

# 基于全息定向散射屏的光场三维成像系统研究

刘永春<sup>1</sup> 龚华军<sup>1</sup> 耿征<sup>2</sup> 沈春林<sup>1</sup> 张赵行<sup>2</sup> 李伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

<sup>2</sup>中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100190

**摘要** 建立了一个基于全息定向散射屏的光场三维(3D)成像系统,系统能够实现真实场景与虚拟场景的光场三维显示。详细地分析了光场三维显示在垂直全息定向散射屏下的视图图像内容和投影图像的生成方法,开发了相机采集校正算法和投影显示校正算法,完成了光场三维采集与显示系统的硬件结构设计和软件开发。实验进行了真实场景光场和虚拟场景光场的三维成像,实验结果验证了光场三维成像系统的可行性,同时证明系统中投影图像生成方法和校正算法是正确的。

**关键词** 成像系统; 三维显示; 三维采集; 光场; 全息定向散射屏

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101103

## Research of Light-Field 3D Imaging Systems Based on Holographic Directional Scattering-Screen

Liu Yongchun<sup>1</sup> Gong Huajun<sup>1</sup> Geng Zheng<sup>2</sup> Shen Chunlin<sup>1</sup> Zhang Zhaoxing<sup>2</sup> Li Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210016, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Complex System and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100190, China

**Abstract** A light-field three-dimensional (3D) imaging systems based on holographic directional scattering-screen is developed, which is able to realize light-field 3D display of real scene and virtual scene. The viewpoint image and the generation method of projected image under holographic directional scattering are detailedly analyzed. The camera calibration algorithm and projector display calibration algorithm are developed, and hardware design and software development of light-field 3D acquisition and 3D display are achieved. Light-field 3D imaging of both real scene and virtual scene are completed in the experiment, and the results of which demonstrate the proposed system is feasible. Meanwhile the results also prove the generation method of projected image and the calibration algorithms are correct.

**Key words** imaging systems; 3D display; 3D acquisition; light-field; holographic directional scattering-screen

**OCIS codes** 110.6880; 330.1400; 160.4670

## 1 引言

人们所处的物理世界是一个三维(3D)的空间,虽然传统的二维采集和二维的显示技术得到了前所未有的发展,但是二维的图像无法记录和显示出物理空间的第三维信息(深度信息)。这种技术的缺陷极大地限制了人们理解复杂真实世界的的能力。三维采集与三维显示技术可以弥补传统二维采集和二维显示的缺陷,真实的记录和重现出三维的场景,使人们更加直观真实地获取视觉信息,具有重要的研究意义。

光场三维成像包含光场三维采集与光场三维显示两个部分。随着计算机视觉技术、数字视频技术、视频压缩编码技术的发展及传感器和投影技术的进步,光场三维成像技术随之产生并受到极大的关注。斯坦福大

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-05-20; 网络出版日期: 2015-09-07

基金项目: 国家863计划(2012AA011903)、江苏省研究生科研创新计划项目(CXLX13\_158)

作者简介: 刘永春(1987—),男,博士研究生,主要从事三维采集与三维显示方面的研究。E-mail: lyc03516@126.com

导师简介: 龚华军(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事计算机控制和三维成像等方面的研究。

E-mail: ghj301@nuaa.edu.cn

学<sup>[1]</sup>、三菱研究实验室<sup>[2]</sup>和清华大学<sup>[3]</sup>等研究机构都构建了不同规模的阵列相机进行光场的采集;LYTRO公司推出了一款基于微镜阵列的LYTRO光场相机<sup>[4]</sup>,与相机阵列不同,它是在一台传统相机的传感器平面前添加微镜阵列来实现对光场的采集,后续可以进行重聚焦;基于掩膜的光场采集技术<sup>[5-7]</sup>也成为了一个研究热点,它的思想是在镜头与传感器之间添加一层光学元件掩膜,对进入光圈的光线进行调制,之后通过线性或非线性的算法进行光场的恢复。在光场三维显示方面,Holografika公司<sup>[8-9]</sup>提出并实现了HoloVizo显示系统,它利用了全息屏和一定数量的投影仪来实现多视光场的三维显示,系统中的全息屏是由垂直散射膜和有机玻璃构成,系统具有水平视差。Nagano等<sup>[10]</sup>开发了基于投影阵列的三维人脸显示系统,系统对投影仪的大小和分辨率进行了优化,可以显示视场角为110°的裸眼三维人脸,可应用于三维电话会议和交互式娱乐等领域。此外,MIT的Wetzstein等<sup>[11-12]</sup>提出并实现了计算光场多层液晶三维显示系统,将光场进行张量分解后通过背光和多层液晶屏进行显示。四川大学的王琼华等<sup>[13-15]</sup>在自动立体显示方面投入了大量的研究,取得了众多的研究成果。浙江大学刘旭等<sup>[16-18]</sup>针对光场多投影三维显示和360°水平光场三维显示作了深入的研究,研发了多个光场显示系统。但在光场采集与显示集成方面投入的研究较少,北京邮电大学的Sang等<sup>[19-20]</sup>验证了大尺寸实时全彩色的三维显示系统,系统搭建了64个视点的端对端光场采集与三维显示系统,但文章对三维显示的原理与技术方案的没有进行详细地论述。

