

线结构光三维测量系统扫描方向的标定

曾祥军 霍金城 吴庆阳

(深圳大学电子科学与技术学院 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 提出一种基于平面标靶的线结构光三维传感器扫描方向的标定方法。利用平面标靶对摄像头进行标定,得到摄像头的内部参数,将棋盘格平面标靶固定在空间某一位置,测量系统沿着扫描方向移动并采集一系列图像。根据这一系列图像求出摄像机的外部参数,并结合已经求出的摄像机内部参数计算出标靶上同一特征点在摄像机坐标系下的坐标值,对这些点进行直线拟合得到一直线方程,直线的方向就是测量系统的扫描方向。实验表明,该方法测量精度高,操作简单,无需辅助的调整设备,降低了标定设备的成本和系统校准的难度,适合现场标定。

关键词 测量;三维测量;线结构光;标定

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0108002

Calibrate Method for Scanning Direction of 3D Measurement System Based on Linear-Structure Light

Zeng Xiangjun Huo Jincheng Wu Qingyang

(Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract A calibrating method for the scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light using a plane calibration board is proposed. In the calibration, the camera's inner parameters are calculated with the plane calibration board first. Then the plane calibration board is placed on a position, the 3D sensor moves along the scanning direction and collects pictures at the same time. The outside parameters of the camera for every position of the 3D sensor are worked out. With these pictures and the camera coordinates of homologous points on each picture can be worked out with the inner and outside parameters. At last, linear equation is acquired by linear fitting with the camera coordinates of homologous points. The scanning direction is equal to the direction of the line. The experimental result shows that the method has high precision and it is practical in 3D measurement.

Key words measurement; three-dimension measurement; linear-structure light; calibrate

OCIS codes 120.5800; 150.1488; 150.6910; 100.6890; 130.6010

1 引言

线结构光三维测量由于其具有结构简单、成本低、抗干扰性好、精度高等优点,在三维视觉测量与检测领域得到了广泛的应用^[1,2]。该方法由于每次只能得到物体某一截面上的三维轮廓信息,要获得整个物体表面的三维数据必须附加一维扫描,通常采用平移和旋转两种扫描方式实现^[3]。平移扫描方式通常沿光平面的法线方向进行扫描,因此系统在校准时必须保证光平面的法线方向与扫描方向一

致。传统的标定方法通常需要借助高精度的辅助设备来进行调整,这不但增加了系统校准的难度,同时还提高了设备的成本。针对这一问题,本文提出了一种操作简单、精度较高,基于平面标靶的线结构光扫描方向标定方法。

2 基本原理

传统线结构光测量系统一般由摄像机、线形激光器、计算机以及扫描设备组成^[4],摄像机光轴与激

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-10-10

基金项目: 深圳市科技计划(JC200903120031A)和深圳大学应用技术开发项目(201151)资助课题。

作者简介: 曾祥军(1987—),男,硕士研究生,主要从事三维测量方面的研究。E-mail: xiangjunzeng405@126.com

导师简介: 吴庆阳(1973—),男,博士,副教授,主要从事三维传感与机器视觉等方面的研究。E-mail: wuqy@szu.edu.cn

(通信联系人)

光投射方向成一定夹角,激光器产生一平面光投影到被测物体表面,受被测物体表面高度的调制,摄像机记录的是一变形的物体(光切)轮廓图像。根据图像中物体(光切)轮廓变形的程度以及摄像机和线形激光器之间的三角位置关系,可以还原出物体表面的三维信息^[5]。

2.1 传统线结构光三维测量系统标定

如图 1 所示, $O_c-X_cY_cZ_c$ 为摄像机坐标系, $O-UV$ 为图像坐标系, \mathbf{n} 为光平面的法线方向。线结构光三维测量系统的标定主要有以下步骤:

