

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103910

旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定*

李云梦¹ 关丽敏¹ 王会峰¹ 黄鹤¹ 高荣¹ 刘盼芝¹ 温立民¹ 吕景祥²

(1. 长安大学 电子与控制工程学院 西安 710064; 2. 长安大学 工程机械学院 西安 710064)

摘要:针对传统平移扫描检测系统的缺陷,提出了一种基于旋转扫描线结构光的三维检测与重构系统及对应的系统参数标定方法,建立了点云数据获取模型。被测物体通过旋转实现与线结构光间的相对运动,得到被测物体的外表面二维图像。系统标定获得图像坐标与世界坐标间的转换关系,得到被测物体的三维坐标信息及数字模型。由实验可知,相机的标定精度为0.2 mm,原理样机进行物体测量的精度为0.1 mm。实验证明该系统检测精度高,具有可行性。

关键词: 三维检测;线结构光;旋转扫描;双目视觉;系统标定

中图分类号: TN391;TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Three-dimensional detection system of rotating scanning structured light and its calibration

Li Yunmeng¹ Guan Limin¹ Wang Huifeng¹ Huang He¹ Gao Rong¹Liu Panzhi¹ Wen Limin¹ Lv Jingxiang²

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Engineering Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the traditional translational scanning detection system, a three-dimensional detection and reconstruction system based on rotating scanning line structured light and the corresponding system parameter calibration method are proposed, and a point cloud data acquisition model is established. The measured object makes a relative movement with linear structured light by rotation, and a two-dimensional image of the external surface of the measured object is obtained. The system calibration obtains the conversion relationship between the coordinates of the image and the coordinates of the world, and obtains the information of three-dimensional coordinates and numerical model of the measured object. It can be seen from the experiment that the calibration accuracy of the camera is 0.2 mm, and the accuracy of the principle prototype for object measurement is 0.1 mm. Experiments prove that the system has high detection accuracy and feasibility.

Keywords: three-dimensional inspection; line structured light; rotating scanning; binocular vision; system calibration

0 引言

随着计算机技术的发展,基于计算机视觉的三维检测方案以其非接触性、高精度以及高效率等特点被广泛应用于文物保护、工业测量以及医疗诊断等诸多领域。其中,线结构光检测法由于其非接触性、高精度以及实时性等特点被广泛应用于不同领域^[1-2]的三维测量。结构

光测量法的研究起源于20世纪70年代,Will和Pennington将结构光首次应用到物体的三维测量中。目前,德国GOM公司利用结构光测量原理研发的ATOS系列三维扫描设备在商品化的光学测量设备中最为流行^[3]。

基于线结构光的三维测量系统是通过线结构光与被测物体之间的相对位移,对物体的整个外表面进行扫描来获得表面三维轮廓信息,并进一步进行测量。韩佩好

收稿日期: 2021-01-19 Received Date: 2021-01-19

* 基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(SQ2018YFB16003105)、“十三五”装备预研基金项目(61403120105)、中国博士后科学基金项目(2019T120872)资助

等^[4]提出基于格雷编码的彩色结构光快速三维测量技术,可以在保证测量精度和准确度的同时提高速度,但是对采集的图像质量要求很高;熊耀阳等^[5-6]进行了光学测量系统在面部外形测量中的应用研究,证明了光学测量在面部外形重建中的实用性与可靠性,但测量速度与精度并不理想。崔毅^[7]、隋显庭^[8]和孟伟^[9]对线激光旋转扫描三维测量进行了研究,但是采用摄像机旋转并未得到理想的效果,且过程复杂,计算繁琐。

陈思豪^[10]、Wang 等^[11]和伏燕军等^[12]提出了单目结构光对大物件进行三维测量的方法,证明了其可行性但对于单目结构光存在的视觉盲区问题尚未解决;毛佳红^[13]、周科杰等^[14]、Wooden 等^[15]和张永举等^[16]提出了线结构光与双目系统进行结合的三维测量,但采用平移扫描法^[17]进行测量系统与被测物体间的相互运动,存在结构限制。

在前人的基础上,本文提出一种基于双视线结构光的旋转扫描三维测量系统。系统通过增加摄像机,来增大视觉传感器的检测视场,进而避免检测盲区。而旋转扫描方案中线结构光随着平台的转动会将整个物体表面扫描一遍,从而尽可能多的获得物体外表面的三维形貌特征。相比来说,旋转扫描系统所占空间更小、便携性更好、实用性更强。此外,本文利用一维精密移动平台以及锯齿靶标提出一种新的旋转扫描三维测量系统内外参数标定方法。实验证明,该系统具有较高的可靠性及测量精度。

