

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108231

基于线结构光单平面标定的3D成像方法研究*

陈晓辉¹, 张智豪², 杨鑫², 徐江²

(1. 黄淮学院信息工程学院 驻马店 463000; 2. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要:针对现有线结构光3D成像系统标定步骤繁琐、标定鲁棒性低等问题,本文提出了基于线结构光单平面标定的3D成像方法,实现高精度、高鲁棒性的3D成像。该3D成像方法通过构建结构光平面到成像面的单平面映射模型简化了三维空间的标定步骤,提高了系统的鲁棒性。该模型基于棋盘格图像内角点坐标作为线结构光平面标定计算控制点,提高了标定控制点个数和降低了标定的偶然误差;该模型无需进行成像系统内外参矩阵估计,精简了标定中间步骤;该模型无需计算线结构光图像光条中心点,避免了图像算法误差对标定结果的影响。实验结果表明,该3D成像方法标定步骤简单,标定控制点多、鲁棒性高,标定平均距离残差0.158 mm,单点的重复性测量精度优于 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

关键词: 线结构光;单平面映射;标定;3D成像;高精度;高鲁棒性

中图分类号: TH-3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

A high accuracy and robustness 3D imaging method for line structured light single plane calibration

Chen Xiaohui¹, Zhang Zhihao², Yang Xin², Xu Jiang²

(1. School of Information Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing wired structured light 3D imaging system has the problems of tedious calibration steps and low robustness. To address these issues, this paper proposes a 3D imaging method based on the single plane calibration of linear structured light, which could achieve high accuracy and high robustness of 3D imaging. The 3D imaging method simplifies the calibration steps of 3D space and improves the robustness of the system by constructing a single plane mapping model from the structured light plane to the imaging plane. In this model, the coordinates of the corners in the checkerboard image are used as the control points for the calibration of the line structured light plane, which improves the number of control points and reduces the accidental error. The model does not need to estimate the internal and external parameter matrix of the imaging system, which can simplify the intermediate steps of calibration and improve the repeatability and accuracy of calibration. In addition, the model does not need to calculate the center point of the light stripe in the line structured light image, which avoids the influence of image algorithm errors on the calibration results. Experimental results show that the calibration procedure of the 3D imaging method is simple and has many calibration control points. The robustness of the calibration is high, the calibration average distance residual is 0.158 mm, and the repeatability measurement accuracy of single point is better than $\pm 1 \mu\text{m}$.

Keywords: line structured light; single planar mapping; calibration; 3D imaging; high accuracy; high robustness

0 引言

线结构光3D成像技术是一种基于激光三角测量原

理的主动视觉测量技术^[1],可以实现高空间和深度分辨率的三维信息非接触成像与测量^[2-8]。它具有高精度、测速快、非接触、成本低和体积小等优点,被广泛应用于机器人智能引导、智能焊接、尺寸检测、逆向工程和遗产保

收稿日期:2021-07-12 Received Date: 2021-07-12

* 基金项目:国家自然科学基金(51575213)、国家重点研发计划(2019YFB1310403)项目资助

护等方面^[9-12]。

线结构光 3D 成像原理是将线结构光条纹投射到被测物体上产生表征被测物体外形的结构光轮廓,成像系统(相机或镜头)采集轮廓图像后,通过标定来求解应轮廓 $x-z$ 面物理尺寸信息^[13-16]。进一步的,结合空间一维 y 向平移(机器人,传送带,直线模组)驱动,将获得的一系列轮廓信息进行空间标定,可实现高精度的三维成像、测量与分析。因此,线结构光 3D 成像技术中的标定问题是测量过程的关键步骤,标定方法的好坏对三维测量的精度与速度起着决定性作用。现阶段,标定过程主要分为成像系统的标定和线结构光平面的标定两部分:1) 成像系统的标定方面已经较为成熟,该部分主要是计算成像系统的内外参矩阵以及畸变参数。有代表性的是 Zhang, Z 相机标定方法^[17],通过计算至少两个不共面的平面标定板图像即可实现成像系统的标定。2) 线结构光平面的标定则是基于成像系统标定得到的内外参矩阵参数的基础上,计算结构光产生的光平面在三维空间坐标系下的光平面方程,同时转换成成像系统中的单位(pixel)到三维空间的物理尺寸单位(mm)^[1,18-19]。

