

一种线结构光自扫描测量系统的研究*

商大伟, 解则晓*, 王浩元, 常文静
(中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 为了实现对复杂自由曲面的快速精确测量, 提出了一种由 CCD 摄像机、振镜和激光线投射器组成的全视觉自扫描测量系统。该系统利用光学三角法确定了一种新的测量物体表面三维坐标的方式。基于该方式, 此测量系统使用平面靶标实现了对摄像机内部参数的标定, 借助振镜转动驱动激光平面完成了对摄像机视场内被测物体的扫描, 最终根据激光平面方程和计算机二维平面图像信息获得了被测物体的三维数据。试验结果证明, 该系统能以较快速度实现自由曲面的精确测量。

关键词: 逆向工程; 光学三角法; 自扫描; 三维测量

中图分类号: TH74; TP391; TG806

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)10-0030-04

Research of a laser projector self-scanning measurement system

SHANG Da-wei, XIE Ze-xiao, WANG Hao-yuan, CHANG Wen-jing
(Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: To meet the requirement of accurate and convenient 3D measurement for some complex free-form surface, a new kind of measurement method based on a full field of view scanning system was proposed, by the optical-triangulation. This system was mainly composed of a CCD camera, a galvanometer and a laser projector. The camera was calibrated by using a planar target and the mirror was rotated by a galvanometer reflects the laser plane and sweeps the measured objection in the view field of the camera. Based on this new method, the three coordinates of a point on the measured objection can be directly obtained by the laser plane equation and the stripe information on the computer 2D image. Experiment study result shows that the measure system possesses good accuracy and convenience.

Key words: reverse engineering; optical-triangulation; self-scanning; 3D measurement

0 引言

逆向工程^[1]在现代制造业中发挥着重要的作用, 三维数字化测量是逆向工程的首要环节。完整精确的测量数据直接影响后续曲面重构的效率和所加工工件的精度。三维数字化测量主要分为接触式测量与非接触式测量两种。基于机器视觉技术^[2]的非接触式测量与传统的接触式测量方法相比, 具有扫描速度快、扫描精度高等特点。在诸多的视觉测量方法中, 结构光三维视觉测量方法^[3-5]以其大量程、较高精度、光条图像信息易于提取、实时性强及主动受控等特点, 近年来

在工业环境中得到了广泛的应用。

本研究提出了一种由 CCD 摄像机、激光器和振镜组成的线结构光自扫描测量系统^[6]。

1 三维测量原理

1.1 测量功能的实现

结构光三维视觉测量方法基于光学三角法测量原理, 由激光平面发射器与振镜组成的激光源^[7]向物体投射激光平面, 由 CCD 摄像机作为结构光图像传感器^[8]采集由被测物体反射的激光线条。

如图 1 所示, 激光平面投射器发射出的光平面经

振镜镜面反射后投射到被测物体上,与物体相交生成一个光条,CCD 摄像机拍摄该光条图像,利用光学三角法原理可求出该光条的三维坐标。通过振镜转动使反射光面扫过 CCD 摄像机的视场来实现自扫描过程。

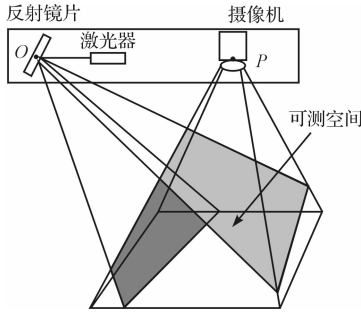


图 1 系统原理图

要确定一个光条的三维数据,首先要建立三维世界坐标系,确定 CCD 像面坐标系到该坐标系的变换关系;然后确定任一振镜角度所对应的光平面在该三维世界坐标系下的光平面方程,这样光平面方程中的一个坐标可用另外两个来表示,从而建立了从二维像面坐标系到三维世界坐标系的关系。

1.2 测量过程数学建模

测量过程的数学建模是指确定像素平面 (u, v) 与摄像机三维世界坐标 (x, y, z) 之间的几何关系,使测量所得的二维像素数据 (u, v) 转化为摄像机三维世界坐标系下的 (x, y, z) 。根据小孔成像原理,摄像机的模型如图 2 所示(其中原点 O 为光学中心; z 轴与光轴重合; $XO'Y$ 为摄像机像面坐标系;原点 O' 是光轴与摄像机像面的交点; $O'X, O'Y$ 分别平行于 ox, oy ; $o_w x_w y_w z_w$ 为振镜坐标系; f 为理想成像系统的焦距)。

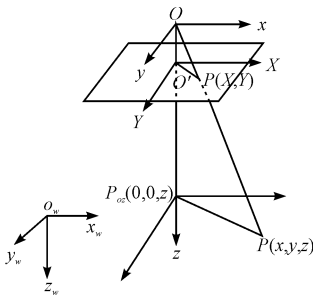


图 2 摄像机模型

1.2.1 确定摄像机三维世界坐标系到计算机图像坐标系的变换关系

由各坐标系之间的几何关系可推知摄像机三维世界坐标 (x, y, z) 的点计算机图像坐标系的变换关系为:

$$\rho \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \cdot N_x \\ y \cdot N_y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, (N_x, N_y) 为图像平面上单位距离像素点数,可由摄像机给定参数换算得到;主点 u_0, v_0 可由摄像机像素参数确定;镜头焦距 f 为待求参数。