本文建立了一种基于全息定向散射屏的光场三维成像系统,系统可实现虚拟场景的光场三维显示和真实场景光场的实时采集和高分辨率三维显示。完成了系统的硬件设计和软件开发,对视点图像的内容和投影图像的生成进行了详细地分析。实验的结果呈现出非常逼真的裸眼三维显示效果,证明了系统的有效性和设计方法的可行性。

## 2 光场三维显示原理及实现方法

### 2.1 光场的表示

Adelson等<sup>[21]</sup>在1991年提出利用全光函数来描述视觉系统中被感知的各种视觉刺激。全光函数是基于观察者对光在空间与时间上的描述。所描述的全光函数的数学形式为 $P(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$ ,它是一个7维全光函数。其中 $(x, y, z)$ 表示光线在空间中的坐标, $(\theta, \phi)$ 表示光线在空间中垂直与水平的方向角度, $\lambda$ 和 $t$ 分别是光的波长和光被观察到时的时间。

现实中的三维物体可以被看作由众多的三维点构成,每个三维点都主动或者被动的向周围发射光线,那些进入人眼睛的光线使得人们可以看到对应的三维物体。因此,可以使用全光函数来表示三维物体的光场。由于光线在自由空间中波长的变化很小,对于单独的观察来说,某一时刻在特定的位置观察到的物体,它的光场可以表示为5维的全光函数形式: $L = L_{O_i}(x_i, y_i, z_i, \theta, \phi)$ ,其中 $i = 1, 2, \dots, N$ 为物体三维点的数量。如图1所示。

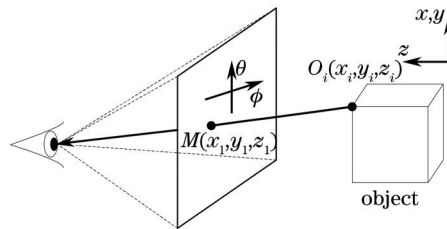


图1 特定位置全光函数的表示

Fig.1 Representation of light field in specific location

由于5维的光场信息量巨大,通常在进行光场三维显示的过程中,对垂直视差的光场信息进行压缩,只处理水平视差的光场信息,此时的光场表示为

$$L = L_{O_i}(x_i, y_i, z_i, \phi), i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

图1中,假设全息定向散射屏幕位于 $z = z_1$ 处,三维点 $O_i$ 发出的光线与屏幕相交与 $M$ 点,方向向量为 $(\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ ,直线 $O_i M$ 可以表示为

$$\frac{x_1 - x_i}{\sin \theta \cos \phi} = \frac{y_1 - y_i}{\sin \theta \sin \phi} = \frac{z_1 - z_i}{\cos \theta}, \quad (2)$$

因此可以计算出  $M$  点的  $xy$  坐标为

$$\begin{cases} x_1 = (z_1 - z_i) \tan \theta \cos \phi + x_i \\ y_1 = (z_1 - z_i) \tan \theta \sin \phi + y_i \end{cases} \quad (3)$$

令  $\alpha = \tan \theta \cos \phi$ ,  $\beta = \tan \theta \sin \phi$  分别表示  $x$  和  $y$  方向的空间角度信息, (3)式可写成

$$\begin{cases} x_1 = (z_1 - z_i) \alpha + x_i \\ y_1 = (z_1 - z_i) \beta + y_i \end{cases} \quad (4)$$

