

基于多层平面折射模型与多投影中心模型的光场相机水下标定

张晓强^{1*}, 钟良涛¹, 冷齐齐¹, 冉令燕², 楚红雨¹

¹西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621000;

²西北工业大学计算机学院, 陕西 西安 710129

摘要 现有光场相机水下标定方法的缺乏限制了光场成像技术在水下等折射场景中的应用。针对这一问题, 分别基于多层平面折射模型与多投影中心模型对典型水下场景中光场相机的场景光路与相机光路进行建模, 并对相应水下标定参数进行估计。利用平面折射几何约束对光场相机的水下标定参数进行线性初始化估计, 并在考虑真实光场相机内部光路畸变的条件下, 基于最小化重投影误差对水下标定参数进行非线性优化。设计了模拟场景与真实水下场景的定量标定实验对所提方法的有效性进行验证。结果表明, 所提方法能够较精确地对水下标定参数进行估计。在多次真实水下场景实验中, 折射面法向量方向误差均小于 0.8° , 折射面距离误差均小于 3%。定量对比实验结果表明, 相较单视水下标定方法, 由于所提方法利用了光场相机的多视特性, 故其标定结果与真实值更为接近。

关键词 机器视觉; 标定; 水下相机标定; 光场; 光场相机; 平面折射几何

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1215001

Underwater Light Field Camera Calibration Based on Multi-Layer Flat Refractive Model and Multi-Projection-Center Model

Zhang Xiaoqiang^{1*}, Zhong Liangtao¹, Leng Qiqi¹, Ran Lingyan², Chu Hongyu¹

¹School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology,

Mianyang 621000, Sichuan, China;

²School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, Shaanxi, China

Abstract The lack of calibration methods for the underwater light field camera restricts the applications of light field imaging technologies in underwater and other refractive scenes. Aiming at the above problem, the ray paths of the scene and those inside the camera in typical underwater scenes are modeled based on the multi-layer flat refractive model and the multi-projection-center model, and the corresponding underwater calibration parameters are estimated. The underwater calibration parameters of the light field camera are linearly initialized by using the flat refractive geometric constraints. Considering the internal ray path distortion in the real light field camera, the underwater calibration parameters are optimized nonlinearly by minimizing the reprojection error. Quantitative calibration experiments of simulated scenes and real underwater scenes are designed to verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed method can estimate the underwater calibration parameters accurately. In multiple real underwater scene experiments, the direction errors of the normal vectors of the refraction surfaces are all less than 0.8° and the distance errors of the refraction surfaces are all less than 3%. The quantitative comparison experimental results show that, compared with the single-view underwater calibration

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2021-12-16; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(61902322)、四川省科技计划项目(2019YJ0325)、西南科技大学博士基金项目(19zx7123)、中国民航大学民航航空器适航审定技术重点实验室开放基金(SH2020112706)

通信作者: *xqzhang@swust.edu.cn

method, the proposed method makes use of the multi-view characteristics of the light field camera, so the calibration results are closer to the real values.

Key words machine vision; calibration; underwater camera calibration; light field; light field camera; flat refractive geometry

1 引言

近年来,随着有缆水下机器人、自主水下机器人和无人潜航器等水下探测平台的广泛应用,水下光视觉系统获得了长足的发展,其探测数据量呈指数级增长^[1]。作为水下声学系统的有益补充,水下光视觉系统可在水下环境的测绘重建^[2-4]、水下生态系统的监测^[5]等一系列重要应用中提供重要的探测信息,其较高的空间分辨率与相对较小的噪声^[4]不仅有利于研究人员对水下环境进行直观感知与理解,同时也为水下机器人^[6-7]等水下平台主动作业能力的提升提供了数据基础。

现有水下光视觉系统大多基于传统光学成像相机,其采样过程仅能获取场景高维视觉信息的二维离散投影,在拍摄过程中损失了场景光线角度等信息。针对这一局限性,近年来,研究者们提出了场景光线的四维光场表征^[8-10]用于描述光线的位置与角度信息,并可利用基于微透镜阵列的光场相机对场景的光场信息进行单次曝光采集。受益于更高维的视觉数据,光场成像在遮挡目标成像、目标检测与分割等应用中获得了比传统二维成像更优的结果。

然而,现有光场的研究大多针对陆上环境,针对水下场景的应用仍较少。该现象的原因之一为陆上环境中场景光路沿直线传播的假设在大多数水下成像场景中不成立。在水下场景中,由于成像传感器往往放置于透明的防水外罩中,且空气、外罩透明材质和水的折射率不同,故其场景光路将在外罩的内外界面发生两次折射,使得陆上环境中常用的小孔成像模型不再适用^[11]。近年来,在多层平面折射模型^[12]的假设下,研究者们针对传统二维成像相机的水下标定展开了研究。Agrawal等^[12]利用所提出的平面折射几何约束对具有2~3种不同介质场景的相机外罩参数进行了估计。利用不同颜色光在折射时的色散现象,Yau等^[13]给出了两色光的三角化几何约束,并利用这一约束提升了外罩参数的估计精度。针对双目和多目系统,Chen等^[14]提出了利用折射面法向量对介质厚度进行估计的线性方法,并利用球面搜索的方法对最优折射面法向量进行估计。在文献^[14]的基础上,解则晓等^[15]进一步考虑了双目相机之间的

