基于光场相机的全视差三维显示

石肖1,艾灵玉1*,于淼2,金笑雨1,陈永铮1

1江南大学物联网工程学院,无锡 江苏 214122;

²江南大学理学院,无锡 江苏 214122

摘要 针对光场相机采集的三维信息在显示时只能呈现非常窄的视差问题,对光场相机信息记录过程进行了分析,提出一种将光场数据转化为元素图像阵列(EIA),并对 EIA 中的物体进行重新采样以调整深度的全视差三维显示方法。为了验证该方法的有效性,使用光场相机采集真实三维物体,利用所提方法对光场图像进行处理后,将 其在深度优先集成成像(DPII)系统中进行显示。实验结果表明,利用所提方法可以实现光场数据的全视差三维显示。

关键词 成像系统; 三维成像; 光场相机; 深度调整; 集成成像 中图分类号 O435 **文献标志码** A

doi: 10.3788/AOS202040.0711005

Full-Parallax Three Dimensional Display Based on Light Field Camera

Shi Xiao¹, Ai Lingyu^{1*}, Yu Miao², Jin Xiaoyu¹, Chen Yongzheng¹

¹ School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; ² School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Aiming at the problem that the 3D information captured by a light field camera can only provide a very narrow parallax when it is displayed, the recording process of information by the light field camera is analyzed, and a full-parallax 3D display method is proposed which converts the original light field data into an element image array (EIA) and resamples the objects in EIA to adjust the depth. In order to verify the validity of this method, the real 3D object is captured by the light field camera and displayed in the depth priority integral imaging (DPII) system after processing the light field image with the proposed method. The experimental results show that the full-parallax 3D display of light field data can be realized by the proposed method.

Key words imaging systems; three-dimensional imaging; light field camera; depth adjustment; integral imaging OCIS codes 110.6880; 110.1758; 110.3010

1引言

三维信息的采集与显示一直是光学成像领域研究的热点。基于 Adelson 等^[1]提出的全光函数理论,在有限观察角度的静态场景下,光场以平行的双平面分别记录空间光的位置信息(*x*, *y*)与角度信息(*u*, *v*),最终表现为四维函数*L*(*x*, *y*, *u*, *v*)^[2]。光场信息可以使用光场相机进行采集,Ng 等^[3]对Adelson等人的非聚焦型光场相机模型进行改良,通在相机主透镜和传感器之间插入微透镜阵列,以相机主透镜平面和微透镜阵列平面表示四维光场,制备了第一台基于微透镜阵列的手持光场相机。相

较于普通相机只能记录光线强度,光场相机同时还可以记录光线的方向,实现了数字重聚焦的功能^[4]。 得益于其深度采集能力,光场相机在计算机视觉领 域有着广泛的应用^[5-7]。

目前,国内外学者对于光场相机的研究集中在 深度提取^[8-11]、超分辨率成像^[12-13]以及基于光场相 机重聚焦^[14-15]等方面。虽然光场相机获取了三维物 体的深度信息,但利用其数据进行三维物体显示的 研究鲜有报道。Martínez等^[16]通过位移光场图像 的子图像,改变微透镜阵列在相机内部的中间像空 间的聚焦位置,从而改变光场图像参考面相对于微 透镜阵列的位置,但是并没有在三维显示系统上进

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-11-28; 录用日期: 2019-12-26

基金项目:国家自然科学基金(61703185)、高等学校学科创协引智计划(B12018)、江苏省自然科学基金(BK20180597)、 中央高校基础研究经费(252050205171780)

* E-mail: ailyair@jiangnan.edu.cn

行显示。Jenog 等^[17]使用光场相机作为集成成像采 集系统,通过机械控制主透镜和微透镜阵列的距离 来控制光场相机的采样聚焦面,从而实现深度范围 可控采集,但是在显示时对采集到的深度没有进行 处理,其三维重建像的视差较小。Salahieh 等^[18]基 于多视角匹配得到光场相机的深度,对采集到的光 场数据进行视差增强后使用多面板显示器进行三维 显示,但是在显示阶段,多面板显示器的分布方式需 要根据深度分布进行调整以防止空白平面,该显示 方法较为复杂。

