

基于结构光标记的光场三维成像技术研究

吴庆阳^{1,2}, 黄浩涛¹, 陈顺治¹, 李奇锋¹, 陈泽锋¹, 卢晓婷¹

(1. 深圳大学 电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060;
2. 深圳技术大学 大数据与互联网学院, 广东 深圳 518118)

摘要: 由于四维光场数据中记录了场景中所有光线的方向和强度, 通过对其分析和计算即可获得空间场景中对对应点的 3D 坐标。但是目前对光场数据进行处理所采用的重聚焦和多目视觉方法, 由于空间场景中特征较少, 导致很难确定光场数据中的对应关系光线, 因此, 重建获得的 3D 数据不仅稀疏而且精度较低。针对此, 提出了一种使用结构光投影技术对三维场景进行标记, 并根据相位标记精确的建立起光线之间的对应信息, 最终快速地计算出空间场景 3D 数据的方法。由于 4D 光场矩阵中存储的是光线相位而不是传统方法中的强度, 并且还记录有不同方向的光线信息, 因此, 该方法不仅提高了传统光场三维重建的精度, 还可以解决以往结构光投影三维测量方法中存在的遮挡和高光反射问题。最后通过实验验证了所提方法的可行性和准确性。

关键词: 光场成像; 四维光场; 三维重建; 结构光投影

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3378/IRLA202049.0303019

Research on 3D imaging technology of light field based on structural light marker

Wu Qingyang^{1,2}, Huang Haotao¹, Chen Shunzhi¹, Li Qifeng¹, Chen Zefeng¹, Lu Xiaoting¹

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
2. College of Big Data and Internet, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China)

Abstract: A method for three-dimensional (3D) reconstruction from four-dimensional (4D) light fields was presented. The 4D light field image recorded the direction and intensity of all rays passing through the scene and contained useful information to estimate scene depth. Point 3D coordinates were obtained by calculating relative positional relationships between rays emitted from one point in the scene. However, it was very difficult in practice to determine these light rays from 4D light field data. The proposed method used fringe projection to mark object surfaces. Light ray information can then be accurately and quickly determined from the phase marker and 3D data calculated. The 4D light field matrix was light ray phase rather of intensity as in the conventional method and can record rays with various directions. Thus, shadow, occlusion, and surface specular reflection problems can be addressed. Feasibility and accuracy of the proposed method were verified experimentally.

Key words: light field imaging; four-dimensional light field; three-dimensional reconstruction; structured light projection

收稿日期: 2019-11-20; 修订日期: 2019-12-18

基金项目: 国家重大科研仪器研究项目 (61827815); 深圳市战略性新兴产业发展专项研究基金 (JCYJ20170412105812811); 深圳技术大学启动项目 (201723); 深圳技术大学校企合作项目 (2018010802013)

作者简介: 吴庆阳 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事三维传感技术研究。Email: wuqingyang@sztu.edu.cn

0 引言

3D 成像和测量技术广泛应用于工业, 娱乐, 文物保护, 医药等领域。然而就传统的 3D 测量技术而言, 已经越来越难以满足市场的需求, 因此, 寻找快速有效的 3D 成像和测量方法成为趋势, 也成为了当前研究的热门话题。在众多方法之中, 基于光场原理的成像技术具有结构简单, 成像速度快的优点, 它通过分析不同视角等图像之间的冗余视差信息, 获得完整的场景三维点云数据^[1-4]。这些优点符合三维测量领域的需求, 因此, 受到国内外学者的广泛关注。目前, 关于利用光场成像原理进行三维测量的研究很多。首先, 利用记录的 4D 光场的数据, 可以通过堆栈估计场景深度的信息, 即清晰成像中的点的对应聚焦堆栈是该点的深度信息。其中主要的计算方法包括傅里叶层析成像和数字重聚焦^[5]。此外, 还可以通过使用对象点的视差来获得场景深度的信息^[6-9]。例如, 在多目系统中, 通过多个摄像机的有序排布获得不同视角的图像, 并且通过多视角的像素匹配来获得视差信息^[10]。再例如, 在分析光场数据的极线平面图像时, 根据极坐标曲线的性质, 对象点对应的像素会呈线性分布在极坐标图上, 通过计算极坐标图中拟合直线的斜率信息来估计视差信息^[11]。