Son 等^[1]首先对成像系统畸变校正,然后利用成像系统的内外参矩阵来计算线结构光平面在三维空间的平面方程来实现标定。因此,成像系统的内外参矩阵的计算误差会累积到标定的结果中。Kumar 等^[18]提出了一种借助特殊标定圆形阵列法进行光平面的标定。但是,该方法标定点过少,容易引入偶然误差,标定块的加工精度不易保证,标定点的计算依赖标定块上光条中心提取结果,同样会引入计算误差,降低整个系统的鲁棒性。Bok 等^[19]提出利用平面棋盘格标定板的角点配合结构光中心线在靶标平面的直线方程,进而通过多幅图像标定点的拟合得出了光平面方程。但是,由于光条中心提取和交点的计算,仍会带来分析误差,光平面的计算依赖成像系统标定的内、外参矩阵参数以及畸变参数。周富强等^[20]提出了一种基于共面标定参照物的现场标定方法。通过移动标定板 5 个位置,建立数学模型,确定光平面方程。但是,由于光条纹的中心提取与特征点的像点定位误差,以及成像系统的内参标定误差都会对光平面的标定精度和鲁棒性产生较大的影响。

现阶段光平面的标定依赖成像系统内外参矩阵估计,这些参数的误差会直接影响最终三维测量结果的精度。同时,在进行光平面的标定时,多数需要获取包含有线结构光光条的图片,并通过图像处理算法(滤波、灰度化、二值化、细化等)来提取光条中心点集作为参考点。光条中心点的计算误差也会增加最终标定结果的误差累计。因此,目前的标定方法过程不但误差较大,标定点少,而且标定过程繁琐,很难保证标定的重复性结果。同时,目前的多数线结构光 3D 成像系统的标定方法仅仅实

现了光平面的标定,没有实现三维空间的标定。

本文提出了一种高精度、高鲁棒性的线结构光 3D 成像方法。该方法把 3D 成像方法的空间 $\{O-XYZ\}$ 的标定分解为光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定与 y 向空间标定。同时,提出一种基于线结构光单平面映射的标定方法实现光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定问题。该标定方法再进行成像系统内参的标定后,仅采用畸变参数的校正来进行后续的光平面的标定,避免了内外参矩阵参数计算,简化了标定过程,精简了大量中间变量,提高了整个系统的标定精度。同时,在标定过程中无需获取包含有线结构光光条图片,无需提取图像中光条中心点,降低了光学算法计算误差,保证了标定的重复性。由于该方法标定点较多,提高了标定的鲁棒性。进一步将经过光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定后得到的轮廓序列进行 y 向空间标定可实现高精度,高鲁棒性的 $\{O-XYZ\}$ 空间的 3D 成像与测量。

1 线结构光 3D 成像原理

线结构光 3D 成像原理如图 1 所示。线结构光发射器投射到被测表面产生线结构光轮廓,成像系统在成像面上成像。假设线结构光平面坐标系为 $\{O-XZ\}$,垂直于光平面 $\{O-XZ\}$ 的方向为 y ,则世界坐标系可表示为 $\{O-XYZ\}$; CCD 成像面坐标系为 $\{O'-UV\}$ 。假设线结构光平面在 y 方向上有 n 个空间标定点 $\{p_0, p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$,他们 y 向坐标已知。假设 C 为线结构光轮廓上一点, C 在 $\{O-XYZ\}$ 下的坐标为 $C(x_c, y_c, z_c)$; C' 为 C 在 CCD 成像面坐标系为 $\{O'-UV\}$ 的成像点, C' 在 $\{O'-UV\}$ 下的坐标为 $C'(u_c, v_c)$ 。线结构光 3D 成像的实质是构建 CCD 成像面坐标系 $\{O'-UV\}$ 中的点 $C'(u_c, v_c)$ 到世界坐标系 $\{O-XYZ\}$ 中的点 $C(x_c, y_c, z_c)$ 的映射关系,即线结构光 3D 成像系统 $\{O-XYZ\}$ 的标定。

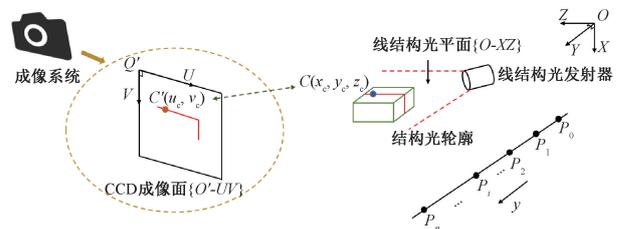


图 1 线结构光 3D 成像原理

Fig. 1 Principle of line structured light 3D imaging

假设此时线结构光平面在 y 方向空间标定点 p_i 上,则可得:

$$y_c = y_{p_i} \quad (1)$$

由于 $C'(u_c, v_c)$ 在 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 和线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 上,因此, $C'(u_c, v_c)$ 到 $C(x_c, z_c)$ 的映射包含

两个部分:

1) CCD 成像面的畸变校正变换 \mathbf{W} , 该为非线性变换根据成像系统镜头径向畸变模型, 可得:

$$u = (u' - u_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + u_0 \quad (2)$$

$$v = (v' - v_0)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + v_0 \quad (3)$$