本文分析了光场相机成像模型及其像空间与物 空间的深度对应关系,发现中间像空间的深度信息 在被微透镜阵列记录前经过了不均匀的压缩。由此 提出一种基于光场相机原始数据的全视差三维显示 方法,首先将采集的原始数据校正为标准模型并转 化为匹配深度优先集成成像(DPII)显示系统的元素 图像阵列(EIA)。针对光场图像记录的场景深度的 不均匀压缩问题,将采集的物体分别分割到单独的 EIA中;根据物体实际深度比例,对提取的 EIA 通 过像素点位移进行深度调整,所有分割的 EIA 在深 度调整完后重新融合为一张 EIA。最后在 DPII 系 统中进行了真实三维显示实验。

2 光场相机模型及深度压缩

图 1 所示为光场相机的 2D 截面示意图,空间 中不同深度的三点 S₁、S₂、S₃分别经过光场相机的 主透镜在相机内部的中间像空间成像 S₁、S₂、S₃,并 最终被传感器记录下来。不同于传统的相机,光场 相机在记录光线时是相机物镜平面和微透镜阵列平 面两个平面记录光场,传感器位于微透镜后,间距为 微透镜的焦距 f。最终传感器得到的是由若干子图 组成的光场图像,其中每一个子图中的像素坐标记 录了光线的方向信息,子图的坐标记录了光线的空 间信息。此时,微透镜阵列平面相当于传统相机的 传感器,为相机的采样平面,光场相机图像的分辨率 和微透镜阵列的数目是一致的。光场相机微透镜阵 列平面接收到的光场辐照度可以表示为

$$E = \frac{1}{D^2} \iint L_D(x, y, u, v) A(u, v) \cos^4 \phi \mathrm{d} u \mathrm{d} v, \quad (1)$$

式中:D 为相机物镜与微透镜阵列的间距;L_D 为物 距 D 处的光场;A 为相机物镜的光瞳函数; o 为入 射光线和微透镜阵列的夹角。在傍轴近似下,微透 镜平面接收到的光场辐照度可以简写为

$$E = \iint L_D(x, y, u, v) \,\mathrm{d} u \,\mathrm{d} v \,. \tag{2}$$



图 1 光场相机成像模型

Fig. 1 Imaging model of light field camera

对于点 S'_2 来说,此时正位于相机的焦平面上, 像点为 S'_2 在微透镜下对应的所有像素的积分。对 于不在相机焦平面上的两点来说,它们所成的像位 于微透镜阵列的前后两侧,采样平面此时记录的是 它们的离焦信息,离焦点可以由光线几何关系进行 重聚焦。如图 1 中点 S_3 的光路所示,微透镜阵列位 于相机物镜后距离 D 处,而点 S_3 的像' S_3 则位于微 透镜阵列平面之后的位置,与相机物镜平面距离为 $\gamma \cdot D$,其中 γ 为常数。以 S_3 点通过主透镜中心的 光线为例,光线与主透镜平面 p_u 相交,坐标为 u,与 像 S'_3 所在平面 p_x 相交,坐标为 x,由相似三角形可 得光线与微透镜阵列平面 p'_x 相交于 $u + (x-u)/\gamma$ 坐标位置处。空间光线在传播过程中方向不变,设 S'_3 坐标为(u,v,x,y),由图 1 所示的 S_3 点光线传 播的几何关系得 S'_3 所在深度的光场 $L_{D'}$ 为

$$L_{D'}(x, y, u, v) = L_{\gamma \cdot D}(x, y, u, v) =$$
$$L_{D}\left(u + \frac{x - u}{\gamma}, v + \frac{y - v}{\gamma}, u, v\right), \qquad (3)$$

重聚焦后的像平面辐照度表示为

$$E_{D'} = \iint L_{D'}(x, y, u, v) du dv_{\circ}$$
(4)