在文中的方法中, 笔者将结构光投影技术和光场成像相结合, 并提出了一种灵活的 3D 测量过程。首先, 笔者通过投影一系列编码条纹图像对测量物体的表面进行编码的标记, 利用摄像机在特定方向上的有序移动, 模拟相机阵列采集光场数据的方式, 来记录具有编码信息的物体图像。其次, 通过处理图像序列来求解相位, 同时建立 4D 相位光场图像。在光场理论中, 从同一点发出的每条光线, 其对应的相位值是恒定的。4D 相位光场图像中的像素可以用来表征光线, 因此构成具有相同相位的这些像素, 分别对应于物体表面的同一个点所发出的光线。所以空间中所有点的 3D 坐标可以利用每个点各自所对应的光线进行计算。与以前的方法相比, 该方法可以通过利用编码条纹标记物体的方式, 简单快速地获取 3D 数据, 具有较高的精度和稳定性。与此同时, 所提出的方法使用来自各种视角的信息来计算场景深度, 有效地弥补了传统的结构光测量方法当中阴影、遮挡或过度曝光的问题。实验结果证明了该方法的可靠性。

1 基本原理

光场的本质是空间中所有光线向各个方向传播的光辐射函数的总体, 这可以通过全光函数完全描述。但是当光线在光场中传输时, 只考虑由射线携带的二维位置信息 (u, v) 和二维方向信息 (θ, φ) 。在这种情况下, 光场数据可以利用两个平行平面进行参数化描述。如图 1 所示, 光线分别与透镜平面 (u, v) 和传感器平面 (s, t) 相交与两点, 构成 4D 光场函数 $L(u, v, s, t)$ 。其中透镜平面和传感器平面之间的距离是 d , 透镜平面与传感器平面之间的关系用于描述光线的传播方向, 并且光线的强度由传感器获得。在这种情况下, 光线的强度和方向就由光线和两个平面的交叉点的坐标表示。

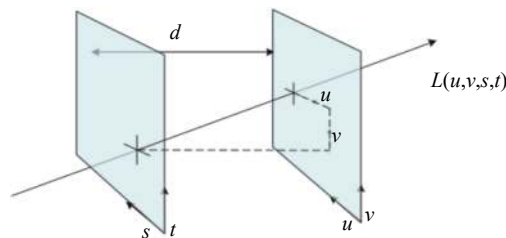


图 1 两平面参数化表征

Fig.1 Parameterized representation of two planes

在文中, 主要利用极平面分析法估算场景的深度信息, 因此, 下面就极平面分法的原理进行描述。通过单点采样模型来描述 3D 场景, 并且将 4D 光场的平面参数化模型转换为几何图像进行分析。在图 2(a) 中, 从空间中的点 $P(px, py, pz)$ 发散出的光线与两个平面 (u, v) , (s, t) 分别相交与两个点并且在两个平面之间的距离为 d 。

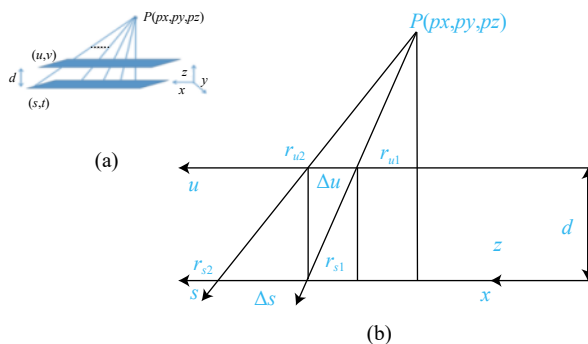


图 2 (a) 两平面参数化描述的几何表示; (b) $u-s$ 面几何分析的示意图
Fig.2 (a) Geometric representation of two plane parameterized; (b) Schematic diagram of geometric analysis of $u-s$ plane