相对姿态,对法向量的估计方法进行了改进,相较于Agrawal等^[12]所提的方法提升了标定精度。Zhang等^[16]基于光场的双平面表征方法,对传统二维成像双目相机系统进行了水下标定。需要指出的是,上述方法均针对传统二维成像相机进行水下标定,针对光场相机的水下标定工作较少,在一定程度上限制了基于光场表征的视觉应用在水下场景中的应用。

针对上述问题,本文在近年来光场相机成像模型相关工作^[9,17-18]的基础上,对基于微透镜阵列的光场相机的水下标定方法进行了研究。首先,以多投影中心模型^[18]中光场相机内部参数所描述的相机光路为基础,利用多层平面折射几何约束对光场相机的水下外罩参数进行线性初始化。然后,在考虑真实光场相机中非线性畸变的条件下,对各参数进行非线性优化,通过仿真实验与真实水下环境的标定实验对所提方法的有效性进行验证。结果表明,所提方法可得到较为精确的水下标定结果,其中多次真实实验中的折射面法向量角度误差均小于 0.8° ,折射面距离误差均小于3%。

2 成像模型

为准确描述水下场景内三维物体的光线与光场相机成像靶面上像素的对应映射关系,需要在符合真实折射过程的条件下,分别对光场相机内部微透镜阵列的相机光路与水下折射条件下的场景光路进行建模。图1为光场相机水下标定相机光路与场景光路模型示意图。

2.1 相机光路模型

光场使用双平行平面表示^[8],并对场景中的光线进行参数化表示。设有两个互相平行的平面,即视点平面与图像平面,二者间距为 f ,不失一般性地,可设平面方程分别为 $z=0$ 和 $z=f$ 。场景光线 \mathbf{r} 与视点平面 $z=0$ 相交于点 (s, t) ,与图像平面 $z=f$ 相交于点 $(s+u, t+v)$,则可用四维向量 (s, t, u, v) 对光线 \mathbf{r} 进行表征。其中,光线与视点平面的交点 (s, t) 表征了光线的位置,光线与图像平面交点相对点 (s, t) 的偏移量 (u, v) 表征了光线的方向。

微透镜阵列的光场相机通过对相机靶面的多路复用对场景光线进行采集。通过对微透镜阵列光场

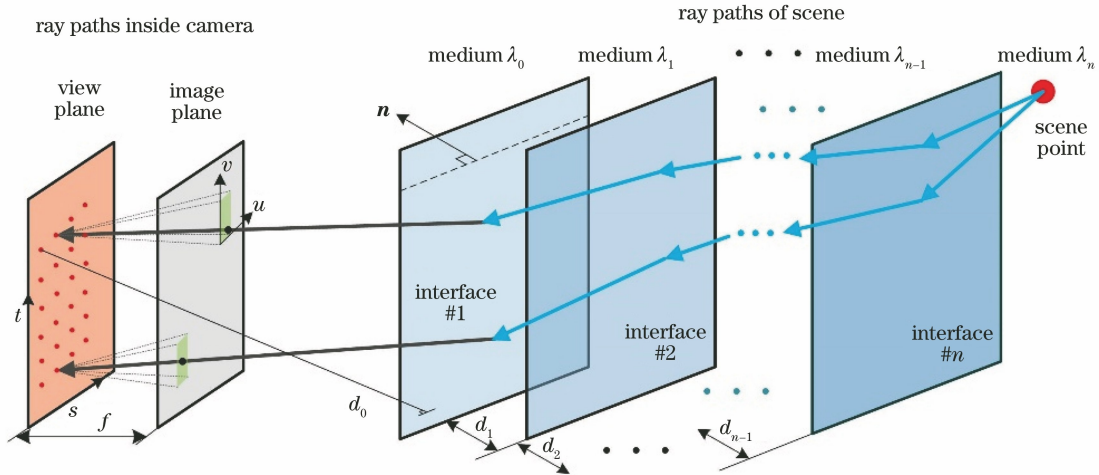


图 1 光场相机水下标定相机光路与场景光路模型示意图

Fig. 1 Model diagram of ray paths inside camera and those of scene in underwater light field camera calibration

相机靶面上所采集的二维原始图像进行解码^[19],可获得虚拟多视点采集图像。该图像中的各像素可由四维向量 (i, j, x, y) 表征,其中 (i, j) 为子视点位置的位置标号,且 $i, j \in \mathbf{N}$, (x, y) 为子视点图像上的像素坐标。多投影中心光场相机成像模型^[18]构建了四维向量 (s, t, u, v) 与 (i, j, x, y) 之间的映射关系,即

$$\begin{bmatrix} s \\ t \\ u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_u & 0 & u_0 \\ 0 & 0 & 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ j \\ x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: k_i 和 k_j 为各子视点在水平方向和竖直方向的距离; k_u, k_v, u_0, v_0 为子视点图像的小孔成像模型内参。利用式(1)可将解码后的光场相机图像上的光线四维表示 (i, j, x, y) 转换为实际物理坐标的四维表示 (s, t, u, v) ,进而可用于后续场景光路的模型中。同时,利用多投影中心模型可将微透镜阵列光场相机数据转化成光心共面的多子视角相机阵列图像,其中各子视角的小孔成像模型内参与姿态相同,这一性质将在后续的水下标定中得到应用。

