

玻璃影响下的线结构光测量系统模型

夏国峰 蔡柏林 陈向成

Model of line structured light measurement system under influence of glass

XIA Guofeng, CAI Bailin, CHEN Xiangcheng

引用本文:

夏国峰, 蔡柏林, 陈向成. 玻璃影响下的线结构光测量系统模型[J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1097–1103. DOI: 10.5768/JAO202546.0503005

XIA Guofeng, CAI Bailin, CHEN Xiangcheng. Model of line structured light measurement system under influence of glass[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1097–1103. DOI: 10.5768/JAO202546.0503005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0503005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于平面互补靶标的线结构光标定系统

Line structured light calibration system based on planar complementary target

应用光学. 2023, 44(2): 371–379 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0203002>

高分辨率微线结构光测量系统设计

Design of high-resolution thin line structured light measurement system

应用光学. 2023, 44(5): 1073–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0503003>

基于小视场结构光的指纹三维形貌测量系统

Fingerprint three-dimensional shape measurement system based on small field of view structured light

应用光学. 2025, 46(4): 819–825 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0403001>

基于传像束的小视场双目结构光三维形貌恢复

3D shape restoration of binocular structure light in small field of view based on image bundles

应用光学. 2021, 42(1): 113–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103003>

基于法线引导的激光中心线提取方法

Laser center-line extraction method based on normal guidance

应用光学. 2023, 44(1): 211–218 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0107003>

基于局部RANSAC的结构光标定方法

Structured light calibration method based on local RANSAC

应用光学. 2024, 45(6): 1252–1260 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 05-1097-07

引用格式: 夏国峰, 蔡柏林, 陈向成. 玻璃影响下的线结构光测量系统模型 [J]. 应用光学, 2025, 46(5): 1097-1103.

XIA Guofeng, CAI Bailin, CHEN Xiangcheng. Model of line structured light measurement system under influence of glass[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(5): 1097-1103.



在线阅读

玻璃影响下的线结构光测量系统模型

夏国峰¹, 蔡柏林², 陈向成¹

(1. 安徽大学 人工智能学院, 安徽 合肥 230000; 2. 安徽大学 互联网学院, 安徽 合肥 230000)

摘 要: 为了消除玻璃厚度对线结构光三维测量系统的影响, 构建了一个新的三维测量模型。基于斯涅尔定律建立了相机折射模型, 精确计算出玻璃影响下光线的传播路径, 提出了一种新的标定方法, 实验得到相机的重投影误差为 0.23 像素; 同时提出了一个新的平面校正方法, 通过激光平面、折射面和玻璃厚度之间的关系, 可快速完成所有激光平面校正, 点云拟合平面的均方根误差可达 0.32 mm, 绝对距离误差可达 0.26 mm。实验结果表明, 所提方法具有良好的测量精度, 在工业领域具有一定的实用性。

关键词: 线结构光; 相机折射模型; 激光平面校正; 三维测量

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0503005

Model of line structured light measurement system under influence of glass

XIA Guofeng¹, CAI Bailin², CHEN Xiangcheng¹

(1. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei 230000, China; 2. School of Intelligence, Anhui University, Hefei 230000, China)

Abstract: In order to eliminate the influence of glass thickness on the line structured light 3D measurement system, a new 3D measurement model was constructed. A camera refraction model was established based on Snell's law to accurately calculate the propagation path of light under the influence of glass. A new calibration method was proposed, and the experimental results showed that the camera's reprojection error was 0.23 pixel. Meanwhile, a new plane correction method was proposed, which could quickly complete all laser plane corrections through the relationship between the laser plane, refractive surface, and glass thickness. The root mean square error of the point cloud fitting plane could reach 0.32 mm, and the absolute distance error could reach 0.26 mm. The experimental results show that the proposed method has good measurement accuracy and certain practicality in the industrial field.