1 系统总体结构及原理

1.1 系统结构

旋转扫描三维测量系统的结构框图如图 1 所示。系统主要由视觉传感部分、运动控制单元和计算机信息处理和单元组成,运动控制单元由单片机和控制单元组成来控制旋转平台的转动,旋转平台、步进电机以及步进电机驱动器组成旋转驱动模块,根据控制模块发送的指令,驱动旋转平台的旋转。摄像机和激光发射器组成视觉传感模块,向被测物体投射结构光并采集带有结构光畸变条纹的图像^[18-19]。

由图 1 可以看到,双目视觉系统中的两个摄像机在同一条竖直线上,两个激光器位于相机的两侧。上摄像机可以补充下摄像机视野范围之外的被测物体顶端或表面凸起情况,如此可以避免单目视觉系统存在的视野盲区问题。

1.2 透视投影成像模型

根据小孔成像原理,空间中任何一点在图像中的成像位置都可以用针孔模型来表示,在此模型下,物体的空

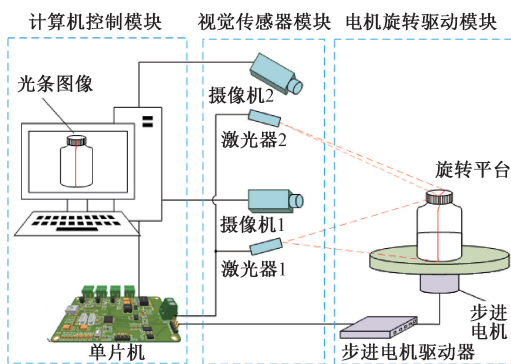


图 1 系统结构框图

Fig. 1 System structure block diagram

间坐标和图像坐标之间存在线性关系^[20]。通过该模型,可以表示出三维空间中的实景与二维图像平面的投影关系。摄像机模型如图 2 所示,其中 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 为摄像机坐标系中的一点, $p(x, y)$ 为点 P 在成像平面上的投影, P' 为点 P 在摄像机坐标系 $X_c O_c Z_c$ 面的投影点, f 为相机的焦距。

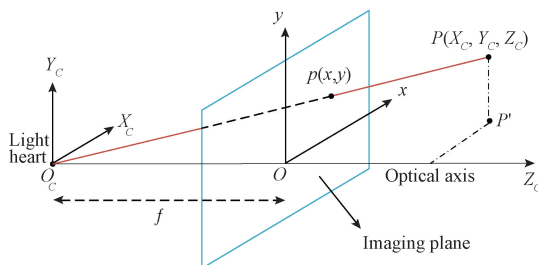


图 2 相机模型

Fig. 2 Camera model

根据摄像机成像的几何模型,由三角形的相似原理,可以得到如式(1)所示的摄像机坐标系与图像物理坐标系之间的转换关系。

$$Z_c \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

在摄像机平面中,由图像像素坐标系和图像物理坐标系共同组成了图像坐标系,若坐标点 (u_0, v_0) 为图像物理坐标系原点 O 在图像像素坐标系中的位置。

假设每个单位像素在 x 轴、 y 轴方向上的物理尺寸分别为 d_x, d_y , 则根据图像物理坐标系与图像像素坐标系的位置关系,可以得到任意像素 (u, v) 在两个坐标系中对应坐标的转换关系,进而可以得到三维世界坐标系下空间中任意一点与其在图像像素坐标系上投影点之间的转换关系如下:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标系中一点的坐标值; (u, v) 是该点投射到成像面中对应于图像像素坐标系中的坐标值。在获取世界坐标系与图像像素坐标系之间的转换关系的过程中,由于摄像机坐标系通常与世界坐标系不一致,因此需要使用平移变换和旋转变换得到这两个坐标系之间的转化关系。如式(3)所示,使用平移矩阵和旋转矩阵能够描述三维世界坐标系与摄像机坐标系之间的转换关系。

1.3 旋转扫描系统数学模型

旋转扫描方案是通过旋转平台带动被测物体旋转,从而在被测物体与线结构光之间产生相对运动,被测物体旋转一周即实现对其整个外表面的扫描^[21]。其中,激光发射器与摄像机的位置固定不变,因此通过坐标系之间的旋转变换和平移变化可以得到图像像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系。结合本系统所采用的旋转扫描方案以及摄像机模型,以系统中的一个摄像机为例,系统数学模型如图3所示。

