

# 光场相机成像模型及参数标定方法综述

张春萍 王庆

西北工业大学计算机学院, 陕西 西安 710072

**摘要** 光场相机成像模型与参数标定方法是拓展光场应用的理论基础和关键环节,已成为计算光场领域的研究热点。不同于传统相机的成像原理,光场相机通过新颖的光学系统将场景中的光线按照某种给定关系与图像传感器像元进行对应,实现对三维空间中光线位置和角度信息的采样与记录,可通过计算摄影学恢复场景的三维结构。利用微透镜阵列分析了光场相机标定的成像模型和参数化模型,比较了不同物理参数设置对光场采样结果的影响;分析了光场相机的光线提取与校正方法、参数标定模型、误差定义与精度度量等主要问题,对光场相机参数标定方法进行了归纳和总结。

**关键词** 探测器;光场相机;成像模型;光场参数化模型;相机参数标定

中图分类号 TB879

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0609004

## Survey on Imaging Model and Calibration of Light Field Camera

Zhang Chunping Wang Qing

School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China

**Abstract** Imaging model and parameter calibration method on light field camera are the theoretical basis and key points on computer vision applications, and drawing a great number of attentions in computational photography. Different from the principle of traditional camera, light field camera corresponds the light in the scene with imaging sensor pixel of novel optical systems according to a given relationship, both the position and angular information of ray are sampled and recorded and it is able to recover the three dimensional structure of real scene by computational photography. The model and the calibration of light field camera are analyzed with micro-lens array, and the effects of different physical parameters on the results of light field sampling are compared. Then major problems of calibration on light field camera are analyzed, including decoding, calibration model, error analysis and evaluation. The parameter calibration method of light field camera is induced and summarized.

**Key words** detectors; light field camera; imaging model; light field parameterization model; camera parameter calibration

**OCIS codes** 040.1240; 040.1490; 110.1758; 150.1448

## 1 引言

在传统二维成像框架下,对于计算场景深度、获取目标物几何形态等诸多问题的求解均存在局限性。这些局限性的根本原因在于传统成像方式只能记录光线所经过的位置信息,而丢失了与场景深度、目标几何形态、场景遮挡关系等高度耦合的光线角度信息,即三维(3D)信息,而光场成像理论恰好能够从根本上解决光线角度信息的采集问题。因此,基于光场成像理论的计算摄影学成为近年来国内外学界研究的热点。

基于微透镜阵列的光场相机(后文简称光场相机)是目前主流的光场获取装置。利用光场相机可以同时获取的光线角度和位置信息,采用相应的计算摄影术能实现颠覆传统成像方式的新颖图像生成方法,如数字

收稿日期: 2015-11-23; 收到修改稿日期: 2016-01-18

基金项目: 国家自然科学基金(61531014,61272287)、虚拟现实技术与系统国家重点实验室开放基金(BUAA-VR-15KF-10)

作者简介: 张春萍(1992-),女,硕士研究生,主要从事计算光场成像理论和方法方面的研究。

E-mail: 724495506@qq.com

导师简介: 王庆(1969-),男,博士,教授,主要从事计算机视觉、计算摄像学方面的研究。

E-mail: qwang@nwpu.edu.cn(通信联系人)

重聚焦、合成孔径成像、光场显微成像、全景深图像合成、场景深度图获取等。为三维重建、全景拼接、视角合成、目标识别与跟踪等计算机视觉问题提供更加完备而有效的解决方案。

然而,与传统成像技术相比,光场成像技术也存在一定的局限性。对于单个光场相机,在传感器像元个数一定的情况下,由于要同时获取光线位置和角度信息,光场相机信号的获取过程存在角度与位置分辨率的折衷问题;受限于成像原理和传感器制备工艺,单视光场相机对目标光场信号的采样完备性差,导致其存在视场角有限、深度恢复精度较差、对遮挡不稳健等缺点。单视光场数据存在局限性,且不同的光场相机成像系统在物理参数和成像模型上也存在差异,这些问题成为限制光场相机广泛应用的重要瓶颈。

正如多视图几何理论解决了计算机视觉中以前被认为无法解决的问题一样,将光场计算理论从单视点延拓至多视点可有效解决单视光场面临的问题。因此,研究具有普适性的光场相机成像模型和精确的光场数据解码方法,研究符合光场特征参数标定及数据校正和统一参数化方法,是优化光场计算、拓展光场应用的理论基础。目前,国内外已有多个研究机构开展了光场相机成像模型及参数标定方法的研究,这些研究基本集中于双平面光场模型,并形成双平面平行度校准、畸变模型校准、光场相机空间姿态估计等多个热点问题。

本文将围绕光场获取与表示方法展开讨论,介绍不同光场相机成像模型及其对光场信息的采样规律,总结光场数据的表示方法,并通过分析光场解码模型、光场参数化理论、光场数据误差定义、光场注册及统一参数化方法,讨论光场相机的参数标定方法。

## 2 光场成像模型

为了分析几何光学范畴内视觉信号的基本元素——空间光线集合,Adelson等<sup>[1]</sup>提出了七维全光函数,用以描述随位置、角度、时间以及波长变化的空间连续光场信号。空间中光线可以用七维全光函数 $L(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$ 表达,该函数描述了空间中任意位置 $(x, y, z)$ 、任意角度 $(\theta, \phi)$ 、任意波长 $\lambda$ 、任意时刻 $t$ 的光线。针对不同的应用条件,需将七维全光函数在一定的物理意义下降维。当光线在自由空间中传播,其波长 $\lambda$ 一般不会发生变化,即任意时刻的自由空间光线可由五维参数 $(x, y, z, \theta, \phi)$ 表示。若忽略光线在传播过程中能量的衰减,可将五维全光函数降至四维表示<sup>[2]</sup>,衍生出球面对、点球、点切、双平面等参数化模型。

光场采集的本质是对全光函数进行降维和离散采样的过程。对光场不同的降维和采样方法形成了不同的光场获取方式和设备<sup>[2]</sup>,如相机推扫<sup>[3]</sup>、相机阵列<sup>[4]</sup>、编码孔径相机<sup>[5-6]</sup>、基于掩膜的相机<sup>[7]</sup>、光场相机<sup>[8-9]</sup>、光场显微镜<sup>[10]</sup>等。根据光场成像理论,国外研究机构设计了多种各具特色的光场采集系统。2010年以来,Adobe<sup>[11]</sup>、Pelican<sup>[12]</sup>、Lytro、Raytrix<sup>[13]</sup>、Nokia、Toshiba等公司推出了各自的便携式光场成像设备,与此同时Qualcomm、Google也开展了如火如荼的研究。其中,光场相机相比于其他光场采集设备,具有硬件结构简单且设备便携(以改造传统相机模型为基础)、采集控制简单(通过图像传感器的单次曝光即可采集光场数据)、获取光场精度高等优势,在众多装置中脱颖而出,成为目前获取光场数据的主要设备之一。下面将分别讨论光场相机的光路模型和光场采样方法,并总结光场数据的表示方法。