2.2 场景光路模型

在水下场景中,光学传感器通常放置于防水外罩中。当外罩的内外表面为互相平行的平面时,可用多层平面折射模型^[12]对折射场景光路进行描述。为描述一般化的多介质场景,设场景中有 $n+1$ 个不同介质,其折射率分别为 $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ 。图1右侧给出了此类多介质场景的示意图,可以看出,相邻

介质之间的分界面为平面,分别命名为折射面#1, ..., 折射面#n。设各分界面互相平行,因此各平面的法向量 \mathbf{n} 相同,相机光心到折射面#1的距离设为 d_0 ,设折射面#i与折射面#(i+1)的距离为 $d_i, i \in [0, n-1]$ 。图1右侧给出了位于折射率为 λ_n 的介质中的某个三维点,该点发出的光线经过 n 个不同折射面的折射后,被左侧的光场相机拍摄到。由折射定律可知,由三维点到其像素投影的整条光线路径都在同一平面上,且光线 r_{i+1} 方向可由光线 r_i 进行计算,即

$$\mathbf{r}_{i+1} = \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \mathbf{r}_i + \left[\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \cos \theta_i - \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^2 \sin^2 \theta_i} \right] \mathbf{n}, \quad i \in [0, n-1], \quad (2)$$

式中: μ_i 和 μ_{i+1} 分别为相邻两介质的折射率; θ_i 为入射角,可通过光线 r_i 与 \mathbf{n} 两向量的方向进行计算。

3 光场相机水下成像参数标定

在第2节中相机光路与场景光路模型的基础上,本节对所提的微透镜阵列光场相机水下标定方法进行阐述。首先,对光场相机水下标定的问题进行描述,给出未知参数的物理意义。然后,在平面折射模型约束下对未知参数进行线性初始估计。最后,考虑实际光场相机的畸变效应,对相应参数进行非线性优化。

3.1 问题描述

在典型的水下成像场景中,通常假设场景中含

有 2 种(空气、水)或 3 种(空气、透明防水外罩和水)不同介质。本文假设场景内介质个数为 3,各介质的折射率 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 已知。假设折射场景满足多层平面折射模型,即相邻介质层之间的分界面为互相平行的平面,当场景中相邻介质层的分界面为曲面时,使用该假设会出现一定的系统误差。由于折射率为 λ_1 的中间介质为透明防水外罩,其厚度可提前测量,故本文假设该介质的厚度(折射面 #1 到折射面 #2 的距离 d_1)已知。设 K 个三维点 $\mathbf{P}_k (k \in [1, K])$ 位于介质 2 中,且各三维点在某个物体坐标系 O 中的坐标已知。光场相机位于介质 0 中,假设其内部参数已利用多投影中心模型^[18]标定,利用该模型可将光场相机视作光心共面的子视角相机阵列,且各子视角的姿态相同。设相机坐标系 C 的原点位于光场相机左上角的子视角光心处。为完整描述折射场景光路,需对多层平面折射模型中的若干未知参数进行标定,主要包括折射面的法向量 \mathbf{n} 和相机坐标系原点到折射面 #1 的距离 d_0 。此外,还需对物体坐标系 O 与相机坐标系 C 之间未知的相对旋转矩阵 \mathbf{R}_0^C 与相对平移矩阵 \mathbf{t}_0^C 进行估计。下文

中,除特殊说明外,各向量均在相机坐标系 C 下进行表示。

3.2 基于平面折射约束的水下标定参数初始估计

考虑三维点 \mathbf{P}_k , 设其在光场相机位置标号为 (i, j) 的子视点中的对应像素坐标为 (x, y) , 将其在介质 0, 介质 1, 介质 2 中对应的折射光线路径设为 $\mathbf{r}_0^{(i,j),k}, \mathbf{r}_1^{(i,j),k}, \mathbf{r}_2^{(i,j),k}$ 。设光线路径与折射面 #1、折射面 #2 的交点分别为点 $\mathbf{q}_1^{(i,j),k}$ 与 $\mathbf{q}_2^{(i,j),k}$ 。

根据折射定律与多层平面折射模型^[12], 可知点 \mathbf{P}_k 应在光线与过子视点 (i, j) 光心的折射面法向量 \mathbf{n} 所构成的平面上^[12], 即有如下约束

$$[\mathbf{R}_0^C \mathbf{P}_k + \mathbf{t}_0^C - \mathbf{t}^{(i,j)}]^T [\mathbf{n} \times \mathbf{r}_0^{(i,j),k}] = 0, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{t}^{(i,j)} = [(i-1)k_i \quad (j-1)k_j \quad 0]^T$ 为子视点 (i, j) 相对相机坐标系 C 原点的相对平移向量。光线 $\mathbf{r}_0^{(i,j),k}$ 可由像素坐标 (x, y) 与光场相机内参解算得到, 即

$$\mathbf{r}_0^{(i,j),k} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & u_0 \\ 0 & k_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将式(3)等号左侧展开并进行整理, 有

