

文章编号: 0258-7025(2008)08-1224-04

线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法

吴庆阳¹ 李景镇¹ 苏显渝² 惠彬¹

(¹ 深圳大学深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)
(² 四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610065)

摘要 为简化旋转轴心线的定位, 提出了一种基于平面参照物的现场标定方法。将一个绘制有棋盘格图案的靶标倾斜地放在旋转平台上, 控制旋转平台任意旋转几个角度, 并拍摄下每个位置处靶标的图片。通过处理这些图片获取靶标上特征点的空间坐标, 对这些特征点作圆拟合得到一系列的圆心点, 再对这些圆心点作直线拟合, 建立起旋转轴的直线方程, 完成旋转轴的标定。实验验证了该方法的可行性, 实测物体的均方根误差为 0.04 mm。

关键词 测量; 三维传感; 线结构光; 标定

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1224

An Approach for Calibrating Rotor Position of Three-Dimensional Measurement System for Line-Structure Light

Wu Qingyang¹ Li Jinzhen¹ Su Xianyu² Hui Bin¹

(¹ Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)
(² Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract To simplify the procedure of rotation axis positioning, a flexible and real-time calibration method is proposed. A plane calibration board with tessellated pattern is placed on the rotating stage, the calibration board was recorded at every point when the stage was rotated. Then the coordinates of these character points on the target are calculated by processing these pictures. At last, the axis equation of the working stage is acquired by linear fitting with the circle centers which were gotten by circle fitting with the character points. This method is proved by experiment, and the root-mean-square error of a measured object is 0.04 mm.

Key words measurement; three-dimensional sensing; line-structure light; calibration

1 引言

光学三维传感在机器视觉、逆向工程、工业检测、生物医学等领域具有重要意义和广阔的应用前景^[1,2], 其中采用线结构光照明的主动光学三维传感由于具有大量程、非接触、速度快、系统柔性好和测量精度较高等特点, 被大多数实用的三维面形测量仪器所采用^[3,4]。由于线结构光测量一次只能得到物体表面某一截面上的轮廓线, 为了得到完整的物体表面必须附加一维扫描, 通常采用的有两种扫描方式: 平移和旋转。采用旋转扫描方式只通过一次扫描就可获得整个物体表面的数据, 而且不需要

对测量结果进行拼接, 所以具有很强的实用性。

目前, 比较常见的线结构光三维测量系统参数校准方法有: 拉丝靶标法^[5]、齿形靶标法^[6]和基于三维靶标的交比不变法等^[7]。这些标定方法都需要使用经过精密加工的标准模型, 模型的定位精度也要求很高, 并且只适用于平移式扫描系统的校准。这是因为采用旋转扫描方式的测量系统除了要标定光学成像系统的基本参数外, 还必须对旋转平台的旋转轴进行标定。目前专业人员使用高精度的辅助设备对线结构光传感器和旋转平台进行精密的调节来保证旋转轴在线结构光平面内, 并且通过测量标准

收稿日期: 2007-09-19; 收到修改稿日期: 2008-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(60477042, 60127501)和深圳大学科研启动基金(4WQY)资助项目。

作者简介: 吴庆阳(1973—), 男, 陕西人, 副教授, 主要从事高速成像技术与机器视觉方面的研究。

E-mail: wqywqy01@163.com

件来保证其误差在允许的范围内^[8]。但当测量环境发生改变时,误差可能超出允许的范围,而要保证误差则需要再次进行调节,这样既增加了成本,也给设备的使用带来诸多不便因素。另外也有采用一个标定球进行旋转测量标定^[9],但只适用于多维扫描的测量系统。为此,本文提出了一种基于平面参照物的现场标定方法^[10~12],这种标定方法成本低、过程简单、精度较高,不仅适用多维的,也适用一维的旋转扫描系统。

2 基本原理

图 1 为测量系统的模型, O_c 为摄像机镜头光心, $O_w X_w Z_w$ 为线结构光平面, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, OUV 为摄像机像素坐标系, U 轴和 V 轴与 X_c 轴和 Y_c 轴平行, Z_c 轴与摄像机镜头的光轴重合, R 为旋转轴。由于安装误差旋转轴的方向很难保证与 Z_w 轴一致,如不对其进行标定势必会导致测量结果的偏差。