### 2.1 光路模型

光场相机的典型代表是Ng等设计的传统光场相机(Plenoptic 1.0)<sup>[8]</sup>。该成像装置在传统相机的焦平面处放置一个微透镜阵列,并将图像传感器置于微透镜的一倍焦距处。真实场景中特定深度平面上来自同一点的不同方向光束,通过主镜头折射、微透镜聚焦,最终被图像传感器上的成像单元所记录,其光路模型和成像结果如图1所示。由于微透镜对光线的折射作用,被微透镜覆盖的图像传感器区域的光通量要高于非覆盖区域,其成像表现为规则排布的子图像。每个子图像与主镜头孔径形状一致。为使子图像之间既不相互覆盖又要保持间隙尽可能少,相机安装参数、微透镜和主镜头的焦距以及通光孔径需满足一定约束关系<sup>[8]</sup>。

由图1可知,该模型记录光场的位置分辨率与微透镜个数相关,记录光场的角度分辨率等于子图像的像元分辨率,这种采样方式导致图像分辨率较低且不可调节。

在此基础上,Lumsdaine等<sup>[9,13]</sup>设计了聚焦式光场相机(Plenoptic 2.0)。该成像模型在传统相机焦平面的前后位置分别放置微透镜阵列,并将图像传感器置于微透镜阵列之后的特定距离处,使真实场景中特定深

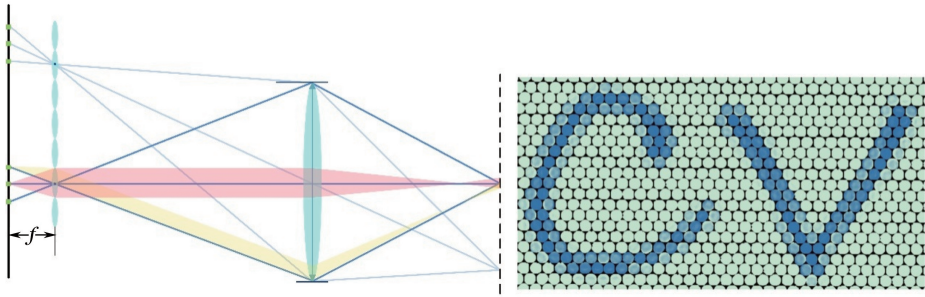


图 1 Plenoptic 1.0 的光路模型及其成像效果

Fig. 1 Optical path model and imaging effect of Plenoptic 1.0

度平面上来自同一点不同方向的光束,在图像传感器上提前聚焦或二次聚焦,其光路模型和成像效果如图 2 所示。其中,主镜头成像平面、微透镜阵列及图像传感器之间的距离  $z$ 、 $g$  需满足高斯成像公式<sup>[9]</sup>,以保证物方光束在图像传感器上能够会聚于一点;同时,为使同一物点被记录  $M$  次, $z$ 、 $g$  应满足关系为  $M = \frac{z}{\kappa g}$ ,其中  $\kappa$  为与微透镜阵列排布方式相关的系数<sup>[14]</sup>。聚焦式光场相机的成像方式与传统光场相机相似,子图像成像效果受微透镜阵列的聚焦方式影响而略有不同;当相机参数满足一定关系时,可保证子图像之间不覆盖且尽可能相切。聚焦式光场相机记录光场的方式可近似看作相机阵列,每个子图像等效于主镜头成像面处的观测。受微透镜聚焦方式的影响,这类相机可分为二次聚焦、提前聚焦两种形式;其中,二次聚焦情况下子图像为倒像,提前聚焦情况下子图像为正像,如图 2 所示。

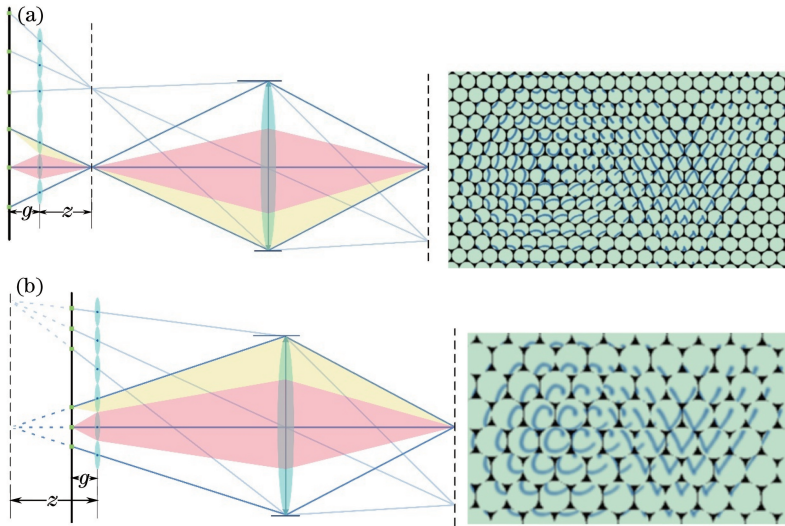


图 2 Plenoptic 2.0 的光路模型及其成像效果。(a) 二次聚焦;(b) 提前聚焦

Fig. 2 Optical path model and imaging effect of Plenoptic 2.0. (a) Secondary focusing; (b) focus in advance

由图 2 可知,该模型采样光场的角度分辨率与主镜头、微透镜阵列、图像传感器的相对安装位置有关,因而能够通过调节安装参数来灵活改变光场分辨率,但仍存在角度与位置分辨率的折衷瓶颈。此外,Georgiev 等<sup>[15]</sup>还设计了一种基于多焦距微透镜的聚焦式光场相机,Perwass 等<sup>[13-14]</sup>研制了基于该模型的光场相机,该相机的不同之处在于微透镜阵列由不同焦距的微透镜组成。多焦距微透镜光场相机可以被看作交错式单焦距微透镜光场相机的组合,其优点在于可获取更大的景深范围,但是却牺牲了单一焦段内的成像质量与聚焦能力。

综上所述,不同光路模型决定了微透镜阵列对光场的采样方式,影响了所获取光场的位置与角度分辨率。传统光场相机的解码方法较为简单,但光场分辨率由光学元件的物理参数决定,位置分辨率较低;聚焦型光场相机的解码方法受角度分辨率限制,光场分辨率可通过内部元件的安装参数来灵活调节,可通过控制角度采样数来提高位置分辨率<sup>[16]</sup>。