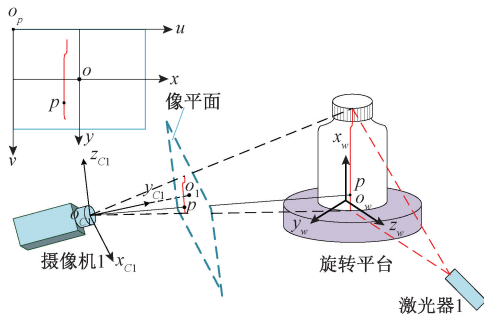


图3 系统数学模型

Fig.3 System mathematical model

图3中,以圆盘的中心点为原点建立世界坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$, 其中平面 $O_w - x_w z_w$ 与激光发射器投射出的光平面重合。根据前文描述的摄像机模型,结合式(3)可以得到点 P 在世界坐标系下的坐标值与摄像机坐标系中

坐标值的转换关系,如式(4)所示,其中 (X_w, Y_w, Z_w) 为点 P 在世界坐标系中的坐标值, (X_c, Y_c, Z_c) 为点 P 在摄像机坐标系中的坐标值。

$$\begin{cases} X_c = r_1 X_w + r_2 Y_w + r_3 Z_w + t_x \\ Y_c = r_4 X_w + r_5 Y_w + r_6 Z_w + t_y \\ Z_c = r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + t_z \end{cases} \quad (4)$$

根据上述公式,世界坐标系与图像像素坐标系之间的转换关系如下:

$$\begin{cases} (u - u_0) d_x = f \frac{r_1 X_w + r_2 Y_w + r_3 Z_w + t_x}{r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + t_z} \\ (v - v_0) d_y = f \frac{r_4 X_w + r_5 Y_w + r_6 Z_w + t_y}{r_7 X_w + r_8 Y_w + r_9 Z_w + t_z} \end{cases} \quad (5)$$

系统经过标定之后,式(5)中未知数有3个,即世界坐标系中数据点的3个坐标值,分别为 X_w, Y_w, Z_w 。但是式(5)只有两个约束等式,因此原则上无法得到精确解。但是,由于光平面和世界坐标系中的 $O_w - x_w z_w$ 平面重合,因此结构光光条上的每一个点都位于光平面内,图4中的点 P 。点 P 在 y_w 轴上的坐标值为0,将 $Y_w = 0$ 代入式(5),可以将式(5)简化为式(6),式(6)中有两个位置坐标 X_w, Z_w , 以及两个约束等式,联立等式就可以解出点 P 在 X 轴与 Z 轴上的坐标值。

$$\begin{cases} (u - u_0) d_x = f \frac{r_1 X_w + r_3 Z_w + t_x}{r_7 X_w + r_9 Z_w + t_z} \\ (v - v_0) d_y = f \frac{r_4 X_w + r_6 Z_w + t_y}{r_7 X_w + r_9 Z_w + t_z} \end{cases} \quad (6)$$

通过式(6)能计算出线结构光条纹在世界坐标系中的两个坐标值 X_w 和 Z_w , 由于三维空间中的点需要3个坐标值才能精确描述,还需要解算出结构光条纹在世界坐标系中 y_w 轴的坐标值 Y_w 。由于每次采集图像之后旋转平台在步进电机驱动之下旋转的角度是固定的,因此可以将旋转角度作为一个约束条件求取世界坐标系内数据点的坐标值。

本文使用的步进电机由单片机配合步进电机驱动器来进行控制,在电机驱动器的控制下,单片机每输出一个脉冲,步进电机转动一个设定好的固定角度,电机每转动一次,摄像机都会采集带有线结构光条纹的被测物体图像,旋转一周即实现了对整个物体外表面的扫描。假设点 P 在步进电机旋转之前通过前文描述的转换关系计算得到的世界坐标系的坐标值为 $P(X_w, 0, Z_w)$, 则点 P 在步进电机旋转 θ 角度之后新坐标值与原坐标值之间的关系如图4所示。

图4中,坐标系 $O_w - x_w y_w z_w$ 为以旋转平台为中心的世界坐标系,点 $P(X_w, 0, Z_w)$ 为摄像机采集到的光平面内的一点,点 $P'(X'_w, Y'_w, Z'_w)$ 为点 P 在步进电机驱动下随着旋转平台旋转 θ 角度之后新的坐标位置,旋转角

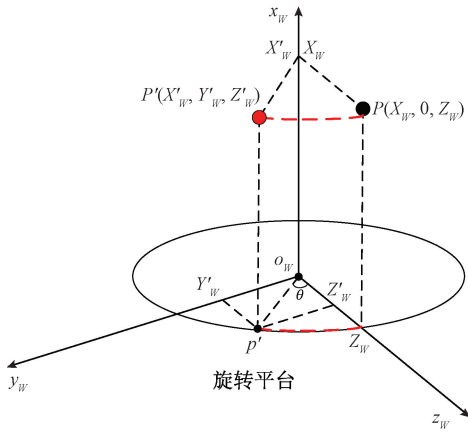


图 4 坐标旋转

Fig. 4 Coordinate rotation

度 θ 与步进电机每个脉冲旋转的固定角度 α 之间的关系如下式所示,其中 n 为当前脉冲个数。

$$\theta = n \cdot \alpha \quad (7)$$

由于点 p' 为点 P' 在平面 $O_w - x_w y_w$ 上的投影点,根据图中的几何关系,由光平面 $O_w - x_w z_w$ 内的点 P 的坐标以及步进电机的旋转角度,可以计算出点 P 通过旋转 θ 角之后新的坐标点 P' 的坐标值,如式(8)所示。

