

基于前向光线追迹技术的单光场相机空间分辨率研究

田杏 曹丽霞

Research on spatial resolution of a single light field camera based on forward ray tracing technique

TIAN Xing, CAO Li-xia

引用本文:

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*, 2026, 19(1): 69–84. doi: 10.37188/CO.2025–0119

TIAN Xing, CAO Li-xia. Research on spatial resolution of a single light field camera based on forward ray tracing technique[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 69–84. doi: 10.37188/CO.2025–0119

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0119>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分辨率、超分辨率与空间带宽积拓展—从计算光学成像角度的一些思考

Resolution, super-resolution and spatial bandwidth product expansion——some thoughts from the perspective of computational optical imaging

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1105 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0105>

基于残差网络的结肠内窥镜图像超分辨率重建方法

Super-resolution reconstruction for colorectal endoscopic images based on a residual network

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1022 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0247>

多尺度注意力融合的图像超分辨率重建

Image super-resolution reconstruction with multi-scale attention fusion

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1034 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0020>

太赫兹超分辨率成像研究进展

Research progress of terahertz super-resolution imaging

中国光学 (中英文). 2022, 15(3): 405 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0198>

奇偶探测超分辨率折射率测量的理论研究

Theoretical investigation on super-resolution refractive index measurement with parity detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 434 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0119>

超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计

Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1029 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0125>

文章编号 2097-1842(2026)01-0069-16

基于前向光线追迹技术的单光场相机 空间分辨率研究

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: 在三维场景重建过程中, 光场相机的空间分辨率会影响可恢复的空间细节和深度分辨率, 从而影响三维重建的准确性。因此, 对光场相机的空间分辨率进行计算与分析, 对于高分辨率和低分辨率区域的识别十分重要。本文利用前向光线追迹技术的高精度优点, 研究了一种基于前向光线追迹技术的光场相机空间分辨率计算方法。对不同微透镜阵列排列方式下的光场相机 1.0 和 2.0 的空间分辨率进行了定量计算和比较。进一步研究了不同的主镜头逆放大率(M_l)对光场相机深度分辨率的影响。结果表明, 光场相机在物平面与光轴交点附近以外的区域具有较高的深度分辨率。光场相机 2.0 在 (0,0,0) 附近区域的深度分辨率优于光场相机 1.0。对于正方形排列的微透镜阵列, 光场相机 2.0 的横向分辨率较光场相机 1.0 略有提升。光场相机 1.0 的深度分辨率随着 M_l 的增大而逐渐降低。

关键词: 光场相机; 空间分辨率; 重建; 光线追迹; 深度分辨率

中图分类号: O438.1 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0119 CSTR: 32171.14.CO.2025-0119

Research on spatial resolution of a single light field camera based on forward ray tracing technique

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: In the process of 3D scene reconstruction, the spatial resolution of the light field camera (LFC) affects the recoverable spatial details as well as the depth resolution, thereby influencing the accuracy of the 3D reconstruction. Therefore, calculating and analyzing the spatial resolution of the LFC is crucial for identifying the high and low resolution regions. In this paper, a calculation method for the spatial resolution of an LFC is explored based on the forward ray-tracing technique, which has the advantage of high accuracy. The spatial resolutions of LFC 1.0 and LFC 2.0 under different microlens array configurations are quantitatively calculated and compared. In addition, the effects of the inverse magnification (M_l) of the main lens on the depth resolution of the LFC are investigated. The results show that the LFC exhibits higher depth resolution in regions away from the intersection of the object plane and the optical axis. The depth resolution of LFC 2.0 near the region of (0,0,0) is better than that of LFC 1.0. For a microlens array arranged in a square pat-

收稿日期: 2025-09-17; 修订日期: 2025-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(No. 12302370)

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

tern, the lateral resolution of LFC 2.0 shows a slight improvement over that of LFC 1.0. The depth resolution of the LFC 1.0 gradually decreases as M_f increases.

Key words: light field camera; spatial resolution; reconstruction; ray tracing; depth resolution

1 引言

单光场层析粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 对于空间受限的非定常流动的三维速度场测量具有重要的应用价值^[1]。这项技术最早由 Lynch K 等在 2012 年提出。他们的研究基于数值模拟, 主要介绍了单光场相机权重矩阵的数值计算方法, 然后利用乘法代数重建技术 (Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, MART) 重构了奥辛涡环 (Oseen vortex) 的体积场, 最后通过三维互相关算法计算了奥辛涡环的三维三分量 (Three-dimensional three-component, 3D-3C) 的速度场^[2]。2015 年, Fahringer T W 等在实验中利用单光场相机代替多相机系统, 实现了三维粒子场的重建与流场速度场的测量^[3]。在过去十年中, 基于单光场相机的层析 PIV^[4-9] 取得了多方面的研究进展, 包括光场相机标定技术的研究^[4]、基于密集光线追踪的层析重建方法的研究^[5-6] 以及影响三维粒子场重建和三维速度场测量精度的因素分析^[7-9]。近年来, 基于单光场相机的层析 PIV 取得了显著进展^[10-14]。相关研究主要集中在权重矩阵的计算与优化^[10]、光场相机的光学参数对粒子场重建精度的影响^[11-12]、层析重建方法的改进^[13] 以及单光场层析 PIV 中三维互相关算法的研究^[14]。基于单光场相机的层析 PIV 已被应用于合成射流冲击和湍流边界层的测量, 验证了其实际应用价值^[15]。

尽管光场层析 PIV 已得到应用, 但重建所得的三维粒子场中, 每个粒子在 Z 轴 (深度方向) 上仍存在拉伸现象^[4, 16-17]。在基于传统多相机的层析 PIV 技术中, 三维粒子场的拉伸问题与多相机的像素视线分布所包围的最大角度 β 紧密相关^[18]。角度 β 由多相机的布局及其光学参数决定。研究表明, 当 β 较小时, 重建粒子在深度方向上容易出现拉长现象。在基于单台光场相机的层析 PIV 中, 重建的三维粒子场在深度方向上的拉伸程度与光场相机的像素视线所包围的角度 β 有关。研

究发现, 光场相机中的 β 通常小于 20° , 且其大小由光场相机的光学参数决定^[11]。无论如何优化光场成像系统的参数, 单台光场相机的 β 仍然很小。本质上, 单光场相机重建所得的三维粒子场出现拉伸现象, 主要是由于其深度分辨率较低, 且低于横向分辨率^[12]。从而导致在一定深度范围内, 粒子的光场图像几乎相同, 从而使重建算法难以准确区分该深度范围内粒子的三维位置。光场相机的空间分辨率包括深度分辨率和横向分辨率。研究光场相机的分辨率对于提升其深度分辨率具有重要意义。研究表明, 光场相机的空间分辨率表现出三维性、复杂性以及显著的非均匀特性^[19]。这表明, 光场相机的深度分辨率和横向分辨率会随 X、Y、Z 位置的不同而变化, 研究空间分辨率沿各坐标轴的变化规律具有重要意义。Deem E A 计算了全光光场相机 (光场相机 1.0) 在与光轴 OZ 相交的平面 YOZ 上的深度分辨率^[20]。朱效宇计算了单个光场相机 1.0 的分辨率^[12]。赵周计算了单个光场相机、双光场相机以及 Scheimpflug 光场相机的分辨率^[19]。目前, 光场相机的分辨率计算方法主要基于逆向光线追踪技术, 即追踪光线从每个微透镜的上下边缘经过主镜头及物平面, 最后到达物空间的任意深度位置。目前的研究仅针对光场相机 1.0 进行计算, 且仅考虑了微透镜中心所连的直线与光轴相交共面的情况。这存在两大局限性: 第一, 难以计算与光轴异面的空间分辨率; 第二, 微透镜阵列呈蜂窝型的光场相机以及聚焦型光场相机 (光场相机 2.0) 的空间分辨率尚未得到研究和分析。

本文提出了基于前向光场追迹技术的光场相机空间分辨率的计算方法。为了便于观察任意位置的空间分辨率, 本文采用光场相机的一维深度分辨率和横向分辨率对其空间分辨率进行表征和可视化呈现。采用前向光线追迹技术计算单个光场相机 1.0 和 2.0 的空间分辨率。此外, 研究并分析了微透镜阵列的正方形和蜂窝型排列方式以及主镜头的逆放大率对光场相机空间分辨率的影响。

2 基于前向光线追迹技术的空间分辨率计算原理

图 1(彩图见期刊电子版)展示了光场相机 1.0 和光场相机 2.0 的结构示意图。如图 1 所示, 相比于传统相机, 光场相机在 CCD 传感器前紧密安装了一组微透镜阵列, 微透镜阵列由一系列微小透镜组成^[21-22]。其中, 每个微小透镜的尺寸为(1~1000) μm , 焦距为(10~5000) μm 。光场相机的主镜头将光线汇聚到微透镜阵列前, 微透镜阵列进一步细分穿过主镜头的光线, 使其投射到 CCD 传感器的不同像素上^[23]。在相同曝光时间下, 光场相机能够同时采集光场的位置信息、方向信息和强度信息^[24]。基于光线从左至右的传播顺序, 前向光线追迹技术的空间分辨率的计算过程为: 追迹物空间中点光源发出的光线, 依次穿过点光源与主镜头之间的自由空间、主镜头、主镜头与微透镜阵列之间的自由空间、微透镜阵列以及微透镜阵列与 CCD 传感器之间的自由空间, 最后投射

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ \tan\theta'_1 \\ \tan\varphi'_1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_1 \\ 0 & 1 & d_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/f_i & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f_i & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_m \\ 0 & 1 & l_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1/f & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/f & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \tan\theta_1 \\ \tan\varphi_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_x/f_i \\ s_y/f_i \end{bmatrix} \right\}. \quad (1) \end{aligned}$$

式中, (x_1, y_1) 为物空间中光线的起点位置坐标, (θ_1, φ_1) 为光线起点位置沿着 X 轴和 Y 轴的方向坐标, f 为主镜头的焦距, f_i 为微透镜阵列的焦距, l_1 为物空间中点光源与主镜头之间的距离, l_m 为主镜头与微透镜阵列之间的距离, d_1 为微透镜阵列与 CCD 传感器之间的距离, (s_x, s_y) 为微透镜阵列中每个微透镜单元的中心相对于 Z 轴的偏移量, (x'_1, y'_1) 为光线到达 CCD 传感器的位置坐标, (θ'_1, φ'_1) 为光线终点位置沿着 X 轴和 Y 轴的方向坐标。