其中, $r = \sqrt{(u' - u_0)^2 + (v' - v_0)^2}$, (u_0, v_0) 为主点, k_1, k_2 为径向畸变系数。

2) 畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 到线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的单应性变换 \mathbf{H} , 该变换为面到面的线性投影变换。

结合以上两部分, 可得 $C'(u_c, v_c)$ 到 $C(x_c, z_c)$ 的映射:

$$(x_c, z_c) = \mathbf{H}(\mathbf{W}(u_c, v_c)) \quad (4)$$

联立式(1)和(4)即可求得 $C(x_c, y_c, z_c)$, 实现空间三维成像与测量。

2 线结构光 3D 成像系统空间 $\{O-XYZ\}$ 的标定方法

根据线结构光 3D 成像特点, 假设 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 的畸变参数根据张正友相机标定方法 Zhang, Z^[5] 已经计算并校正, 那么线结构光 3D 成像系统 $\{O-XYZ\}$ 的标定可分解为线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定与 y 向空间标定如图 2 所示。

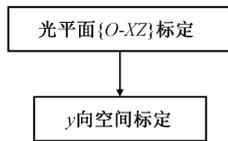


图 2 线结构光 3D 成像系统 $\{O-XYZ\}$ 的标定

Fig. 2 Calibration of the line structured light 3D imaging system $\{O-XYZ\}$

2.1 线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定

本文提出一种基于单结构光平面映射的标定方法, 通过构建畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 到线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的单应性变换 \mathbf{H} , 来实现线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定问题。

线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定原理如图 3 所示。假设棋盘格标定板黑白格为正方形, 宽度为 w ; $Q_{ij}(i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n)$ 为棋盘格标定板第 i 列、第 j 行上的内角点; $Q'_{ij}(i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n)$ 为 CCD 成像面上棋盘格图像上分别与 $Q_{ij}(i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n)$ 对应的内角点图像点。

将线结构光平面与棋盘格标定板重合, 为了便于分析, 定义线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的 x 方向沿着棋盘

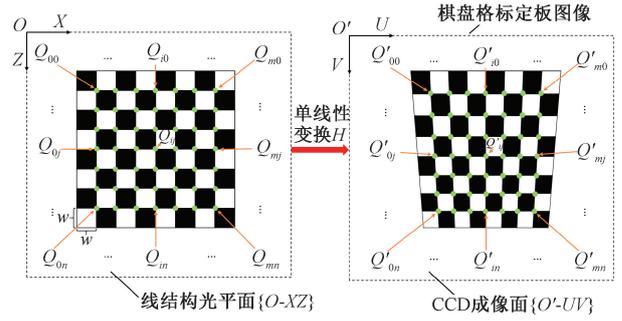


图 3 标定线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定原理图

Fig. 3 Calibration schematic of the calibration line structured light plane $\{O-XZ\}$

格水平方向, $\{O-XZ\}$ 的 z 方向为沿着棋盘格竖直方向, 原点 O 设置为 Q_{00} 。由于线结构光平面与棋盘格标定板重合, 棋盘格标定板上内角点 Q_{ij} 同时为线结构光平面关键特征点, 则 $Q_{ij}(i=0, 1, 2, \dots, m; j=0, 1, 2, \dots, n)$ 在线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 下的坐标 $(x_{Q_{ij}}, z_{Q_{ij}})$ 为:

$$x_{Q_{ij}} = w \times i \quad (5)$$

$$z_{Q_{ij}} = w \times j \quad (6)$$

其中, $x_{Q_{ij}}$ 和 $z_{Q_{ij}}$ 分别为 Q_{ij} 在线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的 x, z 方向上的坐标; w 为黑白格宽度。

定义畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 的 U 方向为 CCD 成像面水平方向, V 方向为 CCD 成像面竖直方向, 原点 O' 为 CCD 成像面左上角顶点, 如图 3 所示。通过 OPENCV 棋盘格图像内角点计算方法计算 Q'_{ij} 在畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 上的亚像素点坐标 $(u_{Q'_{ij}}, v_{Q'_{ij}})$ 。

由于 Q_{ij} 为线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的关键特征点, Q'_{ij} 是畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 上的关键特征点, 且 Q_{ij} 与 Q'_{ij} 是一一对应的, 假设畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 到线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的单应性变换矩阵 \mathbf{H} 为:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, h_{ij} 为矩阵 \mathbf{H} 中第 i 行, 第 j 列的元素 ($i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$)。

为计算单应性矩阵 \mathbf{H} , 基于 Q_{ij} 构建线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的关键特征点齐次坐标矩阵 \mathbf{A} :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_{Q_{00}} & \cdots & x_{Q_{ij}} & \cdots & x_{Q_{mn}} \\ y_{Q_{00}} & \cdots & y_{Q_{ij}} & \cdots & y_{Q_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, \mathbf{A} 的第 Q_{ij} 列为 Q_{ij} 在线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的齐次坐标, 可由式(5)和(6)计算得到。

