

## 基于射线追踪的线结构光曲面网格标定

王晓倩<sup>1</sup>, 徐锐<sup>2</sup>, 吴守仑<sup>2</sup>, 彭涛<sup>1</sup>, 黄臻臻<sup>1</sup>, 张之江<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444;<sup>2</sup>中冶宝钢技术服务有限公司, 上海 201999

**摘要** 结构光视觉技术是一种光学三维表面测量技术,具有速度快、精度高、鲁棒性强等优点。在实际应用中,线结构光发射器的镜头失真会导致光平面发生弯曲,而现有的大多数标定方法无法对失真进行补偿,并且会限制线结构光的分布规则。为了避免透镜失真所造成的影响,提出了一种精确且鲁棒性强的线结构光标定方法,通过构建曲面网格模型将水平、竖直射线追踪相结合,克服了现有方法对结构光分布方向的限制,同时,利用微分后的空间网格平面与像素网格平面之间的单应性关系实现了亚像素级的光条中心点三维重建。实验结果表明,该方法可以降低线结构光平面弯曲对标定精度的影响,对间距为 55 mm 的任意相邻靶标进行距离测量的误差小于 0.08 mm,对间距为 1133.85 mm 的任意相邻靶标进行距离测量的精度可达 0.50 mm。

**关键词** 线结构光曲面标定; 射线追踪; 曲面网格模型**中图分类号** TP391 **文献标志码** A**DOI:** 10.3788/AOS231544

## 1 引言

三维测量在航空航天、生物医学、机械工程等领域得到了广泛的应用。线结构光视觉技术是一种主动三维测量技术,因其非接触、高速度、高精度、高鲁棒性和低成本等优势备受关注<sup>[1-4]</sup>。结构光视觉系统主要由相机和线结构光发射设备组成,结构光图案投射到物体上时,会受到目标物体表面的调制而发生扭曲,通过相机捕获调制后的结构光图案,结合系统标定参数,即可重建结构光图案对应的真实三维坐标点。因此,结构光视觉系统精度主要取决于相机和线结构光的标定精度。现有的线结构光标定方法一般通过双目视觉理论或线结构光表面建模方式实现。

双目视觉理论一般通过三角测量的方式重建三维坐标点,相机和线结构光发射器是三角测量双目系统的主体构成。将线结构光发射器视为相机的反向成像设备,对相机和线结构光发射器分别进行标定,确定系统参数,即可通过三角测量获得被测物体的三维坐标并重建场景点。文献[5-6]提出了许多标定方法来获得三维重建中使用的系统参数,但需要通过复杂的方法标定线结构光发射器或者借助辅助相机来确定三维场景点,并且双目特征匹配过程非常耗时,严重限制了测量的速度与精度。文献[7-12]通过投影正交的光条纹图案实现了线结构光发射器的高精度标定,然而这些方法仅适用于能投影正交条纹图案的设备。

根据线结构光表面模型的类型,可将线结构光表面建模理论分为光平面模型理论和光曲面模型理论。光平面模型理论一般将线结构光的投影平面视为理想平面<sup>[13-17]</sup>,旨在确定光平面的空间参数。结构光发射器的透镜存在失真现象,这会导致光平面发生弯曲,因此,在传统方法中,必须对结构光发射设备进行精确的校准来避免非线性效应。然而,校准过程复杂,并且由于系统装配误差的存在,很难仅仅通过精确校准将畸变的光曲面转换成理想光平面。光曲面模型理论充分考虑了线结构光表面的弯曲,将线结构光的投影表面视为曲面,将通过适当的参数表达式来量化弯曲的光表面作为结构光三维建模的目标。文献[18]提出了一个包含 7 个参数的曲面方程来代替理想平面方程作为光条纹的数学模型,以降低光条纹失真的影响。但为了确保模型参数能够被求解,这种方法要求相机和结构光发射器完全平行。文献[19]构建了三维向的空间坐标与图像坐标之间的多项式模型,标定过程简单便捷,标定板的摆放不受任何位置约束,但需要一个冗余相机用于辅助标定,且精度仍然有待提高。文献[20]通过建模光条纹的亚像素列坐标和三维坐标之间的关系实现了较高的标定精度,但投射的光条纹必须为竖直方向,这使光条纹的方向具有很强的局限性。

线结构光发射设备的透镜失真导致了线结构光平面发生弯曲,为了避免透镜畸变对标定精度的影响,本文提出了一种新的方法进行线结构光曲面的标定。分

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-10-23; 录用日期: 2023-11-01; 网络首发日期: 2023-11-17

通信作者: \*zjzhang@staff.shu.edu.cn

别沿着图像的水平或竖直方向追踪相机射线,则相机射线与光曲面交点的深度可以分别转换成光条纹图像亚像素列坐标或行坐标的线性变化,因此,空间线结构光曲面被分解成多条曲线。通过等概加权的方式拟合水平、竖直曲线相交形成的网格点,从而获得线结构光曲面网格。拟合得到的线结构光曲面网格对应着图像中进行射线追踪的像素网格,由于微分后线结构光局部曲面可以被视为平面,因此,通过构建像素网格点和曲面网格点之间的对应关系,可以实现非图像像素网格点的任意光条中心点的三维重建。

## 2 原理

线结构光视觉系统标定主要分为相机标定和线结构光曲面标定两部分。相机标定可以确定相机射线的入射方程,建立图像点和相机坐标系下三维点的映射关系,从而通过图像上记录的场景点回溯其真实三维场景点坐标。基于此,当线结构光发射器投射多个结构光平面时,对于任意一个光平面,沿着图像平面的水平方向或竖直方向追踪相机入射光线,空间中相机射线和结构光曲面的交点唯一且确定,并按照一定的规律变化。

### 2.1 相机成像原理

线结构光视觉系统主要由结构光发射器和相机两个部件组成,如图 1 所示,待测对象位于世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$  中,  $O_c-X_cY_cZ_c$  为相机坐标系,  $O-UV$  为图像的像素坐标系。结构光发射器投射单一方向的多线结构光图案,相机捕捉待测目标表面调制后的线结构光图案。设线结构光图案与目标相交于点  $P$ ,点  $p$  为其对应的无失真像点。

根据小孔成像模型,以相机坐标系为测量坐标系,则  $P$  在相机坐标系下的坐标  $(x_c, y_c, z_c)^T$  和像点  $p$  在像素坐标系下的坐标  $(u, v)^T$  之间的关系可以表示为

$$p_d = \begin{bmatrix} (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) x_u + [2p_1 x_u y_u + p_2 (r^2 + 2x_u^2)] \\ (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) y_u + [2p_2 x_u y_u + p_1 (r^2 + 2y_u^2)] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $p_u(x_u, y_u)^T = (x_c/z_c, y_c/z_c)^T$  为归一化相机坐标系下的非畸变图像点坐标;  $p_d(x_d, y_d)^T$  为畸变图像点坐标;  $r = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$  为点距成像中心的距离;  $k_1, k_2, k_3$  为径向畸变系数;  $p_1, p_2$  为切向畸变系数。

### 2.2 射线追踪原理

由于结构光发射器失真的原理很复杂,很难在硬件上校正设备,并且发射器只能投射像素级别的图案,无法对投影图案进行亚像素精度的校正以形成理想光平面,因此,通过理想光平面和相机射线的几何约束进行三维重建时存在系统误差。为了降低投影失真的影

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $(x_w, y_w, z_w)^T$  表示点  $P$  在世界坐标系下的坐标;  $f_x$  和  $f_y$  分别表示图像水平和竖直方向的有效焦距;  $(u_0, v_0)^T$  为主点在像素坐标系下的坐标;  $R, t$  分别为旋转矩阵和平移向量。

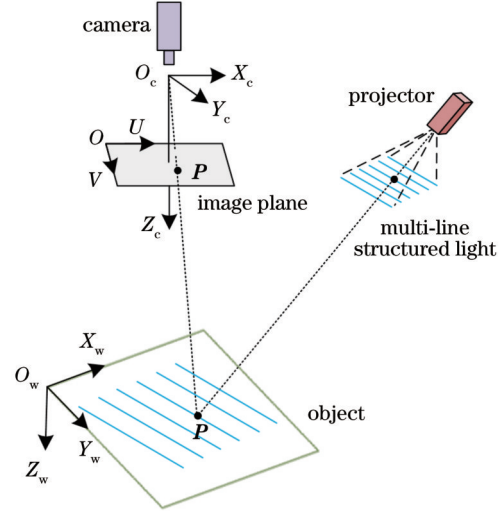


图 1 线结构光视觉系统

Fig. 1 Line structured light vision system

式(1)将相机成像过程描述为线性模型,然而透镜畸变是不可避免的。透镜畸变会使入射光方向发生变化,导致实际(畸变)图像坐标和理想(无畸变)图像坐标之间发生偏差。通过多项式函数的映射对镜头失真进行建模,以量化图像畸变,畸变模型表示为