$$\begin{aligned} & [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T ([\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C) \mathbf{P}_k + [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T (\mathbf{n} \times \mathbf{t}_0^C) - [\mathbf{t}^{(i,j)} \times \mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T \mathbf{n} = \\ & [\mathbf{P}_k^T \otimes [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T \quad [\mathbf{t}^{(i,j)} \times \mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T] \begin{bmatrix} \text{vec}([\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C) \\ \mathbf{n} \times \mathbf{t}_0^C \\ \mathbf{n} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\text{vec}([\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C)$ 为矩阵 $[\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C$ 中各元素的一维列向量排列; \otimes 为 Kronecker 积; $[\mathbf{n}]_{\times}$ 为三维法向量 \mathbf{n} 对应的三阶反对称矩阵。可以看出, 式(5)给出了未知参数 $\mathbf{n}, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C$ 与测量量之间的形如 $\mathbf{a}_k^T \mathbf{x} = 0$ 的线性约束, 其中 $\mathbf{a}_k^T = [\mathbf{P}_k^T \otimes [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T [\mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T \quad [\mathbf{t}^{(i,j)} \times \mathbf{r}_0^{(i,j),k}]^T]$, $\mathbf{x}^T = [\text{vec}([\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C) \quad \mathbf{n} \times \mathbf{t}_0^C \quad \mathbf{n}]$ 。类似地, 可将场景内 K 个三维点和其在子视角 (i, j) 中的对应像素所构建的行向量 \mathbf{a}_k^T 按行排列, 可得系数矩阵 \mathbf{A} 。利用矩阵奇异值分解方法, 可对方程 $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{0}$ 进行求解, 通过将矩阵 $[\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C$ 的范数设为 1, 可求得 \mathbf{x} 的尺度因子。解得 $[\mathbf{n}]_{\times} \mathbf{R}_0^C$ 后, 利用类似本质矩阵求解^[20]的方法, 对 \mathbf{R}_0^C 进行恢复^[12, 15]。对于 \mathbf{t}_0^C , 考虑到 \mathbf{x} 中的 $\mathbf{n} \times \mathbf{t}_0^C$ 与 \mathbf{n} 垂直, 因此利用式(5)仅可对 \mathbf{t}_0^C 垂直于 \mathbf{n} 的分量 $\mathbf{t}_{0,\perp}^C$ 进行估计。

设未知平移向量 \mathbf{t}_0^C 平行于 \mathbf{n} 的分量为 $h\mathbf{n}$, 即

$\mathbf{t}_0^C = \mathbf{t}_{0,\perp}^C + h\mathbf{n}$, 其中 h 为标量系数。由平面折射几何约束^[12]可知, 点 \mathbf{P}_k 与 $\mathbf{q}_2^{(i,j),k}$ 的连线方向与光线 $\mathbf{r}_2^{(i,j),k}$ 的方向平行, 利用向量叉乘, 有

$$\mathbf{r}_2^{(i,j),k} \times [\mathbf{R}_0^C \mathbf{P}_k + \mathbf{t}_{0,\perp}^C + h\mathbf{n} - \mathbf{t}^{(i,j)} - \mathbf{q}_2^{(i,j),k}] = \mathbf{0}, \quad (6)$$

其中, 点 $\mathbf{q}_2^{(i,j),k}$ 的坐标可由光线路径方向 $\mathbf{r}_0^{(i,j),k}$ 、光线路径方向 $\mathbf{r}_1^{(i,j),k}$ 、相机坐标系原点到折射面 #1 的距离 d_0 和中间介质厚度 d_1 进行计算, 即

$$\mathbf{q}_2^{(i,j),k} = \frac{\mathbf{n}^T [(i-1)k_i \quad (j-1)k_j \quad d_0]^T}{-\mathbf{n}^T \mathbf{r}_0^{(i,j),k}} \mathbf{r}_0^{(i,j),k} + \left[\frac{d_1}{-\mathbf{n}^T \mathbf{r}_1^{(i,j),k}} \right] \mathbf{r}_1^{(i,j),k}, \quad (7)$$

其中, 光线路径方向 $\mathbf{r}_0^{(i,j),k}$ 和 $\mathbf{r}_1^{(i,j),k}$ 可由式(2)进行迭代计算得到。将式(7)代入式(6)后可整理为关于未知数 h 和 d_0 的方程, 即

$$\mathbf{r}_2^{(i,j),k} \times \left[\mathbf{n} \frac{n(3)}{-\mathbf{n}^T \mathbf{r}_0^{(i,j),k}} \mathbf{r}_0^{(i,j),k} \right] \begin{bmatrix} h \\ d_0 \end{bmatrix} = -\mathbf{r}_2^{(i,j),k} \times \left[\mathbf{R}_0^C \mathbf{P}_k + \mathbf{t}_{0,\perp}^C - \mathbf{t}^{(i,j)} - \frac{n(1)(i-1)k_i + n(2)(j-1)k_j}{-\mathbf{n}^T \mathbf{r}_0^{(i,j),k}} \mathbf{r}_0^{(i,j),k} - \frac{d_1}{-\mathbf{n}^T \mathbf{r}_1^{(i,j),k}} \mathbf{r}_1^{(i,j),k} \right], \quad (8)$$

式中： $\mathbf{n}(i)$ 为归一化后法向量的第*i*个元素， $i \in [1, 3]$ 。通过联立*K*个不同三维点的形如式(8)的约束方程，可对剩余未知参数*h*和*d*₀进行求解，在求得*h*后，可利用 $\mathbf{t}_0^C = \mathbf{t}_{0,\perp}^C + h\mathbf{n}$ 对 \mathbf{t}_0^C 进行求解。

3.3 基于光场相机畸变模型与折射正向投影的非线性优化

根据 3.2 节所述，利用光场相机中标号为(*i, j*)的子视角图像可对水下标定中的未知参数进行估计。进一步地，利用光场相机中所有子视角图像可对未知参数进行多次独立估计。对多次估计结果求平均可获得各未知参数的线性估计结果。考虑到实际水下成像过程中，三维点在各子视角图像中的投影点的像素坐标存在测量误差，仅使用 3.2 节中的线性约束所得的标定结果仍存在误差，因此需对该估计进行进一步优化。