基于 $Q'_{ij}(i=0,1,2,\dots,m; j=0,1,2,\dots,n)$ 构建畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 的关键特征点齐次坐标矩阵 \mathbf{B} :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} u_{Q'_{00}} & \cdots & u_{Q'_{ij}} & \cdots & u_{Q'_{mn}} \\ v_{Q'_{00}} & \cdots & v_{Q'_{ij}} & \cdots & v_{Q'_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, \mathbf{B} 的第 Q'_{ij} 列为 Q'_{ij} 在畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 的齐次坐标, 可由棋盘格图像内角点

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_{Q_{00}} & \cdots & x_{Q_{ij}} & \cdots & x_{Q_{mn}} \\ y_{Q_{00}} & \cdots & y_{Q_{ij}} & \cdots & y_{Q_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{Q'_{00}} & \cdots & u_{Q'_{ij}} & \cdots & u_{Q'_{mn}} \\ v_{Q'_{00}} & \cdots & v_{Q'_{ij}} & \cdots & v_{Q'_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \cdots \times \left(\begin{bmatrix} u_{Q'_{00}} & \cdots & u_{Q'_{ij}} & \cdots & u_{Q'_{mn}} \\ v_{Q'_{00}} & \cdots & v_{Q'_{ij}} & \cdots & v_{Q'_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{Q'_{00}} & \cdots & u_{Q'_{ij}} & \cdots & u_{Q'_{mn}} \\ v_{Q'_{00}} & \cdots & v_{Q'_{ij}} & \cdots & v_{Q'_{mn}} \\ 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \quad (13)$$

即实现线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定。

2.2 y 向空间标定

y 向空间标定是在垂直于线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的方向上设定 n 个等间距(假设间距为 k) 的空间标定点点 $P_r(r=0,1,2,\dots,n)$, 如图 1 所示。假设第一个空间标定点点 P_0 为 y 向原点, 则 P_r 的 y 向坐标 y_r 为:

$$y_r = r \cdot k (r=0,1,2,\dots,n) \quad (14)$$

基于式(14), 在每一个 y 向标定点点 P_r 的位置, 联立式(13)线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的单应性变换矩阵 \mathbf{H} , 计算当前与 y_r 对应的线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 中线结构光 x 与 z 坐标, 实现空间 $\{O-XYZ\}$ 的标定, 完成空间三维成像与测量。

3 实验结果

实验采用 Basler 面阵工业相机 daA1280-54 μm [CS-Mount] (分辨率: 1280×960 ; 像元尺寸: $3.75 \mu\text{m} \times 3.75 \mu\text{m}$; 全幅面帧率: 54 fps) 和 Computar 工业镜头 M0814-MPW2(焦距: 8 mm(定焦); 光圈: 手动可调) 构成成像系统和线结构光激光器采用加拿大 Osela 的 Compact Laser-650(波长: 650 nm) 进行线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定; y 向空间标定采用博姆斯康 MK 系列封闭式线性光栅尺 MK600-1900。搭建的硬件环境如图 4 所示。

下文首先进行线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定实验, 然后进行 y 向空间标定并结合线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定结果完成空间三维成像与测量实验。

3.1 线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定实验

图 5 为线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 与棋盘格标定板重合后, 畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 上的棋盘格图像,

计算方法计算得到。单应性矩阵 \mathbf{H} , 矩阵 \mathbf{A} 和矩阵 \mathbf{B} 满足:

$$\mathbf{H} \times \mathbf{B} = \mathbf{A} \quad (10)$$

为计算 \mathbf{H} , 将式(10)左右两端分别右乘 \mathbf{B}^T 可得:

$$\mathbf{H} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{B}^T) = \mathbf{A} \times \mathbf{B}^T \quad (11)$$

由于矩阵 $\mathbf{B} \times \mathbf{B}^T$ 可逆, 则由式(11)可得:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \times \mathbf{B}^T (\mathbf{B} \times \mathbf{B}^T)^{-1} \quad (12)$$

联立式(8)、(9)和(12)可得单应性变换矩阵 \mathbf{H} :



图4 硬件环境图

Fig. 4 Hardware environment diagram

其中, 图像中菱形各角上的点为通过棋盘格图像内角点计算方法[opencv]计算的 Q'_{ij} 在 CCD 成像面上的亚像素点坐标 $(u_{Q'_{ij}}, v_{Q'_{ij}})$, 共有 523 个。

