

基于多视角采样校正的大尺度多投影光场显示系统

倪丽霞, 李海峰, 刘旭

(浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出了一种基于多视角采样校正的大尺度多投影光场三维显示系统, 系统采用了 360 台投影机环绕投影在直径 3 m、高 1.8 m 的柱形各向异性散射屏上, 并在柱形屏内部精确重构出物体的三维光场。该系统能在 360° 范围内显示可供多人多角度同时观看的具有平滑运动视差的大尺度三维场景, 其中动态场景的绘制帧率达 30 frame/s 及以上, 具有流畅的动态效果。设计了一种宽场柱面屏幕投影镜头来扩展投影机画幅, 并设计了一种基于相机多角度采样的光场自动校正方法, 用于校正宽场镜头引入的非线性畸变以及系统装配引入的误差, 实现了对 360 台投影机光场的拼接融合。

关键词: 光场; 三维显示系统; 大尺度; 校正

中图分类号: TN27 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0603004

A large-scale multi-projection light-field display based on multi-view sampling calibration

Ni Lixia, Li Haifeng, Liu Xu

(College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A large-scale multi-projection light-field 3D display system based on multi-view sampling calibration was proposed. In this system 360 projectors were arranged in a circle under an anisotropic cylindrical diffuser with 3 m diameter and 1.8 m height and projecting images onto the diffuser. Light field of 3D scenes was accurately reconstructed inside the screen and can be observed by multiple viewers from different angles and positions simultaneously around 360°, as well as providing smooth motion parallax. Rendering frame rate of dynamic scenes can achieve 30 frame/s and above, offering fluent visual experience. To realize this system, a wide-field projection lens with cylindrical lenses was designed to enlarge image of the projectors. Then an automatic light-field calibration method based on multi-view sampling was proposed to eliminate distortion, which was induced by non-linear distortion of the projection lens and system assembly error, from the projection images. After calibration, light field projected by 360 projectors can be fused together seamlessly.

Key words: light field; 3D display system; large scale; calibration

收稿日期: 2018-04-10; 修订日期: 2018-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002900); 国家自然科学基金(61575175)

作者简介: 倪丽霞(1993-), 女, 博士生, 主要从事光场三维显示方面的研究。Email: 11530030@zju.edu.cn

导师简介: 李海峰(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电显示、光学薄膜、光学测量方面的研究。Email: lihailfeng@zju.edu.cn

0 引言

近年来三维显示技术迅速发展,其中大尺度裸眼三维显示技术能够提供沉浸式的观感,表达和传输更具真实感的三维世界,因而广受瞩目。目前,裸视三维显示实现技术主要分为多视角三维显示、集成成像三维显示、全息三维显示、光场三维显示等。多视角三维显示技术发展自双目视差三维显示技术,为双眼提供视差对图像从而实现立体显示。多视角显示在生成图像时采用了固定的视点位置,因此观察体验和视点密度密切相关,若设置的视点不够密集,则在视点位置之间会存在图像跳变^[1-2]。为解决该问题,Y. Takaki 等人构建了超多视角(Super Multi-View, SMV)三维显示系统^[3],将水平视点间隔(1.31 mm)缩小到小于瞳孔直径,从而提供连续的运动视差。但是由于高密度的视点设置,该系统的尺寸较小,三维分辨率较低。集成成像三维显示一般利用微透镜阵列和二维显示器件来生成全视差三维图像,因此其显示分辨率、可视角度、景深等受限于微透镜像差以及显示器件分辨率^[4-5]。全息技术理论上能够还原物体光场的所有信息,且近几年在显示速度^[6]及扩大视场角方面^[7]的研究都有所进展,但由于包含的数据量巨大,故其显示分辨率、尺寸、视角及响应速度仍受限于数据处理、传输以及空间光调制器的发展。光场三维显示的原理为记录和重构经过三维物体上所有点的所有光线,因此可以同时实现大视场角以及高密度的视角分辨率。此外,由于只关注光强信息,光场显示可以实现高分辨率动态三维场景的绘制,且其刷新率能达到实时交互的要求。在构建大尺度三维场景方面,由于多投影阵列能提供海量光线信息,因此适合作为大尺度三维显示系统的图像源。钟擎等人^[8-9]研究了基于柱面屏和投影阵列的大尺度光场重建算法,陈贝石等人^[10]提出了针对该系统的图像校正方法。但是该方法仍限于校正二维图像,无法从三维角度直接对光场进行校正。