## 2.2 光场采样方法

传统光场相机与聚焦式光场相机这两种相机的主要区别在于微透镜阵列对相机内部光线的聚焦方式和重新排布规律。将主镜头聚焦成像面看作位置平面  $(x, y)$ , 主镜头镜头孔径所在平面看作角度平面  $(u, v)$ , 且各个平面坐标系只考虑一维, 则传统相机、传统光场相机、聚焦式光场相机(二次聚焦)三种不同光路模型的光场采样情况分别如图 3 所示。在  $x-u$  坐标系下, 每个方格代表一个具有一定采样带宽的图像传感器成像单元<sup>[17-18]</sup>。

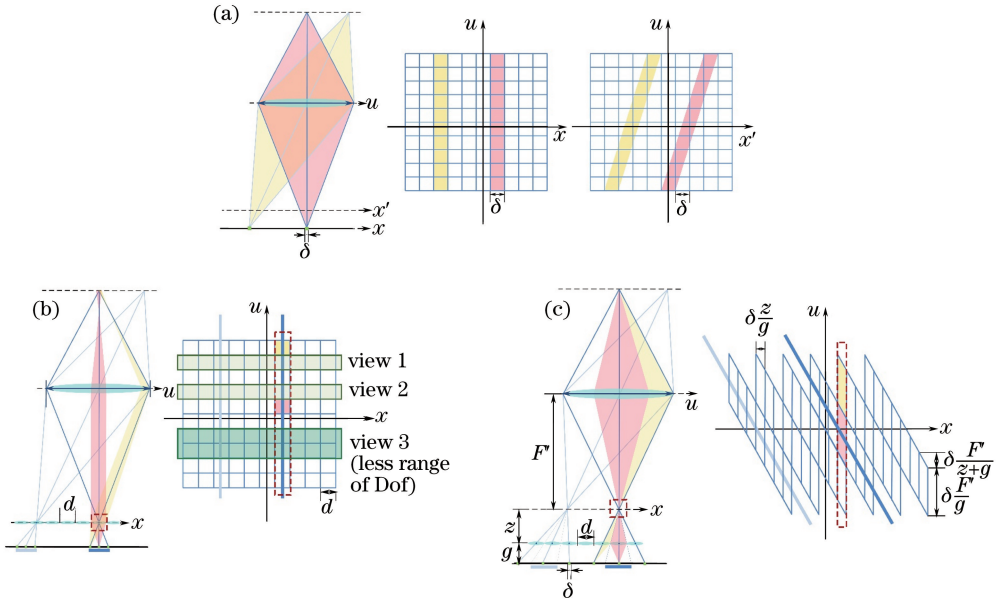


图 3 不同相机模型的光场采样分布。(a) 传统相机; (b) Plenoptic 1.0; (c) Plenoptic 2.0(二次聚焦)

Fig. 3 Light field sampling distribution of different camera models. (a) Traditional camera; (b) Plenoptic 1.0; (c) Plenoptic 2.0 (secondary focusing)

由于两种光场相机模型中主镜头、微透镜阵列、图像传感器三个部件特殊的相对位置, 微透镜对真实空间中特定位置点的光束有聚焦作用, 此时微透镜可简化为针孔模型<sup>[14, 19]</sup>, 故可将每个图像传感器成像单元所记录的光束简化为一条光线表示, 仅四维参数  $(x, y, u, v)$ 。如图 3(a)所示, 传统成像是光场在二维平面上投影的结果, 不同聚焦深度的成像是四维光场在不同方向采样后的积分结果。相比之下, 如图 3(b)和(c)所示, 原本会聚在同一成像单元的光束, 在光场相机下分别聚焦在不同成像单元上, 而两种模型的区别在于物点不同方向的信息是记录在同一或不同微透镜下。因此, 在保证  $z$  与  $g$  关系的前提下, 聚焦式光场相机能够通过调节微透镜与图像传感器间的距离, 改变子图像的视场(即子图像记录  $x$  的范围), 达到调节光场角度分辨率的目的; 而传统光场相机记录光场的角度分辨率等于子图像的像元分辨率, 记录光场的位置采样数等于微透镜个数, 导致了图像分辨率较低且不可调节。

对于两种光场相机模型, 从原始数据的子图像中相同位置抽取单个像元或图像块, 并按子图像的相对位置重新排布、插值, 可合成多视点图像、解码光场数据<sup>[20-21]</sup>。对于传统光场相机, 如图 3(b)所示, 其解码方式较为简单, 能够通过抽取单个像元的方法, 由原始图像重建光场数据<sup>[8]</sup>; 对四维光场的不同二维采样结果  $L(x, y, u_i, v_j)$  形成了不同视点的成像, 而对  $(u, v)$  的积分范围决定了成像的景深。Liang 等<sup>[22]</sup>在频域上分析了光场解码和渲染方法, 相对于空域处理方法成像分辨率得到了提高。对于聚焦式光场相机, 光场的解码与对齐方法较复杂, 抽取图像块的大小与角度分辨率、场景深度有关, 将影响合成图像的聚焦深度。当所有子图像抽取像元数量一定时, 在非聚焦区域将会因角度采样过低而产生混叠效应。为避免这一现象, Georgiev 等<sup>[11]</sup>通过估计相邻子图像的视差, 确定不同子图像所抽取图像块的大小以合成多视点图像; Wanner 等<sup>[21]</sup>通过频域滤波的方法检测和评价多视点图像的混叠区域, 调整不同子图像抽取像元的数目, 能够较好地抑制混叠效应。

### 2.3 光场数据表示

不同于传统二维图像的数据组织形式,光场数据需要更高维度的参数化方法。单视光场相机获得的数据可用双平面模型表示,其参数对三维场景的几何变换关系有重要意义;将单视光场拓展至多视环境下,则需要更高维度或其他形式的参数化模型。

Levoy 等<sup>[3]</sup>指出传统相机捕获的图像仅是空间中连续光场信号(七维全光函数)在二维子空间的投影,并提出可采用平行双平面(TPP)实现对空间光场四维信号的有效采集,即  $L(x, y, u, v)$ 。Gortler 等<sup>[23]</sup>从流明图的角度指出在无遮挡场景下,可忽略光线传播过程衰减对信号采集的影响,在此假设下光场四维参数化与五维光场信号具有物理意义上的等价性。在上述工作的基础上,Levoy<sup>[24]</sup>综合分析了光场多种参数化表示之间的关系。针对双平面光场,Ng<sup>[25]</sup>提出了频域上等效的重聚焦算法。Liang 等<sup>[26]</sup>对光线的传播过程进行建模,提出球面点对、点球、点切、双平面等参数化模型对光场具有同样的表述能力。Yu 等<sup>[27]</sup>利用双平面模型对针孔相机、正交相机、推扫相机等 8 种相机进行几何建模,以寻求更具普适性的成像模型,并表明不同相机模型是对四维光场进行不同采样和降维的结果;其后继工作在该模型框架中加入了光场相机的分析<sup>[28]</sup>。考虑到成像器件尺寸与制备工艺现有条件,主流光场成像系统,如相机阵列、微透镜阵列光场相机,均采用了双平面模型的设计原则。Birklbauer 等<sup>[29]</sup>在此基础上利用同轴双柱面模型参数化全景光场,将多个双平面光场注册到同轴双柱面坐标系下,并实现了有效的多视点和重聚焦。可见,双平面光场模型涵盖现有主流光场成像设备,并具有较强的可扩展性。