主镜头的逆放大率 M_l 定义为:

$$\begin{cases} M_l = \frac{l_1}{l_m} (\text{光场相机 1.0}) \\ M_l = \frac{l_1}{l_2} (\text{光场相机 2.0}) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, l_2 为主镜头与虚拟像面之间的距离。

到 CCD 传感器的不同像素上。

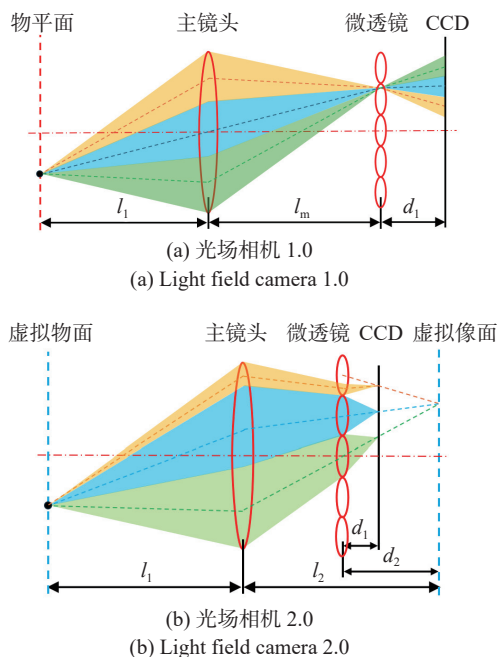
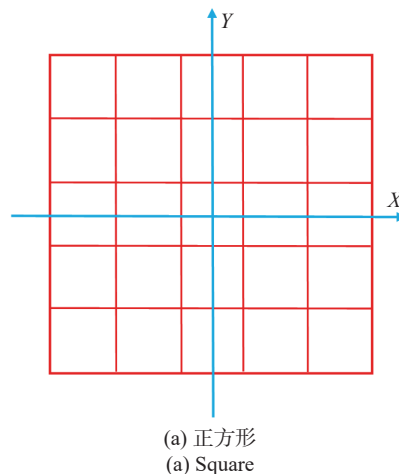


图 1 光场相机的成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the imaging principle of the light field camera

对应的前向光线追迹模型为:

图 2 是两种微透镜阵列排列方式的示意图。光场相机中微透镜阵列的常用排列方式包括正方形排列和蜂窝型排列。相比正方形的排列方式, 蜂窝型排列的微透镜阵列之间存在空隙。



(a) 正方形
(a) Square

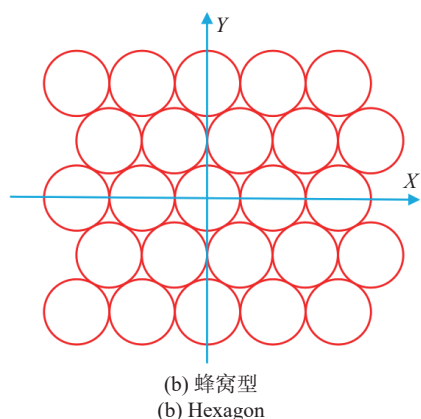


图 2 微透镜阵列排列方式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the arrangement of the MLA

图 3(彩图见期刊电子版)为点光源的位置示意图,其中 dz 是相邻两个点光源之间的距离。对于深度分辨率的计算,将点光源放置在 $(0,-3,Z)$, $(0,3,Z)$, $(-3,0,Z)$, $(3,0,Z)$, $(0,0,Z)$, $(-3,-5,Z)$, $(-3,5,Z)$, $(3,-5,Z)$, $(3,5,Z)$, 其中 $Z \in [-7.5, 7.5]$; 对于横向

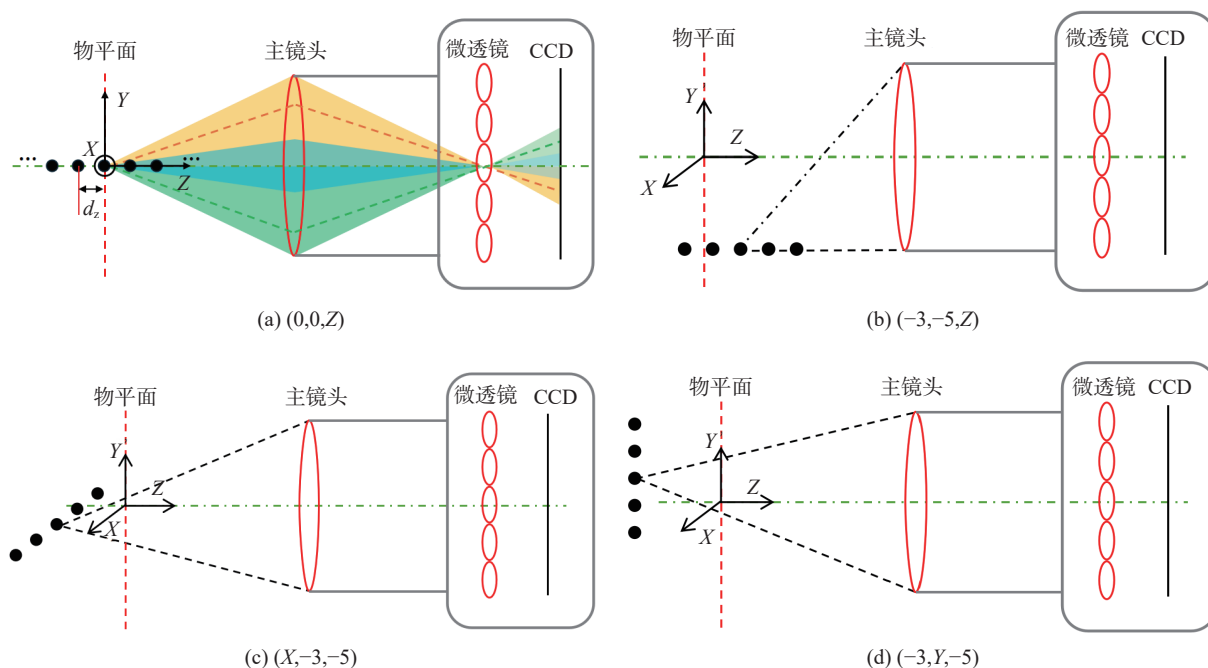


图 3 点光源的位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the position of the point light source

3 光场相机空间分辨率计算结果

3.1 正方形微透镜阵列的光场相机 1.0 的空间分辨率计算结果

光场相机 1.0 的原理示意图如图 1(a) 所示,其对应的光学参数列于表 1,微透镜阵列采用正

分辨率的计算,将点光源放置在 $(X,0,-3)$, $(X,0,3)$, $(X,-3,0)$, $(X,3,0)$, $(X,0,0)$, $(X,-3,-5)$, $(X,-3,5)$, $(X,3,-5)$, $(X,3,5)$ 和 $(0,Y,-3)$, $(0,Y,3)$, $(-3,Y,0)$, $(3,Y,0)$, $(0,Y,0)$, $(-3,Y,-5)$, $(-3,Y,5)$, $(3,Y,-5)$, $(3,Y,5)$, 其中 $X, Y \in [-7.5, 7.5]$ 。相邻两个点光源之间的距离 dz 为 10^{-4} mm。利用前向光线追迹技术(公式 1),计算了位于 $[-7.5, 7.5]$ 区间内的点光源的光场图像。然后统计相同光场图像的数量 N_{LF} ,光场相机的分辨率 (R_{re}) 由式 (3) 计算获得:

$$R_{re} = N_{LF} \cdot dz \quad (3)$$

当点光源位于 R_{re} 的范围内时,其对应的光场图像的模式是相同的。当点光源位于 R_{re} 范围之外时,其对应的光场图像的模式各不相同。用于计算光场图像的服务器配置为: 40 核 Intel (R) Xeon(R) CPU Gold 6133 V4, 主频 2.5 GHz, 并配备 128 GB 内存。

方形排列。

表 1 光场相机 1.0 的光学参数

Tab. 1 Parameters of the light field camera 1.0

d_1 (mm)	d_2 (mm)	f_m (mm)	f (mm)	l_1 (mm)	l_m (mm)	P_m (mm)	P_x (μm)
0.6	-	0.6	100	200	200	0.1045	5.5

3.1.1 深度分辨率

图 4(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Z 轴上及 Z 轴外的深度分辨率。图 4(e) 展示了点光源在 $(0,0,Z)$, 即 Z 轴上的深度分辨率。可以看出, R_{re} 在 $Z=0$ mm 附近达到最大值, 约为 1.2 mm。在这 1.2 mm 内的点光源的光场图像模式是一致的, 因此难以分辨该区域内物体的深度信息。其余区域的 R_{re} 均小于 0.4 mm, 可见光场相机在靠近中心位置 $(0,0,0)$ 处的深度分辨率最差。图 4(a)、4(b)、4(c)、4(d)、4(f)、4(g)、4(h) 和 4(i) 为点光源

在 Z 轴外的深度分辨率。从图 4(a)、4(b)、4(c)、4(d) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 中心附近, R_{re} 约为 0.5 mm, 而在其余位置基本小于 0.2 mm。从图 4(f)、4(g)、4(h)、4(i) 中可以看出, 除 $Z=0$ mm 中心附近外, R_{re} 约为 0.5 mm, 其余位置的 R_{re} 基本在 0.15 mm 以内。由于正方形微透镜阵列在 X 轴和 Y 轴方向上均具有对称性, 图 4(a) 与 4(b)、4(c) 与 4(d)、4(f) 与 4(g)、4(h) 与 4(i) 展示出相同的深度分辨率分布特性。