$$\begin{cases} X'_w = X_w \\ Y'_w = Z_w \cdot \sin\theta \\ Z'_w = Z_w \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (8)$$

每次旋转平台在旋转一个固定的角度 α 后,都利用式(8)计算摄像机采集到的线结构光光条在世界坐标系中的坐标值,旋转一周后就获得被测物体外表面的三维坐标信息。

2 系统标定

旋转扫描三维测量系统参数的标定主要包括相机内参标定以及结构光平面与摄像机位姿关系的外参标定两部分。

2.1 摄像机内参标定

摄像机的内参标定也就是获取前文提到的 u_0, v_0, d_x, d, f 这些参数的过程。摄像机内参标定方法非常多,其中张正友棋盘格标定法和 Tsai 利用径向排列约束的两步标定法是非常经典的摄像机内参标定法,本文采用棋盘格标定法利用 MATLAB 中的工具箱对摄像机的内参进行标定。

本文所建立的旋转扫描三维测量系统中使用的两个摄像机分辨率均为 $1\ 628 \times 1\ 236$,传感器尺寸为 $1/1.8$ in,焦距为 5 mm。通过 MATLAB 提供的工具箱,使用张正友棋盘格标定法可以分别获取两个摄像机的内部参数。标

定时使用的棋盘格标定板为 30×30 ,每个格子边长为 2 mm。

在使用 MATLAB 工具箱标定之前,首先要准备多张由所要标定的摄像机从不同角度拍摄的棋盘格图像,求出的摄像机内参如表 1 所示。

表 1 内参标定结果

Table 1 Calibration results of internal parameters

因素	f_x	f_y	u_0	v_0	k_1	k_2
摄像机 1	165.22	168.34	827.30	627.81	-0.120 1	0.118 2
摄像机 2	150.66	151.41	840.95	588.31	-0.143 8	0.152 9

表 1 为两个摄像机内参标定结果,其中摄像机 1 的镜头焦距分别为 $1\ 165.22$ 以及 $1\ 168.34$ 个像素,取其平均值为 $1\ 166.78$ 。查询摄像机参数,可以得到摄像机像素尺寸为 $4.4\ \mu\text{m} \times 4.4\ \mu\text{m}$,根据内参矩阵中 f_x 与 f_y 的定义,可以估算出摄像机 1 镜头的焦距为 $1\ 166.78 \times 4.4 / 1\ 000 = 5.14$ mm,同理可以得到镜头 2 的估算焦距为 5.06 mm。两摄像机镜头给出的焦距参数均为 5 mm,对比可以看出内参标定的结果在误差允许范围之内。

2.2 线结构光视觉传感器外部参数标定

通过摄像机内参标定,分别获得了两个摄像机的内参矩阵。根据式(2),要获得最终的图像像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系,还需要获取世界坐标系与摄像机坐标系之间的映射关系,也就是求取式(2)中的旋转矩阵和平移矩阵,其结果可以通过视觉传感器的外参标定来获取。

线结构光视觉传感器外参标定所要求取的参数分别为旋转矩阵的 9 个参数 r_1, r_2, \dots, r_9 以及平移矩阵中的 3 个参数 t_1, t_2, t_3 ,共 12 个未知参数。通过旋转矩阵的约束关系,可以将参数简化到 9 个,因此,理论上找到两个坐标系中 9 对对应点,就能够完成外参标定。目前常见的外参标定方法可以分为二维靶标标定法以及三维靶标标定法两大类,比较经典的方法有 Dewar 提出的“拉丝法”,吴庆华^[22]提出的基于三圆点平面靶标的线结构光视觉传感器的现场标定方法以及段发阶提出的锯齿靶标法。其中锯齿靶标法利用线结构光与锯齿靶相切来获取特征点的坐标值,本文利用锯齿靶标法,通过设计外参标定,实现了线结构光视觉传感器的外参标定^[23]。