此时三维点  $O_i$  发射的光线  $O_i M$  在屏幕的光场可表示为  $L_{O_i}(x_1, y_1, \alpha, \beta)$ 。

## 2.2 光场调制与视点图像内容

开发的光场三维成像系统, 是利用投影仪阵列和光学定向散射屏对目标光场进行恢复。系统依赖的三维线索<sup>[22]</sup>主要是双目视差和移动视差。实现水平双目视差的方法主要是通过具有分光特性的定向散射屏对光场进行水平方向的调制和垂直方向的散射。由于只考虑水平方向的光场信息, 将垂直方向  $\beta$  的信息进行压缩, 光场可进一步表示为  $L(x, y, \alpha)$ 。

全息定向散射屏的水平散射角度为  $1^\circ$  左右, 基本不改变光线的方向; 而在垂直方向的散射范围可以到达  $60^\circ$ , 调制函数可以表示为

$$\alpha' = F(x, y, \alpha), \quad (5)$$

假设单个投影仪投出的光线对应的光场为

$$L_i(x, y, \alpha) = \iint L_i(x, y, \alpha) dx dy = I_i(x, y). \quad (6)$$

$n$  个投影对应的光场通过全息定向散射屏后, 被调制为

$$L_{\text{sum}}(x, y, \alpha) = \sum_{i=1}^n \iint L_i(x, y, \alpha) F(x, y, \alpha) dx dy = \sum_{i=1}^n I_i(x, y) F(x, y, \alpha), \quad (7)$$

在观察区的某一位置使用一台摄像机对调制后的光场进行采样, 捕获的图像即为此处对应的视点图像, 为

$$I_{O_c}(x, y) = \sum_{i=1}^n I_i(x, y) F\{x, y, [\alpha - \varphi(x, y, O_c)]\}, \quad (8)$$

式中  $O_c$  为摄像机的光心,  $\varphi(x, y, O_c)$  为摄像机捕获的光场水平方向的角度。从(8)式可以看出, 观察区中看到的图像是由多个投影仪图像经定向散射屏调制后拼接而成。如图2所示, 观察区中  $V_j$  处的图像来自  $i$  个投影图像调制后的拼接。

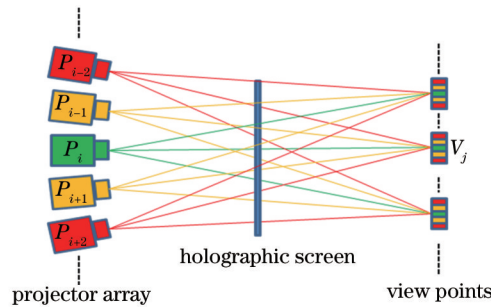


图2 全息定向散射屏的光场三维显示

Fig.2 Light-field 3D display of holographic directional scattering-screen

## 2.3 投影图像的生成

(8)式说明观察区视点图像并不是某一位置投影仪对应的投影图像, 而是多个投影子图像的拼接。因此, 投影图像的生成是光场三维显示的关键。

### 2.3.1 模型渲染

以全息定向散射屏的中心为原点建立三维坐标系。假设系统中的投影仪阵列呈圆弧行排列, 圆弧半径为  $R_p$ , 相邻投影仪的角度间隔为  $\theta$ ; 观察区的视点分布为半径为  $R_v$ 、高度为  $H_v$  的一段圆弧  $\hat{l}_v$ ;  $S(x_0, y_0, z_0)$  为目标三维物体表面上的任意一点。不失一般性, 分析投影仪阵列中的投影仪  $P_i(x_{P_i}, y_{P_i}, z_{P_i})$  对应的三维点  $S(x_0, y_0, z_0)$  的光场重建。如图3所示。

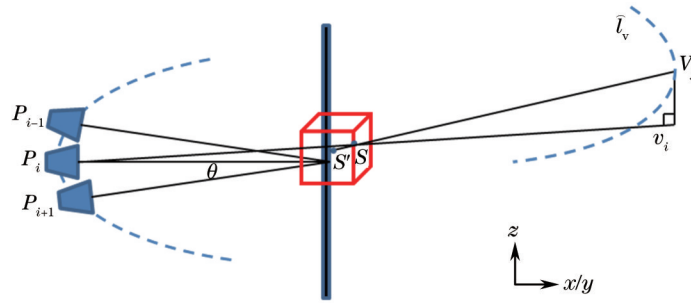


图3 模型渲染的投影图像生成

Fig.3 Projected image generation of model rendering

连接投影仪  $P_i$  的光心与三维点  $S$  并延长至观察区视点分布圆弧  $\hat{l}_v$  所在的柱面, 交点记为  $v_i$ 。光线  $P_i S$  的方程可以表示为

$$\frac{x - x_0}{x_{p_i} - x_0} = \frac{y - y_0}{y_{p_i} - y_0} = \frac{z - z_0}{z_{p_i} - z_0} = k_{p_i S}, \quad (9)$$