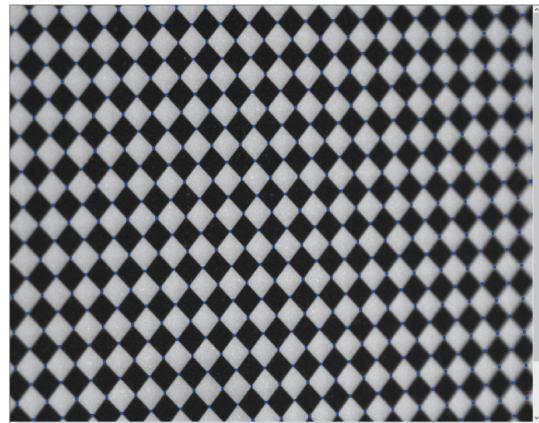


图5 棋盘格图像与内角点

Fig. 5 Checkerboard image and inner corner

棋盘格黑白格宽度 $w = 20 \text{ mm}$, 根据式(5)、(6), 可得线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 的关键特征点 Q_{ij} (与 Q'_{ij} 对应), 局部对应关系图如图 6 所示。

如图 6 所示, 每个点所在位置为 Q'_{ij} 在畸变校正后的 CCD 成像面 $\{O'-UV\}$ 中的坐标位置 (单位: pixel); 相应的标注坐标位置为与 Q'_{ij} 对应的 Q_{ij} 在线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 中的物理坐标 (单位: 20 mm)。

根据式(8)、(9), 可得齐次坐标矩阵 A 和 B , 代入式(12)、(13), 计算得到单应性变换矩阵 H :

$$\begin{bmatrix} 3.062\ 550\ 913\ 233\ 381\ 7 \times 10^{-1} & 2.364\ 733\ 534\ 923\ 565\ 7 \times 10^{-1} & -1.719\ 670\ 251\ 280\ 464\ 2 \\ -2.908\ 711\ 626\ 354\ 148\ 5 \times 10^{-1} & 2.638\ 937\ 877\ 995\ 469\ 2 \times 10^{-1} & 8.675\ 979\ 855\ 519\ 036\ 8 \\ -4.454\ 048\ 363\ 788\ 425\ 5 \times 10^{-5} & 4.213\ 329\ 843\ 687\ 086\ 8 \times 10^{-7} & 1 \end{bmatrix}$$

图 7 所示为基于单应性变换矩阵 H , Q'_{ij} 到 Q_{ij} 标定的 Residual Error 结果显示。基于 523 个标定点点, 计算可得 x 方向标定平均距离残差 $x_{ARE} \approx 0.119\ 7 \text{ mm}$; z 方向标定平均距离残差 $z_{ARE} \approx 0.103\ 4 \text{ mm}$ 。

根据欧式距离计算式可得平均距离残差 $d_{ARE} = \sqrt{x_{ARE}^2 + z_{ARE}^2} \approx 0.158\ 2 \text{ mm}$ 。

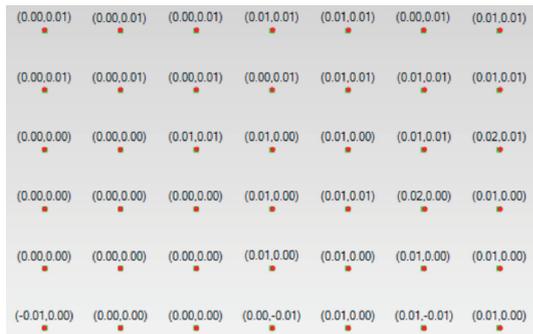


图 7 Q'_{ij} 到 Q_{ij} 标定的 Residual Error 结果局部显示图
Fig. 7 Residual Error result partial display chart of Q'_{ij} to Q_{ij}

表 1 为不同的线结构光平面坐标系 $\{O-XZ\}$ 标定方法的比较, 可以看出无论是精度、鲁棒性、还是标定的个数我们的方法都有明显的优点。

表 1 标定方法的比较

Table 1 Comparison of calibration methods

方法	标定点数	标定平均距离残差(d_{ARE})/mm
三点透视法	6	0.247
交比不变法	6~20	0.437
我们的方法	>500	0.158

为验证重复性测量精度, 采用测量标准件 (标准量块尺寸: $60 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$, 0 级, 精度 $1 \mu\text{m}$) 进行重复性

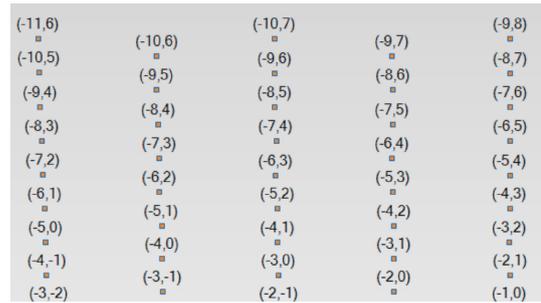


图 6 Q_{ij} 与 Q'_{ij} 局部对应关系图
Fig. 6 Partial correspondence graph of Q_{ij} and Q'_{ij}