本文采用的标定方案如图 5 所示,图 5 中坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 是以旋转平台圆心为原点所建立的世界坐标系,锯齿靶标放置在可以前后移动的导轨上并通过外部设备调整与旋转平台所在平面垂直,一维精密移动平台的移动方向与激光发射器投射出的光平面相切(通过外部设备两次确定垂面实现),锯齿靶标在移动平台的带动下可以做精确的位移,并且锯齿靶标的初始位置要严格与旋转平台的旋转轴重合(旋转轴为圆形旋转平台的圆心)。

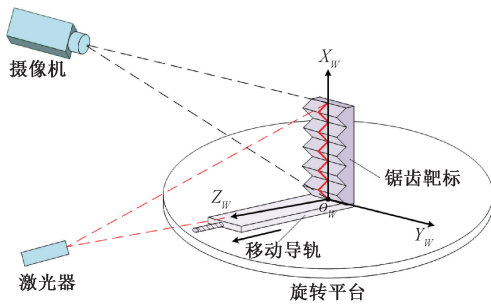


图 5 外参标定方案

Fig. 5 External parameter calibration scheme

本文所用到的锯齿靶标相邻齿根之间的距离为 10 mm, 齿根到齿顶之间的垂直距离为 5 mm, 图 6 所示为摄像机采集到的锯齿靶标图像, 其中图 6(a) 为采集到的带有结构光条纹的原始图像, 图 6(b) 为特征点检测图像, 图中蓝色的点为检测出的位于齿根、齿顶处的特征点。由于锯齿靶标尺寸固定, 因此这些特征点在世界坐标系下的三维坐标值也是确定的。锯齿靶标在一维移动平台的带动下, 沿结构光平面向前移动特定的距离, 在世界坐标系中就会产生更多的坐标明确的特征点。利用这些特征点对应的世界坐标值以及摄像机坐标值, 使用非线性最小二乘法求解超定方程组, 就能得到旋转矩阵与平移矩阵的最优参数, 完成线结构光视觉传感器的外参标定。

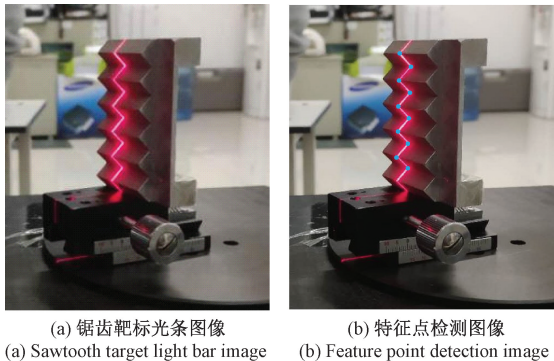


图 6 锯齿靶标图像

Fig. 6 Image of sawtooth target

在进行外参标定时, 锯齿靶标在移动平台的带动下, 沿 $O_w - Z_w$ 方向每移动 3 mm, 采集靶标图像中的 10 个特征值并获取其在全局坐标系以及图像像素坐标系中的坐标值, 标定过程中共移动了 10 次总行程为 3 cm, 因此总共有 100 组数据, 表 2 为摄像机 1 采集到的 100 组特征点中的 8 组数据。由于摄像机视场的影响, 在摄像机 1 标定实验中人为将锯齿靶标和精密移动平台增高 103 mm, 以便避免靶标中锯齿的相互遮挡, 再加上一维移动平台自身的高度 25 mm, 此采集到的特征点在全局

坐标系中 X_w 轴坐标值要加上 128 mm 的基准值。

表 2 相机 1 特征点世界坐标与图像像素坐标

Table 2 Camera 1 feature point world coordinates and image pixel coordinates

序列号	世界坐标/mm			图像像素坐标	
	X_w	Y_w	Z_w	u	v
1	138	0	0	608.39	541.81
2	143	0	5	575.64	514.71
3	148	0	0	526.93	536.95
4	153	0	5	489.36	508.95
5	138	0	3	610.74	526.03
6	143	0	8	578.26	498.37
7	148	0	3	531.83	521.59
8	153	0	8	491.30	492.79

表 2 中给出的是摄像机 1 采集到的部分特征点对应的世界坐标与图像像素坐标, 实验中利用全部的 100 组数据可以求出摄像机 1 所在的摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换关系如下。

摄像机 1 旋转矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} -0.9268 & 0.2033 & 0.3159 \\ -0.02841 & 0.8006 & -0.5986 \\ -0.3746 & -0.5637 & -0.7362 \end{bmatrix}$$

摄像机 1 平移矩阵:

$$T_1 = [97.857 \quad -2.2601 \quad 200.09]$$

摄像机 2 的外参标定与摄像机 1 相似, 根据一维移动平台自身的高度, 摄像机 2 采集到的特征点在全局坐标系中 X_w 轴坐标值所要加的基准值为 25 mm。摄像机 2 所在的摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换关系如下。