光场重聚焦的实现表明光场相机单次记录的光 场图像可以一次性记录下一段空间深度内物体的相 对位置信息,重聚焦即可视为在这段空间深度内光 场采样面的位移。在记录光场时,记录的同一根光 线在不同的位置其能量是不变的,所以采样面的位 移可以利用(3)式通过像素点的位移求取。然而,光 场相机的 3D采集能力源于微透镜阵列,微透镜阵 列直接采集到的是 3D物体经过相机主透镜在中间 像空间所成的像,根据光学系统轴向放大率的定义 可以得到,光场相机采集的物体三维信息经过主透 镜在轴向上的放大率为

$$\alpha = \beta_1 \beta_2 , \qquad (5)$$

式中:β₁ 和 β₂ 分别为物点位于两个较近的深度位 置 z₁ 与 z₂ 时的垂轴放大率。主透镜的轴向放大率 是随着物体远离主透镜而增加的,所以中间像空间 中物体像的深度信息是被非均匀压缩的。在光场相 机内部,微透镜阵列记录的像点到微透镜阵列面的 距离为

 $d = D - D_i$,

式中:D;为像距。由于主透镜的不均匀压缩造成像 距的非线性分布,进而微透镜阵列记录的深度信息 也是被非均匀压缩的。3D显示要求将景深范围内 所有的物体的空间信息进行还原,在实际的相机拍 摄场景中,物体与相机的距离通常较远,如此记录的 3D信息在进行 3D显示的时候就会表现出非常窄 的显示视差。为了获得更好的显示观看效果,需要 对光场相机记录的深度信息进行调整。

3 方法原理

由光场相机的成像模型可得,光场的记录过程 可以视为使用微透镜阵列对中间像空间内的像进行 三维采集,由此得到的单幅的光场图像包含了足够 多的三维信息以供在集成成像系统中进行三维显 示。原始光场数据在集成成像系统中的显示可分为 三个处理过程:第一步,使用光场相机采集三维物体 信息并获得光场图像的微透镜阵列模型;第二步,将 原始光场图像转化为 EIA 并进行深度调整;第三 步,将深度调整之后的 EIA 在 DPII 系统中进行显 示。光场数据三维显示的总体流程图如图 2 所示, 其中 θ_x , θ_y 为子图的行和列相对于像素点网格的偏 转角度。



(6)

图 2 光场数据三维显示流程图

Fig. 2 Three-dimensional display process of optical field data

3.1 原始光场模型

光场图像为六边形的子图阵列,如图 3(a)所示。由于相机本身的误差,直接采集光场图像 L₀的子图不是严格的六边形排列,需要提取 L₀ 的微透

镜阵列模型后将其修正为标准六边形微透镜阵列模型 L_s,然后才能使用像素坐标确定每一个子图在图像上的位置^[19]。所以首先需要得到被采集到的光场图像的子图中心分布以及子图的大小。

子图中心的确定需要借助白图像完成,子图的大小在子图中心分布确定之后由光场图形的大小除以子图个数得到。图 3(b)为白图像的局部示意图,白图像为拍摄白色背景的光场图像,由于微透镜的渐晕效应,白图像的最亮点即为光场图像子图的中心坐标点。图 3(c)所示为遍历光场图像

得到的微透镜模型,其中微透镜中心处于非对齐 状态,在水平和竖直方向上并非呈直线分布,且在 使用亮度寻找子图中心点时,同一子图中的中心 位置会出现多个最亮点,此时子图中心便不是像 素点的中心,而是会偏离像素点中心,落到像素网 格的边界上。



图 3 微透镜阵列栅格模型。(a) 光场相机采集的原始数据;(b) 白图像;(c) 子图像中心分布 Fig. 3 Lenslet array grid model. (a) Raw data captured by light field camera; (b) white image; (c) subimage center distribution