实验。重复性测量实验过程图如图 8 所示。

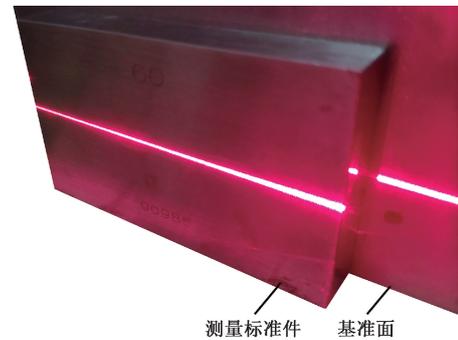
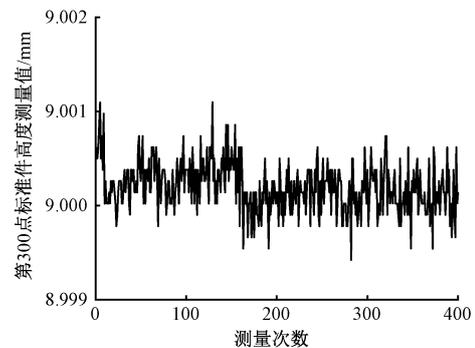
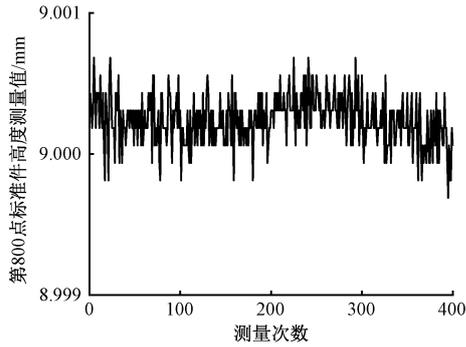


图 8 重复性测量实验过程
Fig. 8 Repeatability measurement experiment process

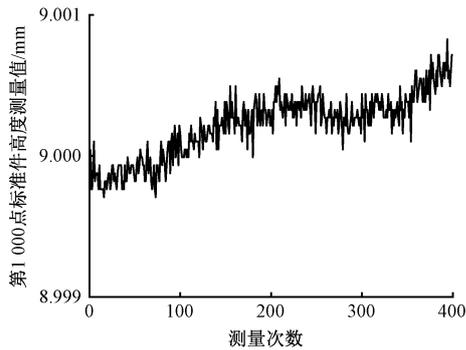
以基准面作为参考零位, 该面高度值为 0 mm , 因此, 测量标准件上理论高度值为 9 mm 。取测量轮廓第 300、第 800、第 1 000 三个点分别进行测量标准件的高度值重复性测量实验, 每个点分别测量 400 次, 测量结果数据如图 9 所示, 其中横坐标为测量次数, 纵坐标为对应的位置的标准件高度测量值 (单位为 mm)。



(a) 第 300 点高度值测量曲线
(a) Measurement curve of the 300th point value



(b) 第800点高度值测量曲线
(b) Measurement curve of the 800th point value



(c) 第1000点高度值测量曲线
(c) Measurement curve of the 1000th point value

图9 重复性测量曲线图

Fig.9 Repeatability measurement graph

表2分别为第300、第800、第1000三个点的期望与标准差 STD 结果展示。

表2 期望与标准差

Table 2 Mean and STD mm

	期望	标准差
第300点	9.000 198 866 875 206	0.000 267 413 603 591 144
第800点	9.000 240 826 173 567	0.000 178 406 036 445 285
第1000点	9.000 216 281 204 164	0.000 228 008 456 526 444

第300点的期望为9.000 198 866 875 206 mm,相对于真值误差0.199 μm,测量标准差 STD 为0.267 μm;第800点的期望为9.000 240 826 173 567 mm,相对于真值误差0.241 μm,测量标准差 STD 为0.178 μm;第1000点的期望为9.000 216 281 204 164 mm,相对于真值误差0.216 μm,测量标准差 STD 为0.228 μm。可以看出,重复性测量精度优于±1 μm。

3.2 y 向空间标定实验与三维成像

通过 MK600-1900 设定 774 个空间标定点(间距:0.32 mm),根据式(14),可得每个空间标定点 y 向坐标:

$$y_r = 0.32 \text{ mm} \times r (r = 0, 1, 2, \dots, 774) \quad (15)$$

根据单应性变换矩阵 H ,在每个空间标定点点计算当

前与 y_r 对应的线结构光平面 $\{O-XZ\}$ 中线结构光 x 与 z 坐标,完成空间三维成像与测量。如图10所示为被测实物;图11为三维测量过程;图12为盖子点云俯视图的 MATLAB 显示结果(分辨率:1 280×365);图13为盖子点云3D图的 MATLAB 显示结果(分辨率:1 280×365);图14为凤曲面点云3D图的 MATLAB 显示结果(分辨率:1 280×365);图15为龙曲面点云3D图的 MATLAB 显示结果(分辨率:1 280×365)。