响,通过构建射线追踪模型将畸变光平面分解为多条畸变光曲线,从而将线结构光畸变平面的建模过程简化为量化分析多条曲线,以实现降低系统测量误差的目的。下面以水平射线追踪为例分析射线追踪模型的原理。

在线结构光发射器投射的多个倾斜结构光平面中,任取其中一个光平面,如图 2(a)所示,由于投影失真的存在,理想光平面畸变为弯曲光表面,将畸变的线结构光曲面简称为“光曲面”。结构光投射在标定板平面上并被标定板平面调制形成线状光条,不断移动标定板平面的位置,并通过相机捕获带有线状光条的标

定板平面图像。根据相机标定参数可以确定相机射线的入射方程,从而通过图像上记录的场景点确定其真实三维场景点所处的相机射线方向。因此,沿着图像平面的水平方向追踪相机入射光线,相机射线与理想线结构光平面的交点在空间中形成一条直线,交点在相机坐标系下的  $z$  坐标和光条图像亚像素列坐标  $u$  之间形成了线性变化关系。然而对于光曲面来说,相机射线与线结构光表面的交点在空间中形成一条曲线,为了建模这条相交曲线,即合理量化曲线上的  $z$  坐标和图像像素  $u$  坐标的映射关系,进行以下分析。

对于一个确定的光曲面,过相机光心和图像像素平面的任意水平方向作相机射线平面,射线平面与光曲面相交形成空间三维曲线,如图 2(b) 所示。过图像像素水平方向  $v = v_1$  的射线平面与光曲面相交形成曲

线  $c_1$ , 在  $v = v_1$  上任取不同位置的光条图像点作相机射线,射线与光曲面分别相交且交点均位于曲线  $c_1$  上。因此,对于图像像素平面中确定已知的水平方向,光条图像点的亚像素列坐标  $u$  和相机坐标系下场景点的  $z$  坐标一一对应。量化  $z$  和  $u$  之间映射关系最精确的方式为建立查找表,即对于确定的光曲面,根据光条图像点的像素坐标直接查找其对应的场景点坐标。然而由于需要记录已知的所有标定数据  $[u, v, x, y, z]$  和样条拟合方程,这种方式非常占用内存空间。为了简化三维重建过程,在高精度、高速度、易于描述与节省存储资源的综合考虑下,对于图像像素平面的任意一行,通过对线结构光成像模型和相机成像原理进行进一步分析,直接构建  $u$  和  $z$  之间的函数映射关系,从而实现仅需要存储函数的映射系数便可以对图像点进行简单的映射运算进而重建三维场景点。

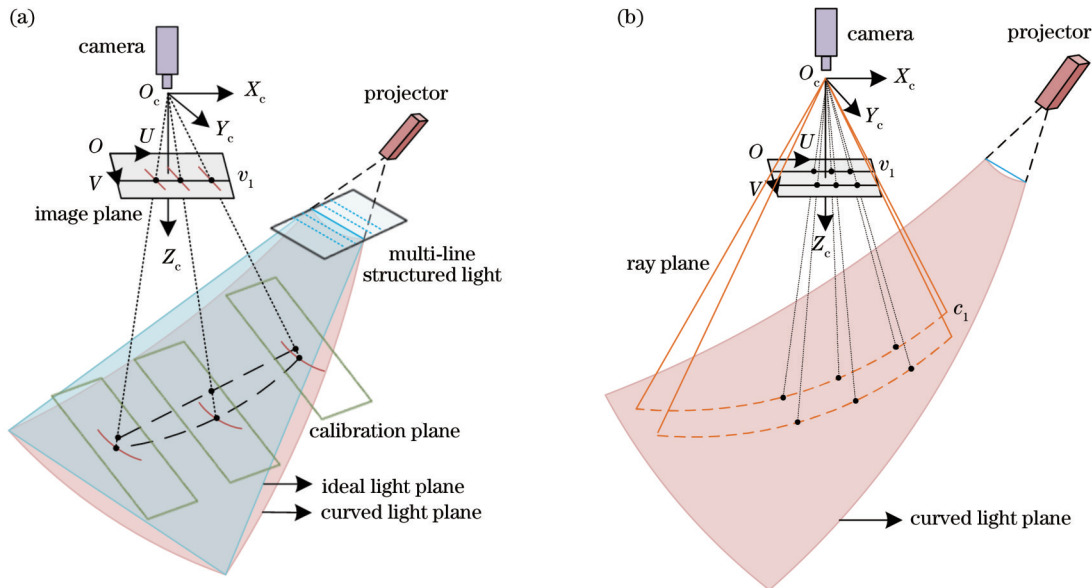


图 2 水平射线追踪原理图。(a) 弯曲光表面; (b) 相机射线平面

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal ray-tracing. (a) Curved light surface; (b) camera ray plane

如图 3 所示,假设结构光发射器投射理想线结构光平面,以下简称“光平面”,过图像水平方向  $v = v_1$  的射线平面与光平面相交于直线  $l_1$ ,  $r_1$  为垂直于  $l_1$  的相机射线,垂足在相机坐标系下的  $z$  坐标为  $z_0$ ,  $O_c$  与垂足之间距离为  $h_1$ ,  $r_2$  为垂直于图像水平方向  $v = v_1$  的相机射线,  $O_c$  与垂足  $(u_s, v_1)$  之间距离为  $h_2$ ,  $r_3$  为过待测量的光条图像点  $(u, v_1)$  的相机射线,  $r_3$  与光平面的交点在相机坐标系下的深度为  $z$ 。设射线  $r_1$  和  $r_2$  之间的夹角为  $\gamma$ , 射线  $r_2$  和  $r_3$  之间的夹角为  $\beta$ , 则有

$$\begin{cases} \tan \beta = \frac{u - u_s}{f_u h_2} \\ \tan(\gamma - \beta) = \frac{z - z_0}{\epsilon h_1} \end{cases}, \quad (3)$$

得到  $u$  和  $z$  之间的函数映射关系为

$$\tan \left[ \gamma - \arctan \left( \frac{u - u_s}{f_u h_2} \right) \right] = \frac{z - z_0}{\epsilon h_1}, \quad (4)$$

式中:  $f_u$  为像素和长度之间进行转换的尺度因子;  $\epsilon$  是由  $l_1$  和  $Z_c$  轴夹角决定的尺度因子。

对于确定的光平面  $I$  和图像水平方向  $v$ , 一旦线结构光发射器和相机的位置固定, 则式 (4) 中只含  $z$ 、 $u$  两个变量, 其余均为常量。因此, 可将  $z$ 、 $u$  之间的映射关系通过泰勒公式展开成  $N$  阶多项式, 表示为

$$z(v, I) = \sum_{n=0}^N {}^H s_n(v, I) u^n, \quad (5)$$

式中:  $I$  为光平面的编号;  ${}^H s_n(v, I)$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$  为根据系统参数  $u_s, z_0, h_1, h_2, \gamma, \epsilon, f_u$  确定的系数。

在有限空间中, 多项式系数也可用于拟合投影仪的非线性效应, 此时  ${}^H s_n(v, I)$  为根据系统参数和投影仪的非线性效应共同决定的系数, 因此可以通过校准

多项式的映射关系实现光曲面标定。

对于图像像素坐标系中的特定行,通过水平射线追踪可以构建 $z$ 和 $u$ 的多项式模型,如式(5)所示。同理,对于图像像素坐标系中的特定列,通过垂直射线追踪可以构建 $z$ 和 $v$ 的多项式模型,表示为

$$z(u, I) = \sum_{n=0}^N v s_n(u, I) v^n, \quad (6)$$

式中, $v s_n(u, I)$ ,  $n=0, 1, \dots, N$ 为由系统参数和投影仪的非线性效应共同决定的系数。

通过水平射线追踪和垂直射线追踪将畸变的弯曲光表面分解为多条曲线,从而将复杂的曲面求解问题转变为建模易于描述和量化的多条曲线。

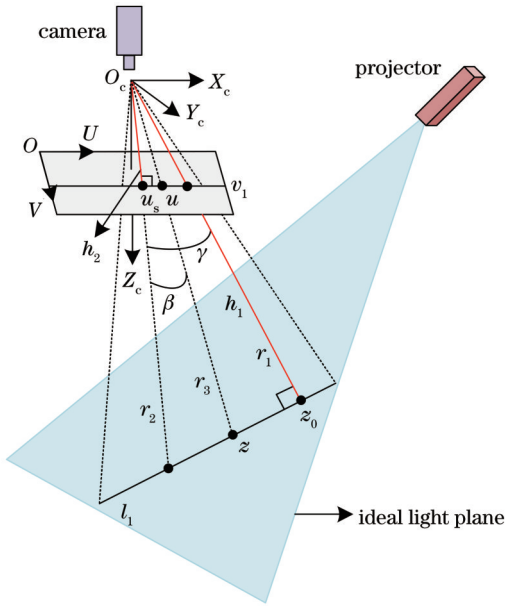


图 3 线结构光成像几何模型

Fig. 3 Line structured light imaging geometry model

### 2.3 线结构光曲面网格模型

为了在射线追踪建模时确保多项式曲线的拟合精度,需要提供数目充足的样本点用于拟合,因此单一的水平射线追踪不适用于标定近似水平方向分布的线结构光,单一的垂直射线追踪不适用于标定近似垂直方向分布的线结构光。并且,通过射线追踪进行线结构光曲面标定时,拟合的多项式数目有限,但光条中心点所处位置的数目却是无限的,因而射线追踪标定的结果难以实现后续亚像素级的三维测量。为了克服单一方向的射线追踪模型对线结构光分布方向的限制,同时为亚像素级的三维精密测量提供优良条件,将水平射线追踪与垂直射线追踪相结合,建立线结构光曲面网格模型。