文中主要基于 Zhong^[8]的算法构建了一种大尺度多投影光场三维显示系统,采用了高 1.8 m,直径为 3 m 的柱面光场屏幕对 360 台投影机发出的光场进行调制,以在真实空间中重构大尺度三维场景的光场。为扩展投影机画幅,设计了一种宽场投影

镜头,并设计了光场自动校正方案来校正镜头和系统装配引入的光场畸变,实现了对三维光场的直接校正。在该校正方案中,用于采样的 CCD 可以任意放置,且无需标定,通过结合多视角采样方法,实现了光场图像的拼接融合显示。

1 光场重构显示原理

多投影光场显示系统的光场重构原理图如图 1 所示。多台投影机成环形排列在柱形散射屏下方,投影机阵列所在圆与屏幕圆同心。为保证显示效果并压缩数据量,系统只提供水平方向的视差,纵向上仅满足透视关系,因此采用纵向大散射角、横向上小散射角的散射屏,则通过散射屏,视点处只能看到单台投影机横向上的局部画面及纵向上的完整画面。图 1 中,视点 V_1 只能看到投影机 P_2 和 P_4 的条状局部图像(称之为光条图像),视点 V_1 处完整的光场图像需要由来自不同投影机的光条图像拼接而成,当投影机排列足够紧密时,能观察到无缝拼接的图像。而在不同视点 V_1, V_2 处观察到的同一空间点(如 A),应位于不同投影机(P_1, P_2)发出的光条图像中。

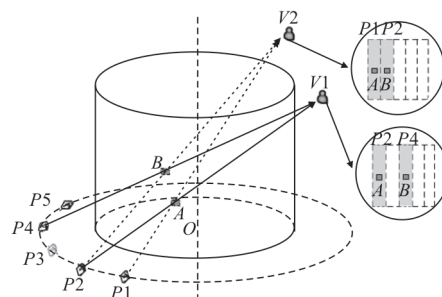


图 1 多投影光场显示系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of multi-projection light-field display system

2 宽场投影镜头设计

投影系统采用商用的 DLP 微投影机(分辨率 800×600)。为使得投影机画幅被扩展到屏幕尺寸,需要重新设计投影镜头,镜头需要达到的指标如下:(1)由于投影机置于屏幕下方,镜头需偏心设计,使图像向上投影到屏幕上。(2)目标成像面为直径 3.0m、高度 1.8m 的柱面,投影机为 4:3 画幅,需要对水平方向进行画幅拉伸。(3)投影画面横向尽量接近 180°柱面。

投影镜头的设计结果如图 2 所示。镜头中使用了一组球面镜组保证柱面屏中心的远距离清晰成像,用两片柱面镜分别控制横向和纵向的视场角,并保证柱面屏两侧近距离地清晰成像。镜头的横向视场角约为 66.4° ,纵向视场角约为 30° 。根据投影仪分辨率及镜头横向视场角可以计算出此时的画幅宽度为 3.75 m,将投影仪横向分辨率的一半除以画幅宽度即可得到水平截止频率 f_c 为 0.107 lp/mm。在 MTF 曲线图(图 2(c))中, f_c 处该镜头的 MTF 值大于 0.6,达到成像质量要求。