值得注意的是,相机在实验中获得的光场图像由不同视角下的图像组成,其中 u 和 v 表示相机在空间坐标系中特定移动的相对物理位置,例如 (u_1, v_1) 表示第 1 行第 1 列的摄像机采集到的一组子图像, s 和 t 描述了对应的子图像中像素的位置分布。由于各自表示的单位不同,因此在计算时,要将单位进行统一,例如将 s, t 的单位转换为物理尺寸。

如图 2(b) 所示,当只考虑单向的数据时,例如 u, s , 分析如下。首先,根据三角形相似的原理, p 点坐标之间的 u, s 对应关系如下:

$$\frac{r_{s_1} - r_{u_1}}{d} = \frac{r_{s_1} - p_x}{p_z} \quad (1)$$

$$\frac{r_{s_2} - r_{u_2}}{d} = \frac{r_{s_2} - p_x}{p_z} \quad (2)$$

然后,直线的斜率 $\frac{\Delta u}{\Delta s}$ 可以表示为:

$$\frac{\Delta u}{\Delta s} = 1 - \frac{d}{p_z} \quad (3)$$

类似地,也可以得到关于点 p 的坐标在 v 和 t 之间的关系。

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = 1 - \frac{d}{p_z} \quad (4)$$

通常来说, u 和 s 分别可以由 r_u 和 r_s 代替,(同理 v 和 t 也可以),然后将两组方程 $(u, v$ 和 $s, t)$ 重新整合为一个方程,由点 p 所表示的 4D 射线空间的子集可以描述为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & p_x \\ t & p_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - d/p_z \\ d/p_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, p_x 和 p_y 可以通过公式变换可得,并且都可以用 p_z 来表示,如公式 (6) 所示:

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s & u \\ t & v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - p_z/d \\ p_z/d \end{bmatrix} \quad (6)$$

当物距远大于像距时,可以将 d 的值近似看作焦距值,因此,可以通过校准相机来准确地确定 d 的值。当然,考虑到相机镜头的失真,在校准过程中进行了失真的校正。经过 $u-s$ 平面的分析可以看出,由于空间中的点 p 在多个子图像上成像,并且这些像素可以拟合成直线,因此, p 点的深度值与所拟合成的直线的斜率成比例关系。同理,对于 $v-t$ 平面,同样满足。

2 系统结构

目前,有很多方法可以收集 4D 光场的数据,最常见的两种采集方法是基于相机阵列和微透镜阵列^[12-13]。对于 4D 光场数据中的每个子图像,如果以相机阵列的形式获取,则可以将其视为使用不同相机采集的数据,但是微透镜阵列可以视为子成像系统由主透镜组和用于收集的微透镜组成。两者之间有一些相似之处,但每种都有各自的优缺点。在文中,笔者使用基于相机阵列的光场采集来获得不同位置的场景视差图,将图像数据转换为 4D 光场数据。摄像机之间的位置关系可以通过平移矩阵进行变换。因此,可以从多视图图像估计场景 3D 信息。该 4D 光场数据采集具有更宽的视场,并且从每个视图获取的图像具有相机分辨率,即高分辨率微图像阵列。相邻相机之间的串扰很小,可以应用于具有不同参数的成像系统。如图 3 所示,笔者设计了一个系统,用于对由相机阵列收集的光场数据进行 3D 测量,包括相机,投影仪和物体。