1) 摄像机内部参数的标定。

2) 光平面方程的标定。将二维平面标靶在空间任意位置摆放, 投射激光平面到标靶上并拍摄图像。建立标靶坐标系并求出相应的摄像机外部参数 R_i 、 T_i , 结合摄像机内部参数, 求出标靶上光切轮廓的点在摄像机坐标系下的坐标值 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) , 对这些点进行拟合求出光平面在摄像机坐标系下的平面方程

$$Z_c = aX_c + bY_c + c. \quad (1)$$

3) 确定摄像机的外部参数。如图 2 所示, 在摄像机坐标系下, 取光平面上任意一点 $p_0(x_0, y_0, z_0)$ 作为世界坐标系的原点 O_w , 再取光平面上的点 p_1 、 p_2 , 使得 $p_1 p_0 \perp p_2 p_0$ 且 $p_1 p_0 = p_2 p_0 = h$, 即 p_0 、 p_1 、 p_2 构成等腰直角三角形的关系, 令世界坐标系的 X_w 轴沿 $p_0 p_1$ 方向, Y_w 轴沿 $p_0 p_2$ 方向, 建立世界坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$, 根据点 p_0 、 p_1 、 p_2 在摄像机坐标系和世界坐标系里的位置, 可以求出两者之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 。

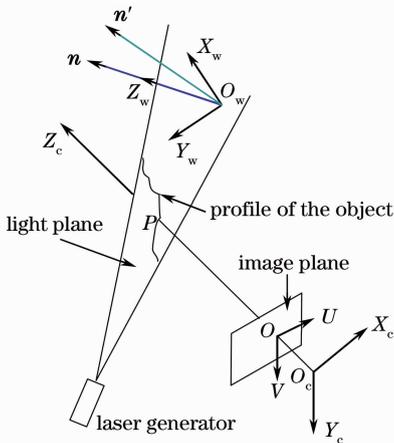


图 1 线结构光三维测量模型

Fig. 1 Model of three-dimension measurement system based on linear-structure light

由于光平面与世界坐标系的 $X_w-O_w-Y_w$ 平面重合, 所以光平面上的点满足

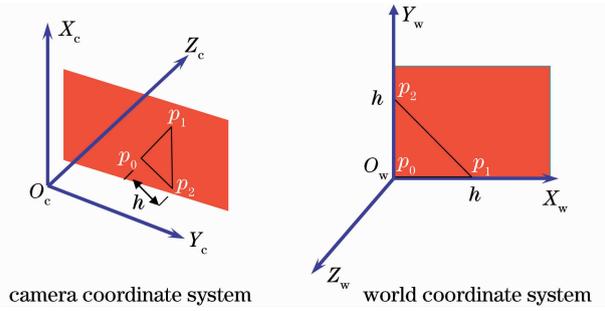


图 2 世界坐标系的建立

Fig. 2 Foundation of the world coordinate system

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (2)$$

由小孔成像模型有

$$\begin{cases} x = \frac{X_c}{Z_c} \\ y = \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 (x, y) 为归一化图像坐标。将 (3) 式代入 (2) 式得

$$Z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{T}. \quad (4)$$

2.2 扫描方向的标定

由图 1 可知, 线结构光三维测量系统一次只能测量物体某一截面上的三维轮廓信息, 需要附加一维的扫描才能获取物体整个表面的三维数据。传统的线结构光三维测量系统通过调整光平面法线方向 \mathbf{n} 使得扫描沿 \mathbf{n} 方向进行, 然后将每次测量得到的数据沿 \mathbf{n} 方向进行平移, 才能将扫描测得的所有数据统一到世界坐标系中, 从而得到物体表面完整的三维轮廓信息。然而, 要调整光平面法线方向与扫描方向相同, 需要借助高精度的辅助设备才能实现, 这不但增加了系统校准的难度, 同时还提高了设备的成本, 而且调整的准确度还影响到系统测量的精度。而本文所提出的方法无需对光平面法线方向进行调整, 通过对扫描方向进行标定, 可计算出传感器在摄像机坐标系下的移动方向 $\mathbf{n}'(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, 将每次测量得到的数据沿 \mathbf{n}' 方向进行平移即可。