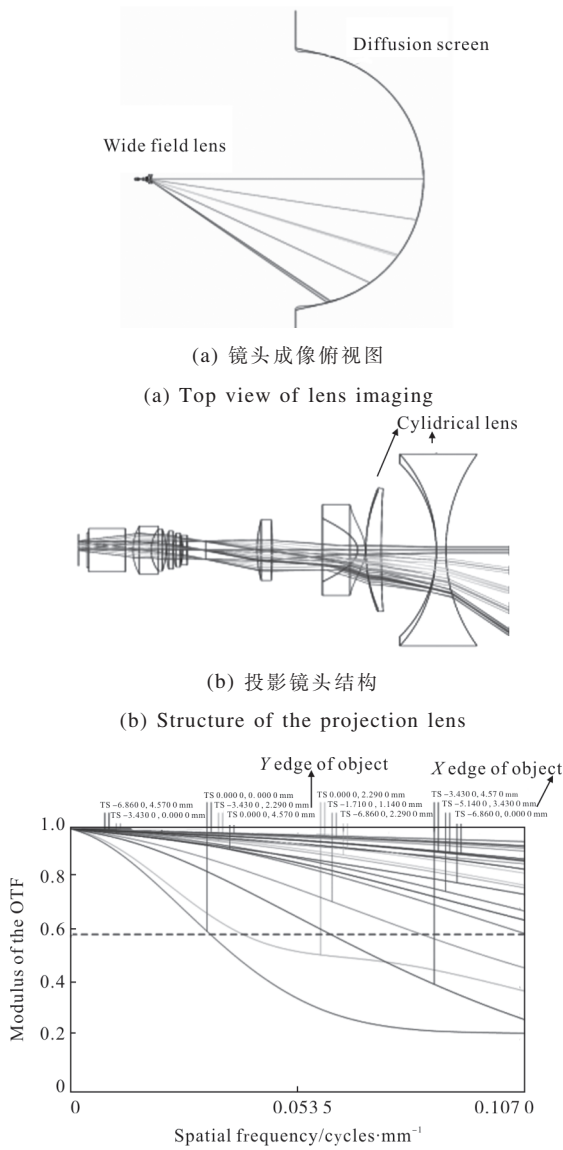


图 2 投影镜头
Fig.2 Projection lens

但是,该镜头在满足成像质量和画幅扩展要求的同时也引入了严重的非线性畸变。由于投影单元到柱面中心和边缘的距离相差较大,因此存在着中心大边缘小的图像畸变,如图 3 所示。图 3(a)为投影仪芯片上的网格图像, H_x, H_y 分别表示水平和竖直方向上的归一化视场坐标。图 3(b)为网格经过投影镜头后投影在柱形屏幕上的图像, Y 为图像高度, θ 为水平方向视场角。两图中的浅色竖线均表示水平

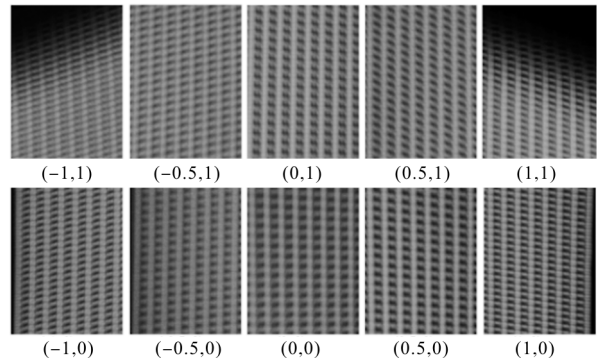
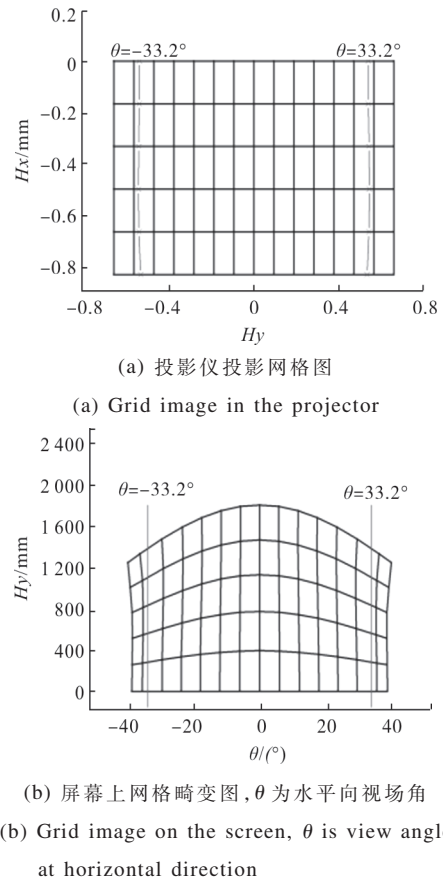