3.2 光场数据转化为 EIA

得到原始光场图像 L_0 的微透镜模型之后,对 原始图像的偏转角度 k_{opt} 进行计算,然后根据 k_{opt} 将 L_0 与像素点网格对齐,得到标准光场图像 L_s 。在 原始的光场图像中,由于设备本身误差,在水平方向 和竖直方向上,子图像的排列并非直线;子图中心标 定时,多个最亮点像素导致子图像中心点落在了像 素点的边缘上,光场图像子图的整体排列如图 4(a) 所示,子图的行和列相对于像素点网格有一定的偏 转角度 θ_x , θ_y 。根据标定出的子图像中心位置在水 平和竖直方向上的偏差进行校正,为了便于操作,对 中心坐标点所在的行与列进行一阶线性拟合,求得 最佳斜率,基于该斜率进行旋转来校正子图像中心 的偏差。在水平方向上选取 n 行,求得拟合直线方 程为

$$y = (x; k_{xi}), i = 1, 2, \cdots, n,$$
 (7)

式中:k_{xi}为x方向上第i条拟合直线的斜率;(x,y)为微透镜中心的坐标。竖直方向选取 n 列,求得拟合直线方程为

$$x = (y; k_{yj}), j = 1, 2, \cdots, n,$$
 (8)

式中:kyj为y方向上第j条拟合直线的斜率。

对于整个光场图像,结合(7)式与(8)式可求得 相对像素网格的最优倾斜角为

$$k_{\text{opt}} = \frac{1}{2n} \Big(\sum_{i=1}^{n} k_{xi} + \sum_{j=1}^{n} k_{yj} \Big) .$$
 (9)

经过旋转的光场图像结构如图 4(b)所示,此时

光场图像相对于像素点网格可认为没有角度偏移, 然而,如图 4(b)右上角所示,由图像的大小与子图 数目求解出的子图大小为 H×W,并非是像素点尺 寸的整数倍,需要进行放大以对齐像素点。放大过 后的子图大小 H'×W'为像素点尺寸的整数倍,光 场图像初步校正为标准六边形排列,如图 4(c)所 示,此时在水平方向和竖直方向上子图中心的排列 与像素点一致且子图像的中心位于像素点中心。

得到标准的六边形光场图像 Ls 后,将子图的 排列方式变为呈正方形排列的初始 EIA 即 E_0 。光 场相机内部的微透镜阵列为 328×378 六边形阵列, 整体为正方形的采样面。以校正的子图中心和半径 得到每一个六边形子图所包含的像素区域,将这些 子图进行正交排列。由图 4(d)可得,直接对光场图 像进行切分并将排列方式改变为矩形排列会造成图 像在竖直方向上发生拉伸,且此时子图的形状仍然 是六边形,其外接四边形为矩形而非正方形。这两 个问题可以通过一维线性插值解决,通过以子图为 单位间隔在水平方向上进行插值可以消除竖直方向 上的拉伸,使图像恢复原本的比例,即 379×378 阵 列。通过对子图内部的像素进行插值处理,可将子 图外接四边形变为正方形。如图 4(e)所示,插值后 的图像为呈正方形排列的正方形子图,其中子图中 的黑色部分为不包含信息或者辐照度很弱的像素 点,这些像素点在使用微透镜阵列显示时会出现周 期性的暗影,故舍弃这些像素点,取子图内的正方形



图 4 从光场图像中提取 EIA。(a) 原始光场图像 L_s 相对于像素网格的角度偏移;(b) 整体旋转以消除偏移;(c) 子图对齐 像素网格的标准六边形光场图像;(d) 直接正交排列的子图像;(e) 插值后正交排列的正方形子图像;(f) 去除暗区域 后从图 4(e)的有效区域中提取 EIA

Fig. 4 EIA extracted from light field image. (a) Angle deviation of original light field image L_s relative to pixel grid;
(b) overall rotation to eliminate offsets;
(c) standard hexagon light field image with subimage aligned with pixel grid;
(d) subimages with orthogonal arrangement;
(e) square subimages with orthogonal arrangement after interpolation;
(f) EIA extracted from effective coverage in Fig. 4(e) after removing dark area