式中  $k_{p_i S}$  为比例系数。视点分布圆弧  $\hat{l}_v$  所在的柱面可写为

$$x^2 + y^2 = R_v^2, \quad (10)$$

联立(9)式和(10)式, 可以计算出比例系数  $k_{p_i S}$  为

$$k_{p_i S} = \frac{-(x_{p_i} - x_0)x_0 - (y_{p_i} - y_0)y_0}{(x_{p_i} - x_0)^2 + (y_{p_i} - y_0)^2} - \frac{\sqrt{[(x_{p_i} - x_0)^2 + (y_{p_i} - y_0)^2]R_v^2 - (x_{p_i}y_0 - y_{p_i}x_0)^2}}{(x_{p_i} - x_0)^2 + (y_{p_i} - y_0)^2}, \quad (11)$$

于是  $v_i$  的三维坐标可表示为

$$\begin{cases} x_{v_i} = k_{p_i S}(x_{p_i} - x_0) + x_0 \\ y_{v_i} = k_{p_i S}(y_{p_i} - y_0) + y_0, \\ z_{v_i} = k_{p_i S}(z_{p_i} - z_0) + z_0 \end{cases} \quad (12)$$

因此可以知道与  $v_i$  对应的视点  $V_j$  的坐标为  $V_j(x_{v_i}, y_{v_i}, H_v)$ 。从图3中可以看到, 在视点  $V_j$  处观察到的三维点  $S$ , 其实是由屏幕上的  $S'$  点沿着  $SV_j$  方向发出的光线。由  $V_j$  和  $S$  的三维坐标, 可以得到直线  $V_j S$  的方程为

$$\frac{x - x_0}{x_{v_i} - x_0} = \frac{y - y_0}{y_{v_i} - y_0} = \frac{z - z_0}{h_v - z_0} = k_{v_i S}, \quad (13)$$

此时全息定向散射屏的法向量为  $\mathbf{n} = (1, 0, 0)$ , 表面方程可以写为

$$1 \cdot (x - 0) + 0 \cdot (y - 0) + 0 \cdot (z - 0) = 0, \quad (14)$$

同理, 联立(13)式和(14)式, 并计算得到  $S'$  的三维坐标为

$$\begin{cases} x_{S'} = k_{v_i S}(x_{v_i} - x_0) + x_0 \\ y_{S'} = k_{v_i S}(y_{v_i} - y_0) + y_0, \\ z_{S'} = k_{v_i S}(z_{v_i} - z_0) + z_0 \end{cases} \quad (15)$$

式中  $k_{v_i S} = \frac{-x_0}{x_{v_i} - x_0}$ 。通过透射投影变换, 计算三维点  $S'$  对应的投影仪中的二维像素, 并将光线的强度和颜色信息赋值给对应的二维像素。利用这种方法可以得到整个物体在投影仪  $P_i$  方向上的光场对应的完整的二维投影图像。

### 2.3.2 相机采集

模型渲染对应的投影图像生成方法需要预先对三维场景进行建模。当需要显示真实的场景光场时, 由于场景的复杂程度高, 建模较为困难, 此时模型渲染的方法并不合适。针对真实场景的光场三维显示, 往往会利用相机采集光场多视图像的方式生成投影图像。

假设在全息定向散射屏前放置圆弧形排列且均匀分布的  $k$  台相机, 相机采集到的显示图像记为  $I_{o_j}(x, y), j \in 1, 2, \dots, k$ , 投影图像记为  $I_{o_p}(x, y), i \in 1, 2, \dots, n$ 。将每个相机采集图像对应的(8)式联立得到

$$I_c = T I_p, \quad (16)$$

式中  $I_c$ 、 $I_p$  分别为相机图像集合与投影图像集合,  $T$  为联立矩阵。若  $T$  存在逆矩阵, 则投影图像  $I_p$  为

$$I_p = T^{-1}I_c, \quad (17)$$

这种求解投影图像的方法计算量巨大, 通常在实现过程中不宜采用。

全息定向散射屏的特性是对水平方向上的光线几乎没有散射, 调制函数  $F(x, y, \alpha)$  的取值对水平方向角度变化较敏感, 对垂直方向角度变化不显著。对于显示屏幕上任意的一点  $S(x, y)$ , 如果满足