图 3 镜头畸变示意图
Fig.3 Distortion diagram of lens

视场边缘。图 3(c)为实际拍摄的屏幕上的网格图, 网格下方的数字表示该图像在完整投影仪画幅中的视场位置。其中水平视场范围从左到右被定义为 $[-1,1]$, 竖直视场范围从下到上被定义为 $[0,1]$ 。例如 $(0.5,0)$ 表示该图位于水平视场中央, 竖直射场下边缘。

3 光场校正方法

由于宽场镜头引入的严重非线性畸变以及系统装配误差, 投影仪之间的光场无法拼接, 因此需要对光场进行自动校正。不同于二维投影图像校正, 光场校正需要同时校正光线的方向和位置。考虑到系统中所有的重构光线均经过投影仪图像面 P 和屏幕柱面 S , 因此可以用这两个面来表示所有重构光线^[11], 则对图像的校正可以归结为求取正确的重构光线, 即建立投影仪像素和屏幕上对应投影点的映射关系。校正系统图如图 4 所示。为简化计算, 将柱形屏幕展开为平面 Scr 并建立归一化平面直角坐标系 SOT 。在柱形屏上标记矩形点阵, 记为 $\{Scr(s,t)\}$, $s, t \in [0,1]$, 点阵中的点在 SOT 中的坐标可以根据点所在的行列位置直接计算。

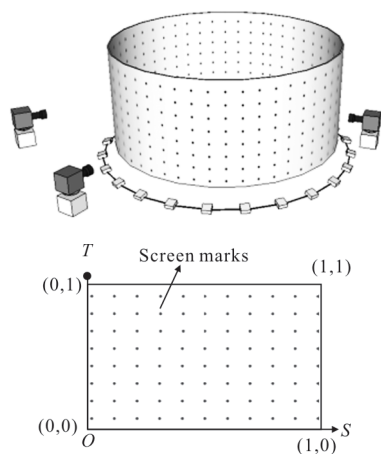


图 4 校正系统图及归一化平面坐标系 SOT

Fig.4 Structure of the calibration system and the normalized plane coordinate system SOT

下面以一台投影仪为例说明校正方案流程。首先利用任意放置的 CCD 来对屏幕标记点采样。如前所述, 由于屏幕的直接透射特性, 在一个采样位置 CCD 只能拍摄到投影仪的局部光条图像。为了采样

投影仪的完整光场, CCD 将会被放置在 N 个位置对投影仪光场进行多视角采样。当 CCD 被放置在第 i 个位置时 ($i=0,1,\dots,N$), 被拍摄到的屏幕标记点记为 $\{ScrCam_i(a,b)\}$, 则屏幕空间和 CCD 相机空间的坐标映射关系可以根据公式(1)计算:

$$Scr(s,t)=B_1\{ScrCam_i(a,b)\} \quad (1)$$

然后投影仪投影二维图像, 显示分布在屏幕高度范围内的 M 条线, 这组线在投影仪图像芯片中水平并等间隔分布。根据散射屏特性, 此时拍摄到纵向上 M 个点, 这些点在 CCD 图像空间中的坐标记为 $\{ProjCam_i(a,b)\}$ 。基于映射关系 B_1 可以算出 $\{ProjCam_i(a,b)\}$ 在在屏幕空间中的坐标 $\{ProjScr_i(s,t)\}$, 如公式(2):

$$\{ProjScr_i(s,t)\}=B_1\{ProjCam_i(a,b)\} \quad (2)$$

通过查找算法, 可以得到 $\{ProjCam_i(a,b)\}$ 在投影仪空间对应的像素坐标, 记为 $\{Proj_i(m,n)\}$ 。该查找算法基于颜色匹配, 首先对投影仪画幅进行颜色分割并显示, 根据投影点颜色判断像素位于哪个色区。确认色区后在该区域内继续进行颜色分割。重复上述步骤直到色区包含的像素点足够少, 最后对目标色区逐像素扫描以提高查找精度。