Key words: line structured light; camera refraction model; laser plane correction; 3D measurement

引言

在三维测量中, 光学测量方法因具有非接触、高速、高精度等特性而得到广泛的应用^[1-2]。其中, 作为光学测量的典型代表, 线激光三维测量具有良好的单色性和高亮度, 以及测量精度

高、鲁棒性好、对场景纹理依赖性小等优点^[3]。然而, 在部分特殊环境中, 并不是只有空气一种介质, 例如结冰风洞中机翼结冰测量, 一些放置在透明保护罩内的贵重的文物等, 此时, 常规的线结构光测量模型将不再适用。因此, 有必要设

收稿日期: 2024-08-26; 修回日期: 2024-12-04

基金项目: 国家自然科学基金 (52105538)

第一作者: 夏国峰, E-mail: wa22301054@stu.ahu.edu.cn

通信作者: 陈向成, E-mail: chenxgcg@ahu.edu.cn

计一种针对场景中存在多种介质影响时的线激光测量模型。

对于多种介质中的物体测量,目前的方法主要分为两种:吸收法^[4]和几何校正法^[4]。吸收法的原理是:当相机的光轴垂直于折射平面时,折射效应会围绕主点中心径向对称,因此可以将折射带来的影响视作相机的畸变来处理,通过调节畸变系数和焦距来吸收折射效应。FERREIRA R等人^[5]通过调节相机畸变参数和焦距来消除折射影响,并将其应用于水下3D重建。然而,吸收法虽然相对简单,但是由于其仍然采用的针孔模型在非单一介质(例如空气-玻璃-空气)中进行标定,违反了单视投影假设^[6-7],因此无法获得物体的精确位置。

相比之下,越来越多的研究人员将注意力集中到了几何校正方法上,考虑多个折射平面上的折射,选择折射模型代替传统的针孔模型^[8]。折射相机模型基于斯涅尔定律^[9],利用其精确计算出每一条光路在各种介质中的传播路径。刘涛等人^[10]提出了一种引入折射补偿的水下相机成像模型,通过精确计算出激光在不同介质中的传播路径,使得测量精度达到0.2 mm。然而,其默认激光平面垂直于直射平面,这大大减少了其方法的使用场景。孙茜等人^[11]提出了一种水下线激光的三维重建系统,在500 mm~1 200 mm工作距离内,系统的重建误差小于0.6 mm。KONG S等人^[12]采用基于三角剖分的折射相机模型,将标定过程转化为最优解问题,以简化计算过程。GU C等人^[13]利用光线在不同介质中的路径差异,求解出折射模型介质的折射率以及折射面姿态,可以在未知介质折射率的前提下仍然取得良好的测量精度。CHEN Z等人^[14]仅仅通过光在空气介质中和在空气-玻璃-空气介质中的路径差异计算出物体深度、玻璃的姿态厚度以及折射率之间的关系,进而完成三维重建。

本文设计了一种基于线结构光的三维测量

系统,建立相机折射模型,通过玻璃的厚度、折射率和姿态,完成对激光平面的校正。并设计实验验证了测量系统的精确度,验证了所提方法的有效性。

1 线结构光三维测量原理

图1为线结构光测量系统,主要由相机、激光器和旋转振镜组成。相机和激光器为固定位置,二维旋转振镜可以在设定角度内匀速转动,当激光器发出线激光后,振镜会将激光反射到物体上,并随着振镜的旋转扫描完预定区域。在振镜旋转的过程中,每间隔固定角度,相机采集一次激光条纹图片,通过计算激光条纹中心线坐标对应的像素射线与激光平面的交点,即可求出空间中的坐标。

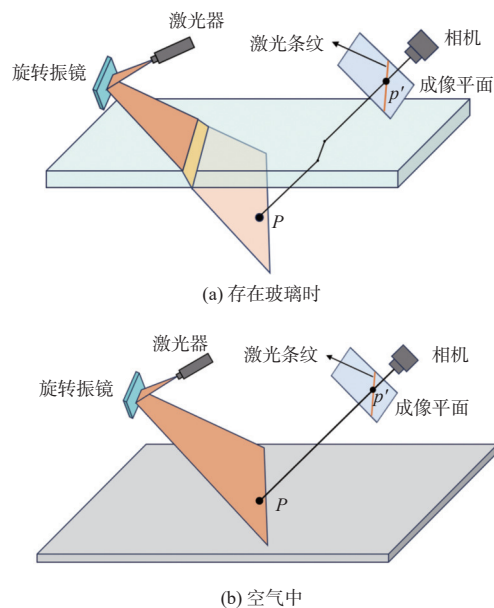


图1 线结构光三维测量系统

Fig. 1 Line structured light 3D measurement system

空气中,世界坐标系下的特征点坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 与相机中的像素坐标 (u, v) 的对应关系可通过透视投影模型^[15]描述。其数学模型如式(1)所示:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = KM \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Z_c 为尺度因子; f_x, f_y 分别为 x 方向和 y 方向上的焦距; (u_0, v_0) 为主点坐标; R, T 为旋转矩阵和平移矩阵; K 为内参矩阵; M 为外参矩阵。通过标定,即