通过射线追踪拟合得到的线结构光曲线在空间中均呈水平或垂直方向排列,由于所有曲线均来自同一线结构光曲面,因此,理论上来说,每条水平曲线与垂直曲线均相交,从而形成了线结构光曲面网格。将空间中畸变的线结构光曲线简称为“光曲线”。如图 4 所

示,对于图像平面中任意一个确定的水平方向 $v=v_i$ ,分别通过水平射线追踪得到光曲线 ${}^H c_i$ ;对于图像平面中任意一个确定的垂直方向 $u=u_i$ ,分别通过垂直射线追踪得到光曲线 ${}^V c_i$ 。水平方向的光曲线与垂直方向的光曲线逐一相交,形成线结构光曲面网格。

将光曲线相交形成的网格点简称为“曲面网格点”,图像中进行光线追踪的像素网格点简称为“图像网格点”,图像网格点与曲面网格点理论上应一一对应。然而,射线追踪过程中的轻微拟合误差与测量误差会导致拟合得到的部分水平方向与垂直方向的光曲线在空间上不相交,无法形成相交的曲面网格点。对于图像上的待测量光点 $p_i$ ,通过水平射线追踪得到光曲线 ${}^H c_i$ 并重建场景点 ${}^H P_i$ ;通过垂直射线追踪得到光曲线 ${}^V c_i$ 并重建场景点 ${}^V P_i$ ,如图 5 所示。由于测量误差的存在, ${}^H c_i$ 和 ${}^V c_i$ 在空间上不相交,重建得到的微形变场景点 ${}^H P_i$ 和 ${}^V P_i$ 存在一定的位置差。为了进一步规范模型,需要通过微形变点合理量化网格点,从而得到真实的曲面网格点 $P_i$ 。

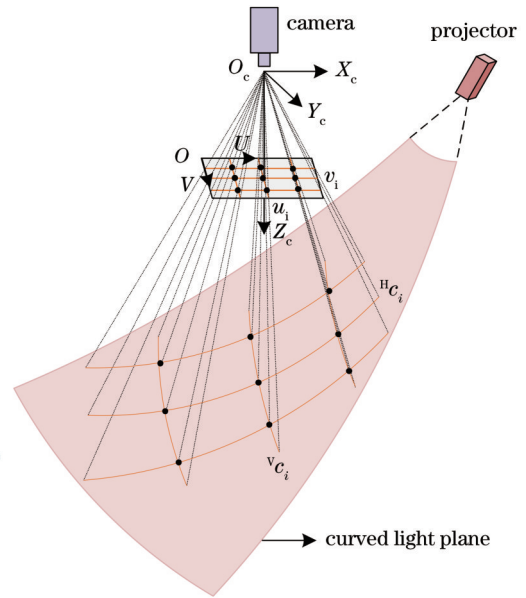


图 4 线结构光曲面网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of line structured light surface grid

由于标定板所处位置和角度的限制,不同图像中有效的光条位置各不相同,因此,用于构建水平、垂直射线追踪模型的有效光点坐标的数目不同。假设进行水平射线追踪拟合曲线 ${}^H c_i$ 时的有效数据数目为 ${}^H n_i$ ,进行垂直射线追踪拟合曲线 ${}^V c_i$ 时的有效数据数目为 ${}^V n_i$ , $(u_i, v_i)$ 为待测光条中心点 $p_i$ 的图像坐标, $I_i$ 为其对应的线结构光编号,对微形变点进行等概加权可以求得 $P_i$ 在相机坐标系下的深度 $z_i$ ,表示为

$$z_i = \frac{{}^H n_i \sum_{n=0}^N {}^H s_n(v_i, I_i) u_i^n + {}^V n_i \sum_{n=0}^N {}^V s_n(u_i, I_i) v_i^n}{{}^H n_i + {}^V n_i}. \quad (7)$$

接着通过式(1)获取真实曲面网格点 $P_i$ 的三维点

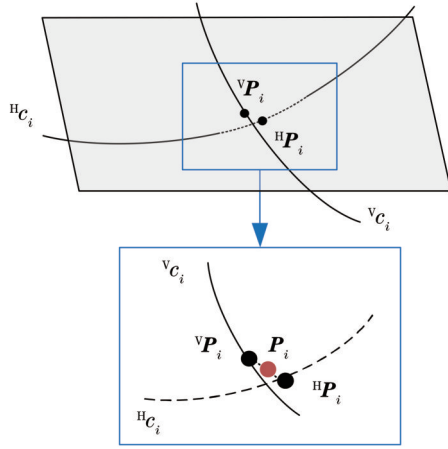


图 5 相交网格点

Fig. 5 Intersecting grid points

坐标 \$(x\_i, y\_i, z\_i)\$。

所提标定方法通过将水平射线追踪与垂直射线追踪相结合来构建线结构光曲面网格,克服了单一方向的射线追踪标定对线结构光分布方向的限制,提高了其在不同场景下的适应能力。

在标定和三维重建过程中,通常会提取光条中心点的亚像素坐标以确保足够的精度。但拟合得到的上述线结构光曲面网格对应于图像中进行光线追踪的像素网格,因此通过线结构光曲面网格的方法仅可直接对像素级的光条中心点坐标进行重建。射线追踪将畸变光曲面分解为曲面网格,由于微分后的网格所占区域较小,因此,由不在同一直线的 4 个相邻曲面网格点构成的网格区域可视为平面。如图 6 所示,对于任意一个非图像网格点的亚像素级光条中心点,其相邻的 4 个图像网格点及对应的 4 个曲面网格点分别构成一个平面,通过求解两平面间的单应性矩阵,可以对网格区域内的任意光条中心点进行三维重建。

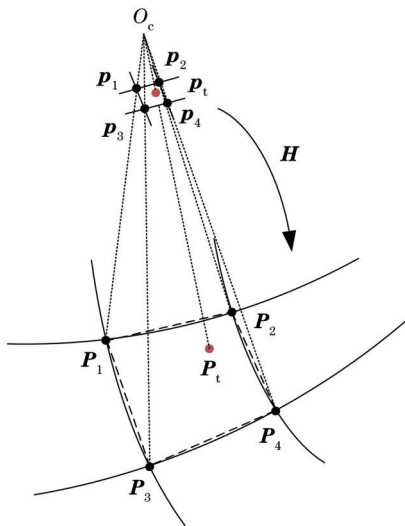


图 6 亚像素级的光条中心点

Fig. 6 Subpixel light strip center point

对于待测的亚像素级光条中心点 \$p\_i(u\_i, v\_i)\$, 设其对应的三维点为 \$P\_i(x\_i, y\_i, z\_i)\$, 则基于线结构光曲面网格模型重建其三维点的具体步骤为:

1) 获取 \$p\_i\$ 相邻的 4 个整数像素点 \$p\_i(u\_i, v\_i)\$, 并通过式 (7) 分别计算相机坐标系下对应的空间曲面网格点 \$P\_i(x\_i, y\_i, z\_i)\$。其中, 下标 \$i\$ 表示像素点的编号。

2) 4 个相邻的曲面网格点形成的网格区域可视为平面, 在相机坐标系下拟合该平面 \$A\_n x + B\_n y + C\_n z + D\_n = 0\$。其中, \$A\_n, B\_n, C\_n, D\_n\$ 为通过这 4 个曲面网格点拟合的平面参数。

3) 4 个图像网格点和曲面网格点分别形成一个平面, 通过这 4 个点对求取两平面之间的单应性矩阵, 使任一点对 \$p\_i(u\_i, v\_i)\$ 和 \$P\_i(x\_i, y\_i, z\_i)\$ 均满足对应关系

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中, \$\tilde{P}\_i(\tilde{x}\_i, \tilde{y}\_i, 1) = (\frac{x\_i}{z\_i}, \frac{y\_i}{z\_i}, 1)\$, \$\tilde{\cdot}\$ 表示归一化相机坐标系下的坐标。

