度图及三维点云重建结果。由图 16(a) 可见, 经光场图像解码后得到的多视角子孔径图像排列规则, 不同视角下目标位置存在连续变化, 反映出场景中包含丰富的视差信息。基于多视角图像间的对应关系恢复得到深度图, 如图 16(b) 所示。橘子主体区域呈现出连续的深度分布, 深度值由中心向边缘逐渐变化, 与橘子近似椭球体的几何形态吻合; 同时, 橘子与背景之间存在明显的深度分层, 目标轮廓能够准确分辨。在此基础上, 通过深度图反投影得到橘子的三维点云, 分别从正视和侧视方向进行展示, 结果如图 16(c) 和图 16(d) 所示。从正面视图可以观察到橘子的整体外形及表面纹理特征, 侧面视图则呈现出较为明显的弧形轮廓和空

间起伏特征。本次重建得到的点云能够较完整地反映橘子的三维形貌,表明 Lytro 商用光场相机在该场景下能够实现稳定的深度恢复和三维点云重建。



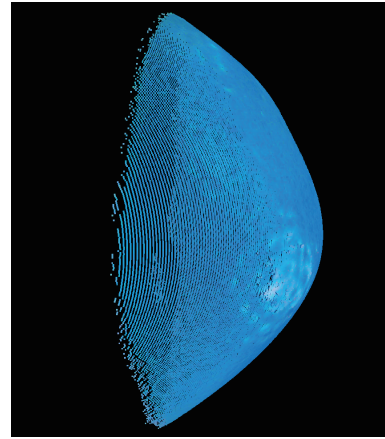
(a) 多视角子孔径图像
(a) Multi-view sub-aperture images



(b) 深度图
(b) Depth map



(c) 三维点云正面视图
(c) The front view of 3D point clouds



(d) 三维点云侧面视图
(d) The side view of 3D point cloud

图 16 Lytro 商用光场相机光场图像的多视角图像、深度图及三维点云结果

Fig. 16 Multi-view images, depth map, and 3D point clouds results from Lytro commercial light field camera

5.2 深度图与三维点云重建结果分析

为了进一步分析深度图和三维点云的重建结果,对 Lytro 商用光场相机和笼式光场相机恢复得到的深度图及三维点云进行统计分析,结果如表 1 所示。由于两套系统的实验对象不同,对应的目标尺寸、纹理分布与空间结构也存在差异,因此表 1 中的有效视差比例、平均视差梯度、平均邻域距离和离群点比例,仅用于分别描述两种相机各自重建结果的基本特征,不作为衡量重建精度与性能优劣的直接比较依据。其中,有效视差比例用于反映深度图中有效深度信息的完整程度;平均视差梯度用于表征深度信息在空间上的变化连续性;平均邻域距离用于描述三维点云的局部空间分布状态;离群点比例则用于衡量点云中异常离散点的占比。

表 1 两种光场相机重建结果的统计特征参数

Tab. 1 Statistical feature parameters of reconstruction results from two types of light field cameras

类别	指标	笼式光场相机	Lytro 商用光场相机
深度图	有效视差比例(%)	100.00	100.00
深度图	平均视差梯度	0.008 762	0.005 763
三维点云	平均邻域距离	1.131 703	1.111 369
三维点云	离群点比例(%)	4.12	0.46

由表 1 可知,两种光场相机恢复得到的有效视差比例均为 100%,说明深度图中不存在明显的

空洞区域。二者的平均视差梯度分别为 0.008 762 和 0.005 763, 结合深度图的结果可以看出, 两种光场相机恢复得到的深度信息均呈现出连续变化的特征。平均邻域距离分别为 1.131 703 和 1.111 369, 说明两种相机的重建点云在局部空间中均保持了连续的分布状态。离群点比例分别为 4.12% 和 0.46%, 说明两种光场相机重建得到的点云都存在少量离散点, 其中基于笼式光场相机重建的三维点云离散点比例较高, 这一结果与图 15(d) 中三维点云的分布特征一致。

为进一步分析笼式光场相机重建点云中离群点的形成原因, 首先确定了离群点的空间分布区域, 并分别统计了离群区域与正常区域的平均视差代价间隔和局部纹理梯度均值。其中, 视差代价间隔定义为次优匹配代价与最优匹配代价之差, 其数值越小, 说明最优视差与其他候选视差之间的区分度越低, 匹配结果越容易受到噪声和局部灰度变化的影响。纹理梯度用于表征局部灰度变化强度, 梯度较低时, 邻域像素外观相近, 不同