可获取这些参数。

每个设定角度下的激光平面方程 $ax_w + by_w + cz_w + d = 0$,可以通过拍摄多个姿态下棋盘格的激

光条纹图片, 提取激光条纹中心线坐标, 并通过式(1)将其转化为世界坐标, 然后拟合平面获得。最终的被测物体表面特征点坐标, 可通过求解式(2)获得:

$$\begin{cases} Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = KM \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \\ ax_w + by_w + cz_w + d = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2 系统设计

当被测物体与激光测量系统之间存在玻璃时, 如图1(a)所示, 由于玻璃使得光线发生折射, 对于相机而言, 传统的透视投影模型将不再适用, 对于激光平面而言, 玻璃也会改变其平面方程。因此, 我们使用折射模型来消除玻璃厚度对相机造成的影响, 并对激光平面进行校正。

2.1 相机折射模型

首先在空气中对系统进行标定, 获取相机的内外参矩阵以及每个设定角度下的激光平面方程。将靠近相机的那一面定义为第一折射面, 将另一面定义为第二折射面。当第一和第二折射面不平行, 甚至不是绝对平面时, 光与折射面的夹角、光在玻璃中的光程都将无法计算, 进而无法计算出光线的具体路径。因此本文假定玻璃的2个平面都是表面平整且绝对平行的, 具有相同的法向量。图2为空气-玻璃-空气介质中的光线路径。

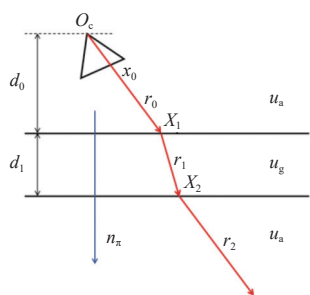


图2 空气-玻璃-空气介质中的光线路径

Fig. 2 Light path in air-glass-air medium

如图2所示, 在空气-玻璃-空气介质中, 有2个折射面, O_c 为相机的光心, 光路方向使用单位向量 r_0, r_1, r_2 表示; 光线与第一折射面的交点为 X_1 , 与第二折射面的交点为 X_2 ; d_0 是相机的光学中心到第一折射表面的距离; d_1 是2个折射平面之间的距离; u_a 为空气的折射率(本文假定为1); u_g 为玻璃的折

射率; n_π 为折射面的法向量; X_0 为成像平面上一点, 其坐标可由相机的内参矩阵获得。则第一段光线的单位向量计算公式为

$$r_0 = \overrightarrow{O_c X_0} = K^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, (u, v) 是 X_0 的像素坐标。

当光线从空气介质中进入玻璃介质中时, 发生折射, 其传播方向遵循斯涅尔定律。则有:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

式中: n_1 为入射光线所在介质的折射率; n_2 为出射光线所在介质的折射率; θ_1 和 θ_2 分别为入射角和出射角。将斯涅尔定律转换为向量形式为($u_i < u_{i+1}$), 则有:

$$r_{i+1} = \alpha_i r_i + \beta_i n_\pi \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \\ \beta_i = \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} r_i \cdot n_\pi - \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} \right)^2 [1 - (r_i \cdot n_\pi)^2]} \end{cases} \quad (6)$$

在空气-玻璃-空气介质中, 光线进入时的方向和光线从玻璃中出射时的方向相同, 因此第三段光线的单位向量平行于第一段光线的向量, 即 $r_2 = r_0$ 。则光线与第一折射面和第二折射面的交点计算公式为

$$X_1 = \frac{d_0}{r_0 \cdot n_\pi} r_0, \quad X_2 = X_1 + \frac{d_1}{r_1 \cdot n_\pi} r_1 \quad (7)$$