设光场相机中共有 $G \times G$ 个子视角，场景中拥有 *K* 个三维点，使用最小化重投影误差的方式对标定参数进行非线性优化，重投影误差为三维点在各子视角图像上投影点的测量值与投影值之间的像素距离。考虑到微透镜阵列的畸变，需对测量值进行畸变矫正。重投影误差的定义为

$$J = \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G \sum_{k=1}^K [D_k^{(i,j)}(x, y) - F^{(i,j)}(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C, \mathbf{P}_k)]^2, \quad (9)$$

式中： $D_k^{(i,j)}(x, y)$ 为测量值，即三维点 \mathbf{P}_k 在子视角(*i, j*)中的投影点(*x, y*)经过畸变矫正后的像素坐标；函数 $F^{(i,j)}(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C, \mathbf{P}_k)$ 为投影值，即利用水下标定参数 \mathbf{n} 和*d*₀，以及光场相机位姿 \mathbf{R}_0^C 和 \mathbf{t}_0^C 将三维点 \mathbf{P}_k 投影至子视角(*i, j*)的投影点的像素坐标。现分别对式(9)中的 $D_k^{(i,j)}(x, y)$ 和 $F^{(i,j)}(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C, \mathbf{P}_k)$ 进行阐述。

考虑到光场相机中主透镜与微透镜阵列的制作与装配误差，真实成像条件下相机光路并不满足理想的多投影中心模型，因此需对点 \mathbf{P}_k 在子视角(*i, j*)中的投影点坐标进行畸变矫正。本文使用文献[18]给出的成像平面上径向畸变的畸变模型进行矫正。对于子视角(*i, j*)中的像素(*x, y*)，利用式(1)，可转化为(*s, t, u, v*)的四维表示。利用文献[18]中的畸变系数，有

$$\begin{cases} u' = [1 + k_1(u^2 + v^2) + k_2(u^2 + v^2)^2]u + sk_3 \\ v' = [1 + k_1(u^2 + v^2) + k_2(u^2 + v^2)^2]v + tk_4 \end{cases}, \quad (10)$$

式中： k_n 为离线标定的光场相机畸变系数， $n \in [1, 4]$ 。在式(10)基础上，可得矫正的像素点坐标 $D_k^{(i,j)}(x, y) = [(u' - u_0)/k_u \quad (v' - v_0)/k_v]^T$ 。

对于正向投影 $F^{(i,j)}(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C, \mathbf{P}_k)$ ，考虑到本文工作是针对三介质环境的，文献[12]已给出了该条件下折射正向投影的解析解。为利用该方法，需计算三维点 \mathbf{P}_k 在子视角(*i, j*)的局部相机坐标系下的坐标 $\mathbf{P}_k^{(i,j)}$ ，并使用 $d_0^{(i,j)} = n_1(i-1)k_i + n_2(j-1)k_j + n_3d_0$ 计算子视角(*i, j*)光心至折射面#1的距离，其中 n_i 代表归一化法向量的第*i*个元素， $i \in [1, 3]$ 。当场景中含有三个不同介质时，解析正向投影需求解 12 次方程，并利用折射定律选择符合物理折射过程的正确解。由于过程较为繁琐，受限于篇幅，在此不再赘述。

综上，以 $G \times G$ 个子视角线性估计值的均值为初值，并对式(9)所定义的重投影误差进行优化，可得最终水下标定的结果 $(\hat{\mathbf{n}}, \hat{d}_0, \hat{\mathbf{R}}_0^C, \hat{\mathbf{t}}_0^C) = \arg \min_{(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C)} J$ 。在实际求解过程中，使用 MATLAB 软件中的 lsqnonlin 函数对式(9)的非线性最小二乘求解过程进行优化，其中最大迭代次数设为 5000，最大函数评估数设为 50000，其余参数均使用函数的默认值。

4 实验设计与结果分析

为验证所提光场相机水下标定方法的有效性，分别设计了模拟实验与真实场景实验对标定方法的精度进行定量分析。定量评价指标主要有：

1) 折射面法向量方向角度误差 e_n 。定义为法向量估计值 $\hat{\mathbf{n}}$ 与真值 \mathbf{n} 之间的夹角大小，即 $e_n = \arccos[\hat{\mathbf{n}}^T \mathbf{n} / (\|\hat{\mathbf{n}}\|_2 \|\mathbf{n}\|_2)] \times 180^\circ$ ；

2) 光场相机与折射面距离误差 e_{d_0} 。定义为光场相机左上角子视角光心到折射面#1距离的估计值 \hat{d}_0 与真值*d*₀之间的归一化相对误差，即 $e_{d_0} = |\hat{d}_0 - d_0| / d_0$ ；

3) 重投影误差 e_{repj} 。定义为 $G \times G$ 个子视角图像中由式(9)所计算的重投影误差的均值, 即 $e_{\text{repj}} = \left\{ \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{G} \cdot \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G \sum_{j=1}^G \sum_{k=1}^K [D_k^{(i,j)}(x, y) - F^{(i,j)}(\mathbf{n}, d_0, \mathbf{R}_0^C, \mathbf{t}_0^C, \mathbf{P}_k)]^2 \right\}^{1/2}$ 。