4) 将待求光条中心点坐标 \$p\_i(u\_i, v\_i)\$ 代入式 (8), 可得其在归一化相机坐标系下的坐标 \$\tilde{P}\_i(\tilde{x}\_i, \tilde{y}\_i, 1)\$。\$p\_i\$ 位于 4 个曲面网格点所构成的平面上, 因此可以解得

$$z_i = -\frac{D_n}{A_n \tilde{x}_i + B_n \tilde{y}_i + C_n}. \quad (9)$$

5) 基于相机标定结果, 将 \$z\_i\$ 代入式 (1) 即可重建相机坐标系下的光条中心点 \$P\_i(x\_i, y\_i, z\_i)\$。

线结构光曲面网格模型的构建提高了标定方法对于不同场景下线结构光分布方向的适用性, 此外, 利用微分后的空间网格平面与像素网格平面之间的单应性关系, 克服了单向的射线追踪标定无法完成亚像素级三维重建的难题。

### 3 线结构光标定

进行线结构光标定的目的是建立参数查找表。在进行标定的视场区域内, 对图像平面的每一行、每一列分别确定其进行射线追踪的样本点数目 \$^H n\_v\$ 和多项式映射系数 \$^H s\_n(v, I)\$、\$^V s\_n(u, I)\$, 从而在实际应用中基于构建的线结构光曲面网格模型完成光条中心点的三维重建。

标定过程中使用的线结构光图案由近似平行分布的三条倾斜线结构光组成, 包含标志位的大尺寸同心圆标定板平面固定在可移动架子上, 不断平移标定板至任意不同位置, 使标定板放置的位置可以覆盖整个测量空间, 并且, 所有线结构光条纹均需完整投射在标定板上。利用机械手臂固定相机和线结构光发射器的相对位置, 利用相机捕获不同位置下标定板表面调制形成的各线结构光条纹图像, 从而通过序列图像获得

线结构光曲面上足够的空间三维点坐标。此外,为了避免线结构光条纹对标定板中特征点提取精度的影响,对于标定板所处的每个位置,通过相机捕获投射和未投射线结构光的标定板图像各一张,并对相机拍摄的所有原始图像进行图像预处理,包括图像增强、图像滤波去噪、图像去畸变,以提高图像质量。

基于射线追踪进行线结构光曲面网格标定的系统流程如图 7 所示,具体步骤包括:

1) 进行边缘检测并提取特征点。对于任意一对标定图像,取该位置下不包含光条纹的标定板图像进行亚像素边缘检测<sup>[21]</sup>和同心圆偏心误差迭代补偿<sup>[22]</sup>,以提取同心圆圆心特征点的亚像素图像坐标。

2) 拟合标定板平面。结合相机标定的内参结果可以计算得到该位置下相机的外参。将世界坐标系的原点  $O_w$  固定在标定板的一角,轴  $O_w Z_w$  垂直于标定板平面,  $X_w O_w Y_w$  平面与标定板平面重合,则标定板平面的方程  $A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0$  可以用其外参表示为

$$r_{13}x + r_{23}y + r_{33}z + r_{13}t_1 + r_{23}t_2 + r_{33}t_3 = 0. \quad (10)$$

3) 提取线结构光条纹中心点。投射的光曲面与标定板相交,产生丰富的交点,形成标定板图像上的线结构光条纹。利用改进的灰度质心法<sup>[23]</sup>提取光条中心点的亚像素坐标  $p(u, v)$ , 并分别确定其所属的线结构光编号  $I$ 。

4) 重建三维光条中心点。进行射线追踪拟合需要获取这些光条中心点在相机坐标系下的三维坐标  $P(x, y, z)$ , 为了解决仅仅通过单目相机无法确定目标点深度的难题,计算光条所处的标定板平面方程,进而结合单目标定的结果重建三维点。

由式(1)可得

$$\begin{cases} x = \frac{u - u_0}{f_x} \cdot z \\ y = \frac{v - v_0}{f_y} \cdot z \end{cases}, \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)即可求得  $z$ , 表示为

$$z = -\frac{(r_{13}t_1 + r_{23}t_2 + r_{33}t_3) f_x f_y}{r_{13}f_y(u - u_0) + r_{23}f_x(v - v_0) + r_{33}f_x f_y}, \quad (12)$$

从而得到光条中心点的三维坐标。

5) 建立参数查找表。对于在任意一个位置捕获的一对标定板图像,通过上述运算可以获得该位置下所有光条中心点在相机坐标系下的坐标。根据光条中心点所处的光条编号  $I$  及图像像素坐标的行号  $v$  与列号  $u$ , 可以将所有的光条中心点分为若干组,进而通过式(5)和式(6)分别拟合水平射线追踪的多项式系数  ${}^H s_n(v, I)$ 、竖直射线追踪的多项式系数  ${}^V s_n(u, I)$ , 并分别记录进行多项式拟合的样本点数目  ${}^H n, {}^V n$ , 以建立射线追踪的参数查找表,完成线结构光标定。

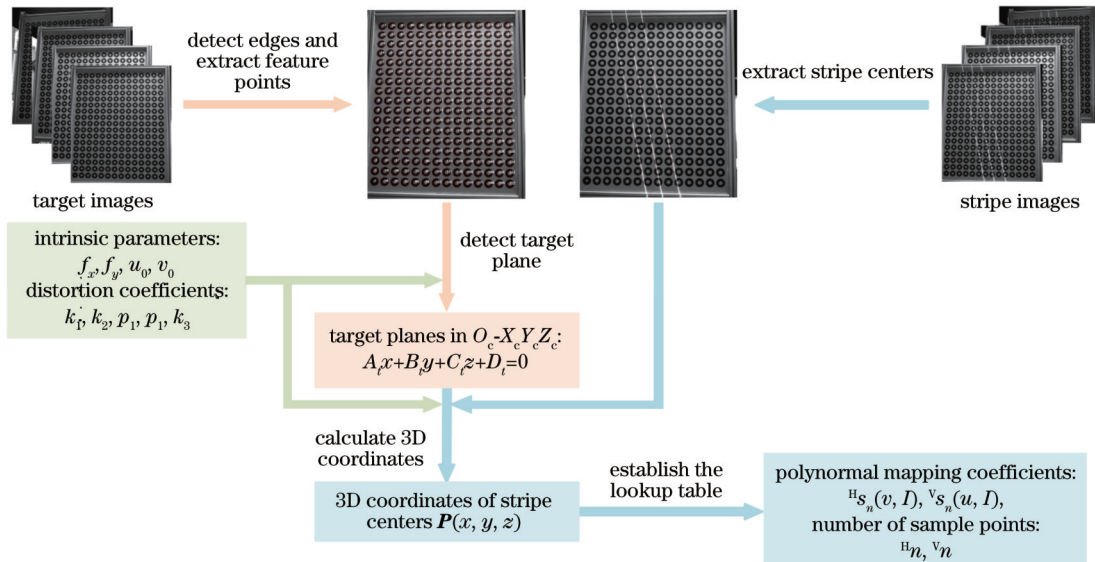


图 7 标定系统流程图

Fig. 7 Calibration system flow chart

## 4 实验和分析

进行线结构光曲面标定的实验现场如图 8 所示。采用的标定板为  $17 \times 14$  的高精密同心圆标定板,相邻同心圆之间的间距为 55 mm,外圆直径为 46 mm,内圆直径为 20 mm,标志位的内圆直径为 13 mm,标定板平面的整体尺寸为  $926 \text{ mm} \times 761 \text{ mm}$ 。工业相机为大恒

水星 ME2P-2621-15U3M,分辨率为  $5120 \text{ pixel} \times 5120 \text{ pixel}$ , 像元尺寸为  $12.8 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$ , 装配的相机镜头为 LM12FC24M 型号的 Kowa 镜头,焦距为 12 mm。结构光发射器通过三个单线激光器组装而成,激光器型号为 KYL650N200-X1670,功率为 50 mW,波长为 650 nm。调整相机与激光组的角度,令 0.5~2.5 m 测量距离内的所有光条直线均可完整

出现在相机视场内,随后通过机械手固定二者的位置,以确保在后续系统标定和测量的过程中二者的相对位置恒定不变。

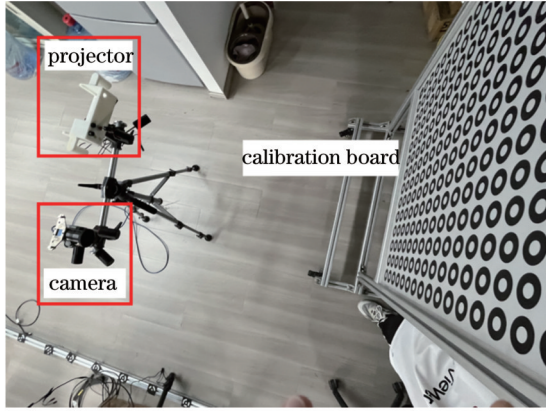


图 8 线结构光曲面标定实验现场

Fig. 8 Field of line structured light surface calibration experiment

#### 4.1 相机标定

在进行结构光视觉系统测量之前,需要进行系统标定,包括相机内参标定、畸变系数标定、外参标定,从而确定各坐标系之间的转换关系。

不断改变同心圆标定板的位置与姿态,使其占据整个视场,并通过张正友标定法<sup>[24]</sup>对相机进行标定,得到的相机内参与畸变系数如表 1 所示。其中,  $f_x$  和  $f_y$  为图像水平和垂直方向的有效焦距,  $(u_0, v_0)$  为主点坐标,  $k_1, k_2, k_3$  为径向畸变系数,  $p_1, p_2$  为切向畸变系数。