令 $X_2(x_0, y_0, z_0)$, $r_2(m, n, p)$, 则通过点 X_2 、方向为 r_2 的直线为

$$(x - x_0)/m = (y - y_0)/n = (z - z_0)/p \quad (8)$$

联立式(3)~式(8), 最终可得每条像素射线在玻璃影响后的直线方程。

2.2 折射模型参数的获取

由上述2.1节可知, 相机折射模型的参数有4个, 分别为折射面法向量 n_π 、相机距离玻璃距离 d_0 、玻璃厚度 d_1 和玻璃折射率 u_g 。其中, 在空气-玻璃-空气模型中, 由于光线在入射玻璃前后的方向平行, 故 d_0 的数值并不影响最终三维点坐标的求取^[13], 因此必要参数为剩余3个。

透明介质平行平面的法向量可以由直接图像和折射图像中对应关系定义的两条或多条折射线之间的交点获取。

玻璃姿态的获取如图3所示。图3中, O_c 点为相机光心; SO_c 为垂直于折射面 Γ_π 的直线; h 点为 S 点在成像平面上的投影; P_1^1 为空间中一点; I_1 为 P_1^1 的直射投影点; P_1^4 为 P_1^1 的折射投影点。

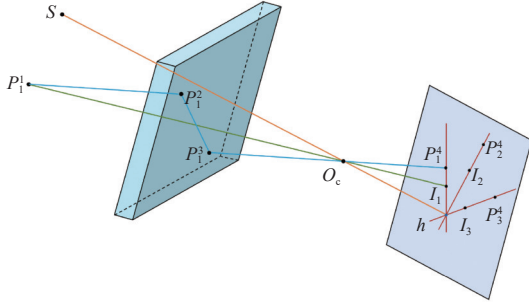


图3 玻璃姿态的获取

Fig. 3 Acquisition of glass posture

由于穿透平板玻璃前后的光线平行, 结合斯涅尔定律, 则有:

$$\begin{cases} \overrightarrow{P_1^2 P_1^3} = \alpha_1 \overrightarrow{P_1^1 P_1^2} + \beta_1 n_\pi \\ P_1^1 P_1^2 // P_1^3 O_c \end{cases} \quad (9)$$

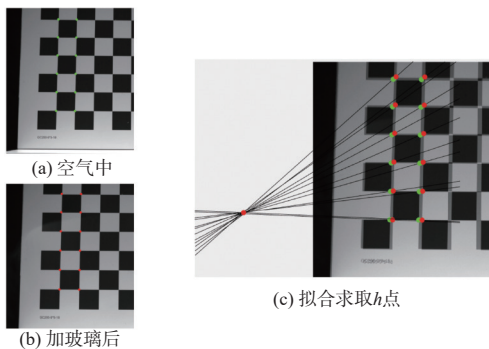
由式(9)得出 P_1^1, P_1^2, P_1^3, O_c 共面, 且其构成的平面 $\Gamma_1 \perp \Gamma_\pi$, 又因为 $SO_c \perp \Gamma_\pi$ 且 $O_c \in \Gamma_1$, 所以 $SO_c \in \Gamma_1$, 因此延长线与成像平面的交点 P_1^4, I_1, h 必定在一条直线上。

取多个点 $P_1^1, P_2^1, P_3^1 \dots$, 求其投影点连线的交点, 便可得到 h 的像素坐标:

$$h = \operatorname{argmin} f(h, L_{P_1^1 I_1}, L_{P_2^1 I_2}, L_{P_3^1 I_3} \dots) \quad (10)$$

式中: $f(\cdot)$ 为点 h 到直线 $L_{P_1^1 I_1}, L_{P_2^1 I_2}, L_{P_3^1 I_3} \dots$ 的距离之和。

实验时, 先在空气中拍摄一幅棋盘格图片, 存在玻璃的情况下再拍摄一幅棋盘格图片, 分别提取他们的角点, 找到对应特征点连线, 求其交点即为 h 点, 如图4所示。

图4 h 点的获取Fig. 4 Acquisition of h points

假设 h 点对应的相机坐标系坐标为 H , 则折射面法向量为

$$n_\pi = \overrightarrow{O_c H} = K^{-1} \begin{bmatrix} u_h \\ v_h \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