图10 被测实物图

Fig.10 Measured physical map

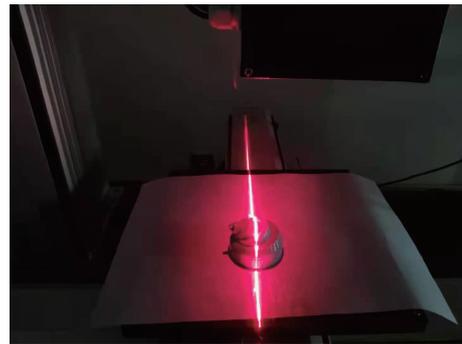


图11 三维测量过程

Fig.11 3D measurement process

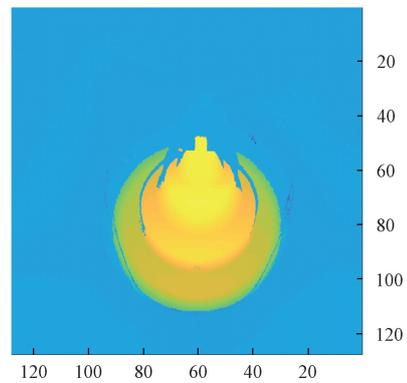


图12 盖子点云俯视图的 MATLAB 显示结果

Fig.12 MATLAB display results of top view of cover point cloud

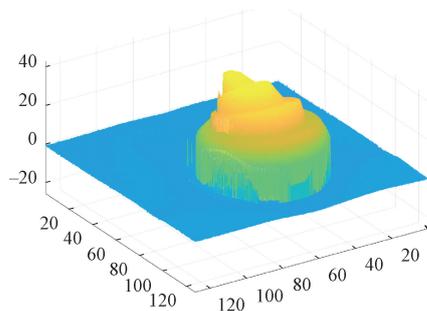


图 13 盖子点云 3D 图的 MATLAB 显示结果

Fig. 13 MATLAB display results of 3D map of cover point cloud

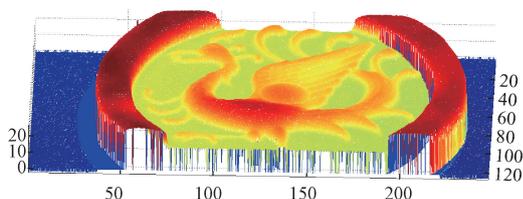


图 14 凤曲面点云 3D 图的 MATLAB 显示结果

Fig. 14 MATLAB display results of 3D map of phoenix surface point cloud

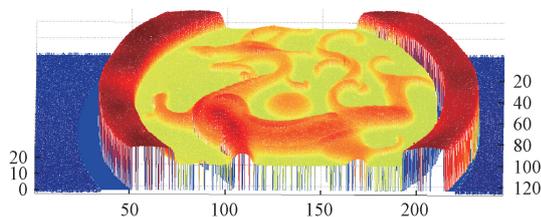


图 15 龙曲面点云 3D 图的 MATLAB 显示结果

Fig. 15 MATLAB display results of 3D map of phoenix dragon surface point cloud

4 结 论

本文提出了一种高精度、高鲁棒性的线结构光 3D 成像方法。该方法把 3D 成像方法的空间 $\{O-XYZ\}$ 的标定分解为光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定与 y 向空间标定。同时,提出一种基于线结构光单平面映射的标定方法实现光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定问题。该标定方法再进行成像系统内参的标定后,仅采用畸变参数的校正来进行后续的光平面的标定,避免了内外参矩阵参数计算,简化了标定过程,精简了大量中间变量,提高了整个系统的标定精度。同时,在标定过程中无需获取包含有线结构光光条图片,无

需提取图像中光条中心点,降低了光学算法计算误差,保证了标定的重复性。由于该方法标定点较多,提高了标定的鲁棒性。进一步将经过光平面 $\{O-XZ\}$ 的标定后得到的轮廓序列进行 y 向空间标定可实现高精度,高鲁棒性的 $\{O-XYZ\}$ 空间的 3D 成像与测量。