有效区域,得到图 4(f)所示的初始 EIA。

3.3 深度调整匹配 DPH 显示系统

图 5(a)所示为光场相机采集空间中不经深度 调整的不同深度物体的过程,空间中两物体与光场 相机的距离分别为 Z_1 、 Z_2 ,光场相机聚焦于 D_{cap} 处, 两个到相机距离为 D_1 、 D_2 的物体在像空间中分别 成像于微透镜面前方 d_1 、 d_2 处。经过主透镜成像 之后,在中间像空间内深度是被非均匀压缩的,即 $D_1/D_2 < d_1/d_2$ 。显示阶段如图 5(b)所示,采集的 两物体的显示深度分别为 D'_1 、 D'_2 ,显示深度之间的 关系为 $D_1/D_2 < D'_1/D'_2$,直接观察到的是深度信息 压缩的像。

为了消除深度上的非均匀压缩,需要对相机微透镜阵列记录的深度信息进行调整,使得所有的深度具有相同的缩放倍数。根据高斯公式,图 5(a)中的字母"W"的物距与像距关系为

$$D_{i2} = \frac{Z_2 F}{Z_2 - F},$$
 (10)

式中:F为相机的焦距;D₁₂为字母"W"的像距。由 此可以得到中间像空间内的像点与微透镜平面的距 离为

$$d_2 = D - D_{i2} = D - \frac{Z_2 F}{Z_2 - F}, \qquad (11)$$

式中:D 为主透镜面与微透镜面的距离。从(11)式

可知,如果要改变中间像空间像点与微透镜面的距离,可以通过调整(11)式中右边第一项 D来实现。 光场相机可以记录光线方向的特性使得调整主透镜 和微透镜之间的距离能够得以实现。如图 5(c)所示,深度调整的目标是为了使 $d_1/d_2 = D_1/D_2$,故 d_2 需要调整为

$$d'_{2} = \frac{D_{2}}{D_{1}} \left(D - \frac{Z_{1}F}{Z_{1} - F} \right), \qquad (12)$$

由此求解出微透镜阵列平面向后调整距离的参数为

$$\gamma = 1 + \frac{d'_2 - d_2}{D}.$$
 (13)

由(3)式可知,确定距离参数γ后,使用像素点位移 可求解出调整的目标深度上的光场分布。调整之后 的显示距离为

$$D'_{2_obj} = \frac{f_{md}}{f_{mc}} \left[\frac{D_2}{D_1} \left(D - \frac{Z_1 F}{Z_1 - F} \right) \right], \quad (14)$$

式中: f_{md}为显示系统微透镜阵列的焦距; f_{mc}为光场相机微透镜就阵列的焦距。

为了实现上述的深度调整,需要将采集到的物体提取出来并分别进行深度调整,然而,在 EIA 中物体不具有完整的轮廓,对物体进行提取十分困难。 针对此问题本文提出了一种基于亚图像阵列 (SIA)^[20]的深度调整方法,将 EIA 转化为具有连续 轮廓的SIA 后对物体进行提取。图6所示为EIA-



图 5 光场相机深度调整原理示意图。(a) 光场相机采集过程;(b) 未经深度调整的 EIA 的 3D 显示过程;(c)像空间深度调整 Fig. 5 Schematic of depth adjustment for light field camera. (a) Capture process of light field camera; (b) 3D display process of EIA without depth adjustment; (c) depth adjustment of image space

SIA 深度调整的流程图,使用正交投影映射算法将 EIA 转换为 SIA;在 SIA 中,对每一个亚图像(SI)中 的两个字母进行分割,得到只包含一个目标的两个 SIA。将分割后的只含有单个物体的 SIA 再转换回 EIA 得到只含单个物体的 EIA,按照上述的原理通

过像素点位移对物体进行深度调整,最后将分割的 各物体的 EIA 融合为一张 EIA。在融合之后的场 景中,两物体在中间像空间中的像的间距增大,从而 物体显示时的视差增大,获得了接近物体在真实空 间中的相对位置关系的显示效果。