在获取折射面法向量后, 在空气介质中, 通过激光测量系统扫描棋盘格标定板, 拟合出标定板的平面方程。利用2.1节中的折射模型求解出角点 p 的像素射线, 再求解像素射线与标定板所在平面的交点, 即为棋盘格角点的空间坐标 P 。最后利用内参矩阵 K 将角点的空间坐标 P 投影到成像平面, 得到重投影点 p_r , 计算 p_r 与 p 之间的距离。取 N 个角点, 利用最小二乘法可求解出 u_g, d_1 , 即:

$$\begin{cases} u_g, d_1 = \arg \min_{n_\pi} F \\ F = \sum_{i=1}^N |p_{ri} - p_i|, i = 1, 2, 3 \dots N \end{cases} \quad (12)$$

2.3 激光平面校正

图5为激光穿透玻璃的路径。在空气-玻璃-空气介质中, 激光平面经过两次折射, 入射激光平面与激光出射玻璃的平面平行。设 θ_1 为激光平面的法向量 n_p 与折射面法向量 n_π 的夹角, θ_2 和 θ_3 为激光平面在经过第一折射面时的入射角和出射角。根据式(13), 由几何关系可计算出经过玻璃前和经过玻璃后的2个光平面之间的距离 Δd :

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \frac{n_r \cdot n_p}{|n_r \cdot n_p|} \\ \theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_1 \\ u_a \sin \theta_2 = u_g \sin \theta_3 \\ \Delta d = \frac{d_1}{\cos \theta_3} \times \cos(\theta_1 + \theta_3) \end{cases} \quad (13)$$

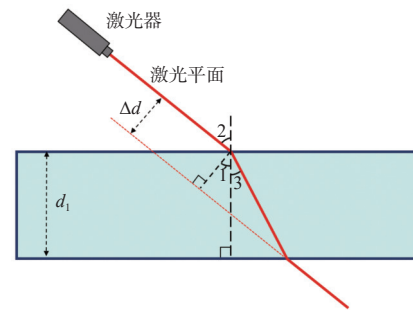


图5 激光穿透玻璃的路径

Fig. 5 Path of laser penetration through glass

令初始激光平面方程为 $Ax + By + Cz + D_1 = 0$, 穿过玻璃后的激光平面方程为 $Ax + By + Cz + D_2 = 0$,

联立方程, 则有:

$$\begin{cases} \Delta d = \frac{|D_2 - D_1|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \\ Ax + By + Cz + D_1 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

因此, 可求解出穿过玻璃后的激光平面方程:

$$Ax + By + Cz + (D_1 + \Delta d \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}) = 0 \quad (15)$$

联立式(8)和式(15), 便可求解出空间中点的坐标。

3 实验和结果

3.1 系统硬件

为验证所提方法, 搭建了一套线结构光测量系统, 实验装置如图6所示。相机采用 Basler 相机, 分辨率为 $1\,920 \times 1\,200$ 像素; 采用鲍威尔棱镜生成一字线激光, 激光波长约为 640 nm , 激光线宽度小于 1 mm ; 振镜采用金海创 RC3808 高精度扫描振镜, 重复定位精度小于 $8\text{ }\mu\text{rad}$; 采用的玻璃板厚度约为 8 mm ; 采用的亚克力板厚度约为 8 mm 和 60 mm ; 采用的平面标靶为边长 100 mm 的金属平面标靶。



图6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setup diagram

3.2 系统参数求取

将不同规格板材与成像平面呈 0° 夹角放置时, 求取的折射模型参数如表1所示。

表1 折射模型参数

Table 1 Refraction model parameters

板材及其厚度/mm	d_1/mm	u_g	n_π
玻璃/8	7.887	1.533	(0.017, -0.008, 0.999)
亚克力/8	7.892	1.497	(0.012, -0.012, 0.999)
亚克力/60	60.124	1.511	(-0.009, 0.006, 0.997)

在获取 n_π 、 d_1 和 u_g 后, 继续对激光平面进行校正。本文实验中, 在完整扫描周期内, 设定的激光平面数量为 801 个。使用 2.3 节所提方法对激光平面进行校正, 当 60 mm 亚克力板存在时, 校正前后的部分激光平面方程如表2所示。