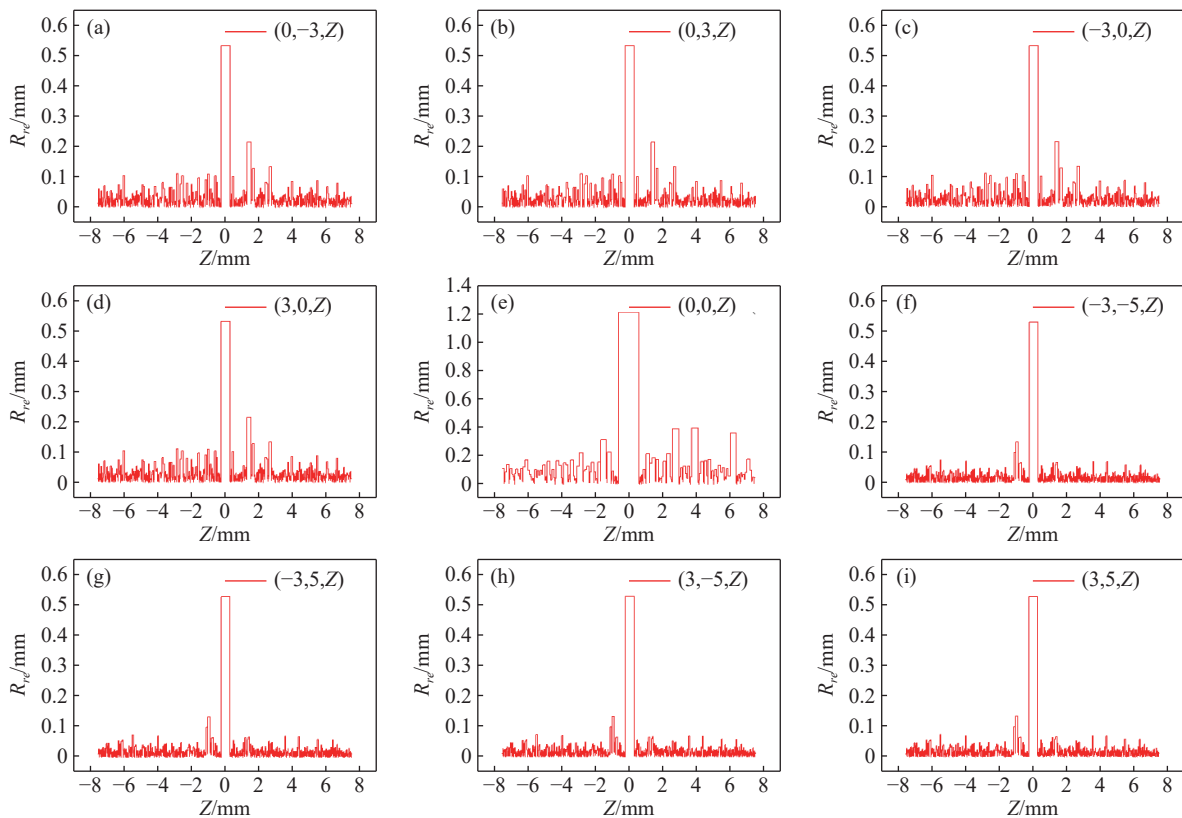


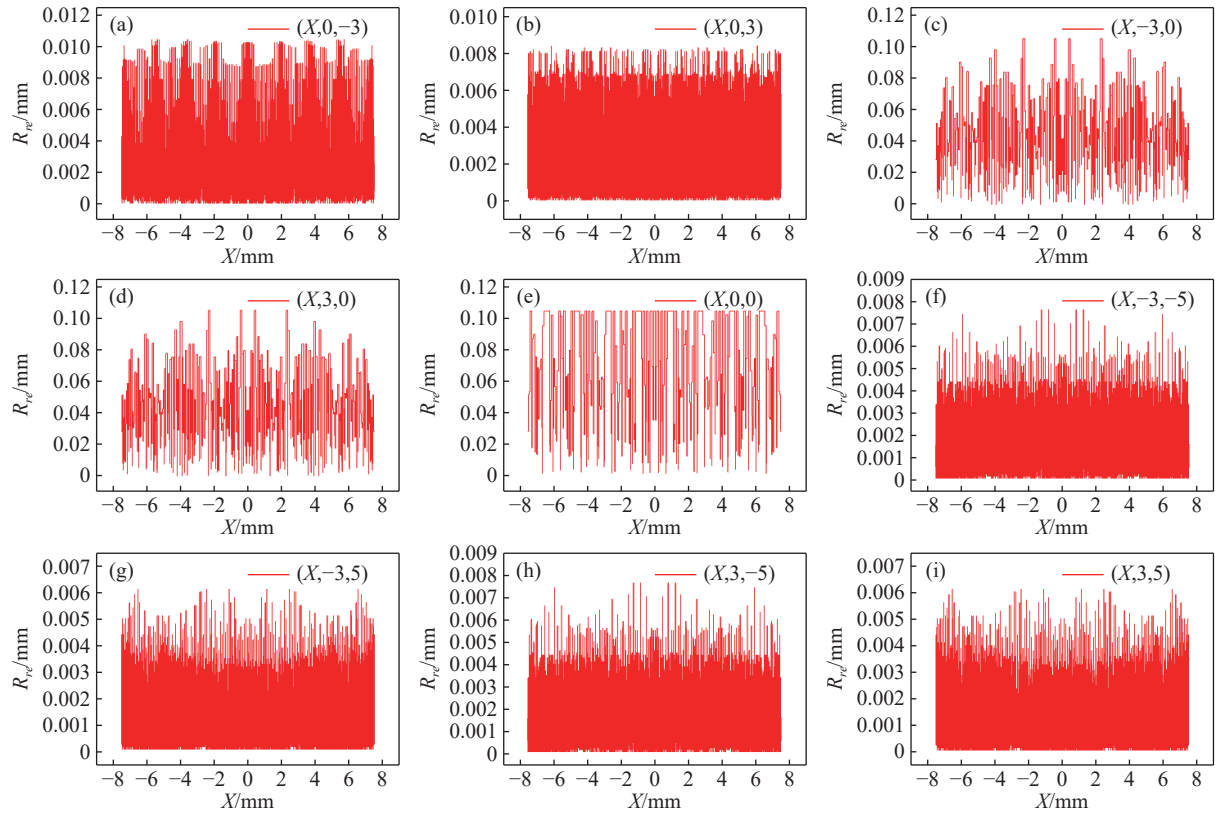
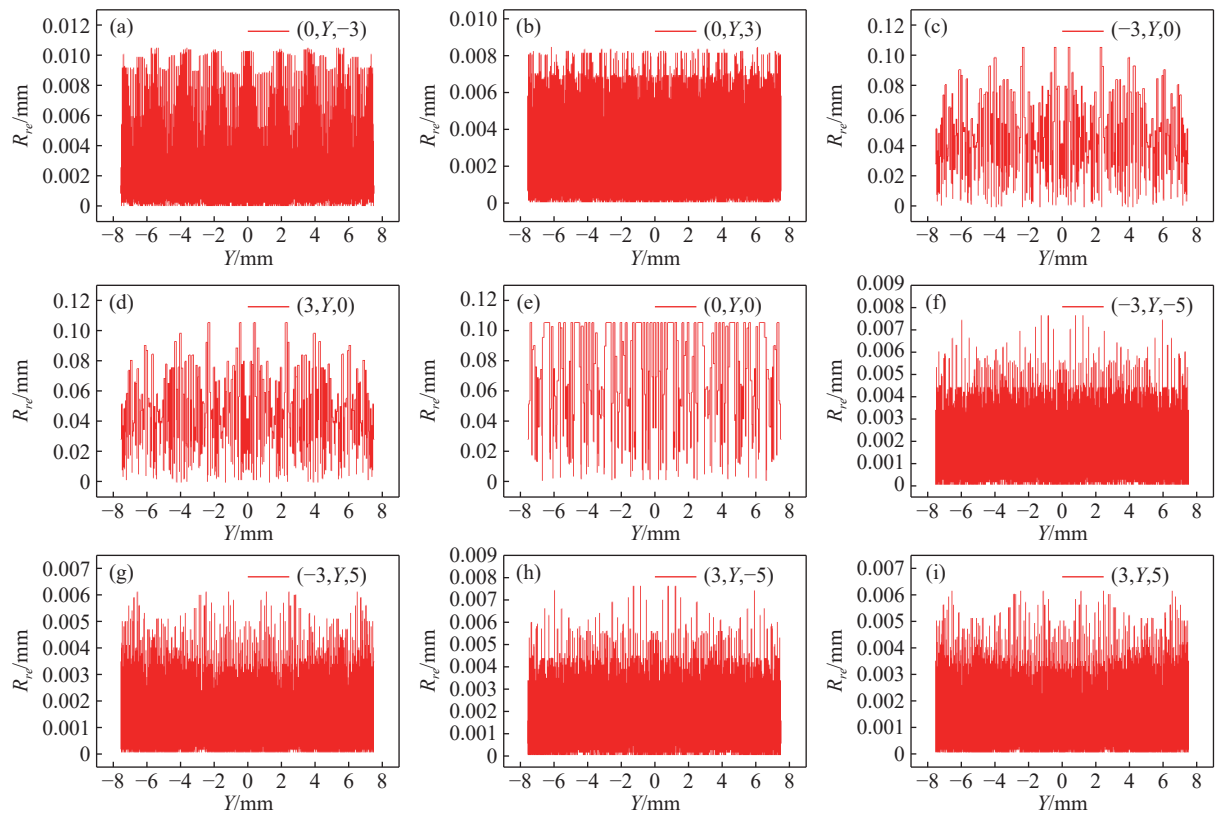
图 4 正方形微透镜阵列光场相机 1.0 沿 Z 轴的深度分辨率

Fig. 4 Depth resolution along Z axis of light field camera 1.0 with square microlens array

3.1.2 横向分辨率

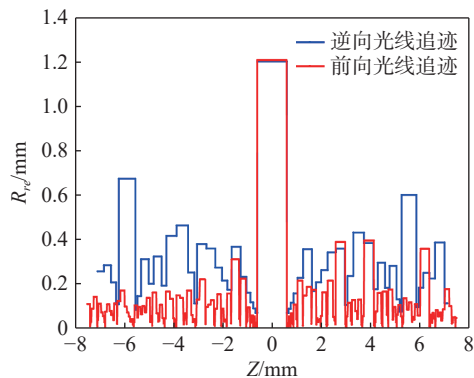
图 5(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 X 轴上及 X 轴外的横向分辨率, 图 6(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Y 轴上及 Y 轴外的横向分辨率。图 5(e) 展示了点光源在 X 轴上的横向分辨率, 可以看出, R_{re} 在 $(0\sim 0.1)$ mm 范围之内变化, 在 $(0,0,0)$ 附近并没有出现分辨率 R_{re} 特别差的区域。图 5(a)、5(b)、5(c)、5(d)、5(f)、5(g)、5(h) 和