图 6 EIA-SIA 深度调整 Fig. 6 EIA-SIA depth adjustment

4 实验与分析

为了验证光场相机在 DPII 系统下的 3D 显示 能力,使用光场相机采集物体的光场数据,使用本文 方法对光场图像进行处理后将其在 DPII 系统下进 行显示。实验使用 lytro 第一代商品级光场相机进 行数据采集与分析,相机主透镜焦距为6.4 mm,图 像传感器像素尺寸为 1.4 μm,分辨率为 3280× 3280,微透镜尺寸为 14 μm,微透镜阵列整体为 328×378 六边形阵列。实验设置两组,如图 7(a)、 (b)所示,以相机为距离零点,使用光场相机分别采 集距离相机不同位置处的一组三维玩偶和一组平面 字母"WM"。DPII 显示系统由液晶显示器 (LCD) 与微透镜阵列组成,如图7(c)所示,本文实验使用



图 7 光场采集与三维显示实验设置。(a) 三维玩偶;(b) 平面字母;(c) DPII 三维显示系统

Fig. 7 Experimental setup for optical field acquisition and 3D display. (a) 3D doll; (b) panel letter; (c) DPII 3D display system

平板电脑与微透镜阵列组合的 DPII 显示系统,平板 电脑使用 NOKIA N1,分辨率为 2048×1536,像素 尺寸为 78.37 μ m,微透镜阵列使用正方形 140×150 阵列,阵列单元为 1 mm×1 mm,焦距为 12 mm。 相机位于显示系统上方 475 mm 处。

采集的图像使用相机自带的白图像数据集进行 解码处理,并对两组图像使用本文提出的方提取 EIA 后进行深度调整。以图 7(b)中采集到的平面 字母"WM"为例,为了匹配显示器的大小,使用光场 相机采集原始数据后以物体为中心取图 8(a)所示 的 120×120 EIA,每个元素图像(EI)中包含 9×9 个像素点。使用正交投影映射算法将图 8(a)中的 EIA 转换为图 8(b)所示的 9×9 SIA,每个 SI 包含 120×120个像素。在SIA中,如图8(b)右侧的放



图 8 EIA-SIA 深度调整。(a) 初始 EIA;(b) 由初始 EIA 得到的 SIA;(c) 字母"W""M"的深度调整;(d) 融合后的深度调整 EIA Fig. 8 EIA-SIA depth adjustment. (a) Original EIA; (b) SIA generated from original EIA; (c) depth adjustment of letters "W" and "M"; (d) depth adjusted EIA after fusion

大图所示,每一个 SI 中的物体都具有连续的轮廓, 对图 8(b)所示的每一个 SI 中的两个字母进行分 割,得到只包含一个目标的两个 SIA,提取方法使用 Wang 等^[21]提出的图形分割方法。将分割后的只含 有单个物体的 S_{obj1} , S_{obj2} 再转换回 EIA,得到图 8(c) 中间所示的 E_{obj1} , E_{obj2} 。按照上述的原理对物体进 行深度调整,得到图 8(c)左侧所示的 E_{adj1} , E_{adj2} 。最 后将分割的各物体 EIA 融合为一张 E_{opt} ,如图 8(d) 所示。

为了验证本文所提方法对 EIA 所包含的深度 信息的调整作用,使用 EIA 的计算机重建方法分别 对两组未经深度调整的 EIA 与经过深度调整的 EIA 进行重建,两物体的重建深度如表1所示。

由表1的两组对比结果可知,在未进行深度调整时,由于相机主透镜在深度方向上的放大率随物体远离相机而减小,虽然同一组中的物体处于不同的深度并且两组物体深度也不相同。未经深度调整时,狮子玩偶重建的深度差为12 mm,而两字母均重建到了36 mm附近,深度与实际严重不符。经过深度调整之后,两实验组中前方物体和后方物体之间的重建距离有了明显的增加,更接近它们在真实