4.1 模拟实验

根据典型水下场景的介质分布情况, 设模拟实验场景中有三种不同介质, 其折射率分别为 1.00、1.50 和 1.33, 将折射率为 1.50 的中间介质类比为防水外罩透明材料。在模拟实验中, 假设相机内部畸变系数均为 0, 设模拟光场相机的内参为 $k_i = 2.5 \times 10^{-4}$, $k_j = 2.5 \times 10^{-4}$, $k_u = 0.0020$, $k_v = 0.0019$, $u_0 = -0.3200$, $v_0 = -0.3300$ 。该组参数为文献[18]中的模拟实验参数。设光场相机左上子视角到折射面的距离为 1 个单位长度, 设中间介质厚度为 d_1 。为模拟相机的随机姿态, 设光场相机的相机坐标系与折射面坐标系的相对旋转矩阵为随机生成的旋转矩阵, 其中三轴角度的变化范围为 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 。为模拟标定过程中的平面棋盘格标定板, 设折射率为 1.33 的介质中有 $C_m \times C_n$ 个三维点, 且位于同一平面(物体平面)。实验中, 取 $C_m = 13$, $C_n = 9$ 。设物体平面坐标系与光场相机的相机坐标系之间的相对旋转矩阵 \mathbf{R}_0^C 随机生成, 三轴角度的变化范围为 $[-7^\circ, 7^\circ]$ 。相对平移矩阵 $\mathbf{t}_0^C = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 也随机生成, 其中 $t_x, t_y \in [-0.2, 0.2]$, $t_z \in [1.4, 1.6]$ 。利用解析正向投影, 可得到三维点在各子视角中投影的像素坐标。

4.1.1 不同测量误差与不同中间介质厚度条件下标定精度分析

为验证所提方法在不同成像条件下的标定精度, 在分别考虑不同中间介质厚度 d_1 与角点测量像素误差的条件下, 对三种定量指标进行计算。在实验中, 将光场相机到折射面的距离固定为 1 个单位长度, 设中间介质厚度分别为 0.05 个单位长度、0.10 个单位长度、0.15 个单位长度, 分别代表薄、中、厚三种程度的中间介质厚度。考虑到真实标定过程中角点检测的测量误差, 实验中对三维点投影像素坐标进行加噪处理, 噪声为均值为 0、标准差为 σ_{pixel} 的高斯噪声。设 σ_{pixel} 的取值为 0.3, 0.5, 0.7 pixel。实验中设子视角个数为 5×5 , 对于每个不同 $d_1, \sigma_{\text{pixel}}$ 的配置, 分别进行 100 次独立实验, 计算三种定量评价指标并求平均, 所得标定精度分析如表 1 所示。从表 1 中可以看出, 利用非线性优化,

所提方法可将重投影误差优化至与测量噪声相同的水平。随着测量噪声的增加, 各误差量均有上升。在不同 d_1 条件下, 所获得的 e_n 与 e_{d_0} 大致相同。在亚像素测量精度下, e_{d_0} 约为 10%, e_n 约为 3°。

表 1 不同中间介质厚度条件下标定精度定量分析
Table 1 Quantitative analysis of calibration accuracy under different intermediate medium thickness conditions

d_1 (in unit length)	Measurement noise / pixel	e_{d_0} / %	e_n / (°)	e_{repj} / pixel
0.05	0.3	6.21	1.9356	0.2997
	0.5	10.71	3.1016	0.4992
	0.7	14.07	3.3863	0.6983
0.10	0.3	6.90	2.2325	0.2996
	0.5	9.67	2.3990	0.4991
	0.7	12.70	2.9575	0.6986
0.15	0.3	5.02	1.4150	0.2996
	0.5	11.60	2.6692	0.4998
	0.7	17.23	3.9720	0.6995

4.1.2 定量对比实验

考虑到现有文献中针对光场相机水下标定的工作较少, 无法进行直接定量对比。本对比实验中采用单目相机水下标定的方法^[12]进行水下标定相关参数的定量对比分析, 该方法的输入为单视角图像与相机内参。在本实验中, 使用光场相机左上角的子视角图像作为算法输入, 相机内参由 4.1 节中 k_u, k_v, u_0, v_0 确定。同时, 为保证对比的合理性, 在使用该方法时, 假设中间介质厚度已知, 对比实验中采用该方法项目主页^[21]的公开代码进行对比。

实验中设测量误差 $\sigma_{\text{pixel}} = 0.5$ pixel, d_1 为 0.1 个单位长度。利用所提方法分别在 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7$ 个子视角数据上进行实验, 并与 Agrawal 等^[12]提出的方法进行对比。各方法均进行 100 次独立实验, 并对三种指标进行求均, 所得结果如表 2 所示。可以看出, 利用所提方法, 随着子视角个数的增加, e_n 与 e_{d_0} 均减小。所提方法较 Agrawal 等^[12]提出的方法精度有较大提升。

4.2 真实场景实验

为进一步验证所提光场相机水下标定方法在真实场景中的标定精度, 使用真实光场相机进行真实水下场景的标定与定量分析。图 2(a) 给出了真实场景中实验数据与真值数据的获取过程, 水中放置有棋盘格标定板, 其上的角点在标定板坐标系下的三维坐标可以测得。可以看出, 位于水中的角点发出的光线将穿过水箱玻璃到达位于空气中的光场相机靶面上。这一场景光路与放置于平面玻璃防水外