双平面模型参数包括两个平行平面的距离  $L$ ,两个二维坐标系的原点偏移  $(\Delta u, \Delta v)$ ,以及各坐标轴单位刻度  $l_x, l_y, l_u, l_v$  间的比例,如图 4 所示。

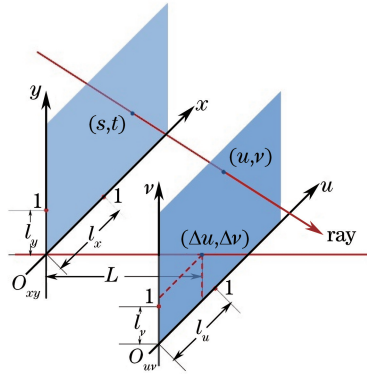


图 4 双平面模型及其参数

Fig. 4 Two-parallel-plane model and its parameters

改变其中任意一些参数,将影响光场所记录的场景的透视关系和比例,如图 5 所示。图 5(a)为初始光场,记录真实场景中具有朗伯体表面的立方体;图 5(b)~(d)分别为光线强度不变时,改变双平面距离  $L$ 、参数化平面比例  $l_x/l_u$  与  $l_y/l_v$ 、角度平面位移  $(\Delta u, \Delta v)$  后的光场数据,其光线角度均发生变化。虽然 4 种条件下形成的多视点图像没有差异,且分别在角度信息上做积分得到传统图像,4 种光场的成像效果也均相同<sup>[17]</sup>;但当重参数化双平面坐标、改变成像平面位置时,图 5(a)~(d)的成像效果将因双平面参数的不同而

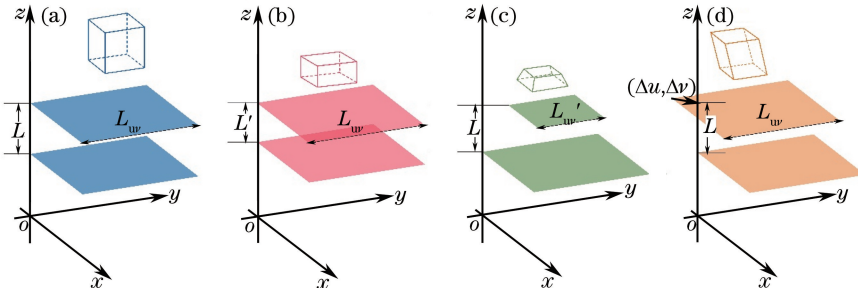


图 5 (a) 双平面光场;(b)~(d) 改变参数  $L, l_x/l_u, (\Delta u, \Delta v)$  后的光场

Fig. 5 (a) Two-parallel-plane light field; (b)~(d) light field after change of  $L, l_x/l_u, (\Delta u, \Delta v)$

发生变化,最终表现为三维重建场景的失真。

因此,光场相机获取的光场数据可用双平面参数化模型表示,光场相机的原始数据标定的精确性可理解为双平面参数求解的精确性;双平面的参数可约束三维场景的透视关系和比例,并对光场数据的三维重建结果产生重要影响。

### 3 参数标定方法

传统相机捕获的图像仅是空间连续光场的一个二维切片,而光场相机捕获的原始图像数据,是对真实空间中四维光场的重新采样和分布,与传统成像的数据组织形式有很大不同。传统相机标定的目的是求解其二维像点  $x$  与三维世界点  $X$  之间的关系: $x = PX$ <sup>[30-31]</sup>。相比之下,光场相机能够同时获取光线的位置和角度信息,其成像特征中隐含了  $X$  的深度,能够获得比传统相机更丰富的数据,其标定目的不仅是求取像点  $x$  与世界点  $X$  之间的映射关系,还包括光线角度的校正。而本文关注的两种光场相机,即传统光场相机与聚焦式光场相机,在成像模型上也存在差异。如图 5 所示,双平面参数的不确定将导致光线角度缺少约束,最终表现为三维重建场景的失真。单视环境下光场相机内参数标定的最终目的是将原始数据校正到与世界坐标系等比例的光场数据中。

受限于成像原理和传感器制备工艺,单视光场相机获取数据的位置分辨率低、视点基线窄,对目标光场信号采样的完备性较差。融合多视几何理论,研究光场相机的外参数标定方法,关联、统一参数化多组光场数据,可达到提高光场数据的分辨率和精度、提升光场设备扩展性等目标。将光场计算理论从单视环境延拓至多视下,能够有效解决单视光场面临的问题。

综上,光场相机参数标定研究是多视光场理论的核心问题。光场相机参数标定方法应以成像模型为基础,以光线的描述和提取为前提,研究光场环境下的参数化理论和几何模型,构建光场数据误差的代价函数,通过非线性最优化方法,求解内外参数,达到校正光场数据、统一参数化多组光场数据的目的。通过对光场相机参数的精确标定,可提高光线解码精确度,提高原始光场数据的分辨率,达到优化光场计算、拓展光场应用的目的。

#### 3.1 光线提取与校正

目前,大多数光场相机解码模型,均用针孔模型简化描述微透镜、用薄透镜模型描述主镜头。光场相机获取的双平面光场数据,等效于光心排布于同一平面的传统相机二维图像数据<sup>[32]</sup>。故光场相机光线的解码结果可理解为多视点图像的合成结果,基于这两种理解方式形成了不同的光线提取方法。

为描述空间中唯一确定的光线,除双平面坐标系下的四维参数表示外(如图 4 所示),常用 Plucker 坐标表示光线<sup>[33-34]</sup>,或用直线上一点及其方向向量表示<sup>[27]</sup>。Dansereau 等<sup>[19]</sup>提出了将子图像 $(i, j, k, l)^T$ 转换为光线向量 $(s, t, u, v)^T$ 的关系矩阵。Perwass 等<sup>[14]</sup>针对聚焦式光场相机,将每个原始图像像元定义为经过图像坐标与对应微透镜光心的光线,并通过光线跟踪算法计算重聚焦图像,在物理意义上等效于 Georgiev 等<sup>[11]</sup>、Wanner 等<sup>[21]</sup>提出的方法。张旭等<sup>[35]</sup>采用多频相移的方法,确定原始数据上像元与空间中标定板上物点的对应关系。Bergamasco 等<sup>[36]</sup>利用光线上一点及其方向描述一条光线,通过拍摄颜色编码板从光场相机原始数据中提取密集匹配的光线,并基于先验信息对光线进行插值和校正,实验证明通过该方法提取和校正的光线可有效提高编码板的重建精度。