如图 3, v 为测量系统的扫描方向, 令棋盘格平面标靶沿 v 方向移动, 每移动一段距离摄像机抓拍一幅图像, 计算出平面标靶的移动方向即可求出测量系统的扫描方向。对每一幅平面标靶图像, 建立平面标靶坐标系, 计算出每个标靶坐标系与摄像机

坐标系之间的位置关系：旋转矩阵 \mathbf{R}_i 和平移向量 \mathbf{T}_i 。根据(1)式和 $Z_w=0$ ，可推出

$$\begin{bmatrix} X_{wi} \\ Y_{wi} \\ Z_{ci} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & -x_i \\ r_{i21} & r_{i22} & -y_i \\ r_{i31} & r_{i32} & -1 \end{bmatrix}^{-1} (-\mathbf{T}_i). \quad (5)$$

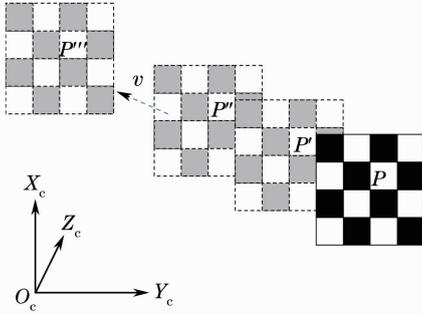


图3 扫描方向标定原理

Fig. 3 Calibration principle of scanning direction

结合(3)式，可以求出标靶上 P 点每次移动后在摄像机坐标系下的三维坐标 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) 。对点 $P, P', P'' \dots$ 进行拟合得到摄像机坐标系下的直线方程^[6]

$$\begin{cases} X_c = a_1 + b_1 Y_c \\ X_c = a_2 + b_2 Z_c \end{cases}. \quad (6)$$

由直线方程的表达式可算出直线与各坐标轴的夹角 $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ 。

标定光平面在摄像机坐标系下的平面方程，如(1)式所示，结合(3)式得

$$\begin{cases} X_c = \frac{cx}{1-ax-by} \\ Y_c = \frac{cy}{1-ax-by}, \\ Z_c = \frac{c}{1-ax-by} \end{cases}, \quad (7)$$

根据(7)式，就可以由归一化图像坐标计算出点在摄像机坐标系下的三维坐标。若传感器每次移动的距离为 h ，那么第 n 次移动后测得的三维坐标为

$$\begin{cases} X_{cn} = X_{c0} + nh \cos \theta_x \\ Y_{cn} = Y_{c0} + nh \cos \theta_y, \\ Z_{cn} = Z_{c0} + nh \cos \theta_z \end{cases}, \quad (8)$$

式中 X_{c0}, Y_{c0}, Z_{c0} 为每次测量得到物体轮廓在摄像机坐标系下的坐标， X_{cn}, Y_{cn}, Z_{cn} 为第 n 次测量结果沿扫描方向平移后得到的物体轮廓在初始摄像机坐标系下的坐标。

根据(8)式，可以将每次测量系统移动后测得物体表面的三维轮廓信息统一于测量系统在初始位置时的摄像机坐标系中，从而得到物体表面三维轮廓

信息的完整数据。

3 实验与结果

3.1 实验过程

整个系统的标定主要包括以下三部分：

1) 摄像头标定。采用基于平面标靶的方法对摄像头进行标定^[7,8]，求出摄像头的内部参数。

2) 光平面方程的标定。对光平面方程进行标定，求出光平面在摄像机坐标系下的平面方程。

3) 扫描方向的标定。将棋盘格平面标靶固定在空间某一位置，测量系统沿着扫描方向移动并采集图像，若以测量系统为参照物，棋盘格则沿扫描方向的相反方向移动，求出棋盘格上特征点的运动轨迹就可以得到测量系统的相对运动轨迹，从而求出传感器的扫描方向。具体步骤为：1) 摄像机沿扫描方向移动并拍摄平面标靶的图像；2) 根据摄像机的内部参数求出每幅图像所对应的摄像机外部参数：旋转矩阵 \mathbf{R}_i 和平移向量 \mathbf{T}_i ；3) 结合 $\mathbf{R}_i, \mathbf{T}_i$ 和摄像机内部参数求出每幅图像中同一特征点在摄像机坐标系下的坐标值 (X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci}) ，对这些点进行拟合得到(6)式所表示的直线方程。