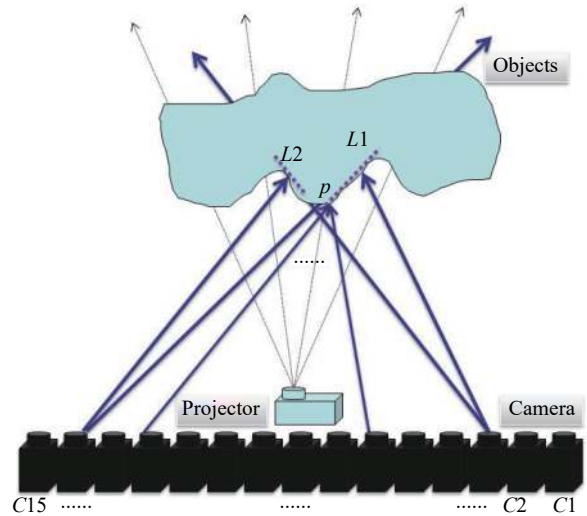


图 3 系统结构图

Fig.3 Schematic diagram of system

在提出的方法中,利用结合了四步相移和格雷码的编码条纹,来求解连续相位值和所对应的相位标记^[14-16]。一旦获得连续相位,具有相同相位值的点是物体上的一点在不同视角下成像的结果,因此,4D 光场数据中直线的斜率可以快速求解,物体的深度通过这种标记特征点的方法进行估算。在整个过程中,需

要校准单个摄像机并确定摄像机移动的精确的相对位置关系,但无需校准投影机和摄像机之间的位置关系。

3 实验过程与分析

在实验中,使用基于结构光标记的灵活光场 3D 成像系统来验证所提出的方法的有效性。其中相机的型号是 PointGray 的 FL2G-13S2M-C,分辨率为 1 280×960 像素,单像素尺寸为 3.75×3.75 μm。使用了计算机公司的镜头, DLP4500 的投影机型号,分辨率为 800×600 像素,一个电动平移台,被测对象是人的石膏模型。笔者在水平方向上收集了 15 组条纹图

案,并通过求解代码得到每个对象的绝对相图。其中,将第一个视图的位置定义为 1 mm,每次移动之间的距离为 1 mm。因此, u 和 v 的单位是 mm, s 和 t 的单位是像素。当然,在计算数据时,要对单位进行归一化。

根据光场成像原理,首先将收集的光场数据转换为 u - s 坐标系进行分析,如图 4(a) 所示,表示 $u=1,5,10,15$ 四个视角下的相位图,当 $t=460,600$ 时, u - s 平面图像分别如图 4(b) 和 4(c) 所示。可以看出,具有相同相位值的点是从不同视角对物体上的同一点进行成像的结果,换句话说,这些像素点拟合成的直线的斜率对应于该点的深度。