$$\varphi(x, y, O_{c_j}) = \varphi(x, y, O_{p_i}), \quad (18)$$

式中  $\varphi(x, y, O_{c_j})$  和  $\varphi(x, y, O_{p_i})$  分别为点  $S$  与相机光心和投影光心的连线方向光线的水平角度。根据(8)式, 可以近似地认为

$$I_{o_j}(x, y) = I_{o_i}(x, y), \quad (19)$$

因此, 在相机排列足够紧密时, 可以根据(19)式的原则生成投影图像。当无法采集到稠密的光场时, 可以借助压缩传感<sup>[23]</sup>或图像插值的方法计算出稀疏相机之间光场图像, 再使用(19)式生成对应的投影图像。

### 3 系统的实现

#### 3.1 系统的硬件结构

构建的基于全息定向散射屏的光场三维成像系统主要包含光场采集和光场显示两个主要部分, 系统的硬件结构如图4所示。

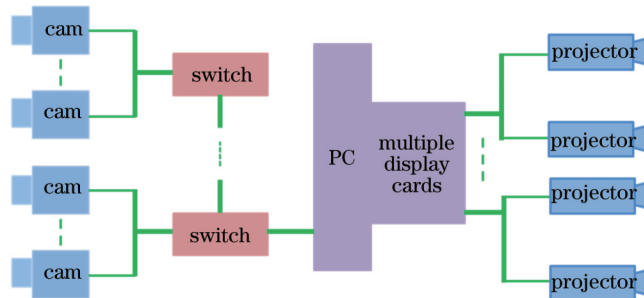


图4 光场三维成像系统的硬件结构框图

Fig.4 Hardware structure diagram of light-field 3D imaging system

采集端的相机阵列(GigE接口)采集真实场景的光场, 相机阵列呈圆弧形紧凑排列, 光心近似地相交于一点, 通过交换机与计算机进行连接。显示端由投影仪阵列(HDMI接口)组成, 借助分屏器和多路显卡与计算机连接, 投影仪阵列交错紧密排列, 前后投影仪间的角度间隔与相邻相机角度间隔相同。

#### 3.2 系统的软件模块

系统的软件模块根据硬件结构进行设计, 采集端实现的功能有相机阵列对光场的采集、图像校正、投影图像生成, 采集同步控制; 显示端包含投影校正和同步控制两部分。软件框图如图5所示。

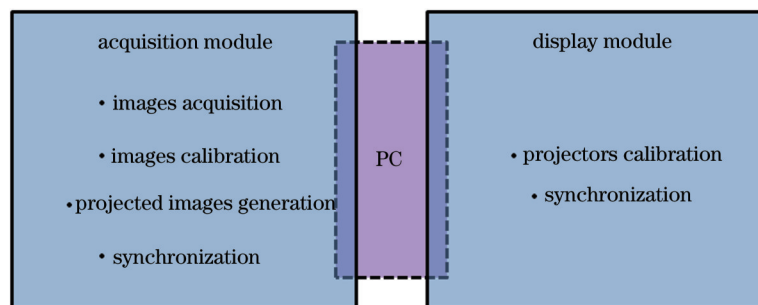


图5 系统的软件框图

Fig.5 Software block diagram of proposed system

##### 3.2.1 采集端图像校正算法

由于相机本身的生产工艺和相机阵列的排列均存在误差, 导致相机阵列的光心无法通过手动调节汇聚在同一点。对相机阵列捕获的光场多视数据进行了校正, 使相机阵列最终获取的是同一视场(FOV)内物体

不同角度的光场视点图像,消除显示端在投影时产生的混叠。

假设目标光场中有  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四个标志点,它们的坐标为  $(x_i, y_i)$ ,  $i \in (1, 2, 3, 4)$ 。期望得到的目标点  $A'$ 、 $B'$ 、 $C'$ 、 $D'$  的坐标为  $(x'_i, y'_i)$ ,  $i \in (1, 2, 3, 4)$ 。提取标志点的坐标后通过透视映射到目标点,得到透视变换矩阵  $P$ 。根据透视变换公式有

$$\begin{bmatrix} t_i x'_i \\ t_i y'_i \\ t_i \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

式中  $P$  是一个  $3 \times 3$  的透视变换矩阵,  $t_i$  是常值系数。设  $P$  的形式为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