表1 重建深度对比

Table 1 Comparison of reconstruction depth

Group	Display method	Distance	Distance
		between	between
		camera	camera
		and front	and rear
		object $/mm$	object /mm
Lion	Without depth adjustment	24	36
	With depth adjustment	24	84
	With depth adjustment	21	04
Letter	Without depth adjustment	36	36
	With depth adjustment	36	84

空间中的位置关系。值得注意的是,依据(14)式所 计算出的结果,深度调整之后两物体应分别重建到 74.76 mm 与 69.96 mm 附近,而 CIIR 算法只能重 建微透镜焦距倍数的深度,故与理论计算结果有细 小的差别。

为了进一步验证本文方法在显示上的有效性, 将得到的四组 EIA 在图 7(b)所示的 DPII 显示系统 中显示并在上、中、下、左、右 5 个视角记录物体的 3D 显示效果。显示效果对比图如图 9 所示,可以看 出,在未进行深度调整的图 9(a)、(c)中,以中心位 置的图像为参考,其他视角观察到的图像中的物体



图 9 多视角 3D 显示对比。(a)(c)未经深度调整;(b)(d)深度调整后

Fig. 9 Comparison of multi-view 3D display. (a)(c) Without depth adjustment; (b)(d) with depth adjustment

相对位置的改变非常小,与场景的实际位置分布相 差较大。在使用本文方法进行深度调整之后,如 图 9(b)、(d)所示,深度调整后,视差随之增加,以中 心位置为参考,其他视角观察到的图像中的物体相 对位置的改变较大,更贴近实际场景中的观看效果。

真实显示和计算机重建结果表明,应用本文方 法可以解决光场相机显示视差小的问题。另外,考 虑现有集成成像采集系统中的串扰、像差以及非平 行采集的失真等问题^[22],光场相机可以作为集成成 像获取的有效工具,结合集成成像以及三维显示的 应用前景,所提方法有较大应用价值和科研价值。

5 讨 论

本文实验通过对光场相机采集的具有不同深度 的两组物体进行深度调整,实现了全视差三维显示。 实验组中选取的是三维空间中两组已知深度的物 体,对于深度连续变化的三维物体,在深度方向上可 以视为由离散的切片组合而成。光场图像包含了被 采集场景的多个视角的信息,这些信息可以用来生 成场景深度图。由光场数据获得的深度图为中间像 空间中的像到微透镜阵列面的深度信息,将这些深 度信息转化为主透镜的像距,利用高斯公式可以求 得物空间中物点距离相机的实际深度。由于透镜组 的像差以及生产制造和安装过程中的误差,深度图 和实际深度值之间的对应关系与由高斯公式结合像 差校正函数得到的理想模型存在误差,在应用本文 方法之前,应对相机进行度量标定、像差校正。所 以,对于连续变化的物体,应用本文方法进行深度校 正的思路为:使用采集的光场图像多视角信息生成 场景深度图,在深度图中不同深度的区域对三维场 景进行切片,然后对不同深度的切片以本文方法进 行深度图校正,最后进行融合显示。连续曲面的显 示与实验部分展示的两个深度的物体显示在原理上 是相同的,但在实现上依赖于深度图的产生。由于 存在着基线窄这一限制,目前针对消费级光场相机 的深度图,如 Lytro desktop software 生成的深度图 及参考文献[11]等获得的深度图,仍存在产生的深 度图轮廓模糊以及识别范围有限的问题。随着光场 相机深度估计的不断完善,本文方法在更复杂场景 下的应用能力也会不断增强。

6 结 论

基于光场相机采集的原始数据,提出了一种在 集成成像系统下进行全视差三维显示的方法。通过 将光场图像转化为 EIA 并根据物体的实际位置关 系对物体进行深度调整,解决了光场相机数据在三 维立体显示方面存在的深度浅、视差小的问题。首 先分析了光场相机成像模型与深度信息记录过程中 的非均匀压缩问题。原始光场图像被校正为标准排 列后,进而被转化为可以直接进行三维显示的 EIA。 将 EIA 转化为 SIA,在 SI 中提取单个物体得到只包 含单个物体的 EIA 集合,并分别根据其空间位置关 系,通过像素点位移进行深度调整后再融合为一张 EIA,融合后的 EIA 在 DPII 系统中具有全视差显示 效果。真实光学实验采集了在不同位置处的三维物 体,并对比了应用所提方法与未应用所提方法的三 维显示效果,实验结果表明,在应用了所提方法的情 况下,显示场景的视差被大幅提高,证实了所提方法 的有效性。另外,考虑到传统集成成像采集系统中 存在的串扰、像差等问题,光场相机可以作为集成成 像获取的有效工具。