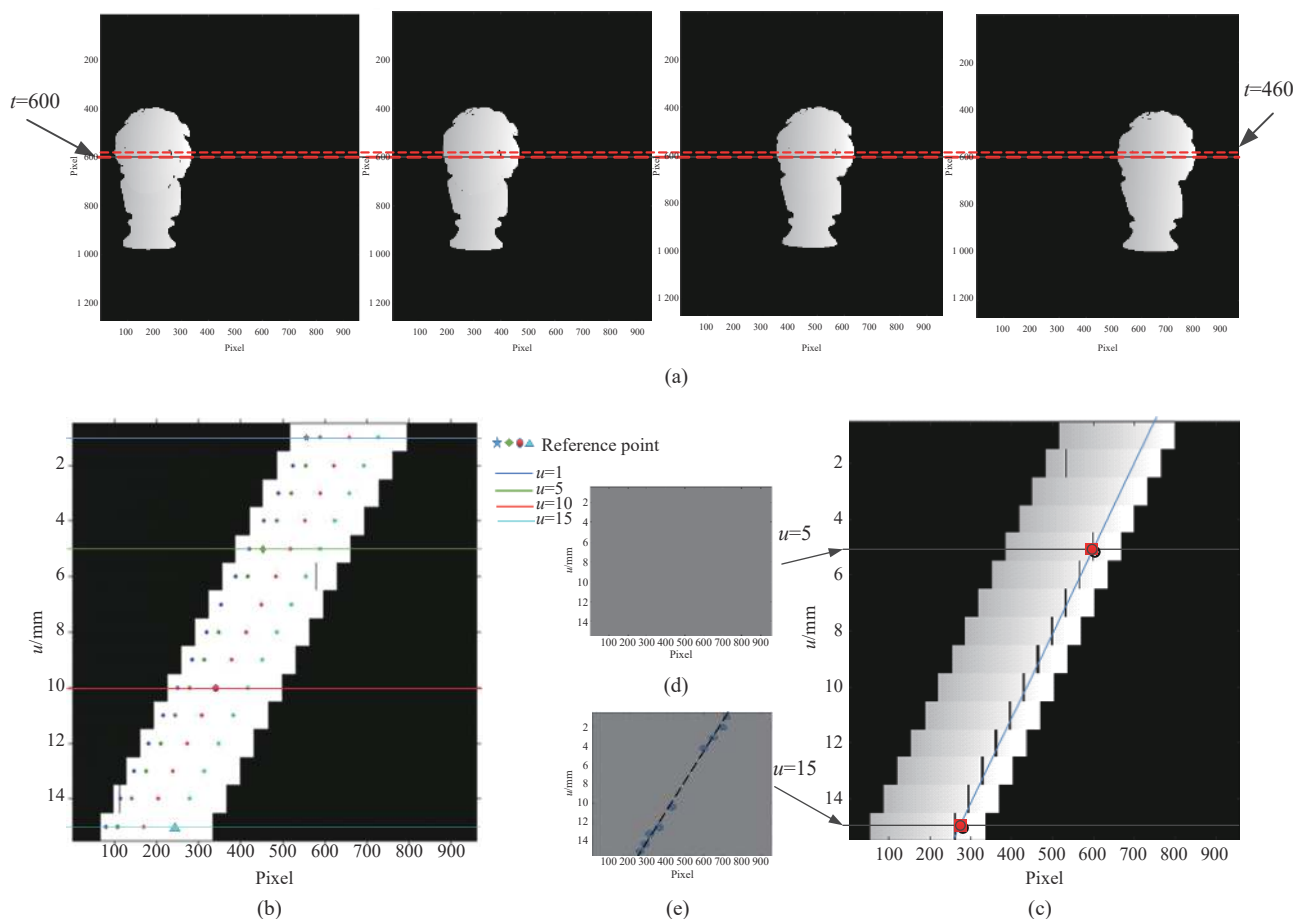


图 4 (a) 相位图; (b)、(c) $t=460, t=600$ 时的 u - s 平面图; (d)、(e) 当 $u=5, u=15$ 时, 相位值的插值描述值的插值描述

Fig.4 (a) Unwrapped phase image; (b), (c) Unwrapped phase image of u - s plane at $t=460$ and $t=600$; (d), (e) Interpolation diagram when $u=5$ and $u=15$

事实上,由于视角的变化,采样位置也发生了稍许变化,因此,笔者得到的相位值并不是绝对准确的。为了提高查找的准确性,笔者使用三次样条插值方法,以某一个视角下的相位值为基准,插值查找该

值在其他视角下的分布情况,可想而知由于光场的特性,每个视角下都有成像且具有不同部分上相位数据,因此,视角与视角之间可以进行相位值的交替插值查找,即使由于单个透镜的视场有限而导致图像中

某些区域存在遮挡和阴影, 只要保证在整个视场中能获取它的相位值, 总能从某一个视角下求解得到对应的深度值。值得说明的是, 由于直线的拟合至少需要两个点, 所以要确定一个点至少在两个视角下有对应的相位值。如图 4(b)~(e) 所示, 通过数据进行了说明。