Ng<sup>[17]</sup>针对传统相机模型,提出从原始数据合成多视点图像的方法,等效于解码出缺少  $L$  约束的双平面光场。Hahne 等<sup>[37]</sup>根据给定的渲染深度,重新排布原始数据,直接合成重聚焦图像,考虑到图像传感器的物理结构,部分光线提取工作从原始单通道数据出发。Sabater 等<sup>[38]</sup>直接在单通道数据上处理,合成未做色彩插值滤波的多视点图像,并计算视差图。Yu 等<sup>[39]</sup>提出了先解码、后色彩插值滤波的频域处理方法,有效提高了多视点图像的成像质量。Seifi 等<sup>[40]</sup>从空域上对色彩插值前的原始数据作处理,先合成部分通道数据缺失的多视点图像,再由此合成视差图、并作为数据补全的参考,改善了成像质量。由于图像传感器的成像单元具有一定采样带宽,Georgiev 等<sup>[41]</sup>针对聚焦式光场相机模型,提出根据渲染平面所在深度,扩大原始像元在渲染平面的覆盖范围,在空域上合成重聚焦图像,如图 6 所示;改变不同角度上光线的权重,可形成不同视点的图像。



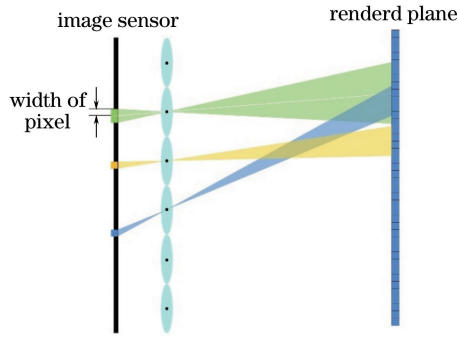


图 6 光场解码方法<sup>[41]</sup>

Fig. 6 Decoding method of light field<sup>[41]</sup>

由此可见,两种光场相机模型,虽然对光场的采样方式不同(图 3),但整体构造类似,光学组件相同,在图像传感器与微透镜阵列构成的双平面上具有同样的光场结构,均可利用图像坐标和微透镜光心的坐标来确定唯一光线;类似于重聚焦图像是双平面光场重参数化后角度积分的结果,原始图像是特殊双平面参数下角度积分的结果,但因为不同的聚焦方式而产生了不同的成像效果,如图 1、2 所示。

以上方法缺少对双平面距离  $L$  以及  $l_x$ 、 $l_u$  比例的标定,故该方法解码出的光场存在类似于图 4(b) 或 (c) 的畸变效果,影响绝对深度的精确求取。另外,以上光场解码模型均将微透镜的主点偏移理想化处理,而在远离主镜头光轴处,微透镜主点偏移量将变大,如图 7 所示,图中成像点  $A'$ 、 $B'$  分别来自于相机外真实场景不同深度上的物点  $A$ 、 $B$ ,且  $A$ 、 $B$  在多个微透镜后均有成像。每个子图像的成像中心为主镜头光心、微透镜光心连线与图像传感器平面的交点<sup>[42-43]</sup>。该理想化处理虽不影响单视光场成像、深度求取等应用,但一定程度上影响了光线提取的精确度。Hahne 等<sup>[42]</sup>通过光场相机在不同深度的重聚焦图像与对应聚焦处物理距离的对比,简单验证了微透镜主点偏移对光线方向的影响。

由于光场相机记录了光线的角度信息,故其畸变模型更为复杂。Dansereau 等<sup>[19]</sup>、Bok 等<sup>[44]</sup>均采用了径向形式的光线畸变模型,认为光线在角度平面上的偏移与其在位置平面到原点的距离有关;Johannsen 等<sup>[45]</sup>借用佩兹伐曲面的概念,解释了由于镜头的折射作用,相机内外两个不同光场在对同一平面刻画的差异,称为深度畸变;Jeon 等<sup>[46]</sup>根据视差图与场景先验的误差,计算多视点图像的校正平移量,对多视点图像的视点值进行了对准处理,校正了视差误差带来的光线畸变。

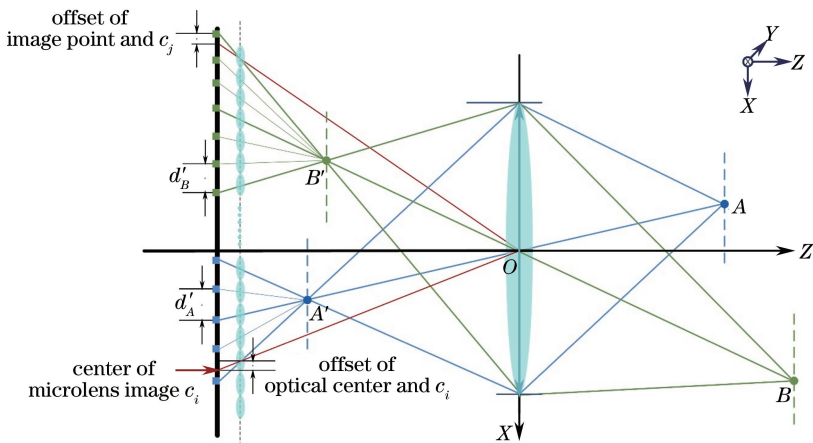


图 7 光场相机原始数据成像特征

Fig. 7 Imaging features of raw data from light field camera

### 3.2 光场参数化理论

对光线位置与角度信息的记录是光场成像理论的重要基础。光线的表示及光线间的关联关系是传统多视图几何理论的重要内容<sup>[30,33]</sup>,传统多视理论将图像数据抽象为光线集合,该框架下的理论成果为光场几何结构的研究提供了重要参考。研究光线参数化模型和光场几何理论,是光场相机参数标定的核心问题,需