表2 校正前后部分激光平面方程

Table 2 Partial laser plane equation before and after calibration

激光平面序列	校正前	校正后
1	$1.432x - 0.058y - z + 244.897 = 0$	$1.432x - 0.058y - z + 139.207 = 0$
50	$1.497x - 0.068y - z + 260.501 = 0$	$1.497x - 0.068y - z + 151.441 = 0$
100	$1.565x - 0.063y - z + 277.827 = 0$	$1.565x - 0.063y - z + 165.207 = 0$
150	$1.615x - 0.065y - z + 296.856 = 0$	$1.615x - 0.065y - z + 181.566 = 0$
200	$1.638x - 0.081y - z + 317.097 = 0$	$1.638x - 0.081y - z + 200.506 = 0$
250	$1.654x - 0.079y - z + 337.955 = 0$	$1.654x - 0.079y - z + 220.524 = 0$
...	...	...

3.3 系统精度评估

将 60 mm 亚克力板与相机成像平面呈 0° 放置时, 折射模型的重投影误差如表3所示。

表3 不同介质下的重投影误差对比

Table 3 Comparison of reprojection errors at different media

方法	像素 (pixel)		
	板材(厚度)		
	玻璃(8 mm)	亚克力(8 mm)	亚克力(60 mm)
空气中	0.21	0.22	0.19
不进行校正	1.46	1.77	1.98
吸收法 ^[5]	0.75	0.95	0.89
所提方法	0.31	0.40	0.23

从表3可以看出, 重投影误差均小于 1 个像素, 最低可达 0.23 像素, 在不同折射率和不同厚度的板材影响下, 所提方法相较于吸收法精度均有提升。同时, 由表3可以看出, 8 mm 玻璃板的重投影误差比 8 mm 亚克力板更小, 60 mm 亚克力板的重投影误差比 8 mm 亚克力板的重投影误差更小, 这是因为当板材造成的折射效果越强时, 折射投影点与直射投影点之间的距离就越远, 在利用它们的连线求取 h 点时, 抗干扰能力就越强, 折射面法向量的求取就更加精准, 重投影误差就越小。

将平面标靶放置在距离相机 55 cm 处, 将不同的板材与成像平面呈 0° 夹角分别放置, 对平面标靶进行三维测量, 将结果拟合成一个平面, 求解其平面均方根误差:

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (16)$$

式中: n 为点云中对应的点数; d_i 为点云中的对应点与拟合平面之间的欧几里得距离。

计算结果如表 4 所示。从表 4 数据可知,在不同板材的影响下,所提方法的平面拟合误差均小于 1 mm,最低达到 0.32 mm,优于吸收法的效果。

表 4 不同介质下的平面拟合误差对比

Table 4 Comparison of plane fitting errors under different media

板材	方法	E_{RMSE}/mm
10 mm 玻璃	空气中	0.42
	不进行校正	2.06
	吸收法 ^[5]	0.47
	所提方法	0.44
10 mm 亚克力板	空气中	0.43
	不进行校正	2.13
	吸收法 ^[5]	0.99
	所提方法	0.48
60 mm 亚克力板	空气中	0.29
	不进行校正	4.95
	吸收法 ^[5]	1.12
	所提方法	0.32

最后,将平面标靶放置在导轨上,使其可沿着平面标靶的法向移动。将 60 mm 亚克力板与相机成像平面呈 0° 夹角放置,重建移动前后的平面标靶,分别拟合出移动前后的标靶所在平面方程。由于移动方向为平面标靶的法向,移动前后拟合得到的平面法向量几乎一致,因此位移距离 Δd_{abs} 统一按照移动前标靶法向量计算:

$$\Delta d_{\text{abs}} = \frac{|D_a - D_b|}{\sqrt{A_a^2 + B_a^2 + C_a^2}} \quad (17)$$

式中: (A_a, B_a, C_a) 为位移前标靶平面法向量; D_a, D_b 分别为移动前后的标靶平面方程常数项。将 Δd_{abs} 与真实移动的距离作对比来计算绝对位移误差,结果如表 5 所示。

表 5 绝对距离误差

Table 5 Absolute distance error

实际移动距离	方法	Δd_{abs}	绝对误差
10	空气中	9.88	0.12
	不进行校正	9.01	0.99
	吸收法 ^[5]	9.45	0.55
	所提方法	9.74	0.26
15	空气中	14.76	0.24
	不进行校正	13.89	1.01
	吸收法 ^[5]	14.21	0.79
	所提方法	14.67	0.33
20	空气中	19.72	0.28
	不进行校正	18.78	1.22
	吸收法 ^[5]	19.02	0.98
	所提方法	19.58	0.42