#### 4.2 射线追踪标定

一般来说,标定板放置的位置越多,通过射线追踪拟合的多项式模型越接近真实曲线。为了完整覆盖

表 1 相机标定参数

Table 1 Camera calibration parameters

Parameter name	Result
$f_x, f_y$	3479.8270, 3480.1814
$u_0, v_0$	2536.5745, 2621.4617
$k_1, k_2, k_3$	-0.07170, 0.08888, -0.02706
$p_1, p_2$	0.00114, 0.00015

表 2 不同阶数的多项式拟合结果

Table 2 Polynomial fitting results of different orders

Method		Order of polynomial				
		2	3	4	5	6
RMSE $S$ / mm	Horizontal ray-tracing	8.647	1.841	1.208	10.754	30.661
	Vertical ray-tracing	3.304	0.585	0.395	0.384	0.527
Time $T$ / s	Horizontal ray-tracing	1.365	1.282	1.282	1.287	1.218
	Vertical ray-tracing	0.343	0.283	0.315	0.300	0.276
Number of polynomials $N_p$	Horizontal ray-tracing	2005	1955	1924	1899	1861
	Vertical ray-tracing	562	506	495	481	459

100 cm × 100 cm × 200 cm 的测量范围并提高标定精度,将标定板平移到 40 个不同位置。此外,在通过射线追踪拟合映射系数时,为了增大相机反投影光线和标定板平面交点的深度变化,沿  $Z_c$  轴方向移动标定板。对于确定的光平面  $I$ 、行坐标  $v$ ,通过水平射线追踪拟合点的  $z$  坐标和亚像素列坐标  $u$  之间的多项式系数  $^H s_n(v, I)$ 。对于确定的光平面  $I$ 、列坐标  $u$ ,通过竖直射线追踪拟合点的  $z$  坐标和亚像素行坐标  $v$  之间的多项式系数  $^V s_n(u, I)$ 。为了估计多项式拟合误差,计算曲线上所有样本点在相机坐标系下的  $z$  坐标值到拟合曲线的均方根误差(RMSE),表示为

$$\begin{cases} S_H = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^K \left| z_k - \sum_{n=0}^N {}^H s_n(v_k, I_k) \cdot u_k^n \right|^2}{K}} \\ S_V = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^K \left| z_k - \sum_{n=0}^N {}^V s_n(u_k, I_k) \cdot v_k^n \right|^2}{K}} \end{cases}, \quad (13)$$

式中:  $S_H, S_V$  分别表示通过水平、竖直射线追踪拟合的  $N$  阶多项式的 RMSE; 下标  $k$  为样本点的序号;  $K$  为所有样本点的数目。

以光平面  $I=1$  为例,拟合不同阶数的多项式时,样本点的  $z$  值到拟合曲线的 RMSE( $S$ )、完成全部多项式拟合的系统运行时间( $T$ )、完成拟合的多项式数量( $N$ )如表 2 所示,其中,进行水平射线追踪的样本点总数为 43748,进行竖直射线追踪的样本点总数为 9725。

通过表 2 可以看出:当实现射线追踪的多项式阶数增大时, RMSE 降低,射线追踪的拟合精度提高。然而,当多项式阶数过大时,样本点的过拟合反而会降低射线追踪的拟合精度。另外,多项式的阶数增大会提高算法的时间复杂度,增大计算成本。但由于实验所用计算机的计算性能较高,当多项式的阶数在一定范围内增大时,通过最小二乘法拟合每个多项式的平均系统运行时间并不会显著增加,并且由于完成拟合的多项式数目随着拟合阶数的增大而降低,竖直射线追踪时甚至出现了完成全部多项式拟合的总体系统运行时间随着多项式阶数的增大而降低的情况。

对于确定数目的标定图像,当多项式的拟合阶数增大时,能够完成拟合的多项式数目会减少,并且参与标定的图像数目越少,能够完成拟合的多项式数目的降低幅度越大。这是因为位于图像边缘的光条中心点数目较少,无法提供足够数目的样本点以满足高阶多项式的拟合需要。

对于光平面  $I=3$ ,通过水平射线追踪对图像行

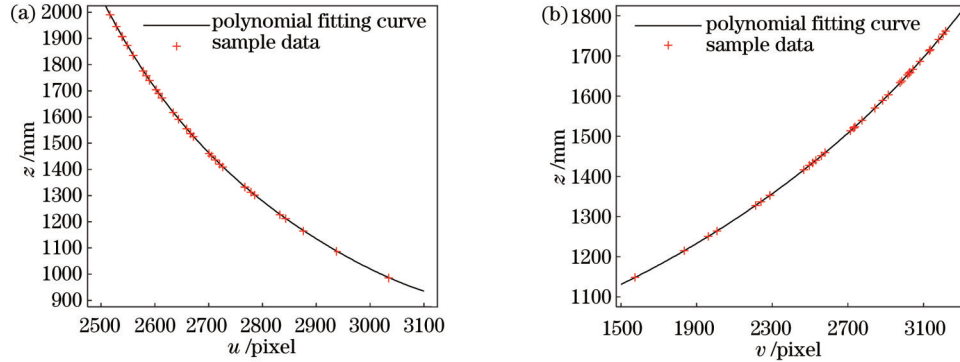


图 9 多项式拟合结果。(a)水平射线追踪;(b)竖直射线追踪

Fig. 9 Polynomial fitting results. (a) Horizontal ray-tracing; (b) vertical ray-tracing

所提方法通过多项式拟合像素坐标与深度之间的映射关系,将弯曲线结构光表面分解为多条曲线,从而形成线结构光曲面网格。为了易于观察,对于光平面  $I=3$ ,利用四阶多项式分别对  $v=2600, 2620, \dots, 2800$  的水平像素方向和  $u=2560, 2570, \dots, 2700$  的竖直像素方向进行射线追踪,拟合得到的多项式曲线的局部效果如图 10 所示。

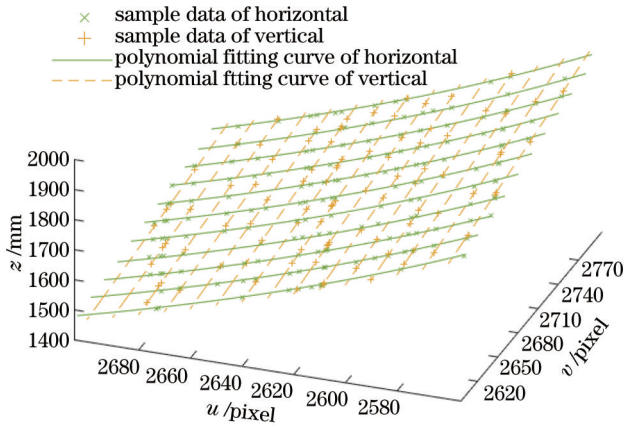


图 10 射线追踪网格的局部结果

Fig. 10 Local results of the ray-tracing grid

基于单一方向的射线追踪标定法<sup>[21]</sup>,分别完成线结构光的水平、竖直射线追踪标定。将光条中心点在相机坐标系下的真实点坐标作为真值,将线结构光标定得到的三维点坐标作为测量值,计算相机坐标系下光条中心点坐标的平均误差,并将其作为线结构光标定模型的精度衡量准则之一。在参与标定的图像数目不同的情况下,分别通过水平、竖直射线追踪标定法和

$v=2566$  进行四阶多项式拟合的效果如图 9(a) 所示,通过竖直射线追踪对图像列  $u=2704$  进行四阶多项式拟合的效果如图 9(b) 所示。拟合  $z$  坐标的 RMSE 分别为 0.833、0.424 mm,拟合效果已经足以满足大多数应用场景的精度需求。因此,为了减小计算成本并避免过拟合,后续实验均采用四阶多项式实现射线追踪建模。

所提方法对线结构光表面  $I=1$  进行标定实验,得到的结果如表 3 所示。其中,HRT 表示水平射线追踪标定法,VRT 表示竖直射线追踪标定法, $N_s$  为参与标定的样本点总数, $E$  为三维样本点坐标的平均误差, $N_p$  为在进行追踪标定时射线间隔相同情况下可以完成拟合的多项式数目。