为了简化,将  $p_{33}$  进行归一化,即  $p_{33} = 1$ 。由(20)式和(21)式可得

$$\begin{cases} x'_i = \frac{p_{11}x_i + p_{12}y_i + p_{13}}{p_{31}x_i + p_{32}y_i + 1} \\ y'_i = \frac{p_{21}x_i + p_{22}y_i + p_{23}}{p_{31}x_i + p_{32}y_i + 1} \end{cases}, \quad (22)$$

式中有 8 个未知数  $p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{31}, p_{32}$ , 可以由四对坐标点构成 8 个方程进行求解,得到透视变换矩阵  $P$ 。采用透射投影将采集到的光场图像与透视变换矩阵  $P$  相乘,便可获得相同视场的光场图像。这种校正方法将损失少量的图像分辨率,在标志点范围内的光场数据被保留下来,如图 6 所示。

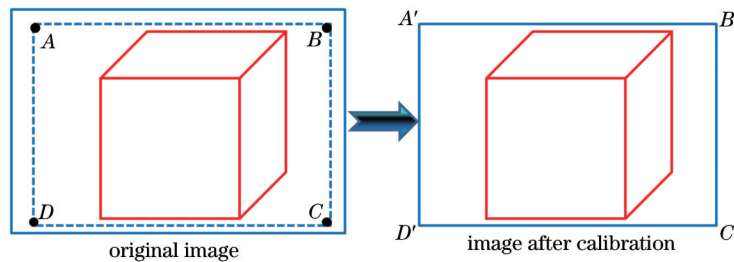


图 6 相机阵列的视场校正

Fig.6 Calibration of camera-array FOV

### 3.2.2 显示端投影校正算法

不同位置的投影仪向同一区域投影,投影图像在成像平面上会发生透射投影形变。因此在光场三维显示前,需要进行投影形变的校正。

投影仪阵列的投影区域校正和相机的采集图像校正原理上是相同的,但是不需要对投影图像进行裁剪,不会损失图像的分辨率。通过求解单应性矩阵的方式完成校正。具体的做法是:投影仪将一个标准的棋盘图像投影在显示屏上,用一个相机将形变的棋盘图像记录下来,提取被记录棋盘的角点,通过单应性变换将每个投影仪的形变棋盘角点映射到屏幕上指定的规则的角点处。校正过程涉及投影仪  $(x_p, y_p)$ 、相机  $(x_c, y_c)$  和全息定向散射屏幕  $(x_s, y_s)$  三个平面坐标系。将投影仪平面到相机平面的单应性矩阵记作  $H_{pc}$ , 相机平面到全息定向散射平面的单应性矩阵记作  $H_{cs}$ 。因此,将投影图像校正到显示屏相同区域的单应变换矩阵可以表示为

$$H = H_{pc} \cdot H_{cs} \cdot H_{pc}^{-1}, \quad (23)$$

利用(23)式的单应性关系,可以将投影图像校正到期望的区域。投影仪阵列中三个投影图像校正前后的结果如图 7 所示。投影校正算法的流程如图 8 所示。

## 4 实验结果与分析

针对构建的光场三维成像系统,进行了真实场景和虚拟场景两种模式的光场三维显示。真实场景的光场三维成像中,使用相机阵列采集水平方向的光场。相机阵列的工作分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ ,呈圆弧型紧凑排列,通过千兆交换机与计算机连接。