5(i) 为点光源在 X 轴外的横向分辨率。从图 5(a)、5(b)、5(f)、5(g)、5(h)、5(i) 可以看出, R_{re} 基本在 $(0\sim 0.01)$ mm 之间变化。从图 5(c)、5(d) 可以看出 R_{re} 基本在 $(0\sim 0.1)$ mm 之间变化。由于正方形微透镜阵列在 X 轴和 Y 轴方向上均具有对称性, 图 5(c) 与 5(d)、5(f) 与 5(h)、5(g) 与 5(i) 具有相同的横向分辨率。图 6 所示的横向分辨率变化模式与图 5 类似。

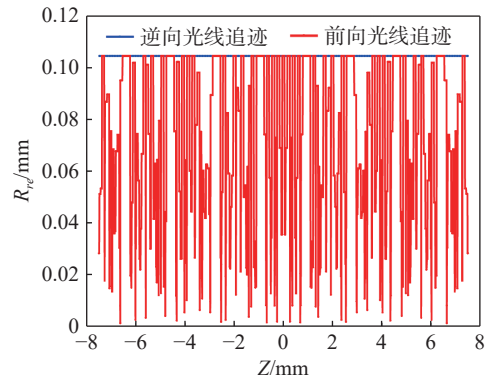
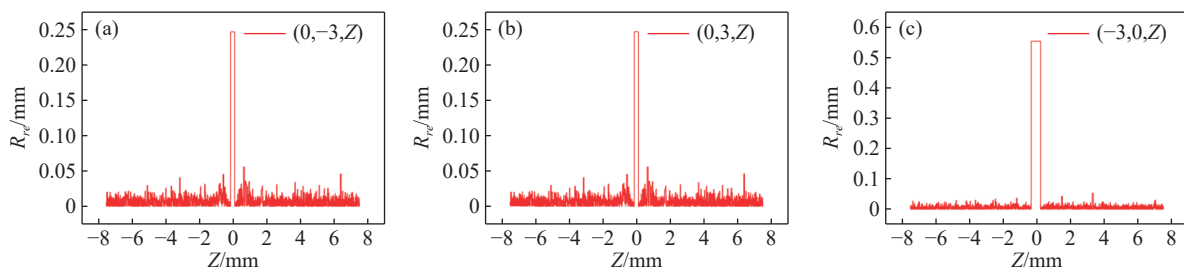
图 5 正方形微透镜阵列光场相机 1.0 沿 X 轴的横向分辨率Fig. 5 Lateral resolution along X axis of light field camera 1.0 with square microlens array图 6 正方形微透镜阵列光场相机 1.0 沿 Y 轴的横向分辨率Fig. 6 Lateral resolution along Y axis of light field camera 1.0 with square microlens array

3.1.3 前向光线追迹和逆向光线追迹的空间分辨率计算结果对比

图 7(彩图见期刊电子版)为基于前向光线追迹和逆向光线追迹技术的空间分辨率计算结果。微透镜阵列采用正方形排列, 光场相机类型为 1.0。从图 7(a) 中可以看出, 基于前向光线追迹技术计算所得的深度分辨率总体上要高于基于逆向光线追迹技术的计算结果。从图 7(b) 中可以看出, 最大的横向分辨率 R_{re} 为 0.1045 mm, 基于前向光线追迹技术所得的横向分辨率总体上要高于逆向光线追迹技术计算所得的横向分辨率。这是因为在使用逆向光线追迹技术追踪光线时会丢失大量信息, 从而导致分辨率降低。而前向光线追迹技术则追踪物空间中某一点光源发出的密集光线至 CCD 传感器, 追踪的光线数量明显多于逆向光线追迹技术, 从而提高了空间分辨率计算的准确性。由于逆向光线追迹技术无法计算微透镜阵列为蜂窝型的空间分辨率, 以及位于与光轴 OZ 相交的平面 YOZ 之外的空间分辨率, 因此这里只对比了 $(0,0,Z)$ 、 $(X,0,0)$ 、 $(0,Y,0)$ 处的分辨率。



(a) 沿 Z 轴的深度分辨率
(a) Depth resolution along Z axis



(b) 沿 X 轴、 Y 轴的横向分辨率
(b) Lateral resolution along X 、 Y axis

图 7 前向光线追迹和逆向光线追迹技术的空间分辨率结果对比

Fig. 7 Comparison of spatial resolution calculation results between forward ray tracing and backward ray tracing techniques

3.2 蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0 的空间分辨率的计算结果

3.2.1 深度分辨率

对于蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0, 其光学参数与表 1 相同。图 8(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Z 轴上和 Z 轴外的深度分辨率。从图 8(e) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 附近, R_{re} 约为 1.2 mm, 其余位置的 R_{re} 基本在 0.05 mm 以内。从图 8(a)、8(b) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 附近, R_{re} 约为 0.25 mm, 其余位置基本小于 0.05 mm。从图 8(c)、8(d) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 附近, R_{re} 约为 0.55 mm, 其余位置基本小于 0.05 mm。从图 8(f)、8(g)、8(h)、8(i) 中可以看出, 除 $Z=0$ mm 附近 R_{re} 约为 0.4 mm 外, 其余位置基本在 0.025 mm 以内。对比图 4 可知, 除 $Z=0$ mm 中心附近外, 采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0 的深度分辨率高于采用正方形微透镜阵列的光场相机 1.0。

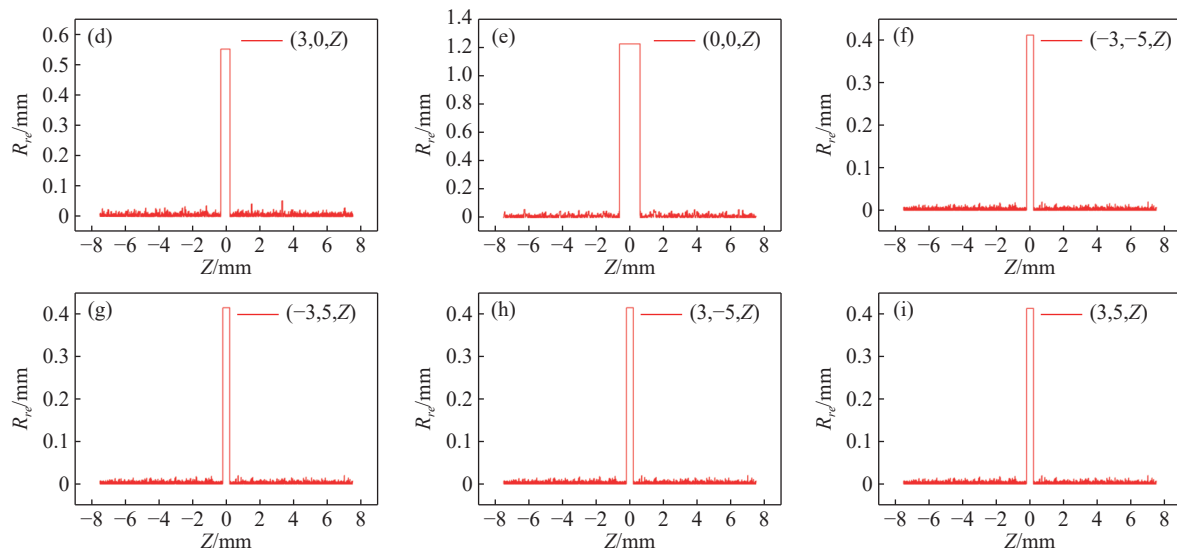


图 8 蜂窝型微透镜阵列光场相机 1.0 沿 Z 轴的深度分辨率

Fig. 8 Depth resolution along the Z axis of light field camera 1.0 with honeycomb microlens array

3.2.2 横向分辨率

图 9(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 X 轴上和 X 轴外的横向分辨率。从图 9(e) 可以看出, R_{re} 在 (0~0.15) mm 之间变化。从图 9(a) 中可

以看出, R_{re} 基本在 (0~0.003) mm 之间变化。从图 9(b)、9(f)、9(g)、9(h)、9(i) 中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.0018) mm 之间变化。从图 9(c)、9(d) 中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.09) mm 之间变化。

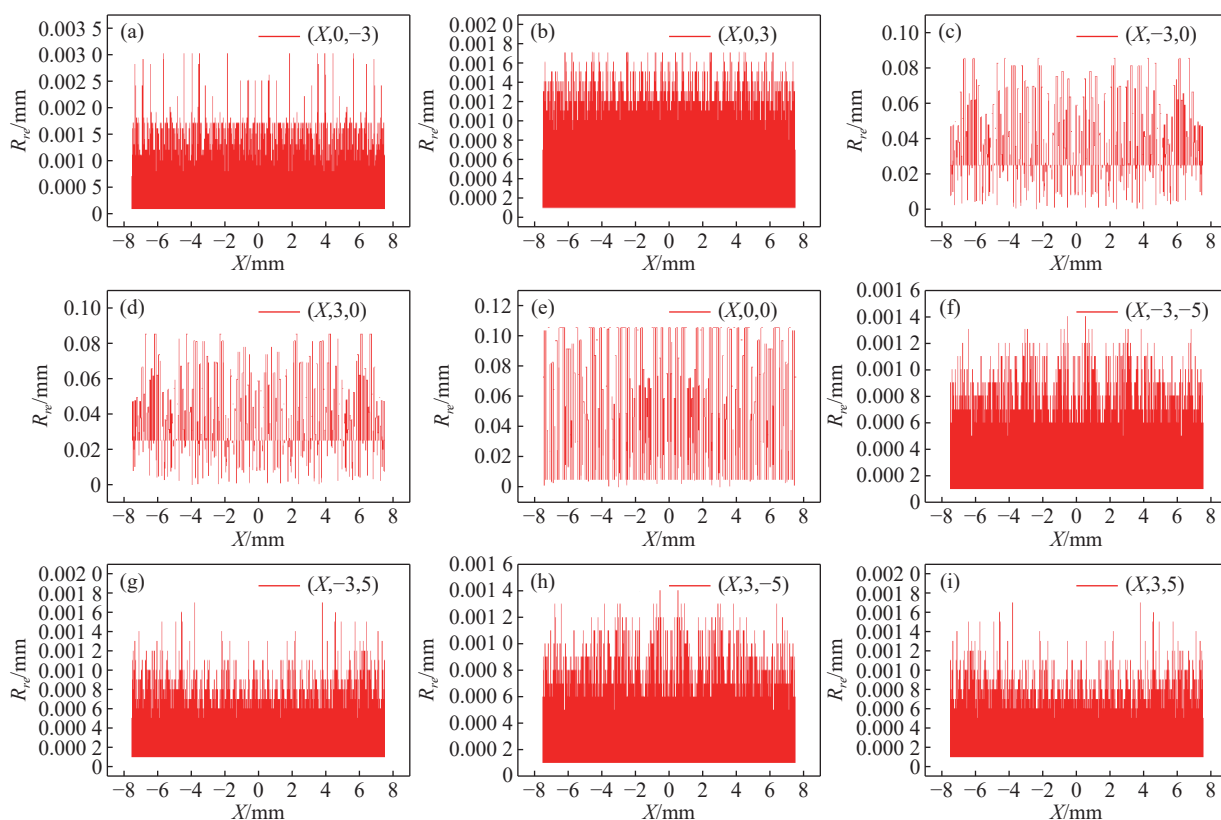


图 9 蜂窝型微透镜阵列光场相机 1.0 沿 X 轴的横向分辨率

Fig. 9 Lateral resolution along the X axis of light field camera 1.0 with honeycomb microlens array