表 2 不同子视角个数条件下所提方法与文献[12]中方法的标定精度的定量对比

Table 2 Quantitative comparison of calibration accuracy between proposed method and method in Ref. [12] under different number of sub-apertures

Calibration method	Number of sub-apertures	$e_{d_0}/\%$	$e_n/(\circ)$	$e_{\text{repi}}/\text{pixel}$
Proposed	3×3	14.43	3.8114	0.4987
Proposed	5×5	9.67	2.3990	0.4991
Proposed	7×7	7.28	2.2280	0.4990
Method in Ref. [12]	1	50.12	10.7565	0.5381

罩中的光场相机观察水下场景的场景光路相同。实验中光场相机的型号为 Lytro Illum, 实验中设定光场相机的焦距为 30 mm, 拍摄时快门时间为 1/80 s。各子视角的解码数据利用文献[19]的方法获得, 在此基础上, 利用多投影中心模型^[18]对所用

Lytro Illum 相机的内部参数与畸变系数进行离线标定: 内部参数的标定结果为 $k_i = 2.4906 \times 10^{-4}$, $k_j = 2.7969 \times 10^{-4}$, $k_u = 0.0017$, $k_v = 0.0017$, $u_0 = -0.5323$, $v_0 = -0.3854$; 畸变系数为 $k_1 = 0.3472$, $k_2 = 0.0948$, $k_3 = -0.3436$, $k_4 = -0.4981$ 。

图 2(b)给出了本次实验条件下的折射面法向量 \mathbf{n} 、光场相机与折射面的距离 d_0 的真值数据获取过程。考虑到所标定的内参 k_u, k_v, u_0, v_0 为子视角图像内参的逆矩阵元素, 利用光场相机最左上子视角所拍摄的折射面 #1 上的平面棋盘格标定板图像。基于张氏标定法可对最左上子视角相对折射面上标定板的姿态与位置进行估计, 进而可对 \mathbf{n} 与 d_0 的真值数据进行解算。利用折射面表面棋盘格标定板获取 \mathbf{n} 与 d_0 真值的方法亦在文献[2, 13]等中使用。本小节中中介介质的厚度为 $d_1 = 10 \text{ mm}$ 。

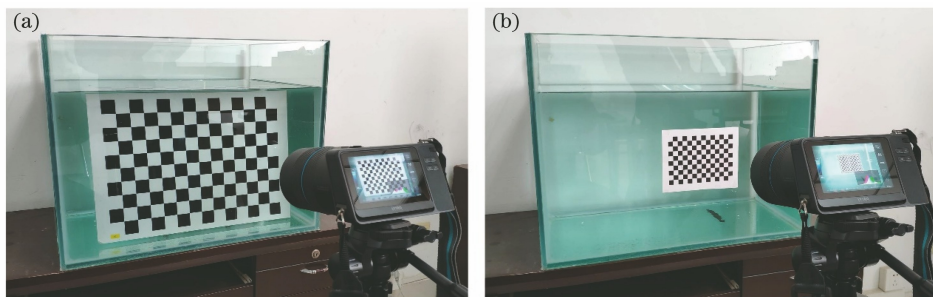


图 2 真实场景实验数据采集与真值获取。(a)真实场景标定数据采集;(b)基于张氏标定法获取 \mathbf{n} 与 d_0 真值

Fig. 2 Real scene experimental data acquisition and ground truth value acquisition. (a) Real scene calibration data acquisition; (b) ground truth values of \mathbf{n} and d_0 obtained by Zhang's method

4.2.1 不同位姿条件下标定精度的定量分析

为验证所提标定算法在不同相机位姿条件下的标定精度, 在图 2(a)所示的真实场景中, 将棋盘格标定板放置于水中。分别在 3 种不同位姿条件下,

采集了水下标定图像。利用 3×3 个子视角图像, 对光场相机水下成像参数进行标定。对所得标定结果与所获取的真值数据进行定量精度分析, 所得结果如表 3 所示。

表 3 不同位姿条件下标定精度的定量分析

Table 3 Quantitative analysis of calibration accuracy under different poses

Pose No.	ground truth of \mathbf{n}	calibrated \mathbf{n}	$e_n/(\circ)$	ground truth of d_0/m	calibrated d_0/m	$e_{d_0}/\%$	$e_{\text{repi}}/\text{pixel}$
1	$[0.3108 \quad -0.0138 \quad -1.0000]^T$	$[0.3221 \quad -0.0236 \quad -1.0000]^T$	0.7936	0.3301	0.3316	0.45	0.3639
2	$[-0.3419 \quad -0.0366 \quad -1.0000]^T$	$[-0.3450 \quad -0.0286 \quad -1.0000]^T$	0.4905	0.3429	0.3523	2.73	0.3483
3	$[0.0513 \quad -0.0182 \quad -1.0000]^T$	$[0.0550 \quad -0.0221 \quad -1.0000]^T$	0.3046	0.3606	0.3645	1.10	0.3491

表 3 中位姿 1、2 分别为具有左、右不同偏航角的姿态, 位姿 3 与折射面近似垂直。各实验中光场相机光心与折射面的距离均不相同。通过三次实验中与真值数据的定量对比可以看出, 在不同位姿条件下所提方法估计出的法向量的方向误差均小于 0.8° , 相机与折射面的距离误差均小于 3%, 重投影