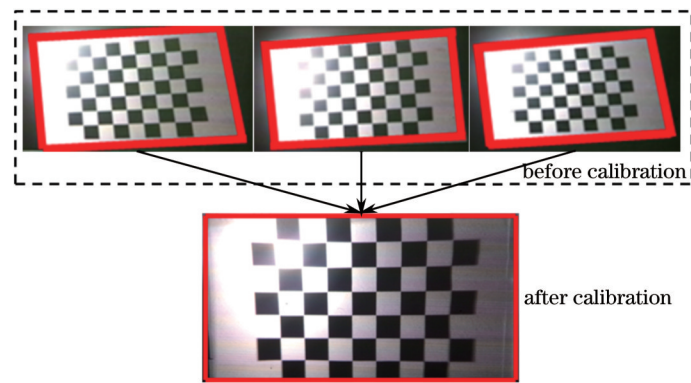


图7 投影图像校正结果示意图

Fig.7 Schematic diagram of projector-calibration results

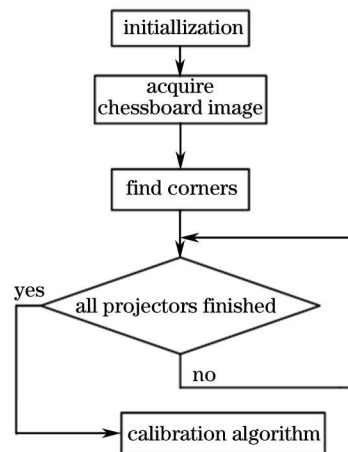
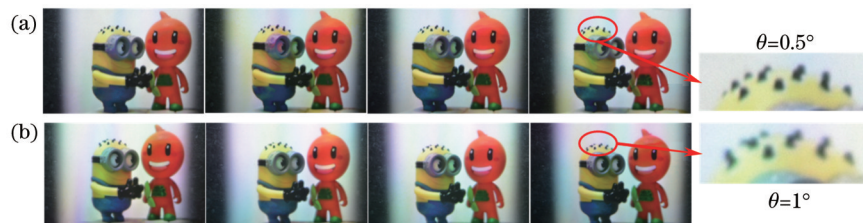


图8 投影图像校正算法流程图

Fig.8 Flow chart of projector-calibration algorithm

真实场景的光场三维显示结果如图9所示,只选择了4个光场视点进行说明。图9(a)、(b)分别对应着两个不同角度间隔的光场三维显示结果。相机采集场景的光场图像,根据2.3节中相机采集的投影图像生成方法,将生成的投影图像进行三维显示。图9(a)为光场的水平采样间隔为 $0.5^\circ$ ,相比于图9(b)的 $1^\circ$ ,光场在水平方向的采样更加稠密,三维显示效果更好。从图9(a)、(b)红色椭圆区域的放大结果中看出,稠密的采样光场显示出更加清晰的细节。

图9 真实场景的光场三维显示结果。(a) 光场水平采样角度间隔 $0.5^\circ$ ; (b) 光场水平采样角度间隔 $1^\circ$ Fig.9 Results of light-field 3D display of real scene. (a) Horizontal sampling angle interval of light-field is  $0.5^\circ$ ;(b) horizontal sampling angle interval of light-field is  $1^\circ$ 

进行了虚拟场景的光场三维显示,根据2.3节中模型渲染的投影图像生成方法,将生成的投影图像进行三维显示,显示结果如图10所示。图10(a)、(b)光场三维显示对应的相邻投影仪的角度间隔分别为 $0.5^\circ$ 与 $1.5^\circ$ 。从图中椭圆区域放大的内容看出,在图10(a)中,锐利的边缘部分能被清楚的显示出来;在图10(b)中,边缘区域则发生了模糊。同时,在矩形框圈出的区域中,图10(b)的显示内容发生了形变,产生了较大程度地向下凹陷。

输入的光场在水平方向上的采样足够稠密时,显示内容清晰、无重影,视点间过渡平滑,同时证明了校正算法的正确性。当输入的水平光场图像过于稀疏,光场中光线的水平方向角度远远不能满足(18)式时,显

示会发生重影,甚至出现显示内容的形变。因此,在全息定向散射光场三维显示中,需要输入足够稠密的水平光场信息来保证优越的三维显示效果。

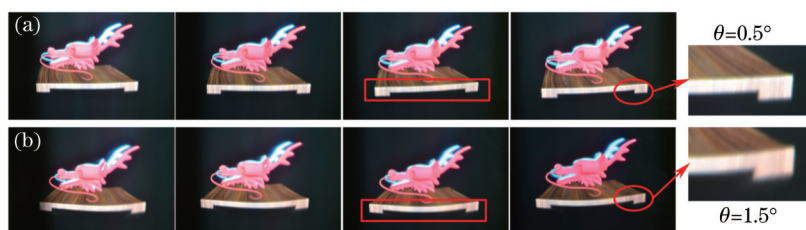


图10 虚拟场景的光场三维显示结果。(a) 光场水平投影角度间隔为  $0.5^\circ$ ; (b) 光场水平投影角度间隔为  $1.5^\circ$

Fig.10 Results of light-field 3D display of virtual scene. (a) Horizontal projecting angle interval of light-field is  $0.5^\circ$ ; (b) horizontal projecting angle interval of light-field is  $1.5^\circ$