对石膏模型进行测量, 将得到的数据导入到 Geomagic 软件中, 当在全局坐标系中显示时, 有效地获得了完整的 3D 点云数据。图 5(a) 显示了从单一视角获得的 3D 点云数据。图 5(b) 是笔者计算的最终完整的 3D 点云数据。圆形区域的比较表明, 该方法大大提高了物体的重建精度和空间分辨率, 获得了复杂物体的完整点云数据。它还为解决由于物体表面上的遮挡或过度曝光而导致物体无法获得完整的脸部形状的问题提供了基础。

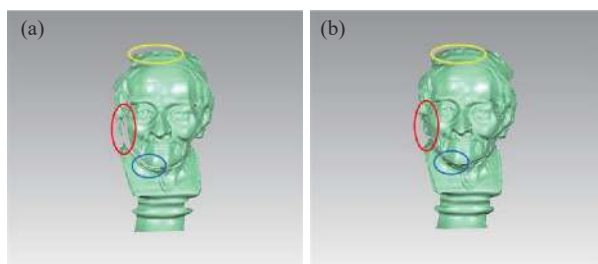


图 5 (a) 从单一角度获得的 3D 点云数据; (b) 最终的完整 3D 点云数据

Fig.5 (a) 3D point cloud data from one single perspective; (b) Complete 3D point cloud data

为了验证笔者的方法是否可以解决部分高光的问题, 笔者测量了金属板。如图 6(a), 图 6(b) 所示, 它们在单个透视图表示条纹图像和得到的相位图。从图中笔者可以看出: 金属板的部分表面区域存在高光, 使得该区域的相位值为 0, 该部分的点云数据是重建不出来的。但是通过笔者的方法利用多次查找和所有视角下的点云数据进行数据补偿的方式, 求解得到了高光区域完整的三维点云数据, 如图 6(d) 所示。

最后, 笔者测量了标准方块 (60 mm×60 mm×60 mm), 对笔者方法的测量精度进行定量分析。其中, 使用最小二乘法进行平面拟合并分析相关误差系数, 如图 7(a) 所示。通过分析, 标准平面方程为 $0.6827X + 0.0352Y - 0.7299Z + -0.0076 = 0$, 其中最大平面偏差为 0.004127 mm, 平均偏差为 0.0003 mm, 标准偏差

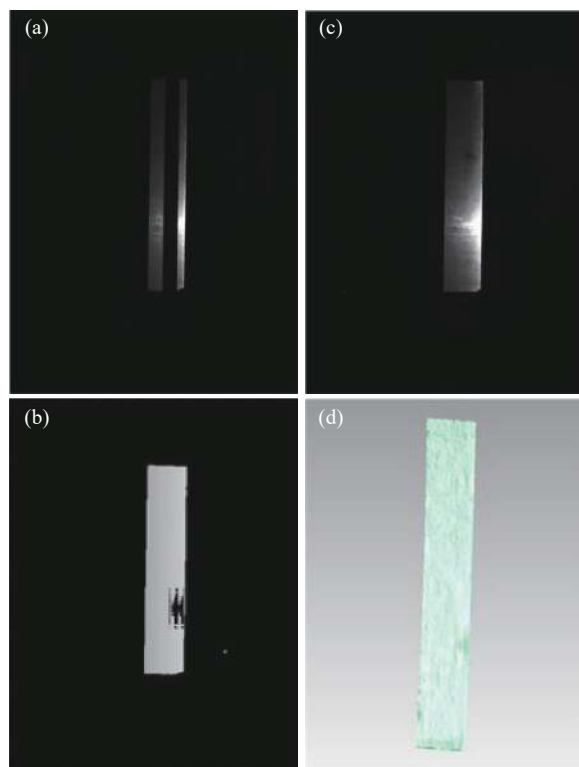


图 6 (a) 金属板的条纹图; (b) 对应的相位图; (c) 金属板的实物图; (d) 重建得到的点云数据图

Fig.6 (a) Image of fringe pattern on metal plate; (b) Corresponding phase diagram; (c) Image of metal plates; (d) Reconstructed 3D point cloud