通过表 3 可以看出:随着标定图像数目的增加,通过这三种方法进行线结构光标定时,参与标定的样本点数目和完成拟合的多项式数目均呈上升趋势。通过 VRT 和所提方法得到的样本点平均误差随着图像数目的增加并未呈现明显的变化趋势;通过 HRT 得到的结果大致呈现上升趋势,这是由于进行标定的线结构光和水平方向的夹角更大,此时,若进行射线追踪时相邻射线之间的间隔相同,则当标定图像的数目一定时,相较于 VRT,通过 HRT 可以拟合更多的多项式,即完成追踪的射线范围更广。将“样本点稠密度”定义为参与标定的所有样本点数量与完成追踪的射线总数量之商。当标定图像的数目增加时,通过 HRT 完成标定的射线范围急剧扩大,参与标定的样本点数目也随之增加,然而,样本点稠密度却并未呈显著的上升趋势,部分射线处于完成追踪区域的边缘,其样本点的稠密程度更是急剧下降,拟合误差增大,进而导致样本点平均误差增大。为了尽可能满足工业大场景的测量需求,实际应用中,使用 40 组标定图像进行线结构光标定。

同时,通过表 3 可以发现,由于进行标定的线结构光和竖直方向的夹角较小,通过 VRT 完成标定的射线范围相对较小,当线结构光和竖直方向相近时,VRT 将不能完成标定。同理,HRT 不适用于近似水平方向分布的线结构光的标定。所提方法通过将两个方向的



表 3 标定图像数目不同时的标定结果

Table 3 Calibration results with different number of calibration images

Method		Number of calibration images				
		40	30	20	15	10
Mean error $E$ /mm	HRT	0.764	0.670	0.587	0.670	0.582
	VRT	0.291	0.290	0.228	0.266	0.347
	Proposed method	0.678	0.601	0.524	0.592	0.548
Number of sample points $N_s$	HRT	43748	31932	20061	10366	4350
	VRT	9725	7105	4328	2490	739
	Proposed method	53473	39037	24389	12856	5089
Number of polynomials $N_p$	HRT	1924	1876	1621	1043	558
	VRT	495	466	402	265	100
	Proposed method	2419	2342	2023	1308	658

射线追踪相结合,提高了算法对近似水平、竖直分布的线结构光的适用性,同时大大扩大了完成追踪的射线范围。相较于VRT,虽然所提方法的样本点平均误差更高,但是网格模型的构建令所提方法调和了HRT与VRT的样本点平均误差,使得所提方法的误差小于HRT。这也是所提方法相较于单一方向的射线追踪方法的优越性所在。

为了进一步验证不同标定方法的鲁棒性,给40

组标定图像添加不同程度的高斯噪声,分别通过HRT、VRT、所提方法、光平面标定法<sup>[16]</sup>和基于三轴多项式拟合的曲面标定法<sup>[19]</sup>进行线结构光标定,并计算相机坐标系下光条中心点坐标的平均误差。不同高斯噪声均值下的测量结果如表4所示,不同高斯噪声标准差下的测量结果如表5所示。其中,LPM表示光平面标定法,PFC表示基于三轴多项式拟合的曲面标定法。

表 4 高斯噪声均值不同时的标定精度

Table 4 Calibration accuracies of Gaussian noise with different mean values

Method	Without noise	Mean value of Gaussian noise $\mu_G$				
		2	4	6	8	10
HRT	0.764	0.733	0.749	0.732	0.732	0.747
VRT	0.291	0.265	0.285	0.265	0.263	0.284
Proposed method	0.678	0.648	0.664	0.646	0.646	0.662
LPM	0.126	0.125	0.127	0.125	0.125	0.127
PFC	38.275	38.710	38.277	38.714	38.712	38.279

表 5 高斯噪声标准差不同时的标定精度

Table 5 Calibration accuracies of Gaussian noise with different standard deviations

Method	Without noise	Standard deviation of Gaussian noise $\sigma_G$			
		5	10	15	20
HRT	0.764	0.732	0.733	0.732	0.747
VRT	0.291	0.264	0.264	0.263	0.284
Proposed method	0.678	0.646	0.647	0.646	0.662
LPM	0.126	0.125	0.125	0.125	0.127
PFC	38.275	38.711	38.715	38.714	38.279

如表4、表5所示,面对不同程度的噪声时,5种方法均呈现较好的鲁棒性,这主要是因为进行标定前对图像进行了图像预处理。此外,所提光条中心点提取算法的抗噪性能优异、精度很高。相较于没有添加高斯噪声的情况,基于加噪图像进行标定得到的样本点平均误差反而更大一些。这是因为亮度较低的光条部

分受到噪声的影响而变得模糊,图像预处理算法和光条中心点提取算法自动筛除了部分具有较大提取误差的光条中心点,因而在一定程度上降低了样本点平均误差。

由表4、表5可以看出,LPM方法的样本点平均误差明显小于所提方法。原因主要有三个方面:首先,实验过程中采用的线结构光是高精密度器械发射的,发射器镜头畸变导致的线结构光表面弯曲的程度较小,所提方法在畸变光平面上的优越性没有得到充分的展现;其次,实验进行标定的视场范围较小,线结构光表面弯曲给LPM带来的误差相对较小;最后,由于LPM是针对光平面的标定方法,为了避免光平面畸变对平面标定法的影响,在通过LPM进行标定的过程中,仅对待测中心区域进行了线结构光标定,舍弃了样本点稀疏的光平面区域,这也是LPM在这些光曲面标定法中脱颖而出的主要原因。

### 4.3 三维测量

光条纹投射在待测目标表面,基于上述射线追踪的标定结果,结合线结构光曲面网格模型,可以对图像平面上的亚像素级光条中心点实现高效和高精度的三维重建。三维表面重建过程分为三步:首先,进行图像预处理,提取光条纹中心点的亚像素坐标并判别其所属的光平面编号;其次,确定光条中心点相邻的像素网格点坐标,在参数查找表中寻找像素网格点对应的水平、竖直射线追踪的多项式系数,以求取相应的深度信息,并通过等概加权的形式拟合曲面网格点;最后,基于图像网格点与曲面网格点的对应关系对非网格点的光条中心点进行三维重建。

为了评估所提线结构光曲面网格模型的性能,基于所提方法的标定结果对投射有三条线结构光的标定板平面进行重建。将光条中心点的三维点云拟合最佳平面  $A_i x + B_i y + C_i z + D_i = 0$  作为标定板的理想平面,在获得线结构光条中心点的三维重建结果后,通过光条中心点与理想平面之间的标准误差来评估重建平面的准确性。重建目标平面的标准误差表示为

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left( \frac{|A_i x_k + B_i y_k + C_i z_k + D_i|}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}} \right)^2}, \quad (14)$$

式中:  $(x_k, y_k, z_k)$  为重建的光条中心点坐标;下标  $k$  为

该测量点的序号;  $K$  为所有测量点的数目。

为了避免单个测量结果的偶然性,将标定板置于不同的测量距离下,通过重建的光条中心点和理想目标平面之间的标准误差来表征算法进行平面测量的精度,同时,在参与标定的图像数目不同的情况下,分别利用所提方法、LPM 和 PFC 完成线结构光标定,并基于标定结果重建目标平面。重建目标平面的标准误差如表 6 所示,其中,  $D_p$  为目标平面到相机的距离。

由表 6 可以看出:所提方法与 LPM 均会不同程度地受到标定图像数目的影响,当图像数目大于 25 时,标定精度受图像数目的影响较小;当图像数目小于 25 时,标定精度随着图像数目的减少而降低,且 LPM 的变化更为显著。标定板平面的数目对 PFC 的精度影响并不明显。若图片数目很少且标定图像中待测线结构光的分布过于分散,利用所提方法完成标定的实际视场区域会显著缩小,测量超出实际视场区域的目标平面时将会失败。如表 6 所示,当仅有 10 张图片参与标定时,位置 1 的待测目标平面超出其完成标定的视场范围,无法实现平面测量。此外,当待测目标平面由近及远变化,分别基于这三种方法得到的标定结果进行平面测量时,测量精度均会发生一定程度的降低,并且,由于 PFC 的标定精度受噪声的影响十分显著,其进行平面测量的精度并不能呈现明显的变化规律。

表 6 平面测量的精度

Table 6 Accuracies of plate measurement

Distance $D_p$ /mm	Method	Number of calibration images				
		40 planer targets	30 planer targets	20 planer targets	15 planer targets	10 planer targets
1294.47	Proposed method	0.520	0.518	0.523	0.638	—
	LPM	0.571	0.630	0.624	0.544	—
	PFC	3.768	9.863	20.815	50.740	—
1589.78	Proposed method	0.835	0.832	0.897	0.987	0.820
	LPM	0.889	0.924	1.045	1.286	1.266
	PFC	34.382	27.744	35.074	22.608	25.357
1693.48	Proposed method	0.996	0.993	0.999	1.023	0.979
	LPM	1.134	1.140	1.203	1.630	1.596
	PFC	18.589	6.764	12.296	16.512	15.035
1767.24	Proposed method	0.959	1.079	1.065	1.148	1.016
	LPM	1.134	1.085	1.121	1.543	1.362
	PFC	6.331	7.973	4.441	9.263	7.340