3.2 结果与分析

采用 Point Grey 公司的 CCD 摄像机、线形激光器以及卓立汉光 TSA150-E 电控精密平移台搭建了线结构光三维测量系统，如图 4 所示。

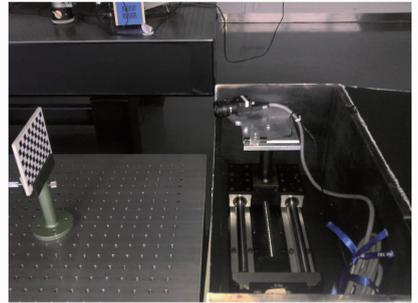


图4 线结构光三维测量系统

Fig. 4 Line structured light three-dimension measurement system

按照实验步骤对系统进行标定，得到 CCD 摄像机的内部参数：焦距 $f_u = 2213.41 \text{ mm}$ ， $f_v = 2213.11 \text{ mm}$ ，主点位置 $u_0 = 631.68, v_0 = 494.72$ ，畸变系数 $k_1 = -0.08518, k_2 = -0.10716, p_1 = -0.00039, p_2 = 0.00291$ ，重投影的像素误差为 $[0.06088, 0.05145]$ 。

光平面在摄像机坐标系下的平面方程为

$$Z_c = 3.303X_c + 0.021Y_c + 324.18. \quad (9)$$

在摄像机坐标系下测量系统扫描方向的直线方程为

$$\begin{cases} X_c = 2.3277 \times 10^7 - 2.0016 \times 10^6 Y_c \\ X_c = 1.0491 \times 10^3 - 3.1096 Z_c \end{cases}, \quad (10)$$

该直线与摄像机坐标系各坐标轴的夹角为

$$[\theta_x, \theta_y, \theta_z] = [17.827^\circ, 90^\circ, 107.827^\circ]. \quad (11)$$

完成标定后对一大大小为 60 mm × 60 mm × 60 mm 的金属标准件(如图 5 所示)进行测量,并将测量结果与传统的线结构光三维测量系统(未对扫描方向进行标定)的测量结果进行比较,结果如下:

1) 对标准件的一个面进行测量,结果如表 1 和图 6 所示。

2) 对标准件相邻的两个面进行测量,计算其夹角,结果如表 2 和图 7 所示。

实验证实,通过对线结构光三维测量系统扫描方向的标定,在提高了测量精度的同时,降低了系统校准的难度和标定设备的成本。图 8 为应用本实验测量系统测得一块石块浮雕的三维轮廓图。

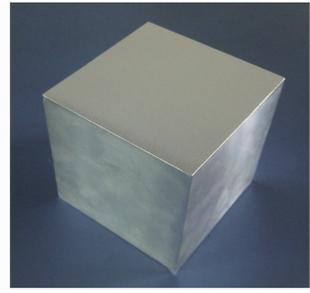


图 5 金属标准件

Fig. 5 Standard component

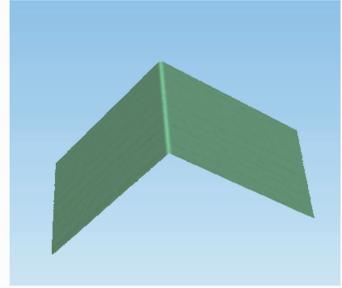


图 6 标准件直角测量结果

Fig. 6 Measuring result of standard component

表 1 标准件平面测量结果对比

Table 1 Comparison of plane measurement results

	Equation of the plane	Max	Average	Std. dev
Before calibrating the scanning direction	$-0.0042X - 0.0800Y + 0.9968Z - 0.0157 = 0$	0.1216	0.0193	0.0158
After calibrating the scanning direction	$0.3817X - 0.0111Y + 0.9242Z - 0.2626 = 0$	0.1230	0.0193	0.0159