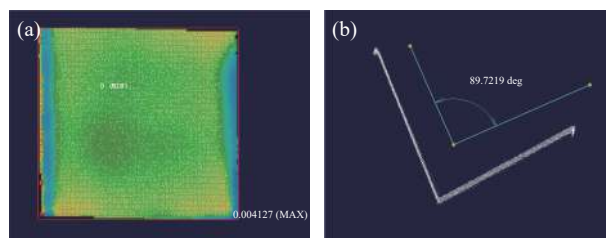


图 7 (a) 平面点云数据的颜色矢量图; (b) 角度评估图

Fig.7 (a) Color vector diagram of plane point cloud; (b) Angle between two planes

为 0.0004 mm。最后, 对平面的夹角进行了评估, 计算出的角度为 89.7392, 如图 7(b) 所示。可以看出测量精度达到了微米数量级, 符合笔者的测量要求, 并且证明了所提出方法的有效性。

4 结 论

提出了一种基于结构光标记的光场三维成像系统, 能够以高精度和稳定性轻松快速地获取三维物体

坐标。所提出的方法解决了难以确定哪些光线包含有效 3D 数据信息的问题,并且在存在阴影、遮挡或过度曝光表面的情况下提供高质量的 3D 数据重建。通过实验验证了所提方法的可行性。

参考文献:

- [1] Orth A, Crozier K B. Light field moment imaging [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(15): 2666–2668.
- [2] Wanner S, Goldluecke B. Globally consistent depth labeling of 4D light field[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012: 41–48.
- [3] Lüke J P, Rosa F, Marichal-Hernández J G, et al. Depth from light fields analyzing 4D local structure [J]. *Display Technology*, 2015, 11(11): 900–907.
- [4] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[R]. Stanford Technical Report CTSR, 2005:1–11.
- [5] Ng R. Fourier Slice Photography[C]//ACM Transactions on Graphics, 2005,24(3): 735–744.
- [6] Lumsdaine A, Georgiev T. The focused plenoptic camera[C]//Proceedings of the ICCP (IEEE), 2009:1–8.
- [7] Bishop T E, Favaro P. The light field camera: Extended depth of field, aliasing and superresolution [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 2017, 34(5): 972–986.
- [8] Wilburn B, Joshi N, Vaish V. High performance imaging using large camera arrays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 765–776.
- [9] Tao M W, Hadap S, Malik J, et al. Depth from combining defocus and correspondence using light-field cameras[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2013: 673–680.
- [10] Lin X, Wu J, Zheng G, et al. Camera array based light field microscopy [J]. *Biomed Opt Express*, 2015, 6(9): 3179–3189.
- [11] Wanner S, Goldluecke B. Globally consistent depth labeling of 4D light fields[C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, 2012: 41–48.
- [12] Frese C, Gheta I. Robust depth estimation by fusion of stereo and focus series acquired with a camera array[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor fusion and Intergration for Intelligent Systems, IEEE, 2006: 243–248.
- [13] Levoy M, Zhang Z, McDowell I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays [J]. *Microsc*, 2009, 235(2): 144–162.
- [14] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors [J]. *Appl Opt*, 1999, 31(38): 6565–6573.
- [15] Liu X, Kofman J. High-frequency background modulation fringe patterns based on a fringe-wavelength geometry-constraint model for 3D surface-shape measurement [J]. *Opt Express*, 2017, 14(25): 16618–16628.
- [16] Zheng D, Da F, Qian K M, et al. Phase-shifting profilometry combined with Gray-code patterns projection: unwrapping error removal by an adaptive median filter [J]. *Opt Express*, 2017, 25(5): 4700–4713.