图 10(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Y 轴上和 Y 轴外的横向分辨率。从图 10(e) 可以看出, R_{re} 在 (0~0.15) mm 之间变化。从图 10(a) 可以看出, R_{re} 基本上都在 (0~0.005) mm 之间变化。从图 10(b)、10(f)、10(g)、10(h)、10(i) 可以看出,

R_{re} 基本在 (0~0.0018) mm 之间变化。从图 10(c)、10(d) 可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.09) mm 之间变化。由此可见, 沿 X 轴方向和沿 Y 轴方向上的横向分辨率存在差异。

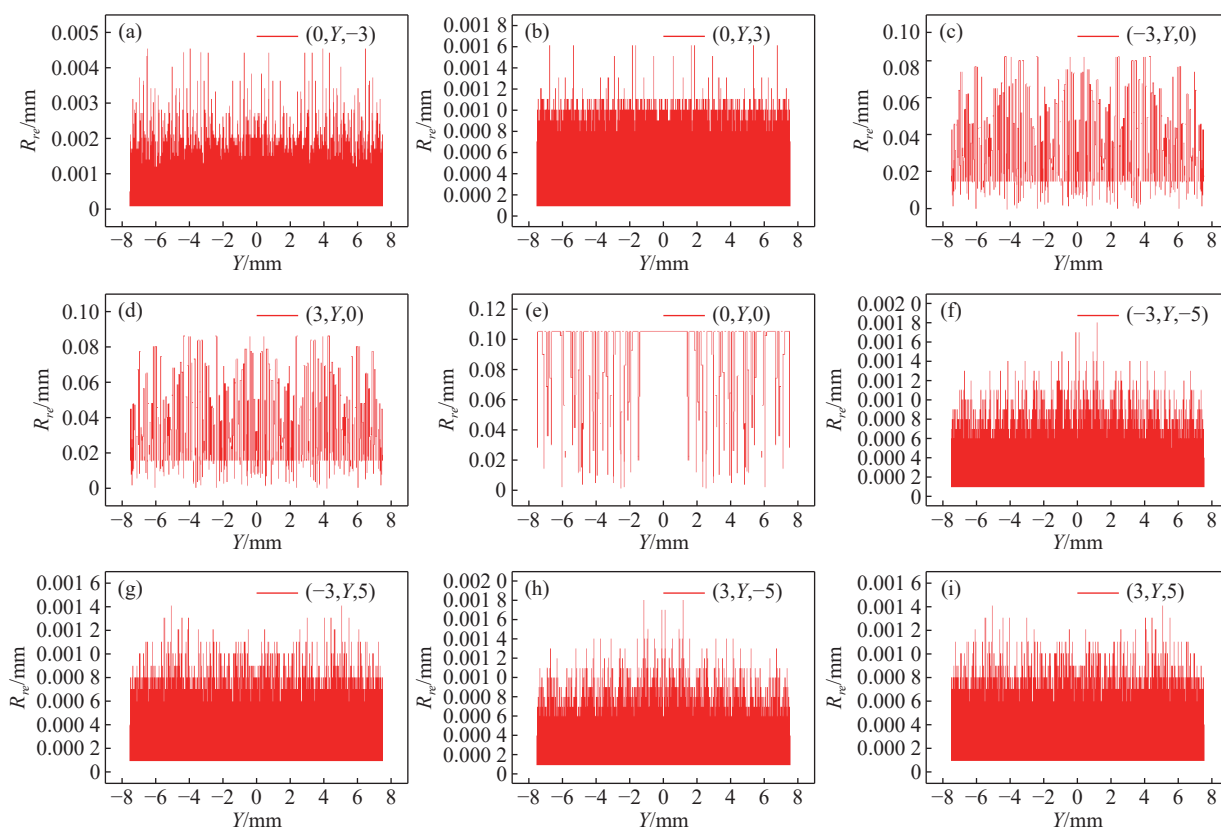


图 10 蜂窝型微透镜阵列光场相机 1.0 沿 Y 轴的横向分辨率

Fig. 10 Lateral resolution along the Y axis of light field camera 1.0 with honeycomb microlens array

3.3 正方形微透镜阵列光场相机 2.0 的空间分辨率计算结果

光场相机 2.0 的原理示意图如图 1(b) 所示, 其对应的光学参数列于表 2, 微透镜阵列采用正方形排列。

表 2 光场相机 2.0 的光学参数

Tab. 2 Parameters of the light field camera 2.0

d_1 (mm)	d_2 (mm)	f_m (mm)	f (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	P_m (mm)	P_x (μm)
0.54	5.4	0.6	100	200	200	0.1045	5.5

3.3.1 深度分辨率

图 11(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Z 轴上及 Z 轴外的深度分辨率。从图 11(e) 中可

以看出, R_{re} 在 $Z=0$ mm 附近达到最大值, 约为 0.55 mm, 而其余区域的 R_{re} 均在 0.3 mm 以内。与图 4 所示的光场相机 1.0 的深度分辨率相比, 光场相机 2.0 在中心区域 (0,0,0) 并不存在像光场相机 1.0 那样较长的难以分辨的区域。从图 11(a)、11(b)、11(c)、11(d) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 附近, R_{re} 约为 0.3 mm, 其余位置基本在 0.1 mm 以内。从图 11(f)、11(g)、11(h)、11(i) 中可以看出, 除 $Z=0$ mm 附近 R_{re} 约为 0.11 mm 外, 其余位置基本在 0.07 mm 以内。由于正方形微透镜阵列在 X 轴和 Y 轴方向上具有对称性, 图 11(a) 与 11(b)、11(c) 与 11(d)、11(f) 与 11(g)、11(h) 与 11(i) 展示出相同的深度分辨率分布。