根植于光场成像理论,并借鉴传统多视几何的研究成果。

在经典双平面模型中,空间中任意光线可以被两个平行平面上已知坐标的两点表示。Ng<sup>[17]</sup>分析了双平面距离改变后对光线的重参数化方法,并提出了频域等效的变换方法,是光场相机重聚焦算法的理论基础。Liang等<sup>[26]</sup>研究了双平面模型在三维空间平移、旋转、投影、折射、遮挡等多个变换的空域和频域理论模型。Dansereau等<sup>[19]</sup>提出了原始数据的解码矩阵,将子图像转换为双平面参数表示的光线,且矩阵的稀疏性与双平面位置相关。Hahne等<sup>[37]</sup>指出光场相机与相机阵列的等价性,并给出与其等价的相机阵列基线长度估计方法。因此,单个光场相机在恢复场景的三维结构时面临射影多义性问题<sup>[30]</sup>。其本质原因类似于双平面参数与场景的透视关系(如图5所示)。单视光场相机参数化理论问题仍有待深入研究。

Li等<sup>[33]</sup>在Plucker坐标下对广义极线约束建模,将多视下传统相机的外参数求解问题定义为光线集合的关联问题,分析不同配置下广义相机模型外参数的最小配置解。Johannsen等<sup>[34]</sup>将光场相机等效为光心排布于同一平面的相机阵列,分析了双平面坐标系与Plucker坐标系下光线的转换关系、Plucker坐标表示的光线在不同坐标系下的转换关系,并利用文献[47]中提出的广义极线约束模型,结合光场数据参数化模型,分析不同双平面坐标系下光线的关联模型。多视光场相机参数化理论可借鉴传统多视理论,但相关研究还未深入展开。

### 3.3 参数求解方法

光场相机原始数据的解码过程包括提取子图像、重采样原始数据并生成多视点图像,是参数求解方法必要的预处理工作。Cho等<sup>[20]</sup>提出了针对传统光场相机模型的数据校正方法,利用白曝光图像精确定位于图像的几何中心,计算微透镜阵列的一维角度安装误差并对成像进行校正。Jeon等<sup>[46]</sup>根据视差图与场景先验的误差,对准与校正了多视点图像的视点值。这几种标定方法的结果是生成两个方向维度上的多视点图像,即 $L(x, y, u_i, v_j)$ ,但并未标定双平面光场的距离参数 $L$ 和两个参数化平面单位刻度的比例 $l_x/l_u$ ,故仍不能将多视点图像组织成拥有唯一双平面参数的光场数据。该结果并不影响多视点、重聚焦等二维图像的渲染结果,但缺少对重聚焦图像深度间隔与成像尺度比例的约束<sup>[42]</sup>,无法描述光线的绝对角度。

Dansereau等<sup>[19]</sup>针对传统光场相机模型,利用针孔模型和薄透镜模型分别描述微透镜阵列和主镜头,提出了包含15个内参数的转换矩阵,阐述了由原始数据到光场数据的解码方法,定义了基于点到直线距离的光场数据重投影误差,并进一步研究了光场相机内外参数的标定方法。该方法利用光线变换矩阵将光线通过主镜头的折射、传播转换到相机外<sup>[26]</sup>,将子图像 $(i, j, k, l)^T$ 转换为表示光线的向量 $(s, t, u, v)^T$ ,完成双平面光场数据的解码。由于标定前已对原始数据进行了预处理(旋转处理、子图像几何中心校正、排布方式修正),其最终求解结果是预处理后的等效虚拟光场相机的参数。该方法求解参数时的初值依赖于传统相机参数标定方法<sup>[28]</sup>,并将光线畸变简单建模为径向畸变的形式。Dansereau等<sup>[19]</sup>建立的光场相机模型,认为微透镜阵列平面与图像传感器平面相互平行,仅存在一维角度误差,这在一定程度上影响了光线解码的精确性。

基于Dansereau等<sup>[19]</sup>提出的标定模型,Birklbauer等<sup>[29]</sup>利用Lytro相机拍摄全景光场数据,并将其注册到统一的同轴双柱面模型下,最终生成不同观点和不同聚焦深度的二维全景拼接图像,实验结果证明该方法对于有遮挡和透明物体的复杂场景均能够得到较好的效果。该方法没有使用多视点图像或多组重聚焦图像进行拼接<sup>[48]</sup>,而是直接将多组光场数据注册到统一坐标系下,提升了光场的位置采样范围。该方法不依赖深度信息<sup>[49]</sup>,但需精确控制相机采样的外参数,否则将因光场采样不足而导致混叠效应<sup>[50]</sup>。

Thomason等<sup>[43]</sup>总结了传统光场相机模型的成像原理和光路设计方法,推导了微透镜阵列姿态和子图像几何中心坐标的关系矩阵,并通过拍摄与光轴垂直的已知大小的物体来标定微透镜阵列与主镜头的安装距离,利用星点图像标定微透镜阵列相对于光轴的三维角度安装误差,每个子图像的几何中心为主镜头光心、微透镜光心的连线在图像传感器平面上的交点。该方法在标定安装距离时,标定精度受景深影响而误差较大,且实验环境下无法保证标定物的位置和姿态;其仅关注相机内参数的标定,并没有对相机外参数建模。光路模型创新性地引入了微透镜阵列的安装误差,并间接表明子图像几何中心并不在其对应微透镜的光轴上,即子图像主点偏移。

Bok等<sup>[44]</sup>认为应该基于微透镜光场相机的投影模型进行标定,并提出直接从原始光场数据中提取光场特征的方法标定内外参数。在光场原始图像中,同一物体将在相邻的不同微透镜下多次成像,并呈现一定的



规律:不同深度的物体,成像次数可能不同,且成像坐标到其归属于图像中心的距离不同,即成像点偏移,如图7所示。而在传统光场相机下,不易提取特定点的精确坐标,故作者通过提取线特征的方法代替成像偏移,并对线段成像的位置和斜率与相机内外参数的关系建立模型,进而通过求解线性方程组获得光场相机内外参数的初值,并利用非线性优化的方式修正求解结果和光线畸变。这里采用了与 Thomason 等<sup>[43]</sup>相同的畸变模型。

Johannsen 等<sup>[45]</sup>以聚焦式光场成像模型为目标,与 Dansereau 等<sup>[19]</sup>提出的光路模型类似,同样地利用针孔模型和薄透镜模型分别描述微透镜阵列和主镜头。在该模型下,通过同一点的多次成像坐标 $(u, v)^T$ ,重建出相机内部三维成像点的坐标 $(X', Y', Z')^T$ ,提出虚拟深度的概念,并通过主镜头的折射作用转换到相机外物点坐标 $(X, Y, Z)^T$ 。之后,使用经典的径向畸变模型描述成像面维度上的畸变,修正成像坐标位置;借用佩兹伐曲面的概念,建立主镜头的深度像差模型,用以描述主镜头对非近轴光线的折射效果,定义了光场在光轴维度上的畸变,即深度畸变模型。最终,提出包含21个内外参数的标定模型,并利用非线性优化方法求解相机内外参数及畸变系数。但在重建平面过程中,忽略了子图像的主点偏移<sup>[42]</sup>,为相机内部三维成像点的重建带来误差。虽然后续的深度畸变模型在物理意义上对其有修正意义,但是对子图像的主点偏移的忽略仍可能影响外参数求取的精确度。