采集了 N 个拍摄位置的数据后, 综合所有位置的数据计算出整个投影仪画幅和屏幕空间之间的映射关系 B_2 , 如公式(3):

$$Proj(m,n)=B_2\{ProjScr(s,t)\} \quad (3)$$

最后根据映射关系 B_2 生成用于显示的投影仪像素和屏幕坐标的映射表。为了提高数据采集速率, 在每个拍摄位置会对所有能被拍到投影图的投影仪采样。

为保证校正精度, 校正算法中的映射关系用贝塞尔曲面中的控制点来表示。一个 Bezier 曲面可以由一系列的控制点来定义。给定空间上 $(N+1) \times (M+1)$ 个定点 $p_{ij}(i=0,1 \dots N; j=0,1 \dots M)$ 后, 称 $N \times M$ 次参数曲面为 $N \times M$ 次 Bezier 曲面, 如公式(4)所示。计算投影仪像素坐标和屏幕空间坐标的映射关系时, 将 $ProjScr(s,t)$ 代入 (u,v) , $Proj(m,n)$ 代入 $P(u,v)$ 即可。

$$P(u,v)=\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M B_i^N(u) B_j^M(v) p_{ij}; u,v \in [0,1] \quad (4)$$

4 实验结果及分析

文中构建的显示系统参数如表 1 所示, 系统实

表 1 显示系统参数

Tab.1 Parameters of display system

Parameter	Value
Number of projectors	360
Interval angle of adjacent projectors/(°)	1
Radius of projector array/m	1.7
Projector resolution	800×600
Angle of wide-field projection lens	Horizontal 66.4°, vertical 30°, approximately
Diameter of screen/m	3.0
Height of screen/m	1.8
Diffuse angle of screen	Horizontal 1°, vertical 60°, approximately
CPU	Intel i7-4930K
GPU	NVidia Quadro K4000 × 1, NVidia Geforce GTX760 × 3

物图见图 5。实验中对 CCD 摆放位置没有严格要求,无需标定,能拍到投影仪图像即可。在一个拍摄位置,CCD 采样 30 台左右投影仪,单台投影仪中采样点的像素间隔约为 70~100,为提高采样效率,CCD 装配广角镜头,则投影仪垂直方向的投影图像能在一次拍摄中完整采样。图 6 为校正前后屏幕上的网格图像,其中网格的竖直线平行于柱形屏幕母线,水平线平行于柱形屏底面圆。由图 6 可知,校正前投影仪图像有严重的非线性畸变,且不同投影仪之间的图像有较大错位。校正之后不同投影仪之间的图像能够拼接融合。系统中模型的实际显示效果见图 7~8,模型的实际大小见图 9,图中的黑色小方块为屏幕标记点。模型复杂度及渲染帧率对比见表 2。



图 5 系统结构图

Fig.5 Structure of the optical system

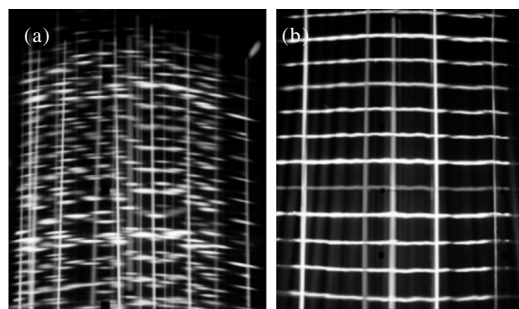


图 6 (a) 校正前网格图, (b) 校正后网格图

Fig.6 (a) Grid before calibration and (b) grid after calibration

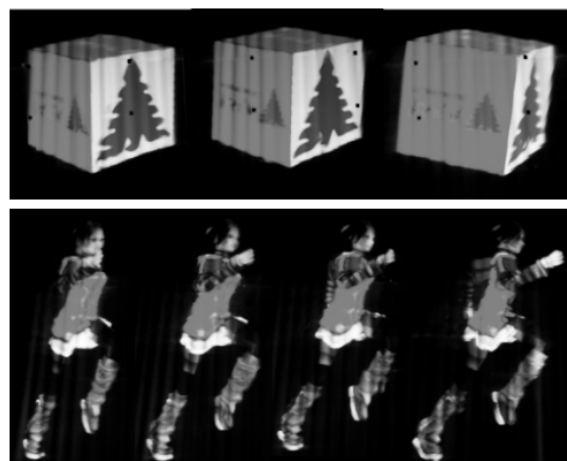


图 7 静态模型显示图(从上至下分别为不同角度拍摄的 cube 模型, girl 模型)