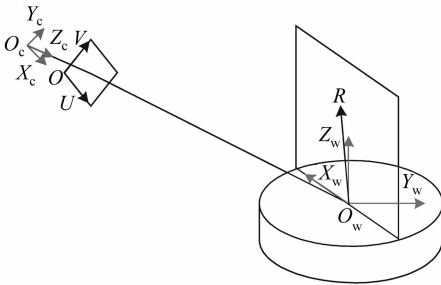


图 1 测量系统模型

Fig. 1 Model of measurement system

在旋转扫描测量中,当旋转角度已知时(可以通过控制电机的旋转角度得到),只要得到平台旋转轴的直线方程就可以通过坐标变换得到整个物体表面的三维坐标。因此建立旋转平台坐标系的关键就是求得旋转轴在摄像机坐标系下的直线方程。

当平台旋转时,物体绕着平台的旋转轴转动,物体上每个点的运动轨迹必然在以旋转轴为中心的圆上,而处于不同高度的点旋转形成的圆的圆心位于旋转轴的不同位置。利用这一特性,通过测量这些轨迹上的点在摄像机坐标系中的坐标,分别将它们拟合成圆,并求出一系列圆心坐标。最后将这些圆心拟合成直线,得到旋转轴在摄像机坐标系下的直线方程。

标定时靶标倾斜放置在旋转平台上,靶标坐标系与摄像机坐标系之间的关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R}_i \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + \mathbf{T}_i, \quad (1)$$

式中 \mathbf{R}_i 为靶标坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, X_b, Y_b, Z_b 为点在靶标坐标系下的坐标值, \mathbf{T}_i 为平移向量, i 为靶标的位置序号。

根据平面靶标定原理^[13],只要获取多于 2 个位置的靶标图像就可以求出摄像机的内、外参数。当获得了摄像机的内、外参数后,根据(1)式和 $Z_b = 0$ 可以推出

$$\begin{bmatrix} X_{bi} \\ Y_{bi} \\ Z_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & -x_i \\ r_{i21} & r_{i22} & -y_i \\ r_{i31} & r_{i32} & -1 \end{bmatrix}^{-1} (-\mathbf{T}_i), \quad (2)$$

式中 $r_{i11}, r_{i12}, r_{i21}, \dots$ 为旋转矩阵 \mathbf{R}_i 中各个元素值, x_i, y_i 为平面靶标上特征点的坐标。

由(2)式可求出靶标上每个特征点旋转过程中在摄像机坐标系下的坐标值 Z_{ci} , 然后根据 $X_{ci} = x_i Z_{ci}, Y_{ci} = y_i Z_{ci}$, 就可以得到这些点在摄像机坐标系下的坐标值 $[X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}]$ 。将这些点按照其在靶标上的位置分类再分别进行空间圆拟合并求取圆心, 就可以得到一系列的轴上点; 最后对这些轴上点进行空间直线拟合就可以得到平台旋转轴在摄像机坐标系下的直线方程(l, m, n 为空间直线方程的三个参数)

$$\frac{X_c - X_0}{l} = \frac{Y_c - Y_0}{m} = \frac{Z_c - Z_0}{n}. \quad (3)$$

3 实验和结果

3.1 标定步骤

整个系统的标定过程分三个步骤,首先是对摄像机的内部和外部参数进行标定,然后再利用这些参数分别对线结构光传感器^[14]和旋转轴进行标定。具体过程如下:

1) 对摄像机进行标定,求出摄像机的内部参数;

2) 将一个绘制有棋盘格的平面靶标倾斜地放在旋转平台上,由于要获得旋转 360° 的图像,所以应该注意倾斜的角度不能太大,但为了保证测量的精度,平面靶标的高度应该覆盖整个测量范围。控制旋转平台旋转一周进行图像采集,一般完成一个圆的拟合只需要 3 个点,但为了提高精度每隔 10° 采集一次图像,一共采集 36 次;