Johannsen 等<sup>[34]</sup>将光场相机等效为光心排布于同一平面的相机阵列,分析不同双平面坐标系下光线的关联模型;通过提取多组光场数据中的匹配光线,求解和优化多组光场相机的外参数,并通过光场数据注册结果验证了参数求解的可靠性。虽然内参数已标定的光场相机可恢复场景的三维结构以及通过三维点云进行外参数求解,但实验数据证明,光线间关联模型能够更精确、更稳健地求解光场相机的姿态问题。

综上,提取子图像是光场相机标定的前提,涉及原始图像的旋转校正,大多数文献给出的方法均通过拍摄白曝光图像完成。由于光场相机对真实空间中特定位置点的光束有聚焦作用,微透镜被简化为针孔模型<sup>[19,43-45]</sup>。目前,有关光场相机标定的文献大多关注内参数标定方法;Dansereau 等<sup>[19]</sup>对二维像点与双平面光线的关系建模,将光线到三维点的距离定义为光场误差;Thomason 等<sup>[43]</sup>通过主镜头的放大倍率和子图像中心的分布规律,求解内参数;Bok 等<sup>[44]</sup>、Johannsen 等<sup>[45]</sup>均利用了像点与子图像中心的偏移,区别在于前者研究该特征与内外参数的关系,直接线性求解内外参数,并通过非线性方法优化包括畸变系数在内的内外参数,而后者根据该特征重建标定物的三维点坐标,通过非线性优化方法求解内外参数。

### 3.4 光场数据误差定义

光场数据误差的定义是量化光场相机标定精度的手段,可用来求解以光场特征为约束的标定问题,进一步优化光场畸变系数和相机内外参数。

传统成像数据是光线在二维平面投影的位置信息,使用重投影误差<sup>[30]</sup>来衡量标定精度,表示两个平面间的映射差值。相比之下,光场数据还包含光线的角度信息,可看作传统成像在不同视角下进行观测的数据集合,因此在表示和计算方法上更加复杂。Dansereau 等<sup>[19]</sup>提出两种方法定义光场误差:根据内外参数将相机外物点坐标投影到图像坐标系下,计算观测值与投影值之间的误差;或利用解码出的对应同一朗伯点的多条光线,求其在相机外的交点,将该交点到光线的距离定义为光线误差。Johannsen 等<sup>[45]</sup>基于光路几何关系,在相机坐标系下重建出标定板平面上每个三维先验点的坐标,继而利用重投影误差定义重建平面与标定板平面间的距离,且当标定板平面与主镜头光轴有一定夹角时,该误差定义方法可以表示重建光场在深度上的误差。Bok 等<sup>[44]</sup>通过线特征进行参数标定,将标定板上三维点坐标通过内外参数反投影回图像坐标系下,将该点到提取线段的距离定义为光场误差。

综上,光场数据误差定义形式多样,但必需保证其收敛结果能够唯一约束光场模型参数。

## 4 结束语

光场相机突破了传统数字成像的局限,通过内部微透镜阵列对光场的调制作用,能够采样并记录光线的位置和角度信息,可从本质上解决传统相机记录三维场景的不完备问题。光场相机相对于其他集成成像装置,采集方式便捷且易于标定,能够获得精确的光场数据;但受限于成像原理和传感器制备工艺,其较低的位置分辨率与较小的角度采样范围限制了光场相机的应用,故研究光场相机标定方法和光场参数化方法,是增

强和拓宽现有光场成像设备的性能及其应用的核心问题。目前,基于光场相机数据的参数化理论和参数标定方法研究已有一定进展,很多成果借鉴并发展了传统多视图几何理论。但现有理论与模型尚未关注光场相机对场景三维结构恢复的层次关系,内参数标定与光线校正问题仍需围绕该问题深入展开;光场相机的外参数标定问题尚处于起步阶段,光场数据的误差分析与精确度量、多组光场数据的重参数化与重采样等问题仍缺少有效的解决方案。

利用光场数据能够恢复更完整的场景信息,为解决计算机视觉问题提供了更有力的工具和途径。在深度获取<sup>[45,49,51-54]</sup>、超分辨率图像重构<sup>[41,51]</sup>、人脸识别<sup>[47]</sup>、真实场景检测<sup>[47]</sup>、显著性检测和场景分割<sup>[55]</sup>等方面已经尝试使用光场成像及处理方法并取得了一定研究成果,并在三维立体显示数据内容获取方面也呈现出重要作用<sup>[32]</sup>。大量研究成果已证实,在一些计算机视觉问题上,光场成像能够获得比传统成像更加可靠的结果。通过设计或组合不同光场成像设备可以提升成像性能,如视角范围、动态范围、采样速度、采样分辨率等,从而显著提高计算机视觉中如三维重建、全景拼接<sup>[29,48,56]</sup>、视角合成、目标识别与跟踪等应用的精确性与可靠性。同时,光场相机应用还可进一步扩展到虚拟现实、显微成像、流场测量、星空检测等方面,从而间接推动如信息科学、医学、物理学、天文学等多学科的发展,具有重要的理论意义和应用价值。

### 参 考 文 献

- Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[M]. Cambridge: MIT Press, 1991.
- Nie Yunfeng, Xiangli Bin, Zhou Zhiliang. Advances in light field photography technique [J]. Journal of Graduate University of 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.
- Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. ACM Transactions on Graphics, 1996: 31-42.
- Vaish V, Wilburn B, Joshi N, *et al.*. Using plane+ parallax for calibrating dense camera arrays[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2004, 1: 2-9.
- Liang C K, Lin T H, Wong B Y, *et al.*. Programmable aperture photography: Multiplexed light field acquisition[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3): 55.
- Levin A, Fergus R, Durand F, *et al.*. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3): 70.
- 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.
- Ng R, Levoy M, Brédif M, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science Technical Report CSTR, 2005, 2(11): 1-11.
- Lumsdaine A, Georgiev T. Full resolution lightfield rendering[J]. Indiana University and Adobe Systems, 2008.
- Levoy M, Ng R, Adams A, *et al.*. Light field microscopy[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3): 924-934.
- Georgiev T, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 021106.
- Venkataraman K, Lelescu D, Duparré J, *et al.*. Pi Cam: An ultra-thin high performance monolithic camera array[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2013, 32(6): 166.
- Perwass U, Perwass C. Digital imaging system, plenoptic optical device and image data processing method: US Patent 8, 619, 177[P]. 2013-12-31.
- Perwass C, Wietzke L. Single lens 3D-camera with extended depth-of-field[C]. SPIE, 2012, 8291: 829108.
- Georgiev T, Lumsdaine A. The multifocus plenoptic camera[C]. Int Society for Optics and Photonics, 2012, 8299: 829908.
- Wang Qing, Zhang Chunping, Zhou Guoqing, *et al.*. The number of variable angle sampling light field acquisition device: CN104469110A[P]. 2015-03-25.  
王 庆, 张春萍, 周果清, 等. 可变角度采样数的光场采集装置: CN104469110A[P]. 2015-03-25.
- Ng R. Digital light field photography[D]. Stanford: Stanford University, 2006.
- Lumsdaine A, Georgiev T G, Chunev G. Spatial analysis of discrete plenoptic sampling[C]. Int Society for Optics and Photonics, 2012, 8299: 829909.