摄像机 2 旋转矩阵:

$$R_2 = \begin{bmatrix} -0.9999 & 0.00179 & -0.01144 \\ 0.00816 & 0.8098 & -0.5866 \\ 0.00821 & -0.5867 & -0.8098 \end{bmatrix}$$

摄像机 2 平移矩阵:

$$T_2 = [51.572 \quad -1.113 \quad 146.26]$$

利用求出的线结构光视觉传感器的外部参数以及前文获取的摄像机内部参数, 可以解算出线结构光光条图像中像素坐标 (u, v) 对应的世界坐标系中的坐标值。

3 原理样机测试及实验结果分析

根据系统结构框图, 计算机控制模块、双目线结构光视觉传感器模块、旋转驱动模块分别包含的硬件设备以及各模块之间的关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 由箱体外壳包裹起来, 内部分为两部分, 分别为固定激光器和摄像机的传感器区域以及承载被测物体的旋转平台区域。

根据图像像素坐标系与世界坐标系之间的转换关

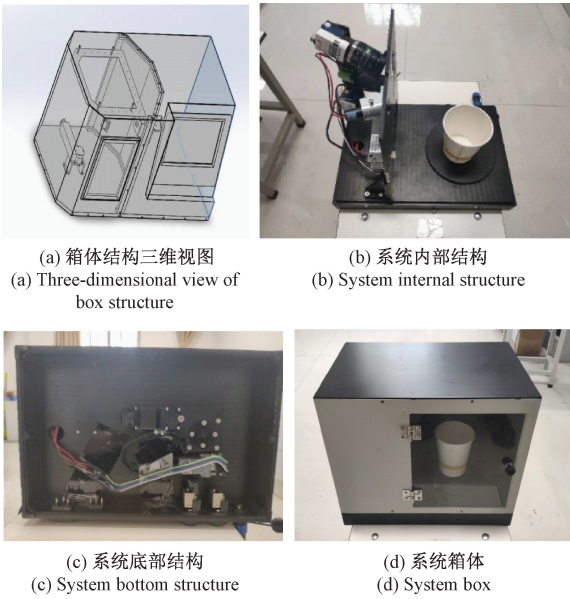


图7 三维检测系统原理样机

Fig. 7 Principle prototype of 3D inspection system

系,可以由摄像机拍摄到的结构光条纹图像,解算出其对应于世界坐标系中的坐标值。而根据设计的原理样机,让旋转平台旋转一周,就能够采集到足够多的三维点云数据,并建立被测物体精确的三维数字模型。图8所示为点云采集实验结果。

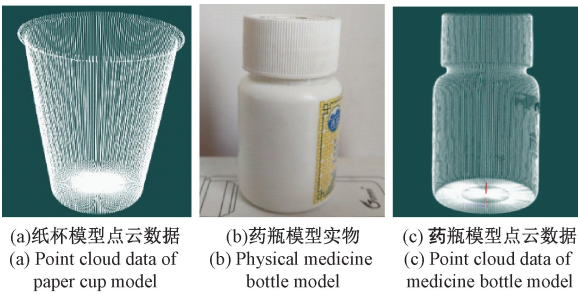


图8 点云数据采集实验

Fig. 8 Point cloud data acquisition experiment

在采集到的点云数据的基础之上,通过点云滤波、点云精简等算法可以保留更多的特征信息。本系统采用的两个摄像机在进行标定时已经统一在同一个世界坐标系下,两个摄像机采集到的点云数据会有大量重合,即无需进行粗配准,只对数据进行精确配准即可。在经过精简的点云数据基础上,利用改进的最近点迭代算法(Iterative Closest Point, ICP)算法进行点云配准,建立起被测物体完整的三维点云数据模型。该模型可以反映出被测物体的三维形貌特征,基于该数字模型可以实现对被测物体的三维测量。

图9所示为基于点云数据的模型高度测量实验,点云中两个红色的数据点是人为根据需求选择的,白色的

数字分别为两个数据点的三维坐标值以及两点之间的间距。由计算结果可知,模型的高度为70.655 mm。为了验证其准确性,利用游标卡尺对被测物体进行高度测量,被测物体高度为70.64 mm。对比可知,本系统测量结果误差在0.1 mm之内,同时也证明了本系统通过采集被测物体表面三维点云数据所建立的数字模型是非常接近于真实的被测物体的。