通过投射三条线结构光重建的标定板平面和像素坐标对应的重建误差分布情况如图 11 所示。可以看出:通过 LPM 重建的平面较为平坦,标准误差为 0.571 mm,精度较高;通过 PFC 重建的平面发生显著弯曲,标准误差为 3.768 mm,这表明 PFC 在噪声较强的情况下并不能精确地量化线结构光发射器的镜头失真;相比之下,利用所提方法重建的标定板平面的精度更高,标准误差为 0.520 mm,并且重建平面更为平坦。

总之,所提方法的标定精度更高且更加稳定。

假设位于标定板平面上最长对角线的两组靶标中心点构成的距离分别为  $d_1, d_2$ , 水平、竖直中心线上最外侧两个靶标中心点构成的距离分别为  $d_3, d_4$ , 水平、竖直方向任意两个相邻靶标中心点之间的距离分别为  $d_H, d_V$ , 它们对应的实际距离分别为 1133.85、1133.85、880.00、715.00、55.00、55.00 mm, 将标定板分别置于视场中的任意位置,基于上述标定结果对靶

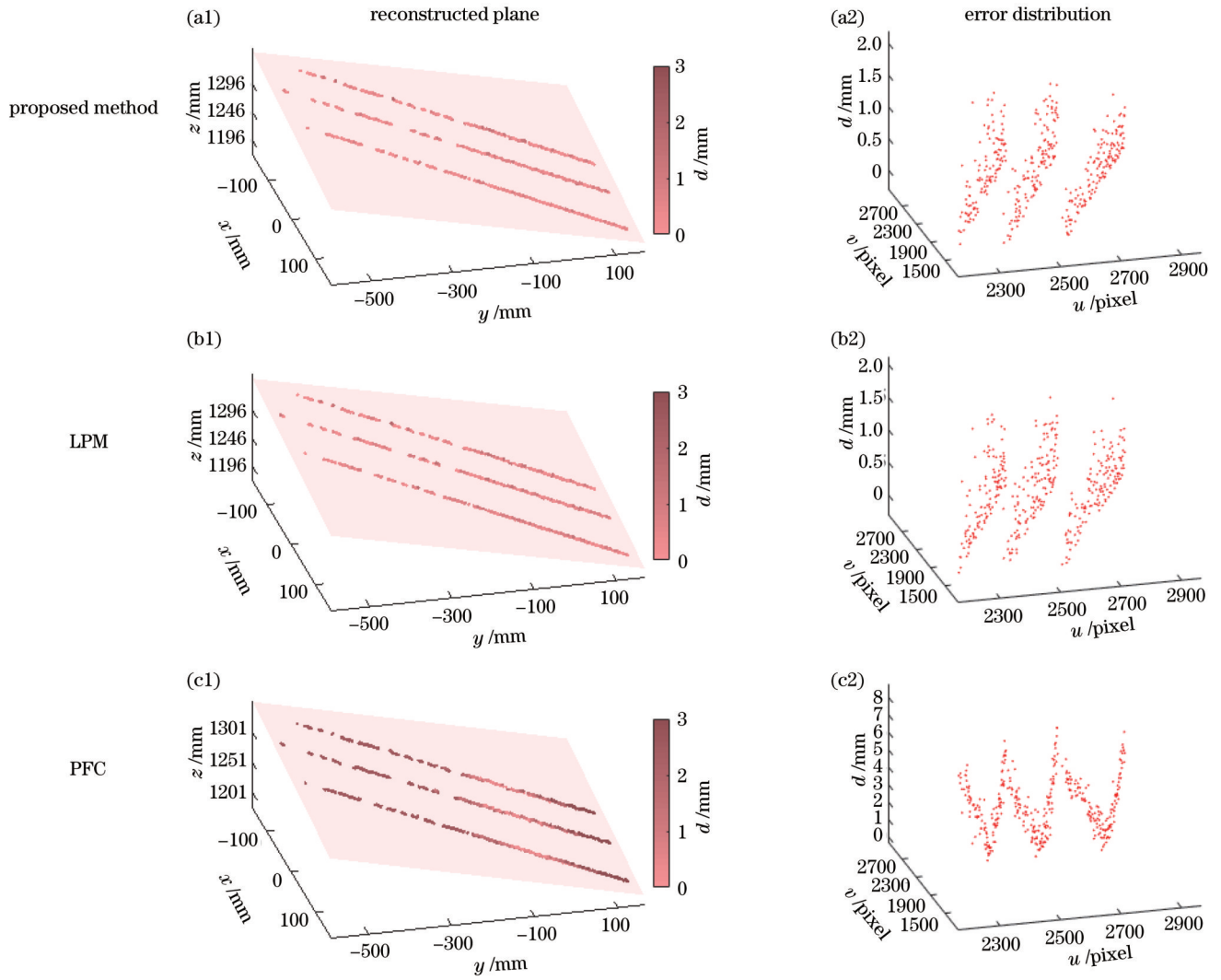


图 11 标定板平面重建及误差分布。(a1)(a2)本文方法;(b1)(b2)LPM;(c1)(c2)PFC

Fig. 11 Calibration plane reconstruction with error distribution. (a1) (a2) Proposed method; (b1) (b2) LPM; (c1) (c2) PFC

标中心点构成的不同距离分别进行三维测量,得到距离测量的误差如表7所示。

表 7 距离测量的精度

Table 7 Accuracies of distance measurement

Method	Distance to be measured					
	$d_1/$ mm	$d_2/$ mm	$d_3/$ mm	$d_4/$ mm	$d_H/$ mm	$d_V/$ mm
HRT	0.017	1.139	0.177	0.744	0.030	0.046
VRT	0.806	0.026	0.471	0.064	0.024	0.034
Proposed method	0.399	0.280	0.340	0.354	0.028	0.030
LPM	0.113	1.059	0.151	0.604	0.027	0.038
PFC	3.575	8.501	6.952	1.001	0.493	0.202

由表7可以看出,相较于短距离,通过所提方法对较长的距离进行测量时,精度略有下降。但相较于其他方法,所提方法在进行长距离测量时精度更高,且对间距相同的不同靶标进行距离测量时精度更稳定。对间距为 1133.85 mm 的相邻靶标进行距离测量的误差

小于 0.50 mm。

为了进一步确定通过所提方法标定线结构光的精度与其所在的相机视场深度之间的关系,通过置于 40 个不同位置的标定板图像进行线结构光标定,然后基于标定结果计算该位置下沿水平、竖直方向任意两个相邻靶标中心点的距离,从而得到该位置下任意相邻靶标距离的平均测量误差,结果如图 12 所示。其中,横坐标为标定板在相机视场中所处的深度,纵坐标为该深度下任意两个相邻靶标中心点距离的平均测量误差。

由图 12 可以看出:通过所提标定方法对间距为 55.00 mm 的任意相邻靶标进行距离测量的平均误差小于 0.08 mm。基于所提方法标定线结构光的精度与其所在的相机视场深度并无明显联系。

分别利用 HRT、VRT、所提方法、LPM 和 PFC 完成线结构光标定,进而对侧面呈矩形的标准体进行目标尺寸测量实验。首先基于线结构光标定结果计算光条中心点的三维坐标,然后拟合标准体的外表面并

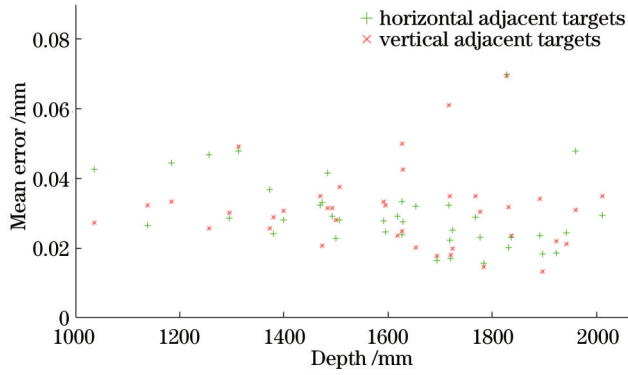


图 12 距离测量结果

Fig. 12 Results of distance measurement

计算标准体各边缘角点的三维坐标,从而获得标准体的尺寸。基于上述 5 种标定方法,对尺寸为 880 mm × 715 mm 的标准体进行尺寸测量,其结果误差如表 8 所示。由表 8 可以看出,所提方法在大视场尺寸测量中具有显著的优势。

表 8 标准体尺寸测量精度

Table 8 Measurement accuracies of standard body size  
unit: mm

Method	HRT	VRT	Proposed method	LPM	PFC
Length	0.479	0.145	0.025	0.457	6.643
Width	0.327	0.480	0.062	0.187	1.386

## 5 结 论

本文提出了一种新的基于射线追踪的线结构光曲面网格标定方法。由于线结构光发射器的透镜失真不可避免,线结构光平面畸变为弯曲的光表面。对于有限空间中的每个光平面,基于射线追踪模型,通过四阶多项式分别拟合其像素坐标和  $z$  坐标之间的关系,从而将畸变光曲面简化为空间中的多条曲线,降低了光平面畸变对标定精度的影响。基于等概加权的原则构建了线结构光曲面网格模型,将双向的射线追踪相结合,实现了对任意分布的线结构光的标定。同时,利用线结构光曲面网格点与图像像素网格点之间的对应关系,实现了对光条中心点亚像素坐标的高精度重建。实验结果表明,与传统方法相比,所提方法在三维重建过程中可以实现更高的精度与鲁棒性,并且,射线追踪过程中通过多项式拟合量化畸变光平面的非线性效应,省略了线结构光发射器的校准过程。因此,所提方法是一种适用于工业应用的简单高效的线结构光标定方法。

## 参 考 文 献

[1] 刘昌文, 段发阶, 李杰, 等. 线结构光三维传感器扫描方向标定方法[J]. 中国激光, 2023, 50(5): 0504001.  
Liu C W, Duan F J, Li J, et al. A scanning direction calibration

method of line-structured light three-dimensional sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(5): 0504001.