误差均在 0.35 pixel 左右, 体现了所提方法的精度。

4.2.2 水下标定参数定量对比实验

选用 4.2.1 节实验中三组不同位姿条件下所拍摄的水下平面标定板图像, 分别采用本文所提方法(子视角数量为 3×3)与 Agrawal 等^[12]提出的方法对水下标定中的折射面法向量、相机到折射面的距

离等进行标定,并与真值数据进行误差计算。所得对比结果如表 4 所示。可以看出,利用更多子视角的视觉信息且进行协同优化,所提方法在 e_n 上取得了较优的估计结果。

表 4 所提方法与文献[12]中方法的标定精度的定量对比

Table 4 Quantitative comparison of calibration accuracy between proposed method and method in Ref. [12]

Pose No.	Calibration method	$e_{d_0}/\%$	$e_n/(^\circ)$
1	Method in Ref. [12]	2.16	0.8104
	Proposed	0.45	0.7936
2	Method in Ref. [12]	2.53	1.2174
	Proposed	2.73	0.4905
3	Method in Ref. [12]	1.05	0.6617
	Proposed	1.10	0.3046

5 结 论

对折射条件下基于微透镜阵列的光场相机的水下标定方法进行了研究,利用多投影中心模型对光场相机的相机光路模型进行建模,并在多层平面折射模型假设下,对光场相机水下标定未知参数的线性约束进行构建。同时,基于最小化重投影误差的方法对参数进行优化。实验结果表明,所提方法可对真实水下场景中的 Lytro Illum 光场相机进行较为精确的水下标定,其中折射面法向量的方向误差均小于 0.8° ,相机与折射面的距离误差均小于 3% 。

参 考 文 献

- [1] 黄琰,李岩,俞建成,等. AUV 智能化现状与发展趋势[J]. 机器人, 2020, 42(2): 215-231.
Huang Y, Li Y, Yu J C, et al. State-of-the-art and development trends of AUV intelligence[J]. Robot, 2020, 42(2): 215-231.
- [2] Chen X D, Yang Y H. A closed-form solution to single underwater camera calibration using triple wavelength dispersion and its application to single camera 3D reconstruction[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(9): 4553-4561.
- [3] Chadebecq F, Vasconcelos F, Lacher R, et al. Refractive two-view reconstruction for underwater 3D vision[J]. International Journal of Computer Vision, 2020, 128(5): 1101-1117.
- [4] Weidner N, Rahman S, Li A Q, et al. Underwater cave mapping using stereo vision[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 29-June 3, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 5709-5715.
- [5] Karnowski J, Hutchins E, Johnson C. Dolphin detection and tracking[C]// IEEE Winter Applications and Computer Vision Workshops, January 6-9, 2015, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2015: 51-56.
- [6] 周浩,姜述强,黄海,等. 基于视觉感知的海生物吸纳式水下机器人目标捕获控制[J]. 机器人, 2019, 41(2): 242-249, 275.
Zhou H, Jiang S Q, Huang H, et al. Vision based target capture control for sea organism absorptive underwater vehicle[J]. Robot, 2019, 41(2): 242-249, 275.
- [7] Xu F, Wang H S, Liu Z, et al. Adaptive visual servoing for an underwater soft robot considering refraction effects [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10575-10586.
- [8] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]// Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, August 4-9, 1996, New Orleans, LA, USA. New York: ACM Press, 1996: 31-42.
- [9] Wu G C, Masia B, Jarabo A, et al. Light field image processing: an overview[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2017, 11(7): 926-954.
- [10] 方璐,戴琼海. 计算光场成像[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111001.
Fang L, Dai Q H. Computational light field imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111001.
- [11] Treibitz T, Schechner Y, Kunz C, et al. Flat refractive geometry [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(1): 51-65.
- [12] Agrawal A, Ramalingam S, Taguchi Y, et al. A theory of multi-layer flat refractive geometry[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE Press, 2012: 3346-3353.
- [13] Yau T, Gong M L, Yang Y H. Underwater camera calibration using wavelength triangulation[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2013: 2499-2506.
- [14] Chen X D, Yang Y H. Two-view camera housing parameters calibration for multi-layer flat refractive interface[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2014, Columbus, OH, USA. New York: IEEE Press, 2014: 524-531.
- [15] 解则晓,余江姝,迟书凯,等. 非平行双目视觉系统水下标定与测量[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912004.
Xie Z X, Yu J S, Chi S K, et al. Underwater calibration and measurement based on non-parallel

- stereovision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912004.
- [16] Zhang C, Zhang X, Zhu Y K, et al. Model and calibration of underwater stereo vision based on the light field[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(10): 105402.
- [17] 张春萍, 王庆. 光场相机成像模型及参数标定方法综述[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609004.
Zhang C P, Wang Q. Survey on imaging model and calibration of light field camera[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609004.
- [18] Zhang Q, Zhang C P, Ling J B, et al. A generic multi-projection-center model and calibration method for light field cameras [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(11): 2539-2552.
- [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*, June 23-28, 2013, Portland, OR, USA. New York: IEEE Press, 2013: 1027-1034.
- [20] Nistér D. An efficient solution to the five-point relative pose problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(6): 756-777.
- [21] Agrawal A. A theory of multi-layer flat refractive geometry[EB/OL]. [2021-05-08]. <http://www.amitkagrawal.com/cvpr12/FlatRefraction.html>.