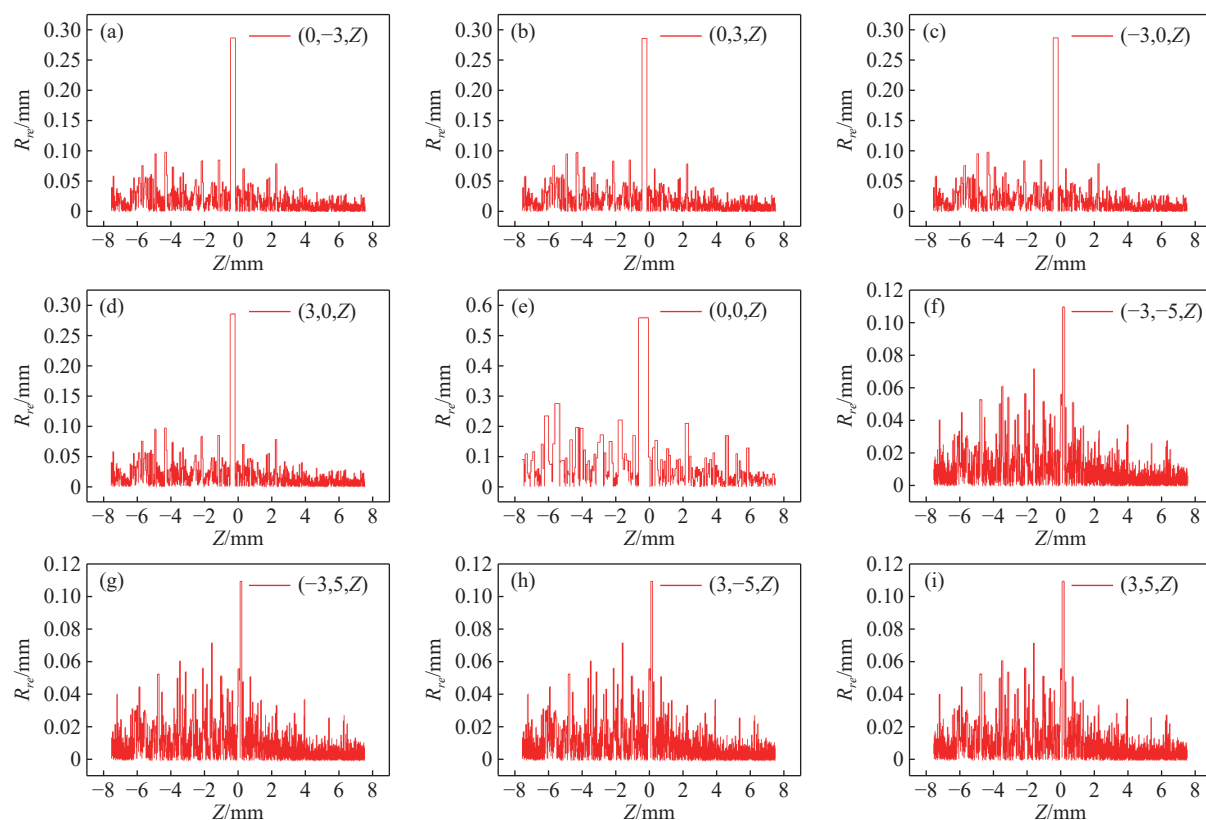


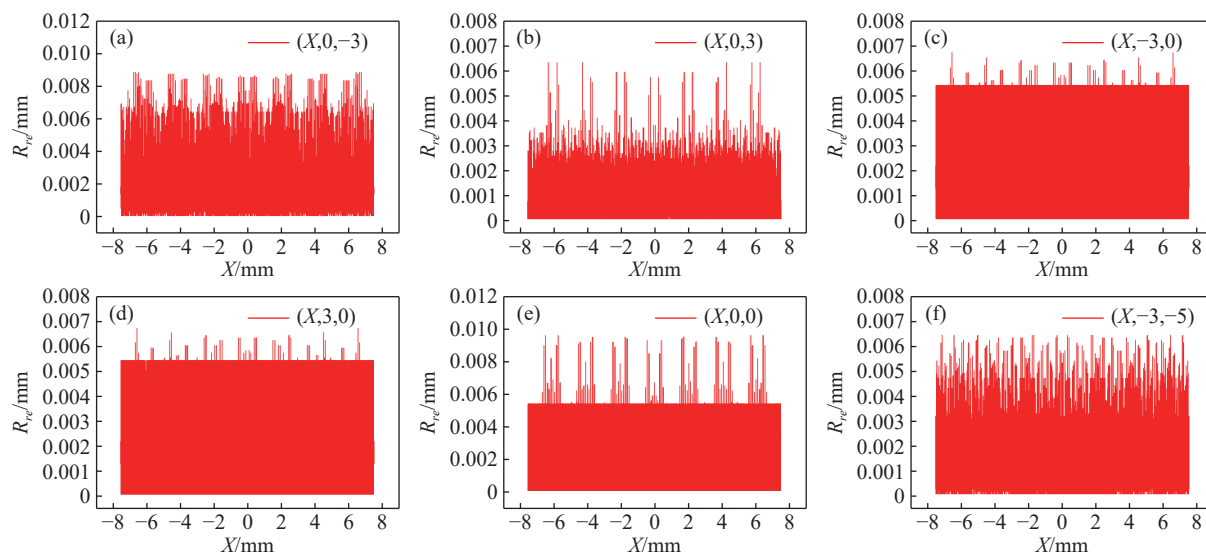
图 11 正方形微透镜阵列光场相机 2.0 沿 Z 轴的深度分辨率

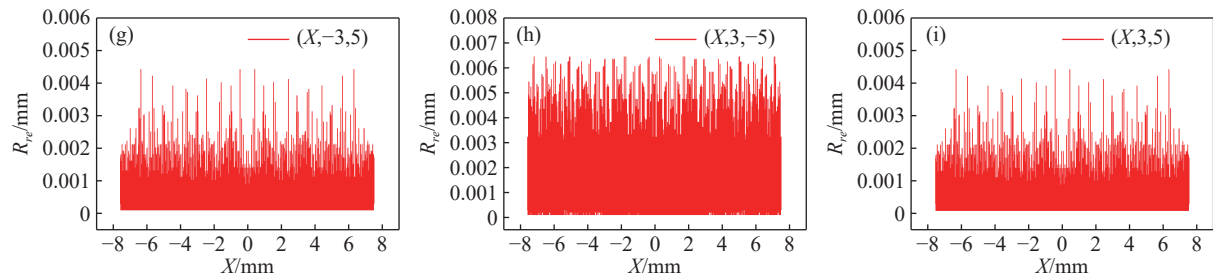
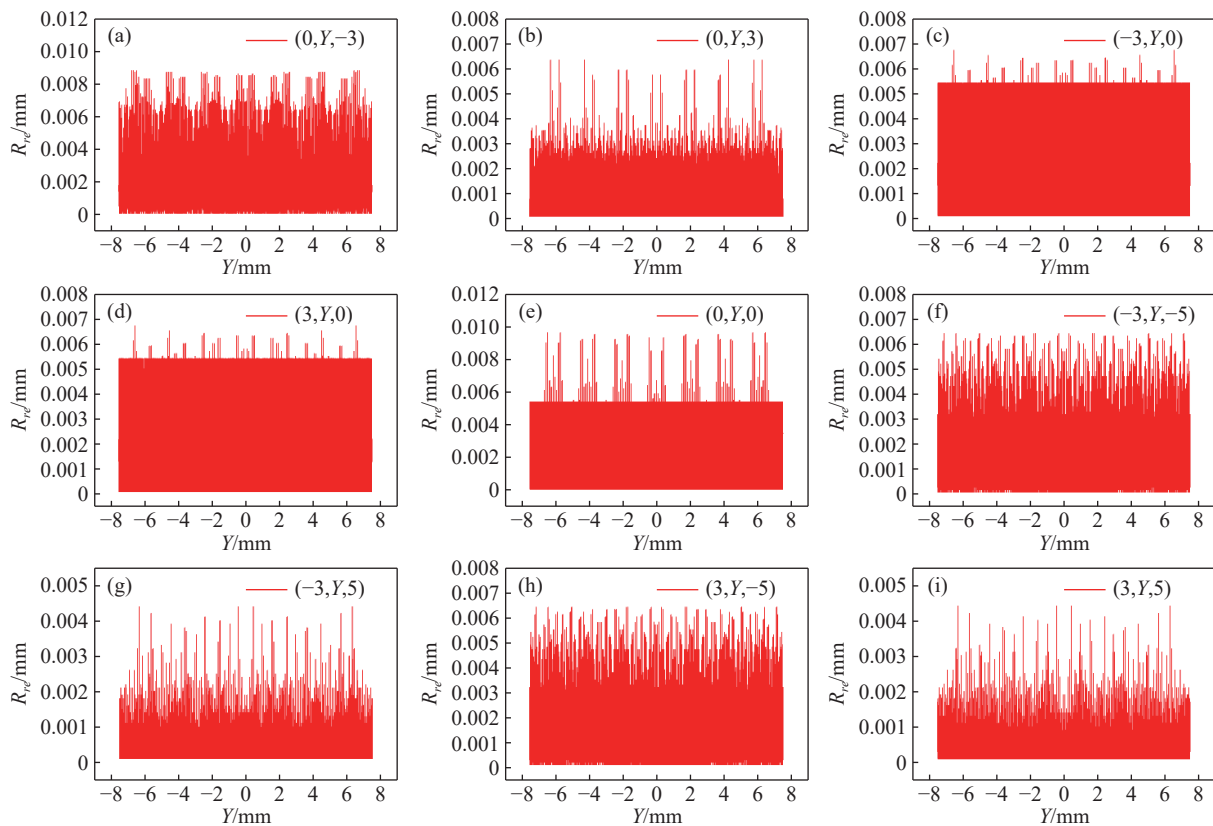
Fig. 11 Depth resolution along Z axis of light field camera 2.0 with square microlens array

3.3.2 横向分辨率

图 12(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 X 轴上及 X 轴外的横向分辨率, 图 13(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Y 轴上及 Y 轴外的横向分辨率。从图 12(a)、12(e) 中可以看出, R_{re} 在 (0~0.01) mm 之间变化。从图 12(b)、12(c)、12(d)、12(f)、12(h) 中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.007) mm

之间变化。从图 12(g)、12(i) 中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.0045) mm 之间变化。由于正方形微透镜阵列在 X 轴和 Y 轴方向上具有对称性, 图 12(c) 与 12(d)、12(f) 与 12(h)、12(g) 与 12(i) 展示出相同的横向分辨率分布。图 13 展示的横向分辨率变化模式与图 12 相似。



图 12 正方形微透镜阵列光场相机 2.0 沿 X 轴的横向分辨率Fig. 12 Lateral resolution along X axis of light field camera 2.0 with square microlens array图 13 正方形微透镜阵列光场相机 2.0 沿 Y 轴的横向分辨率Fig. 13 Lateral resolution along Y axis of light field camera 2.0 with square microlens array

3.4 蜂窝型微透镜阵列光场相机 2.0 的空间分辨率计算结果

3.4.1 深度分辨率

对于采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 2.0, 其光学参数如表 2 所示。图 14(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 Z 轴上和 Z 轴外的深度分辨率。从图 14(e) 可以看出, 在 $Z=0$ mm 和 $Z=-6$ mm 附近, R_{re} 超过 0.23 mm, 除少数位置的 R_{re} 高于 0.075 mm, 其余位置基本在 0.075 mm 以内。与图 8 和图 11 对比可知, 采用蜂窝型微透镜阵列

的光场相机 2.0 的中心区域的分辨率要高于蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0 和正方形微透镜阵列的光场相机 2.0 中心区域的分辨率。从图 14(a)、14(b) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 和 $Z=-6$ mm 附近, R_{re} 超过 0.11 mm, 而其余大多数位置 R_{re} 在 0.06 mm 以内。从图 14(c)、14(d) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 和 $Z=-6$ mm 附近, R_{re} 超过 0.175 mm, 而其余位置 R_{re} 基本在 0.075 mm 以内。从图 14(f)、14(g)、14(h)、14(i) 中可以看出, 在 $Z=0$ mm 附近, R_{re} 约为 0.07 mm 外, 其余绝大

多数位置在 0.05 mm 以内。除 $Z=-6$ mm 附近外，采用的蜂窝型微透镜阵列的光场相机 2.0 大多数位置的深度分辨率要略高于正方形微透镜阵列的光场相机 2.0。