子孔径图像之间难以建立稳定且唯一的对应关系, 容易降低视差匹配的稳定性。

图 17 展示了笼式光场相机重建点云离群点的分布和特征分析结果。由图 17(a) 和 17(b) 可见, 区域 1、区域 2、区域 3 中的离群点共占全部离群点的 81.1%, 并形成三个明显的局部聚集区, 而其余离群点则呈零散分布, 说明离群点主要集中在少数局部区域, 并非均匀分布在目标表面。从图 17(c)、17(d) 中可进一步发现, 三个聚集离群点区域的平均视差代价间隔和纹理梯度均低于正常区域, 表明这些区域局部纹理信息较弱, 且最优视差与其他候选视差之间的区分度下降, 从而增加了视差误判的可能性。其中, 区域 1 位于花瓣交叠边界邻近位置, 局部空间结构较为复杂, 可能进一步增加不同子孔径图像之间建立稳定对应关系的难度。由此可见, 点云离群点主要与弱纹理、视差匹配不确定性及局部复杂结构有关。其余零散离群点的平均视差代价间隔和纹理梯度未呈现一致的变化规律, 但其在空间上未形成明

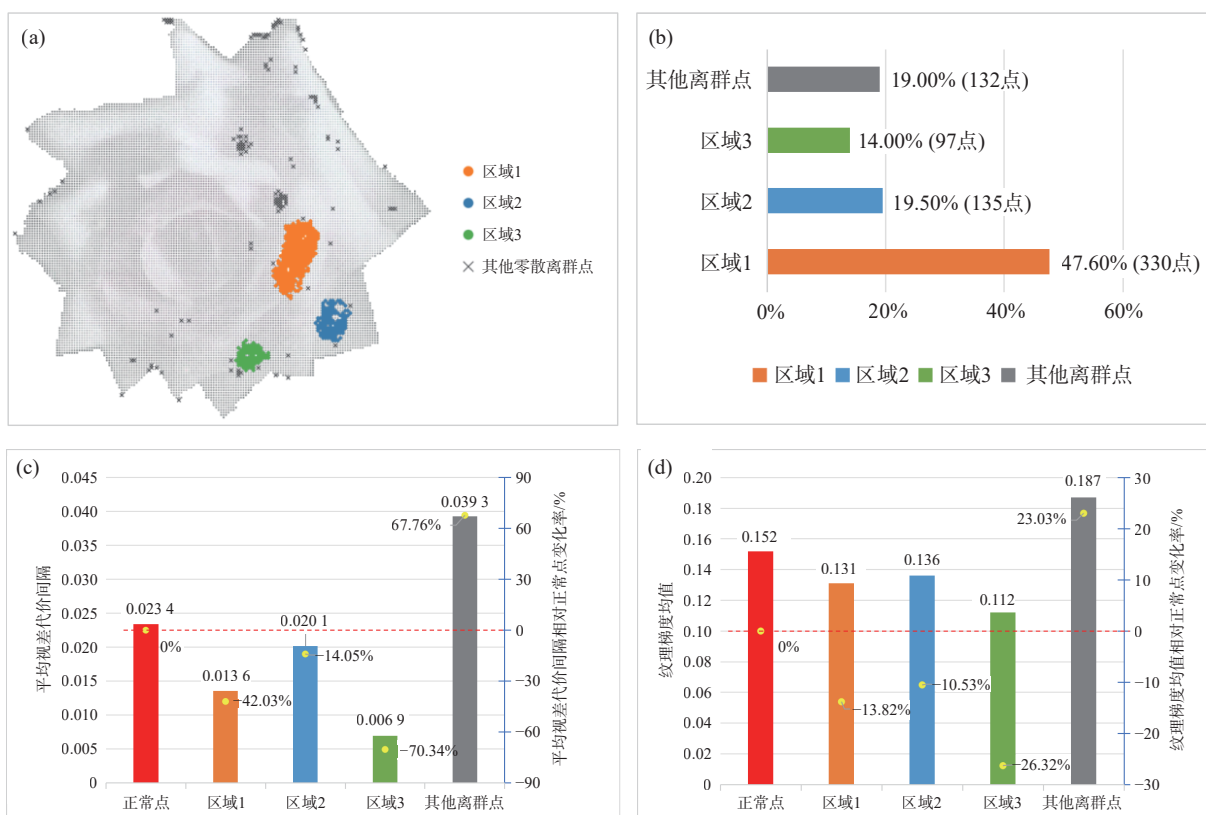


图 17 笼式光场相机重建点云离群点的分布及特征分析。(a) 离群点的空间分布区域; (b) 各离群点区域占全部离群点的比例; (c) 不同区域的平均视差代价间隔; (d) 不同区域的局部纹理梯度均值