- 19 Dansereau D G, Pizarro O, Williams S B. Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013: 1027-1034.
- 20 Cho D, Lee M, Kim S, *et al.*. Modeling the calibration pipeline of the Lytro camera for high quality light-field image reconstruction[C]. Int Conference on Computer Vision (ICCV), 2013: 3280-3287.
- 21 Wanner S, Fehr J, Jähne B. Generating EPI representations of 4D light fields with a single lens focused plenoptic camera [C]. Conference on Advances in Visual Computing, 2011: 90-101.
- 22 Liang C K, Ramamoorthi R. A light transport framework for lenslet light field cameras [J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2015, 34(2): 1-19.
- 23 Gortler S J, Grzeszczuk R, Szeliski R, *et al.*. The Lumigraph[C]. Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996: 43-54.
- 24 Levoy M. Light fields and computational imaging[J]. Computer, 2006, 39(8): 46-55.
- 25 Ng R. Fourier slice photography[C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(3): 735-744.
- 26 Liang C K, Shih Y C, Chen H H. Light field analysis for modeling image formation[J]. IEEE Transactions on Image Processing (TIP), 2011, 20(2): 446-460.
- 27 Yu J, Mc Millan L. General linear cameras[C]. Computer Vision-ECCV, 2004: 14-27.
- 28 Ye J, Yu J. Ray geometry in non-pinhole cameras: A survey[J]. The Visual Computer, 2014, 30(1): 93-112.
- 29 Birklbauer C, Bimber O. Panorama light-field imaging[J]. Eurographics, 2014, 33(2): 43-52.
- 30 Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004: 1, 4-5.
- 31 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 2000, 22(11): 1330-1334.
- 32 Liu Yongchun, Gong Huajun, Geng Zheng, *et al.*. Research of light-field 3D imaging systems based on holographic directional scattering-screen[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101103.  
刘永春, 龚华军, 耿征, 等. 基于全息定向散射屏的光场三维成像系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101103.
- 33 Li H, Hartley R, Kim J. A linear approach to motion estimation using generalized camera models[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.
- 34 Johannsen O, Sulc A, Goldluecke B. On linear structure from motion for light field cameras [C]. IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 720-728.
- 35 Zhang Xu, Li Chen. Calibration and imaging model of light field camera with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 121105.  
张旭, 李晨. 微透镜阵列式光场成像模型及其标定方法[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 121105.
- 36 Bergamasco F, Albarelli A, Cosmo L, *et al.*. Adopting an unconstrained ray model in light-field cameras for 3D shape reconstruction[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 3003-3012.
- 37 Hahne C, Aggoun A, Haxha S, *et al.*. Light field geometry of a standard plenoptic camera[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26659-26673.
- 38 Sabater N, Drazic V, Seifi M, *et al.*. Light-field demultiplexing and disparity estimation[J]. Technical Report, 2014.
- 39 Yu Z, Yu J, Lumsdaine A, *et al.*. An analysis of color demosaicing in plenoptic cameras [C]. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012: 901-908.
- 40 Seifi M, Sabater N, Drazic V, *et al.*. Disparity-guided demosaicking of light field images [C]. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2014: 5482-5486.
- 41 Georgiev T, Lumsdaine A. Superresolution with plenoptic 2.0 cameras [C]. Signal Recovery and Synthesis. Optical Society of America, 2009: STuA6.
- 42 Hahne C, Aggoun A, Velisavljevic V. The refocusing distance of a standard plenoptic photograph [C]. 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), 2015. IEEE, 2015: 1-4.
- 43 Thomason C M, Thurow B S, Fahringer T W. Calibration of a microlens array for a plenoptic camera [C]. 52nd Aerospace Sciences Meeting. 2014: 1-18.
- 44 Bok Y, Jeon H G, Kweon I S. Geometric calibration of micro-lens-based light-field cameras using line features [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014: 47-61.
- 45 Johannsen O, Heinze C, Goldluecke B, *et al.*. On the calibration of focused plenoptic cameras [M]. Heidelberg: Springer, 2013: 302-317.



- 46 Jeon H G, Park J, Choe G, *et al.*. Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2015: 1547-1555.
- 47 Raghavendra R, Raja K B, Busch C. Presentation attack detection for face recognition using light field camera[J]. IEEE Transactions on Image Processing (TIP), 2015, 24(3): 1060-1075.
- 48 Birklbauer C, Opelt S, Bimber O. Rendering gigaray light fields[C]. Computer Graphics Forum (CGF), 2013, 32(2): 469-478.
- 49 Wanner S, Goldluecke B. Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 2014, 36(3): 606-619.
- 50 Xiao Z, Wang Q, Zhou G, *et al.*. Aliasing detection and reduction in plenoptic imaging [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014: 3326-3333.
- 51 Bishop T E, Favaro P. The light field camera: Extended depth of field, aliasing, and super resolution [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), 2012, 34(5): 972-986.
- 52 Yang Degang, Xiao Zhaolin, Yang Heng, *et al.*. Depth estimation from light field analysis based multiple cues fusion[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(12): 2437-2449.  
杨德刚, 肖照林, 杨 恒, 等. 基于光场分析的多线索融合深度估计方法[J]. 计算机学报, 2015, 38(12): 2437-2449.
- 53 Xiao Z L, Wang Q, Si L, *et al.*. Reconstructing scene depth and appearance behind foreground occlusion using camera array[C]. Int Conference on Image Processing (ICIP), 2014: 41-45.
- 54 Tao M, Hadap S, Malik J, *et al.*. Depth from combining defocus and correspondence using light field cameras[C]. IEEE Conference on Computer Vision (ICCV), 2013: 673-680.
- 55 Li N, Ye J, Ji Y, *et al.*. Saliency detection on light field [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014: 2806-2813.
- 56 Xue Z, Baboulaz L, Prandoni P, *et al.*. Light field panorama by a plenoptic camera[C]. SPIE, 2013: 9020: 90200S.