3) 每个图中取 7×12 个特征角点的坐标 $[u_{ij}, v_{ij}]$, j 为图像的序号,并且根据摄像机的内部参数,

求出这些特征点的平面归一化图像坐标 $[x_{ij}, y_{ij}]$;

4) 根据摄像机图像中和标定靶平面上对应的网格点对的坐标求出摄像机坐标系与各个平面靶标坐标系之间的旋转矩阵 R_i 和平移向量 T_i ;

5) 根据旋转矩阵 R_i 和平移向量 T_i ,指定靶标平面上的一系列特征点 $[X_{bi}, Y_{bi}]$,求出这些特征点在摄像机坐标系下的三维坐标 $[X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}]$;

6) 按照特征点的排列序号,对每组 36 个空间点进行空间圆拟合,求得对应的旋转中心 O_i ;

7) 将求得的旋转中心作空间直线拟合,求取旋转轴线的直线方程。

3.2 结果与分析

采用 JAI 的 CV_A50 型摄像机、线形激光器和卓立汉光 RSA200 电控旋转台搭建了线结构光的三维测量系统,如图 2 所示。图 3 为实验中 4 个位置的靶标照片。标定得到的传感器参数为:内部参数:焦距 $f_u = 12.7$ mm, $f_v = 12.6$ mm,主点位置 $u_0 = 372.06$, $v_0 = 254.87$;畸变系数 $k_1 = -0.27$, $k_2 = 0.06$, $p_1 = -0.001$, $p_2 = 0.001$,重投影的像素误差为 $[0.31, 0.34]$ 。图 4 为每个特征角点旋转一周拟合得到的圆及旋转轴。拟合得到的直线方程为



图 2 旋转标定实验图

Fig. 2 Experimental picture of rotating calibration

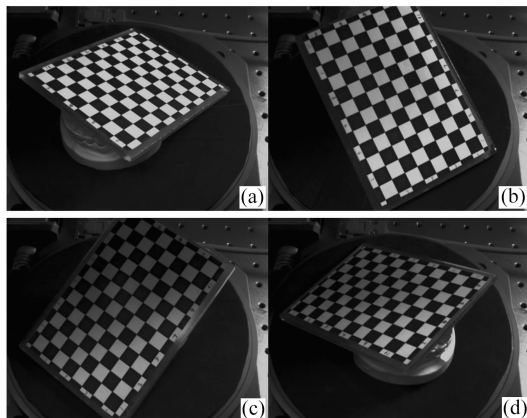


图 3 四个不同位置处的靶标图像

Fig. 3 Target's images at four different positions

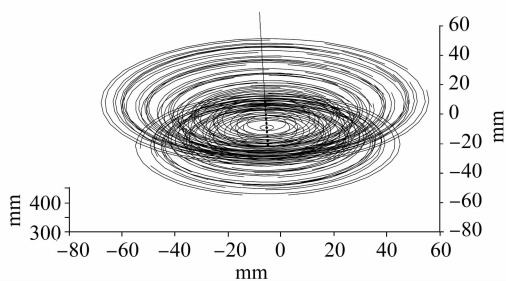


图 4 特征点拟合得到的圆及轴心线

Fig. 4 Axis and the circle fitting by character points

$$\frac{x + 6.3579}{-0.0262} = \frac{y}{0.5872} = \frac{z - 393.71}{0.8090}。$$

直线的拟合误差为:平均误差0.0386 mm,均方根(RMS)误差0.0220 mm。

由于光盘在制作过程中具有统一的标准和严格的尺寸要求,为了验证实验结果,使用图 2 的三维测量系统和美能达的 VIVID910 线结构光扫描仪的高精度测量模式(使用 25 mm 镜头, TELE/FINE 模式)对同一个光盘进行了测量,如图 5 所示,并对测量结果作了比较。其中使用美能达测量其平面拟合误差为 0.037 mm,而使用本系统得到的拟合误差为 0.041 mm;并对光盘的中心圆孔和外径进行拟合,使用美能达得到的光盘中心圆孔半径为 7.45 mm,外径为 59.97 mm,而使用本系统得到的光盘中心圆孔半径为 7.48 mm 和外径为 60.02 mm;二者测量结果的精度基本一致。可见本测量系统已经达到了实