Fig. 17 Reconstruction of point cloud outliers and analysis of their characteristics using a cage-type light field camera. (a) The spatial distribution of outliers. (b) Percentage of each outlier region relative to the total number of outliers. (c) Average parallax cost intervals for different regions. (d) Mean of local texture gradients in different regions

显聚集区域,且仅占全部点云总量的约 0.78%,对整体点云空间结构未产生明显影响,因此本文不再对其形成原因作进一步分析。后续可通过构建视差置信度、引入多视角一致性与边缘保持约束,并结合局部几何一致性进行自适应离群点抑制,以提高弱纹理和局部复杂区域的重建稳定性。

综合表 1 及图 17 的分析结果可知,笼式光场相机能够恢复连续的深度信息,并获得具有较好局部连续性和空间层次的三维点云。虽然其离群点比例为 4.12%,但这些离群点主要集中分布在局部复杂区域,并未对花朵主体轮廓和空间结构的重建结果产生明显影响。因此,以 Lytro 光场相机的重建结果作为参考,可以验证本文构建的笼式光场相机具备应用于静态三维重建的可行性,但其在弱纹理和局部复杂区域的重建稳定性仍有进一步提升空间。

6 结 论

本文提出了一种基于大通光孔径的笼式光场相机设计方案,并搭建了一套采用双镜头中继结构的笼式光场相机。通过分析不同中继镜参数下白图像的渐晕区域、子图像形状以及有效光场成像区域的尺寸,确定了系统的中继镜参数选型;在此基础上,利用这套系统完成了静态目标的深度图提取与三维点云重建,并选取 Lytro 商用光场相机的重建结果作为参照,验证了本文搭建的笼式光场相机针对静态目标具备三维重建能力。主

要结论如下:

(1)通过对比双镜头中继镜参数分别为 F1.8 50 mm 和 F1.4 85 mm 时笼式光场相机的成像结果可知:中继镜参数对系统白场图像的渐晕范围存在显著影响,当中继镜参数为 F1.4 85 mm 时,能够减轻边缘子图像的拉伸畸变,缩小渐晕区域尺寸,进而扩大有效光场成像区域的范围。因此,本文选用两枚规格为 F1.4 85 mm 的定焦镜头,以头对头的方式构成 1:1 对称中继结构,并搭建笼式光场相机,用于光场采集与三维重建实验。

(2)利用本文搭建的笼式光场相机系统,完成了静态目标场景的多视角图像提取、深度图恢复与三维点云重建。并以 Lytro 商用光场相机的重建结果作为参考,证明该系统能够获取完整有效的视差信息,较好地恢复目标的三维空间结构,验证了本文搭建的笼式光场相机应用于静态目标三维重建任务的可行性。

(3)本文搭建的笼式光场相机重建结果表明,当前系统在弱纹理区域和局部复杂区域仍存在视差匹配稳定性不足和少量离群点的问题,且目前仅采用简单静态目标完成了实验,尚未验证系统在复杂及动态场景下的成像与重建性能。后续将进一步开展多类型静态场景与动态场景的相关实验,同时结合系统标定、视差置信度、多视角一致性和边缘保持约束等方法,提升系统重建的稳定性和精度,进一步验证该系统在复杂场景下的适应性。

参考文献:

- [1] 殷永凯,于锴,于春展,等.几何光场三维成像综述[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1209001.
YIN Y K, YU K, YU CH ZH, *et al.*. 3D imaging using geometric light field: a review[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1209001. (in Chinese).
- [2] 张润南,周宁,周子豪,等.光场表征及其分辨率提升技术:文献综述及最新进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(9): 202403.
ZHANG R N, ZHOU N, ZHOU Z H, *et al.*. Light field representation and its resolution improvement techniques: an overview (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(9): 202403. (in Chinese).
- [3] 李明翰,魏凯,封晓华.压缩光场成像:原理、方法及应用[J]. *上海理工大学学报*, 2025, 47(6): 622-639.
LI M H, WEI K, FENG X H. Compressive light field imaging: principles, methods, and applications[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2025, 47(6): 622-639. (in Chinese).
- [4] ZHOU L L, WU G X, ZUO Y B, *et al.*. A comprehensive review of vision-based 3D reconstruction methods[J]. *Sensors*, 2024, 24(7): 2314.
- [5] GAO Y X, ZHANG H W, CHEN ZH H, *et al.*. Enhanced light field depth estimation through occlusion refinement and feature fusion[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 184: 108655.

- [6] GERSHUN A. The light field[J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1939, 18(1-4): 51-151.
- [7] LIPPMANN G. Reversible prints integral photographs[J]. *Academy of Sciences*, 1908, 3(7): 821-825. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认).
- [8] COFFEY D. Apparatus for making a composite stereograph: US, 2063985A[P]. 1936-12-15.
- [9] ADELSON E H, WANG J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 99-106.
- [10] 田杏, 曹丽霞. 基于前向光线追迹技术的单光场相机空间分辨率研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2026, 19(1): 69-84.
TIAN X, CAO L X. Research on spatial resolution of a single light field camera based on forward ray tracing technique[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 69-84. (in Chinese).
- [11] NG R. *Digital Light Field Photography*[D]. Stanford: Stanford University, 2006.
- [12] GEORGIEV T G, LUMSDAINE A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(2): 021106.
- [13] HU X M, LI ZH T, MIAO L, *et al.*. Measurement technologies of light field camera: an overview[J]. *Sensors*, 2023, 23(15): 6812.
- [14] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M M, *et al.*. High-resolution three-dimensional flow measurement through dual-frame light field particle tracking velocimetry[J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(2): 023617.
- [15] TAN Z P, THUROW B S. Perspective on the development and application of light-field cameras in flow diagnostics[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(10): 101001.
- [16] ZHAO ZH, DING J F, SHI SH X, *et al.*. Volumetric flow characterisation of a rectangular orifice impinging synthetic jet with single-camera light-field PIV[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 123: 110327.
- [17] QI Q, HOSSAIN M M, LEI G, *et al.*. Optimum angular arrangement of a multi-light field imaging technique for flame temperature reconstruction[J]. *Measurement*, 2022, 204: 112110.
- [18] LIU Y D, ZHU M J, WANG T X, *et al.*. Spatial resolution of light field sectioning pyrometry for flame temperature measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140: 106545.
- [19] ZHAO R X, HUA X W, BAEK W, *et al.*. A review of light-field imaging in biomedical sciences[J]. *Med-X*, 2025, 3(1): 25.
- [20] LIU F, HOU G Q. Depth estimation from a hierarchical baseline stereo with a developed light field camera[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(2): 550.
- [21] 朱效宇. 单相机光场成像三维流场测量方法与系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
ZHU X Y. *Study of three-dimensional flow field measurement with a single light field camera*[D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese).
- [22] BROXTON M, GROSENICK L, YANG S, *et al.*. Wave optics theory and 3-D deconvolution for the light field microscope[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 25418-25439.
- [23] SONG X L, GU M T, CAO L X, *et al.*. A microparticle image velocimetry based on light field imaging[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(21): 9806-9817.
- [24] LIU Y D, HOSSAIN M M, SUN J, *et al.*. Design a cage-typed light field camera system for flame measurement[C]. *2017 IEEE Sensors Conference*, IEEE, 2017: 1-4.
- [25] TAN Z P, JOHNSON K, CLIFFORD C, *et al.*. Development of a modular, high-speed plenoptic-camera for 3D flow-measurement[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13400-13415.

作者简介:



田杏, 女, 硕士研究生, 主要从事光场成像系统优化和应用方面的研究。
1933270289@qq.com



曹丽霞(1989—), 女, 浙江磐安人, 博士, 讲师, 研究生导师, 2022 年于东南大学获得博士学位。现为中国计量大学计量测试与仪器学院讲师。主要从事光场成像、层析成像和流体可视化方面的研究。E-mail: caolx2019@gmail.com