Fig.7 Display picture of static models(Up to down are pictures of cube model and girl model, taken from different angles)



图 8 不同时刻的动态 soldier 模型图

Fig.8 Pictures of dynamic soldier model, taken at different times

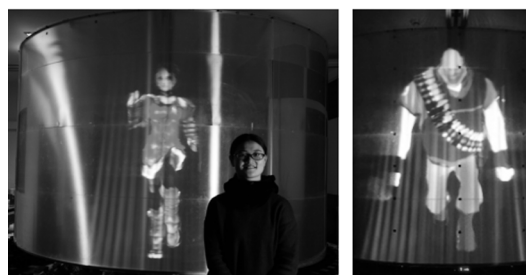


图 9 模型实际大小

Fig.9 Real size of the models

表 2 不同模型的渲染帧率比较
**Tab.2 Comparison of render frame rate
 between different models**

Model	Faces	Render frame ratio/frame · s ⁻¹
Static girl	5 688	116
Dynamic soldier	8 140	43

由显示效果可知,文中构建的系统能够实现光场图像无缝拼接,在空间中高质量地重构大尺度三维场景的光场,提供平滑的运动视差。重构的场景可从 360°范围内的各个角度完成观察。利用新设计的宽场投影镜头,观察者能够观察的最大画幅范围为横向 2.78 m,纵向 1.8 m。从屏幕外侧观看时,相邻投影仪图像的间隔角为 1°,即光条图像宽度约为 2.6 cm,故在每个视点处,能看到 106 台投影仪的光条图像。但由效果图可知,模型存在明暗相间的光条,这在背景上更为明显。这主要和两台投影仪之间的角度间隔及散射屏的横向散射角有关。如前所述,单个视点处只能观察到投影机的局部光条图像,而相邻投影仪的光条间距和投影仪间距正相关。故增加投影机密度,减小光条之间的间距可以减轻这一效应。此外投影仪之间的亮度和颜色的一致性也对三维图像的均匀性有影响。

5 结 论

文中提出了一种大尺度多投影光场三维显示系统。为实现该系统,设计了一种宽场镜头来扩展投影仪画幅,并提出了一种基于多视角采样的光场自动校正方法来校正宽场镜头引入的非线性畸变以及系统装配引入的误差。在该校正方法中,CCD 能够随意摆放在屏幕外侧进行采样,多个视角的采样数据被统一到相同的空间坐标系下,以计算投影仪全画幅的校正数据。实验结果表明:校正后的投影仪光场能无缝拼接,并能实现场景的三维光场被精确重构,平滑的运动视差,提供自然流畅的观察体验。

参 考 文 献:

- [1] Dodgson N A, Moore J R, Lang S R. Multi-view autostereoscopic 3D display [C]//International Broadcasting Convention, 1999, 2: 497-502.
- [2] Speranza F, Tam W J, Martin T, et al. Perceived smoothness of viewpoint transition in multi-viewpoint stereoscopic displays [C]//Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5664: 72-83.
- [3] Takaki Y, Nago N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display [J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [4] Park J H, Hong K, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H77-H94.
- [5] Georgiev T, Zheng K C, Curless B, et al. Spatio-angular resolution tradeoffs in integral photography [C]//17th Eurographics conference on Rendering Techniques, 2006: 263-272.
- [6] Gao H, Liu J, Yu Y, et al. Real-time holographic video display using holographic liquid crystals with extended response to future holographic 3d TV[C]//Digital Holography & 3-D Imaging Meeting. [S.l.]: Optical Society of America, 2015: DTh4A.6. DOI: 10.1364/DH.
- [7] Inoue T, Takaki Y. Table screen 360-degree holographic display using circular viewing-zone scanning [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6533-6542.
- [8] Zhong Q, Peng Y, Li H, et al. Multiview and light-field reconstruction algorithms for 360 multiple-projector-type 3D display[J]. *Applied optics*, 2013, 52(19): 4419-4425.
- [9] Zhong Q, Peng Y, Li H, et al. Optimized image synthesis for multi-projector-type light field display [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(12): 1745-1751.
- [10] Chen B, Li H, Liu X, et al. Automatic geometrical calibration for multiprojector-type light field three-dimensional display [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(7): 073107.
- [11] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM, 1996: 31.