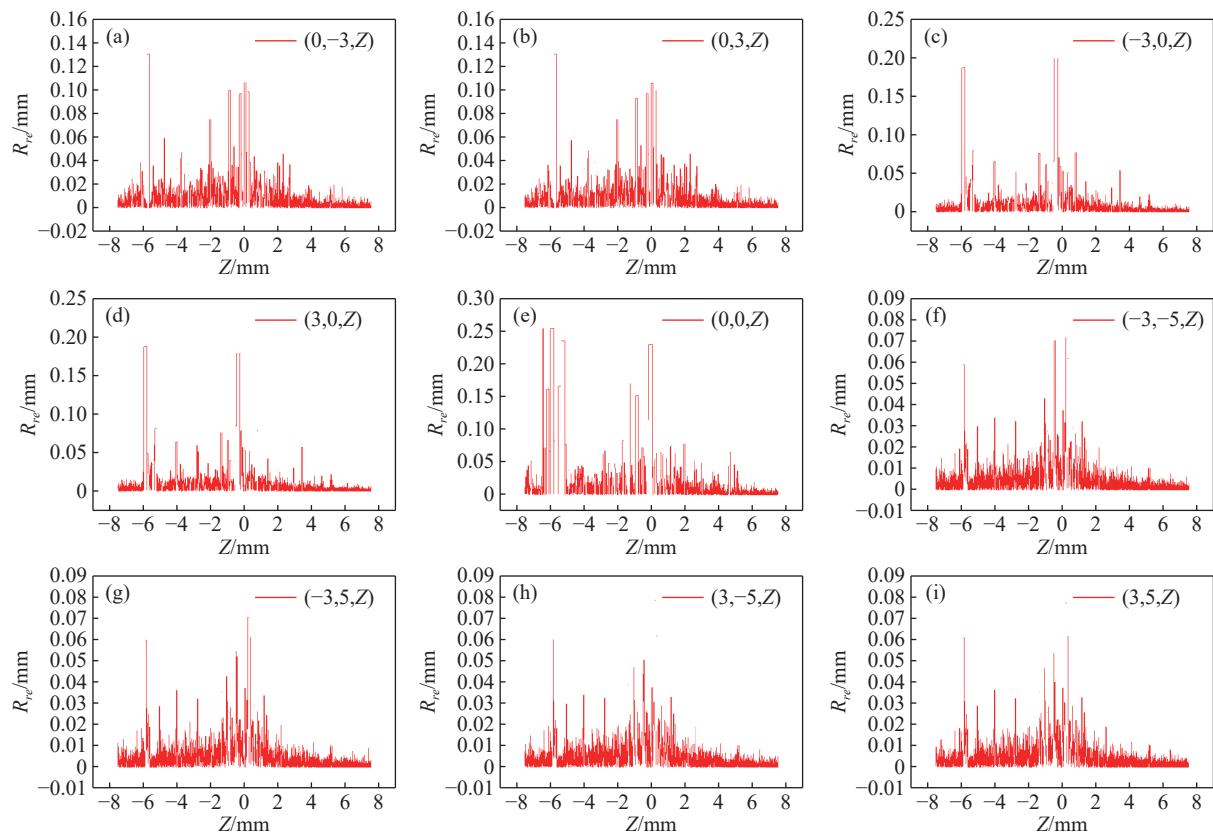


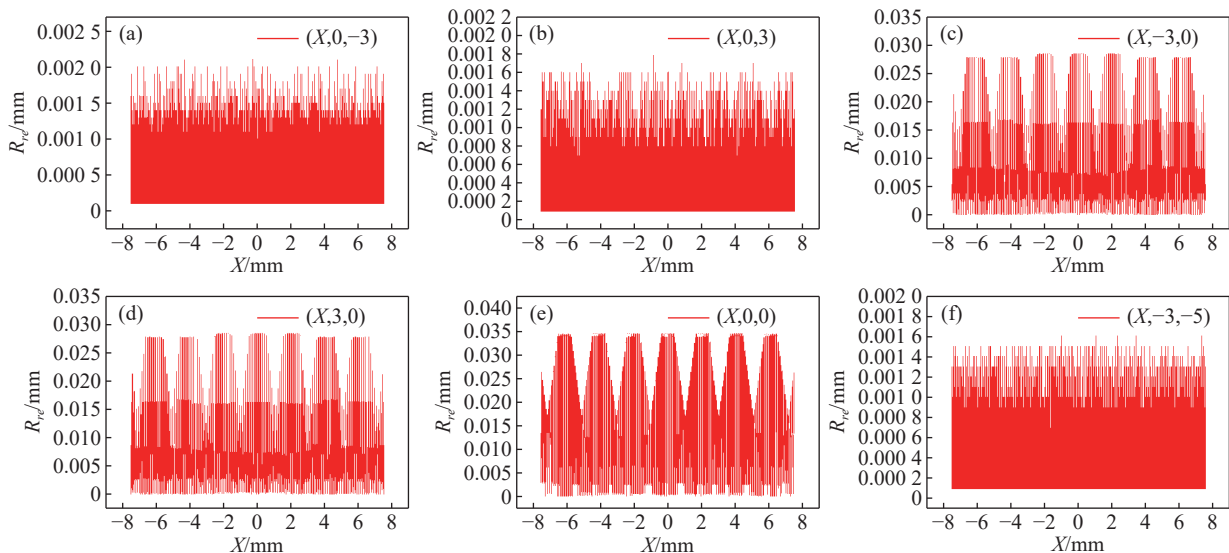
图 14 蜂窝型微透镜阵列光场相机 2.0 沿 Z 轴的深度分辨率

Fig. 14 Depth resolution along Z axis of light field camera 2.0 with honeycomb microlens array

3.4.2 横向分辨率

图 15(彩图见期刊电子版)展示了点光源在 X 轴上和 X 轴外的横向分辨率。从图 15(e)中可以看出, R_{re} 在 (0~0.035) mm 之间变化。从图 15(a)、15(b)、15(f)、15(h)中可以看出, R_{re} 基本

在 (0~0.002) mm 之间变化。从图 15(c)、15(d)中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.027) mm 之间变化。从图 15(g)、15(i)中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.0007) mm 之间变化。



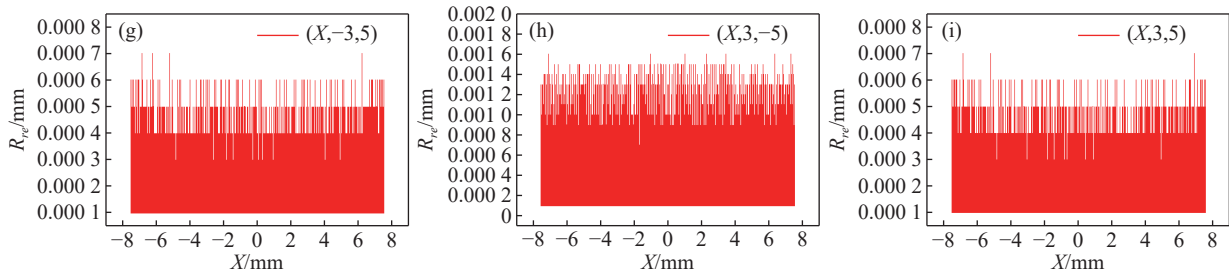


图 15 蜂窝型微透镜阵列光场相机 2.0 沿 X 轴的横向分辨率

Fig. 15 Lateral resolution along X axis of light field camera 2.0 with honeycomb microlens array

图 16 展示了点光源在 Y 轴上和 Y 轴外的横向分辨率。从图 16(e) 中可以看出, R_{re} 基本在 (0~0.0065) mm 之间变化。从图 16(a)~16(d) 可以看出, R_{re} 基本上都在 (0~0.0055) mm 之间变化。从图 16(f)~16(i) 可以看出, R_{re} 基本在 (0~

0.00225) mm 之间变化。沿 X 轴方向和沿 Y 轴方向上的横向分辨率存在差异。除 $(X, -3, 0)$ 、 $(X, 3, 0)$ 位置外, 采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 2.0 的横向分辨率要高于正方形微透镜阵列的光场相机 2.0。

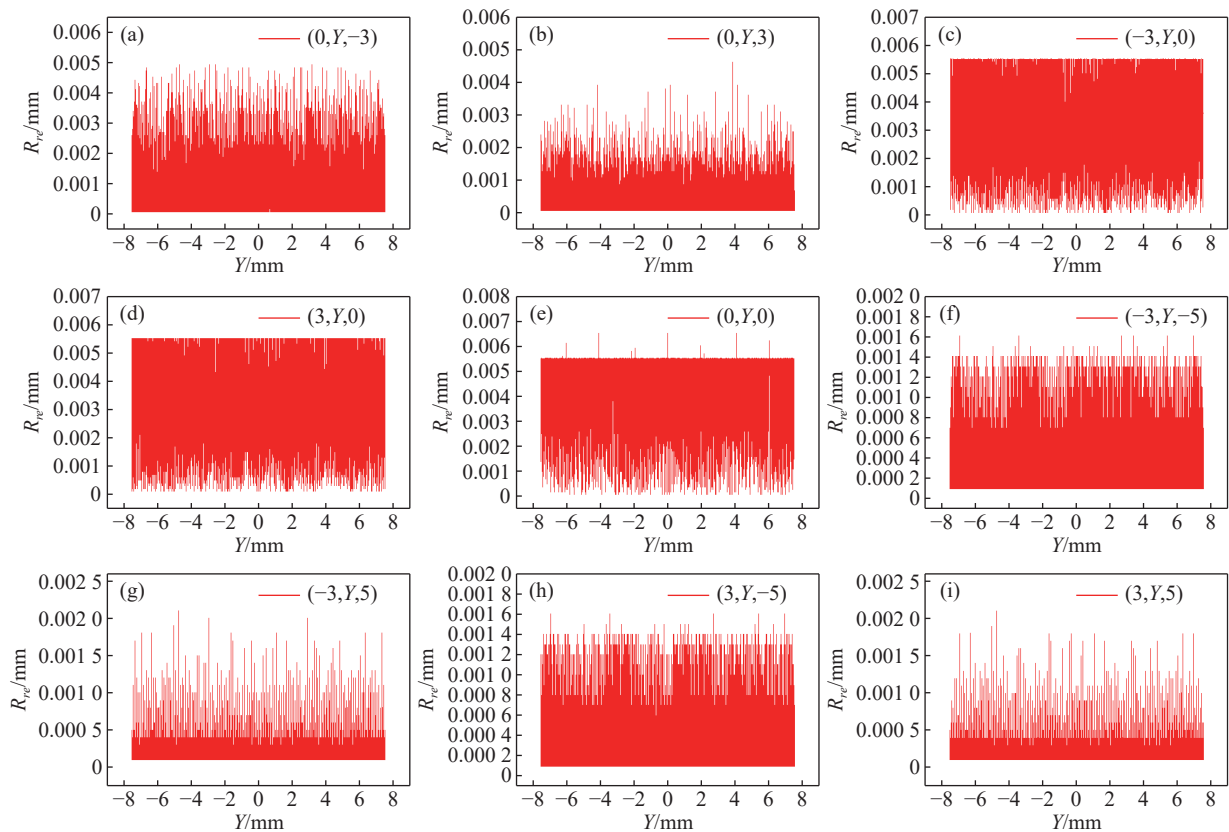


图 16 蜂窝型微透镜阵列光场相机 2.0 沿 Y 轴的横向分辨率

Fig. 16 Lateral resolution along Y axis of light field camera 2.0 with honeycomb microlens array