由表 5 可看出,不进行校正时,绝对距离误差能达到 1 mm 以上,经过所提方法校正后的误差可低至 0.26 mm,相较于不进行矫正的情况下精度有明显提升,且在多次实验中所得结果相较于吸收法也有明显提升。

4 结论

本文提出了一种基于线结构光的玻璃影响下的三维测量方法,通过建立折射模型,计算出光在不同介质中的传播路径,基本消除了玻璃对相机造成的影响,并且完成了对激光平面的几何校正,最终基本消除了玻璃厚度对三维测量系统的影响。实验结果表明,所提出的测量方法在有玻璃影响的情况下,相机重投影误差低至 0.23 像素,工作距离为 55 cm 左右时,测量系统的平面拟合均方根误差为 0.32 mm,绝对位移的测量误差为 0.26 mm。综上所述,所提方法在有玻璃的影响下依然保持着良好的测量精度,在工业领域具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 商执亿, 王建华, 尹培丽, 等. 金属表面非相干线结构光条纹中心提取方法[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 503-509. SHANG Zhiyi, WANG Jianhua, YIN Peili, et al. Method for extracting the center of non phase mainline structured light stripes on metal surfaces[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 503-509.
- [2] 谢雷. 基于机器视觉的非接触测量方法及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2022. XIE Lei. Non-contact measurement method and application research based on machine vision[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [3] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 27-41. DING Shaowen, ZHANG Xiaohu, YU Qifeng, et al. Review of non-contact 3D reconstruction measurement methods[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2017, 54(7): 27-41.
- [4] SHORTIS M. Calibration techniques for accurate measurements by underwater camera systems[J]. Sensors, 2015, 15(12): 30810-30826.
- [5] FERREIRA R, COSTEIRA J P, SANTOS J A. Stereo reconstruction of a submerged scene[C]// Iberian Confer-

- ence on Pattern Recognition and Image Analysis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 102-109.
- [6] TREIBITZ T, SCHECHNER Y, KUNZ C, et al. Flat refractive geometry[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 34(1): 51-65.
- [7] 许丽, 周永昊, 陆桂明, 等. 河流自然水体中三维视觉测量[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2465-2480.
- XU Li, ZHOU Yonghao, LU Guiming, et al. Three dimensional visual measurement in natural water bodies of rivers[J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2465-2480.
- [8] YANG H, TIAN S, FAN J, et al. A precise calibration method for the underwater binocular camera with unknown refractive index[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 23(2): 1565-1574.
- [9] 周旭环, 龚云辉, 吴绍华, 等. 基于光的反射与折射定律的表述方法推导及应用[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 510-517.
- ZHOU Xuhuan, GONG Yunhui, WU Shaohua, et al. Derivation and application of expression methods based on the laws of reflection and refraction of light[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 510-517.
- [10] 刘涛, 关添航, 杜宏旺, 等. 基于线结构光的水下旋转扫描高精度测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023(7): 260-270.
- LIU Tao, GUAN Tianhang, DU Hongwang, et al. Research on high-precision underwater rotary scanning measurement method based on line structured light[J]. *Journal of Instrumentation*, 2023(7): 260-270.
- [11] 孙茜, 薛庆生, 张冬雪, 等. 水下目标物三维激光重建方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 234-240.
- SUN Qian, XUE Qingsheng, ZHANG Dongxue, et al. Research on 3D laser reconstruction methods for underwater targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 234-240.
- [12] KONG S, FANG X, CHEN X, et al. A NSGA-II-based calibration algorithm for underwater binocular vision measurement system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 69(3): 794-803.
- [13] GU C, CONG Y, SUN G. Three birds, one stone: unified laser-based 3D reconstruction across different media[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1-12.
- [14] CHEN Z, WONG K Y K, MATSUSHITA Y, et al. Depth from refraction using a transparent medium with unknown pose and refractive index[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 102: 3-17.
- [15] ZHANG Z, KANG J H, SUN Z F, et al. An optimization measurement method of laser sensor based on perspective projection model[J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127582.