参考文献

- [1] Adelson E H, Wang J Y. Single lens stereo with a plenoptic camera [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- [2] Nie Y F, Xiangli B, Zhou Z L. Advances in light field photography technique [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 28 (5): 563-572.
 聂云峰,相里斌,周志良.光场成像技术进展[J].中 国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.
- [3] Ng R, Levoy M, Brédif M, et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[R]. Stanford University Computer Science Technical Report, 2005: 1-11.
- [4] Ng R. Fourier slice photography[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 735.
- [5] Yang P, Wang Z M, Yan Y Z, et al. Close-range photogrammetry with light field camera: from disparity map to absolute distance [J]. Applied Optics, 2016, 55(27): 7477-7486.
- [6] Lam E Y. Computational photography with plenoptic camera and light field capture: tutorial[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32 (11): 2021-2032.
- [7] Robles-Kelly A, Wei R, You S D. A multispectral light field camera for 3D imaging from a single lens [C] // 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications, June 25-28, 2018, Orlando, Florida. Washington, D. C.: OSA, 2018:

JW5E.1.

- [8] Wang S Z, Liao W J, Surman P, et al. Salience guided depth calibration for perceptually optimized compressive light field 3D display[C] // 2018 IEEE/ CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE, 2018: 2031-2040.
- [9] Hahne C, Aggoun A, Velisavljevic V, et al. Refocusing distance of a standard plenoptic camera
 [J]. Optics Express, 2016, 24(19): 21521-21540.
- [10] Chen Y Q, Jin X, Dai Q H. Distance measurement based on light field geometry and ray tracing [J]. Optics Express, 2017, 25(1): 59-76.
- [11] Jeon H G, Park J, Choe G, et al. Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera[C] // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2015: 1547-1555.
- [12] Lumsdaine A, Georgiev T. Full resolution lightfield rendering [EB/OL]. (2008-01-05) [2019-09-05]. http://www.tgeorgiev.net/FullResolution.pdf.
- [13] Sun F S, Han X. Super-resolution algorithm based on precise color vector constraint of light field camera
 [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0304001.
 孙福盛,韩燮. 光场相机精确色彩矢量约束下的超分 辨率算法[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0304001.
- [14] Chen Q, Xu X P, Jiang Z G, et al. Watermarking scheme for four dimensional light field imaging based on light field camera and its evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0411003.
 陈琦,徐熙平,姜肇国,等.基于光场相机的四维光 场图像水印及质量评价[J].光学学报, 2018, 38(4):

0411003.

- [15] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B. Linear volumetric focus for light field cameras[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(2): 1-20.
- [16] Manuel M, Adrián D, Héctor N, et al. From the plenoptic camera to the flat integral-imaging display[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9117: 91170H.
- [17] Jeong Y, Kim J, Yeom J, et al. Real-time depth controllable integral imaging pickup and reconstruction method with a light field camera[J]. Applied Optics, 2015, 54(35): 10333-10341.
- [18] Salahieh B, Hunter S, Wu Y, et al. Light field retargeting for multi-panel displays[EB/OL]. (2017-10-05)[2019-09-05]. https: // arxiv.org/abs/1710. 02167.
- [19] Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras [C] // 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2013: 1027-1034.
- [20] Park J H, Kim J, Lee B, et al. Three-dimensional optical correlator using a sub-image array[J]. Optics Express, 2005, 13(13): 5116-5126.
- [21] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [22] Park J H , Hong K , Lee B . Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. Applied Optics, 2009, 48(34): 77-94.