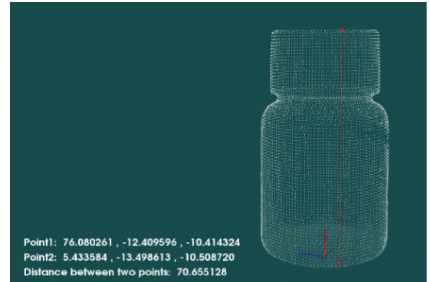


图9 模型高度测量实验

Fig. 9 Model height measurement experiment

4 结论

本文通过分析三维测量系统的数学模型,建立了旋转扫描三维测量系统,并利用张正友棋盘格标定法以及锯齿靶标标定法对三维测量系统的内外参数进行了标定。最终实现了基于点云数据的被测物体三维数据模型的测量以及基于该数字模型的三维重建。通过与真实的物体尺寸比较,验证了本系统三维测量结果的可靠性以及精确性,对于非接触测量以及复杂参数测量方面具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 汪洋,黄进,陈天飞,等. 线结构光检测系统的摄像机镜头畸变校正及标定[J]. 大连海事大学学报,2011, 37(4):67-70.
WANG Y, HUANG J, CHEN T F, et al. Camera lens distortion correction and calibration of line structured light detection system [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2011, 37(4): 67-70.

[2] 陈德林,郝飞,史晶晶,等. 浅谈三维视觉测量方法[J]. 仪表技术,2019(6):21-24,30.
CHEN D L, HAO F, SHI J J, et al. A brief talk on three-dimensional vision measurement methods [J]. Instrumentation Technology, 2019(6): 21-24,30.

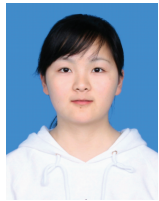
[3] 范弘悦,徐熙平. 基于 ATOS 的异形件逆向方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2019,42(2):36-39,46.
FAN H Y, XU X P. Research on reverse engineering of special-shaped parts based on ATOS [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology

- (Natural Science Edition), 2019, 42(2): 36-39,46.
- [4] 韩佩妤,达飞鹏,盖绍彦. 基于格雷编码的彩色结构光快速三维测量技术[J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1359-1364.
- HAN P Y, DA F P, GAI SH Y. Color structured light fast 3D measurement technology based on Gray coding [J]. Photonics·Laser, 2010, 21(9): 1359-1364.
- [5] 熊耀阳,焦婷,张富强. 光学测量系统在面部外形测量中的应用研究[J]. 口腔材料器械杂志, 2017, 26(2): 91-95.
- XIONG Y Y, JIAO T, ZHANG F Q. The application research of optical measurement system in facial profile measurement [J]. Journal of Dental Materials and Devices, 2017, 26(2): 91-95.
- [6] 熊耀阳,陈晓波,孙健,等. 结构光投影面部三维测量系统的精度研究[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2010, 30(1): 66-69.
- XIONG Y Y, CHEN X B, SUN J, et al. Research on the accuracy of structured light projection facial 3D measurement system [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Edition), 2010, 30(1): 66-69.
- [7] 崔毅. 基于线激光旋转扫描的三维视觉测量方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2018.
- CUI Y. Research on three-dimensional vision measurement method based on line laser rotation scanning [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [8] 隋显庭,王燕生,赵佳佳,等. 基于线激光传感器旋转扫描的空间高精度三维测量方法[J]. 新技术新工艺, 2018(10): 65-67.
- SUI X T, WANG Y SH, ZHAO J J, et al. Spatial high-precision three-dimensional measurement method based on rotation scanning of line laser sensor [J]. New Technology and New Process, 2018(10): 65-67.
- [9] 孟伟. 三维视觉测量技术的研究与开发[D]. 无锡:江南大学, 2012.
- MENG W. Research and development of three-dimensional vision measurement technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [10] 陈思豪,王中任,肖光润,等. 大型工件单目结构光三维扫描方法[J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 1358-1362.
- CHEN S H, WANG ZH R, XIAO G R, et al. Monocular structured light three-dimensional scanning method for large workpieces [J]. Laser and Infrared, 2018, 48(11): 1358-1362.
- [11] WANG H F, WANG Y F, ZHAO X M, et al. Lane detection of curving road for structural highway with straight-curve model on vision[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5321-5330.
- [12] 伏燕军,翁凌霄,胡茗. 基于单目结构光的大物体三维测量关键方法的研究[J]. 应用光学, 2018, 39(2): 212-219.
- FU Y J, WENG L X, HU M. Research on key methods of three-dimensional measurement of large objects based on monocular structured light [J]. Applied Optics, 2018, 39(2): 212-219.
- [13] 毛佳红,娄小平,李伟仙,等. 基于线结构光的双目三维体积测量系统[J]. 光学技术, 2016, 42(1): 10-15.
- MAO J H, LOU X P, LI W X, et al. Binocular three-dimensional volume measurement system based on line structured light [J]. Optics Technology, 2016, 42(1): 10-15.
- [14] 周科杰. 双目视觉三维测量技术研究与应用[D]. 成都:中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- ZHOU K J. Research and application of binocular vision three-dimensional measurement technology [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [15] WOODEN D, MALCHANO M, BLANKESPOOR K, et al. Autonomous Navigation for BigDog [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2010.
- [16] 张永举,顾旭波,张健,等. 结构光与双目视觉相结合的三维测量[J]. 计算机与现代化, 2018(2): 118-121, 126.
- ZHANG Y J, GU X B, ZHANG J, et al. Three-dimensional measurement combining structured light and binocular vision [J]. Computer and Modernization, 2018(2): 118-121, 126.
- [17] 黄建斌,姚滔,刘家旺,等. 基于非标定摄像机的尺寸测量方法[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 122-127.
- HUANG J B, YAO T, LIU J W, et al. Size measurement method based on non-calibrated camera [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(6): 122-127.
- [18] 王宪伦,陈壮,崔玉霞. 结构光非接触式 TCF 标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 135-140.
- WANG X L, CHEN ZH, CUI Y X. Study on structured light non-contact TCF calibration method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 135-140.
- [19] WANG H F, WANG Y F, ZHANG J J, et al. Laser stripe center detection under the condition of uneven scattering metal surface for geometric measurement[J].

IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2020, 69(5): 2182-2192.

- [20] 李凌梅,刘红光,李青,等. 在线检定关键技术及应用[J]. 国外电子测量技术,2017,36(7):107-109.
LI L M, LIU H G, LI Q, et al. Key technologies and applications of online verification[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(7): 107-109.
- [21] 姚乃夫. 基于双目结构光扫描的真彩色三维检测技术研究[D]. 西安:长安大学,2018.
YAO N F. Research on true color three-dimensional detection technology based on binocular structured light scanning [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [22] 吴庆华. 基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
WU Q H. Research on the theory and application of 3D surface defect online detection based on line structured light scanning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [23] 周京博,李玥华,秦志英,等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 412005.
ZHOU J B, LI Y H, QIN ZH Y, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 412005.

作者简介



李云梦,毕业于河南理工大学,现为长安大学硕士研究生,主要研究方向为三维测量与重构。

E-mail: 740665343@qq.com

Li Yunmeng graduated from Henan University of Technology, and is currently a M.Sc. candidate of Chang'an University. Her main research interest includes 3D measurement and reconstruction.



关丽敏(通信作者),毕业于长安大学,主要研究方向为智能测控技术及应用。

E-mail: guanlimin@chd.edu.cn

Guan Limin (Corresponding author) graduated from Chang'an University. Her main research interests include intelligent measurement and control technology and application.



王会峰,毕业于西安电子科技大学,现任长安大学教授,主要研究方向为车路协同智能车辆环境感知与群体控制、三维数字化测量装配与质量控制等。

E-mail: hfwang@chd.edu.cn

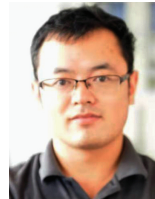
Wang Huifeng graduated from Xidian University and is currently a professor at Chang'an University. His main research interests include vehicle-road collaborative intelligent vehicle environment perception and group control, three-dimensional digital measurement assembly and quality control, etc.



黄鹤,毕业于西北工业大学,现任长安大学副教授。目前研究方向为人工智能与信息融合、无人车感知等。

E-mail: huanghe@chd.edu.cn

Huang He graduated from Northwestern Polytechnical University and is currently an associate professor at Chang'an University. His main research interests include artificial intelligence and information fusion, unmanned vehicle perception, etc.



高荣,毕业于长安大学,主要研究方向为深度学习。

E-mail: gr@chd.edu.cn

Gao Rong graduated from Chang'an University. His main research interest includes deep learning.



刘盼芝,毕业于西安交通大学,现任长安大学电控学院副教授,主要研究方向为信息融合、目标检测等。

E-mail: panzhiliu1980@163.com

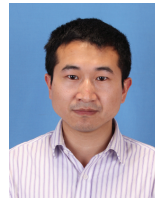
Liu Panzhi graduated from Xi'an Jiaotong University and is currently an associate professor at Chang'an University. Her main research interests include information fusion, target detection, etc.



温立民,毕业于长安大学,现任长安大学电控学院高级工程师,主要研究方向为智能测试技术。

E-mail: lmwen@chd.edu.cn

Wen Limin graduated from Chang'an University and is currently a senior engineer at Chang'an University. His main research interest includes intelligent testing technology.



吕景祥,毕业于浙江大学,现任工程机械学院副教授,主要研究方向为智能制造。

E-mail: lvjx@chd.edu.cn

Lv Jingxiang graduated from Zhejiang University and is currently an associate professor in School of Engineering Machinery. His main research interest includes intelligent manufacturing.