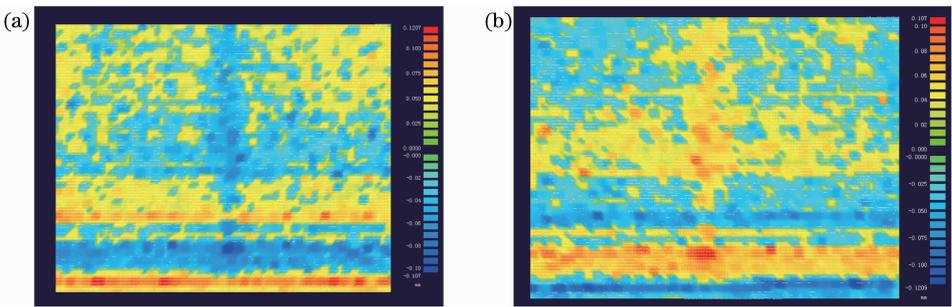


图 7 标准件平面测量结果。(a)标定扫描方向之前测得的标准件平面;(b)标定扫描方向之后测得的标准件平面
Fig. 7 Measurement of standard plane. (a) Plane measured before calibration; (b) plane measured after calibration

表 2 标准件直角测量结果对比

Table 2 Comparison of right-angle measurement results

	Plane one	Plane two	Right-angle / (°)
Before calibrating the scanning direction	$0.6592X - 0.0092Y + 0.7519Z - 0.0379 = 0$	$0.7507X + 0.0160Y - 0.6604Z - 0.0163 = 0$	90.1055
After calibrating the scanning direction	$0.2359X - 0.6713Y + 0.7026Z - 0.1994 = 0$	$0.2211X - 0.7411Y - 0.6339Z + 0.1838 = 0$	90.0020

4 结 论

提出了一种基于平面标靶的线结构光三维测量

系统扫描方向的标定方法。实验结果表明,该方法不但提高了系统的测量精度,而且操作简单、使用灵



图8 石块浮雕三维轮廓图

Fig.8 Measurement result of stone embossment

活,无需辅助的调整设备,降低了标定设备的成本和系统校准的难度,非常适合现场标定。

参 考 文 献

1 Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun, Xu Yuan. Calibration approach for structured-lighted-stripe vision sensor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(2): 210~214
魏振忠,张广军,徐园.一种线结构光视觉传感器标定方法[J].*机械工程学报*,2005,**41**(2):210~214

2 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 182~188
张维光,赵宏,张琦等.线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J].*中国激光*,2009,**36**(1):182~188

3 Wu Qingyang, Li Jinzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
吴庆阳,李景镇,苏显渝等.线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J].*中国激光*,2008,**35**(8):1224~1227

4 He Bingwei, Zhou Xiaolong. Research of sensor planning method in line laser three-dimensional measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1618~1625
何炳蔚,周小龙.线激光三维测量仪中视觉传感器规划方法研究[J].*中国激光*,2010,**37**(6):1618~1625

5 Han Jiandong, Lü Naiguang, Dong Mingli *et al.*. Fast method to calibrate structure parameters of line structured light vision sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 958~963
韩建栋,吕乃光,董明利等.线结构光传感系统的快速标定方法[J].*光学精密工程*,2009,**17**(5):958~963

6 Wang Weifeng, Wen Nai. Research on fitting method of space straight line [J]. *Journal of Xuchang University*, 2010, **29**(5): 37~39
王伟峰,温耐.空间直线拟合研究[J].*许昌学院学报*,2010,**29**(5):37~39

7 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334

8 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3124~3128
刘震,张广军,魏振忠等.一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J].*光学学报*,2009,**29**(11):3124~3128

栏目编辑:何卓铭