4 M_l 对深度分辨率的影响

主镜头逆放大率 M_l 是影响光场相机深度分辨率的重要参数之一。因此, 有必要研究 M_l 对光

场相机深度分辨率的影响。以正方形微透镜阵列的光场相机 1.0 为例, 其在不同 M_l 下的光学参数列于表 3。根据表 3 中的数据, 计算并比较了 $(0, 0, Z)$ 处不同 M_l 对深度分辨率的影响。

表 3 不同 M_l 下光场相机 1.0 的光学参数
 Tab. 3 Parameters of the light field camera 1.0 with different M_l

d_l (mm)	f_m (mm)	f (mm)	M_l	l_l (mm)	l_m (mm)	P_m (mm)	P_x (μm)
0.6	0.6	100	1	200	200	0.1045	5.5
0.6	0.6	100	1.5	250	166.667	0.1045	5.5
0.6	0.6	100	2	300	150	0.1045	5.5
0.6	0.6	100	2.5	350	140	0.1045	5.5

图 17(彩图见期刊电子版)展示了 $(0,0,Z)$ 处不同 M_l 的深度分辨率。可以看出,位于 $(0,0,0)$ 附近的 R_{re} 随着 M_l 的增大而增加,这表明深度分辨率随着 M_l 的增大而逐渐降低。除此之外,在

$(0,0,0)$ 附近,光场图像模式一致的区域随着 M_l 的增大而扩展,这意味着物体深度信息无法分辨的区域随之扩大。

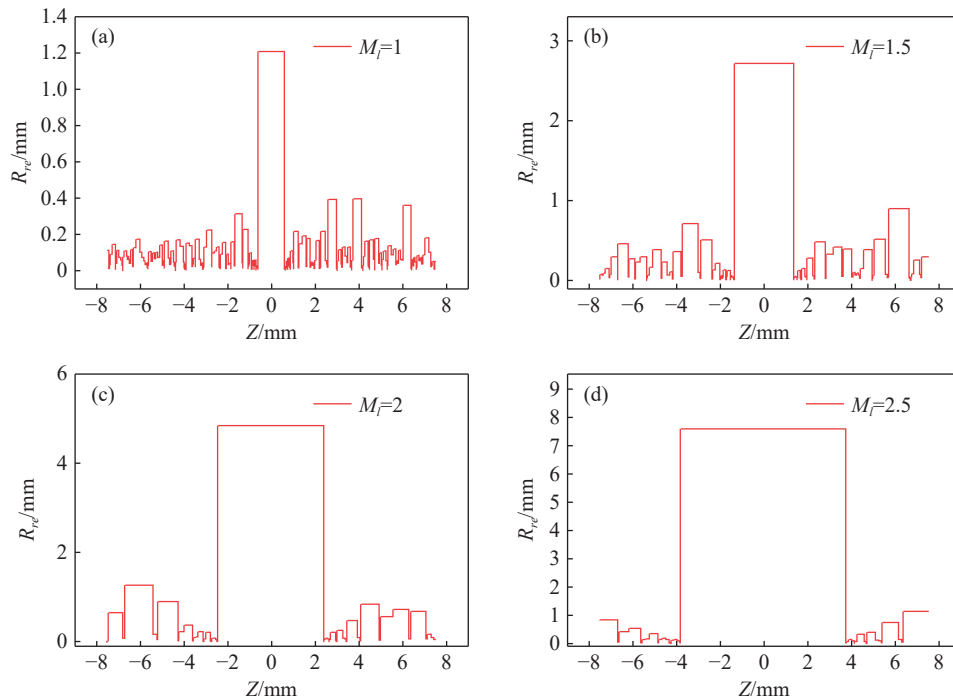


图 17 不同 M_l 在 $(0,0,Z)$ 的深度分辨率

Fig. 17 Depth resolution of different M_l at $(0,0,Z)$

5 结 论

本文研究了基于前向光线追迹技术的光场相机空间分辨率计算方法。通过该方法,对采用正方形及蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0 和光场相机 2.0 的点光源的空间分辨率进行了计算及比较。此外,以正方形微透镜阵列的光场相机 1.0 为例,研究了不同 M_l 对光场相机深度分辨率的影响。本文的结论如下:

(1)在正方形与蜂窝型微透镜阵列两种排列

方式下,光场相机 1.0 在 $(0,0,0)$ 附近区域的空间分辨率均为最差。在 $(0,0,0)$ 附近区域以外,采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 1.0 的深度分辨率优于采用正方形微透镜阵列的光场相机 1.0。

(2)基于本文研究所采用的光场相机 1.0、2.0 的光学参数以及点光源的位置,在正方形微透镜阵列排列方式下,光场相机 2.0 在中心区域 $(0,0,0)$ 附近的深度分辨率优于光场相机 1.0;光场相机 2.0 的横向分辨率较光场相机 1.0 略有提升。

(3)在大多数位置,采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 2.0 的深度分辨率优于采用正方形微透

镜阵列的光场相机 2.0。除 $(X,-3,0)$ 、 $(X,3,0)$ 、 $(X,3,0)$ 位置外, 采用蜂窝型微透镜阵列的光场相机 2.0 的横向分辨率优于采用正方形微透镜阵列的光场相机 2.0。

(4) 在所有 M_l 下, 采用正方形微透镜阵列的光场相机 1.0 在 $(0,0,0)$ 附近区域的深度分辨率是

最差的, 且随着 M_l 的增大, 深度分辨率逐渐降低。为了实现高分辨率的三维场景重建, 以及在单光场层析 PIV 中获得高分辨率的三维粒子场重建和高精度的三维流场测量, 光场相机的主镜头应选择较小的 M_l , 并尽量避免将三维场景置于 $(0,0,0)$ 附近区域。

参考文献:

- [1] 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).
- [2] LYNCH K, FAHRINGER T, THUROW B. Three-dimensional particle image velocimetry using a plenoptic camera[C]//50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, AIAA, 2012: AIAA 2012-1056.
- [3] 吴治安. 光场成像三维流场测量系统体标定方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
WU ZH A. *Study on volumetric calibration method of light field particle image velocimetry for 3D flow measurement*[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese).
- [4] SHI SH X, DING J F, NEW T H, *et al.*. Volumetric calibration enhancements for single-camera light-field PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(1): 21.
- [5] 顾高霏, 赵军, 孔明, 等. 基于光场相机层析法的颗粒三维位置测量[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 0812002.
GU G F, ZHAO J, KONG M, *et al.*. Tomographic three-dimensional particle position measurement based on light field camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 0812002. (in Chinese).
- [6] SHI SH X, DING J F, NEW T H, *et al.*. Light-field camera-based 3D volumetric particle image velocimetry with dense ray tracing reconstruction technique[J]. *Experiments in Fluids*, 2017, 58(7): 78.
- [7] 吴旗, 朱效宇, 许传龙. 基于物理方程的高分辨率光场层析粒子图像测速技术[J]. 光学学报, 2025, 45(1): 0112007.
WU Q, ZHU X Y, XU CH L. High-resolution light field chromatography particle image velocimetry based on physical equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(1): 0112007. (in Chinese).
- [8] SHI SH X, DING J F, ATKINSON C, *et al.*. A detailed comparison of single-camera light-field PIV and tomographic PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(3): 46.
- [9] MEI D, DING J F, SHI SH X, *et al.*. High resolution volumetric dual-camera light-field PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2019, 60(8): 132.
- [10] ZHU X Y, HOSSAIN M M, LI J, *et al.*. Weight coefficient calculation through equivalent ray tracing method for light field particle image velocimetry[J]. *Measurement*, 2022, 193: 110982.
- [11] CAO L X, ZHANG B, LI J, *et al.*. Characteristics of tomographic reconstruction of light-field Tomo-PIV[J]. *Optics Communications*, 2019, 442: 132-147.
- [12] ZHU X Y, ZHANG B, LI J, *et al.*. Volumetric resolution of light field imaging and its effect on the reconstruction of light field PIV[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125263.
- [13] ZHU X Y, WU ZH A, LI J, *et al.*. A pre-recognition SART algorithm for the volumetric reconstruction of the light field PIV[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106625.
- [14] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M M, *et al.*. Approach to select optimal cross-correlation parameters for light field particle image velocimetry[J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(7): 073601.
- [15] CAO L X, ZHANG B, HOSSAIN M M, *et al.*. Tomographic reconstruction of light field PIV based on a backward ray-tracing technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(4): 044007.
- [16] ZHU X Y, XU CH L, HOSSAIN M M, *et al.*. Fast and accurate flow measurement through dual-camera light field particle image velocimetry and ordered-subset algorithm[J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(6): 063603.
- [17] FAHRINGER T W, THUROW B S. Filtered refocusing: a volumetric reconstruction algorithm for plenoptic-PIV[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(9): 094005.

- [18] 张志远. 三维流场层析粒子图像变分光流速度测量算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
ZHANG ZH Y. *Research on variational optical flow velocity measurement algorithm for three-dimensional flow field tomographic particle image*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024. (in Chinese).
- [19] ZHAO ZH, YAO CH H, SHI SH X, *et al.*. Resolution analysis on light-field particle image velocimetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2023, 40(4): 729-740.
- [20] DEEM E A, ZHANG Y, CATTAFESTA L N, *et al.*. On the resolution of plenoptic PIV[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(8): 084003.
- [21] RUAN L Y, CHEN B, LI J ZH, *et al.*. Learning to deblur using light field generated and real defocus images[C]// *Proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, 2022: 16283-16292.
- [22] ZHAO ZH, JI Y, HE Y L, *et al.*. Binocular Scheimpflug light-field PIV[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131176.
- [23] 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.
- [24] LYU W Q, SHENG H, KE W, *et al.*. Advances in light field spatial super-resolution: a comprehensive literature survey[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 18470-18497.

作者简介:



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