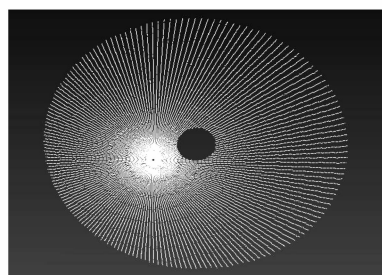


图 5 光盘的点云图

Fig. 5 Cloudy point of disk

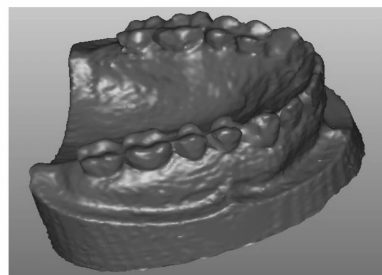


图 6 牙颌模型的测量结果

Fig. 6 Measurement result of tooth model

用的水平。另外,采用此系统对牙颌模型进行了测量,实验结果如图 6 所示。

4 结 论

提出了一种利用共面标定参照物对旋转式线结构光传感器的旋转轴进行现场标定的方法。将平面标定参照物倾斜放置在旋转平台上,控制旋转平台任意旋转几个角度,并记录下在不同位置处的图像,通过直线拟合计算出旋转轴的直线方程,完成旋转轴的标定。实验结果表明,该方法测量的精度达到了 0.04 mm,完全能够满足口腔医学研究领域和塑料模型加工领域的精度要求。该方法无需辅助的调整设备,标定速度快、效率高,既降低了标定设备的成本,又简化了标定的过程,有利于线结构光传感器的工业化应用。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt. Lasers in Eng.*, 2001, **35**(5):263~284
- 3 Su Xianyu, Chen Xiaoxue, Guo Lürong. An automated method for 360° surface measurement of 3D objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(7):670~672
苏显渝,程晓雪,郭履蓉. 三维物体 360°面形自动测量方法[J]. *光学学报*, 1989, **9**(7):670~672
- 4 Jia Bo, Su Xianyu, Guo Lürong. 3D measurement of turbine blade profile by light knife [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(4):271~275
贾波,苏显渝,郭履蓉. 采用激光光刀的叶片三维测量方法[J]. *中国激光*, 1992, **A19**(4):271~275
- 5 Zhang Qican, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Calibration of 3D measurement system using multi-sensor with line structure-illuminated laser [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3):225~228
- 6 K. W. James. Nonecontact machine vision metrology within a CAD coordinate system [C]. Proceedings of Autofact's 88 Conference, Chicago Illinois, 1988, (12):9~17
- 7 Liu Fengmei, Duan Fajie, Ye Shenghua. New accurate calibrating technique for the light-strip sensors [J]. *Journal of Tianjin University*, 1999, **32**(5):547~550
刘凤梅,段发阶,叶声华. 一种新的高精度的线结构光传感器标定方法[J]. *天津大学学报*, 1999, **32**(5):547~550
- 8 Xie Zexiao, Zhang Guoxiong, Xu Yuchun. A study on the rotating measuring system based on structured light vision sensor [J]. *Journal of Tianjin University*, 2001, **34**(6):833~836
谢则晓,张国雄,徐玉春. 回转式激光线扫描测量仪[J]. *天津大学学报*, 2001, **34**(6):833~836
- 9 Xu Yong'an, Yang Qin, Huai Jinpeng. Calibration of the axis of the turnable in 4-axis laser measuring system and registration of multi-view [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5):659~662
徐永安,杨钦,怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中旋转轴标定及多视拼合[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5):659~662
- 10 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):259~264
吴庆阳,苏显渝,向立群等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):259~264
- 11 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1162~1166
李勇,苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1162~1166
- 12 Li Yong, Su Xianyu, Wu Qingyang. Calibration and data merging of two-camera phase measuring profilometry system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):551~556
李勇,苏显渝,吴庆阳. 双摄像机相位测量轮廓术系统标定与数据融合[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):551~556
- 13 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11):1330~1334
- 14 Janne Heikkilä, Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. 1106~1112