## 5 结 论

构建了一种基于全息定向散射屏的光场三维成像系统。系统实现了真实场景与虚拟场景的光场三维显示。详细地分析了基于全息定向散射屏的光场三维显示的显示图像内容和投影图像生成的方法,并介绍了光场三维成像系统在采集端与显示端的校正方法。证明了所建立的光场三维成像系统的可行性,同时验证了整个系统研究方法的正确性,为全息定向散射方式下的光场三维采集与显示的研究提供了理论依据。

提高三维显示的质量,需要增加光场在水平方向视点的数量。若是显示动态的光场,光场的的数据量将会更加巨大。光场数据量的增加会造成采集、压缩、传输、和显示中每个环节的处理负担增大。解决这些关键问题,还需要进一步的研究。

## 参 考 文 献

- 1 B Wilburn, N Joshi, V Vaish, *et al.*. High performance imaging using large camera arrays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 765-776.
- 2 W Matusik, H Pfister. 3D TV: a scalable system for real-time acquisition, transmission, and autostereoscopic display of dynamic scenes[C]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 814-824.
- 3 Y Liu, Q Dai, W Xu. A real time interactive dynamic light field transmission system[C]. IEEE Multimedia and Expo, 2006: 2173-2176.
- 4 R Ng, M Levoy, M Bredif, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science Technical Report, 2005, 2(11).
- 5 A Veeraraghavan, R Raskar, A Agrawal, *et al.*. Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing[C]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): article 69.
- 6 K Marwah, G Wetzstein, Y Bando, *et al.*. Compressive light field photography using overcomplete dictionaries and optimized projections[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 46.
- 7 Liu Yongchun, Gong Huajun, Shen Chunlin. Research of lightfield acquisition and reconstruction based on mask[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810001.  
刘永春, 龚华军, 沈春林. 基于掩膜的光场采集与重建的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810001.
- 8 T Balogh, P T Kovács, A Barsi. Holovizio 3D display system[C]. IEEE 3DTV Conference, 2007: 1-4.
- 9 T Balogh, P T Kovacs. Real-time 3D light field transmission[C]. SPIE, 2010, 7724: 772406.
- 10 K Nagano, A Jones, J Liu, *et al.*. An autostereoscopic projector array optimized for 3D facial display[C]. ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies, 2013: 3.
- 11 G Wetzstein, D Lanman, M Hirsch, *et al.*. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 13-15.
- 12 D Lanman, G Wetzstein, M Hirsch, *et al.*. Polarization fields: Dynamic light field display using multi-layer LCDs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 61-64.
- 13 Wang Qionghua, Tao Yuhong, Li Dahai, *et al.*. 3D autostereoscopic liquid crystal display based on lenticular lens[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2008, 31(1): 296-298.  
王琼华, 陶宇虹, 李大海, 等. 基于柱面光栅的液晶三维自由立体显示[J]. 电子器件, 2008, 31(1): 296-298.



- 14 Xiaofang Li, Qionghua Wang, Yuhong Tao, *et al.*. Crosstalk reduction in multi-view autostereoscopic three-dimensional display based on lenticular sheet[J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(2): 021001.
- 15 Guojiao Lü, Qionghua Wang, Jun Wang, *et al.*. Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(12): 121101.
- 16 Liu Xu, Li Haifeng. Spatial three-dimensional display based on the light-field reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900121.  
刘 旭, 李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术[J]. *光学学报*, 2011, 9(31): 0900121.
- 17 X Xia, X Liu, H Li, *et al.*. A 360-degree floating 3D display based on light field regeneration[J]. *Opt Express*, 2013, 21(9): 11237-11247.
- 18 Y Peng, H Li, Q Zhong, *et al.*. Large-sized light field three-dimensional display using multi-projectors and directional diffuser[J]. *Opt Eng*, 2013, 52(1): 017402.
- 19 X Sang, F C Fan, C C Jiang, *et al.*. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display[J]. *Opt Lett*, 2009, 24(34): 3803-3805.
- 20 Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Zhao Tianqi, *et al.*. Three-dimensional display with smooth motion parallax[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209011.  
桑新柱, 于讯博, 赵天奇, 等. 具有平滑运动视差的三维显示技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209011.
- 21 E H Adelson, J R Bergen. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. *Computational Models of Visual Processing*, 1991: 3-20.
- 22 J Geng. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- 23 X Cao, Z Geng, T Li. Dictionary-based light field acquisition using sparse camera array[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 24081-24095.

栏目编辑: 苏 岑