- [2] 张倩, 张坤, 朱美强, 等. 运动模糊情况下的结构光光条中心快速提取[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0112002.  
Zhang Q, Zhang K, Zhu M Q, et al. Fast extraction of structure light strip center under motion blur[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(1): 0112002.
- [3] 李志宇, 林嘉睿, 孙岩标, 等. 一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1512004.  
Li Z Y, Lin J R, Sun Y B, et al. A method for measuring circular pose based on line structured light sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1512004.
- [4] 刘祥, 王振亮, 姚鹏, 等. 三维形貌的线结构光精密旋转测量与误差补偿方法[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104004.  
Liu X, Wang Z L, Yao P, et al. Measurement and error compensation of 3D morphology with precision rotation line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2104004.
- [5] Song Z, Chung R, Zhang X T. An accurate and robust strip-edge-based structured light means for shiny surface micromasurement in 3-D[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1023-1032.
- [6] Wang Z Z. Robust three-dimensional face reconstruction by one-shot structured light line pattern[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105798.
- [7] Vargas R, Marrugo A G, Zhang S, et al. Hybrid calibration procedure for fringe projection profilometry based on stereo vision and polynomial fitting[J]. Applied Optics, 2020, 59(13): D163-D169.
- [8] Cai Z W, Liu X L, Li A M, et al. Phase-3D mapping method developed from back-projection stereovision model for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1262-1277.
- [9] Marrugo A G, Vargas R, Romero L A, et al. Method for large-scale structured-light system calibration[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17316-17329.
- [10] Ping Y S, Liu Y K. A calibration method for line-structured light system by using sinusoidal fringes and homography matrix [J]. Optik, 2022, 261: 169192.
- [11] Suresh V, Holton J, Li B W. Structured light system calibration with unidirectional fringe patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 106: 86-93.
- [12] Feng S J, Zuo C, Zhang L, et al. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 143: 106622.
- [13] Miao Y P, Yang Y, Hou Q Y, et al. High-efficiency 3D reconstruction with a uniaxial MEMS-based fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34243-34257.
- [14] Zhu Z M, Wang X Y, Zhou F Q, et al. Calibration method for a line-structured light vision sensor based on a single cylindrical target[J]. Applied Optics, 2020, 59(5): 1376-1382.
- [15] Li W G, Hou D M, Luo Z X, et al. 3D measurement system based on divergent multi-line structured light projection, its accuracy analysis[J]. Optik, 2021, 231: 166396.
- [16] Pan H H, Wang Y W, Zhong G W, et al. Method of using non-specific target to complete structured light plane calibration[J]. Optics Communications, 2021, 492: 126980.
- [17] 张瑞峰, 舒子芸, 南刚雷. 一种新的线结构光标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221101.  
Zhang R F, Shu Z Y, Nan G L. Calibration method for line-structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 221101.
- [18] Yang D, Qiao D Y, Xia C F. Curved light surface model for calibration of a structured light 3D modeling system based on striped patterns[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 33240-33253.
- [19] Yang S C, Yang T, Wu G X, et al. Flexible and fast calibration method for uni-directional multi-line structured light system[J].

- Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107525.
- [20] Lu X T, Wu Q Y, Huang H T. Calibration based on ray-tracing for multi-line structured light projection system[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35884-35894.
- [21] von Gioi R G, Randall G. A sub-pixel edge detector: an implementation of the canny/devernay algorithm[J]. Image Processing on Line, 2017, 7: 347-372.
- [22] 黄臻臻, 黄晓梅, 郑莲玉, 等. 同心圆偏心误差补偿迭代的相机标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1912003.  
Huang Z Z, Huang X M, Zheng L Y, et al. Camera calibration method for concentric circle eccentricity error compensation iteration[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(19): 1912003.
- [23] 孙传富, 彭涛, 陆永刚, 等. 连铸坯三维测量多线结构光的中心条纹快速提取[J]. 光学精密工程, 2023, 31(3): 380-392.  
Sun C F, Peng T, Lu Y G, et al. Fast extraction center stripe of multi-line-structured light for three-dimensional measurement of casting slab[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(3): 380-392.
- [24] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

## Surface Grid Calibration of Line Structured Light Based on Ray-Tracing

Wang Xiaoqian<sup>1</sup>, Xu Kun<sup>2</sup>, Wu Shoucang<sup>2</sup>, Peng Tao<sup>1</sup>, Huang Zhenzhen<sup>1</sup>, Zhang Zhijiang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

<sup>2</sup>MCC Baosteel Technology Service Co. Ltd., Shanghai 201999, China

### Abstract

**Objective** Structured light vision is an optical 3D surface measurement technology, which features fast speed, high precision, and strong robustness. The traditional optical plane model theory generally regards the projection plane of line structured light as the ideal plane to determine spatial parameters of the optical plane. However, the distortion in the lens of the structured light emitter causes the light plane to bend. Therefore, in the traditional methods, the structured light emitter must be accurately calibrated to avoid nonlinear effects. Due to system assembly errors and complex calibration processes, it is difficult to convert the distorted optical surface into an ideal optical plane just by accurate calibration. The surface bending of line structured light should be fully considered to achieve high-precision line structured cursor setting under a large field of view.

**Methods** To avoid the influence of lens distortion on calibration accuracy, we propose a new method for surface calibration of linear structured light based on building a surface grid model. First, the camera rays are tracked along the horizontal and vertical directions of the image respectively, and then the intersection depth between the camera rays and the optical surface can be converted into linear changes of the sub-pixel column coordinates or row coordinates of the optical fringe image respectively. The space line structured light surface is decomposed into multiple curves. Then, the grid points formed by the intersection of horizontal and vertical curves are fitted by an equal almost weighting method to obtain the surface grid of line structured light. The fitted surface grid of linear structured light corresponds to the pixel grid for ray-tracing in the image. Since the local surface of linear structured light can be regarded as a plane after differentiation, the center point of any sub-pixel light strip of non-image pixel grid points can be reconstructed in 3D by establishing the homologous relationship between pixel grid points and surface grid points.

**Results and Discussions** By analyzing the computational cost of polynomials of different orders and the fitting accuracy of sample points, the optimal fitting order for ray-tracing is determined (Table 2). To analyze the algorithm robustness, we compare the calibration accuracy of the algorithm and the tracking range of rays under different numbers of calibration images (Table 3). Additionally, the comprehensive analysis and verification show that the proposed method improves the applicability of the calibration method to the distribution directions of down-line structured light in different scenes. By adding different noise levels to the calibrated images, the algorithm is verified to have sound anti-noise performance (Tables 4 and 5). The distance measurement error for any adjacent target with a distance of 55.00 mm is less than 0.08 mm, and the distance measurement accuracy for adjacent targets with a distance of 1133.85 mm can reach 0.50 mm (Table 7). The dimensional measurement accuracy of the 880 mm×715 mm standard body is higher (Table 8), which verifies that the proposed method has significant advantages in large-field dimensional measurement.

**Conclusions** A new calibration method based on ray-tracing for surface grids of linear structured light is proposed. Since the lens distortion of the linear structured light emitter is unavoidable, the plane of the linear structured light is distorted into a light surface. To reduce the influence of optical plane distortion on calibration accuracy, for each optical plane in

finite space, we simplify the distorted optical surface to multiple curves in space based on the ray-tracing model. Meanwhile, we build a surface grid model of linear structured light based on the principle of equal probability weighting and combine the bidirectional ray-tracing to realize the calibration of any distribution of linear structured light. Additionally, the high-precision reconstruction of the sub-pixel coordinates of the center point of the light strip is realized by employing the homologous relationship between the surface grid points of the linear structured light and the pixel grid points of the image.

**Key words** surface calibration of line structured light; ray-tracing; surface grid model