参考文献

- [1] SON Y, YOON S, OH S Y, et al. A lightweight and cost-effective 3D omnidirectional depth sensor based on laser triangulation [J]. IEEE ACCESS, 2019, 7: 58740-58750.
- [2] CAI Z Y, JIN C Q, XU J, et al. Measurement of potato volume with laser triangulation and three-dimensional reconstruction [J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 176565-176573.
- [3] BAI Y, LIU F, DENG J Y, et al. Research on dynamic detection of geometric parameters of groove rail based on laser triangulation and four-point chord measurement [C]. 2020 3rd International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), 2020: 11-15.
- [4] SCHLARP J, CSENCIS E, SCHITTER G. Optical scanning of a laser triangulation sensor for 3D imaging [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3606-3613.
- [5] LIN C F, HWANG C H, FANG H R, et al. Real-time pitch diameter measurement of internal thread for nut using laser triangulation [C]. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017: 181-184.
- [6] DVOYNISHNIKOV S V, MELEDIN V G. Laser differential cloudy triangulation with video flow synchronization [C]. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019: 1700-1705.
- [7] SULIGA P. A feature analysis of a laser triangulation stand used to acquire a 3D screw thread image [C]. 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC), 2016: 702-705.
- [8] LAVRINOV D S, KHORKIN A I. Problems of internal calibration of precision laser triangulation 2D scanners [C]. 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016: 1-4.

- [9] WEN X Q, LIANG J Y. Application of Kalman filtering algorithm in laser triangulation measurement [C]. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017: 5523-5527.
- [10] SENJALIA J, PANDYA P, KAPADIA H. Measurement of wheel alignment using camera calibration and laser triangulation [C]. 2013 4th Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), 2013: 1-5.
- [11] 曹维清, 刘汉伟, 李瑞峰. 机器人自主抓取的三维点云基本形体简化算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 13-19.
- CAO CH Q, LIU H W, LI R F. 3D point cloud basic form simplification algorithm for robot autonomous grasping[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 13-19.
- [12] 桑农, 李默然. 基于三维卷积的人手姿态估计高分辨率网络[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 1-6.
- SANG N, LI M R. High resolution network for human hand pose estimation based on 3D convolution [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 1-6.
- [13] 谢小芳, 万勇, 严可馨, 等. 地下洞库三维激光扫点云区域分割和容积计算[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 80-86.
- XIE X F, WAN Y, YAN K X, et al. Regional segmentation and volume calculation of 3D laser scanning point cloud in underground caverns [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 80-86.
- [14] 王成武, 陆惠宗, 吴俊杰, 等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 1-8.
- WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 1-8.
- [15] 沈小军, 杜勇, 王仁德, 等. 基于地面激光雷达的输电线路铁塔倾斜度测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(4): 516-521.
- SHEN X J, DU Y, WANG R D, et al. Inclination measurement of transmission line tower based on terrestrial 3D lidar [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(4): 516-521.
- [16] 陈诚, 张宏儒, 陈少轩, 等. 直线运动机构三维角误差同步测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(10): 145-151.
- CHEN CH, ZHANG H R, CHEN SH X, et al. Study on synchronous measurement method of three-dimensional angle errors for linear motion mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(10): 145-151.
- [17] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] KUMAR S, TIWARI P K, CHAUDHURY S B. An optical triangulation method for non-contact profile measurement [C]. 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2006: 1335-1340.
- [19] BOK Y, JEONG Y, CHOI D G, et al. Capturing village-level heritages with a hand-held camera-laser fusion sensor [J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 94(1): 36-53.
- [20] 周富强, 张广军, 江洁. 线结构光视觉传感器的现场标定方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(6): 169-173.
- ZHOU F Q, ZHANG G J, JIANG J. Field calibration method for line structured light vision sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(6): 169-173.

作者简介



陈晓辉, 分别在 2005 年、2007 年和 2011 年于华中科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为黄淮学院讲师, 主要研究方向为激光光学测量和机器视觉。

E-mail: 123207271@qq.com

Chen Xiaohui received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 2005, 2007, and 2011, respectively. He is currently a lecturer at Huanghuai University. His research interests include laser optical measurement and machine vision.



张智豪,2019 年于东华大学获得学士学位,现为华中科技大学硕士研究生,主要研究方向为磁致伸缩换能器和信号处理。

E-mail: zhihao@hust.edu.cn

Zhang Zhihao received his B. Sc. degree from Donghua University in 2019. He is currently a master student at Huazhong University of Science and Technology. His research interests include magnetostrictive transducer and signal processing.



杨鑫,2021 年于武汉理工大学获得学士学位,现为华中科技大学硕士研究生,主要研究方向为磁致伸缩导波无损检测。

E-mail: 2097023187@qq.com

Yang Xin received her B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2021. She is currently a

master student at Huazhong University of Science and Technology. Her research interests include magnetostrictive guided wave nondestructive inspection.



徐江(通信作者),分别在 2000 年、2005 年和 2009 年于华中科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为华中科技大学副教授,主要研究方向为导波、磁致伸缩换能器和信号处理。

E-mail: jiangxu@mail.hust.edu.cn

Xu Jiang (Corresponding author) received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 2000, 2005 and 2009, respectively. He is currently an associate professor at Huazhong University of Science and Technology. His research interests include guided waves, magnetoacoustic transducer and signal processing.