1.2.2 确定光平面方程

建立的振镜坐标系如图 3 所示,光面方程为 $z = f(x, y)$,原点 O 位于振镜转轴上与摄像机镜头光心等高处, x_w 与振镜转轴重合,方向垂直于纸面向里, y_w 与 y 平行, z_w 与 z 平行。

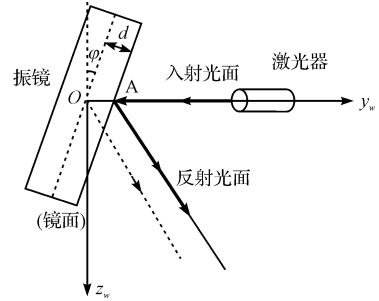


图 3 振镜坐标系

(1) 根据入射光面方程与镜面方程计算得反射光面方程为:

$$A_o x_w + B_o y_w + C_o z_w + D_o = 0$$

其中:

$$A_o = A + ta, B_o = B + tb, C_o = C + tc, D_o = D + td, \\ t = -\frac{A^2 + B^2 + C^2}{2(Aa + Bb + Cc)}$$

式中 A, B, C, D 与 a, b, c, d —入射光面方程与镜面方程参数,为待确定参数。

(2) 假设从振镜坐标系 $o_w x_w y_w z_w$ 到摄像机坐标系 $Oxyz$ 的 RT 变换为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

将反射光面方程进行 RT 转化,为:

$$(F_1, F_2, F_3) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - (F_1, F_2, F_3) \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + D_o = 0$$

其中:

$$F_1 = A_o(r_5 r_9 - r_6 r_8) - B_o(r_4 r_9 - r_6 r_7) + C_o(r_4 r_8 - r_5 r_7) \\ F_2 = -[A_o(r_2 r_9 - r_3 r_8) - B_o(r_1 r_9 - r_3 r_7) + C_o(r_1 r_8 - r_2 r_7)] \\ F_3 = A_o(r_2 r_6 - r_3 r_5) - B_o(r_1 r_6 - r_3 r_4) + C_o(r_1 r_5 - r_2 r_4)$$

式中 旋转矩阵 R —正交矩阵; T —平移矢量,分别表示 x_w, y_w, z_w 坐标轴在 $Oxyz$ 坐标系中的单位方向矢量,为待确定参数。

(3) 将反射激光平面的方程记为:

$$\alpha x + \beta y + \gamma z + \theta = 0$$

且:

$$\alpha = F_1, \beta = F_2, \gamma = F_3, \theta = D_0 - (F_1 t_x + F_2 t_y + F_3 t_z)$$

故:

$$z = -\frac{\alpha x + \beta y + \theta}{\gamma} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得:

$$(x, y, z) = \left(\frac{b_1 c_2 - c_1 b_2}{b_1 a_2 - a_1 b_2}, \frac{a_2 c_1 - c_2 a_1}{b_1 a_2 - a_1 b_2}, -\frac{\alpha x + \beta y + \theta}{\gamma} \right) \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} a_1 = u\alpha - u_0\alpha + N_x f\gamma \\ b_1 = u - u_0 \\ c_1 = -(u - u_0)\theta \end{cases}, \begin{cases} a_2 = v - v_0 \\ b_2 = v\beta - v_0\beta + N_x f\gamma \\ c_2 = -(v - v_0)\theta \end{cases}$$

2 测量系数的确定

2.1 摄像机标定

首先设计 6×6 平面网格靶标,相邻两条平行直线的距离为 25.00 mm,将平面网格靶标置于测量空间内的合适位置,并对其进行拍摄,然后对图像进行处理,提取 6×6 个像素特征点,利用基于交比不变原理的径向排列约束(RAC)两步方法^[9-11]实现对摄像机的标定,求得摄像机镜头的焦距 $f = 8.402$ mm。

2.2 RT 转化矩阵等参数的确定

为了方便确定转化参数,将整个测试系统的固定结构进行精密加工,并在同一个花岗岩平台上对该系统进行安装调试。将振镜夹持装置中心与摄像头加持装置中心安装在同一基准平面上,二者中心水平相距 280.00 mm,并使激光器夹持装置中心位于这条直线上,使其投射的激光平面与基准平面重合。本装置采用的镜头是 ComPutar 镜头,其镜头光心与基准平面的距离约为镜头长度 40 mm,在建立摄像机三维坐标系与振镜三维坐标系时,保证二者原点坐标位于同一水平面上,且 y_w 与 y 平行, z_w 与 z 平行。

因此,理论上,RT 转化矩阵中:

$$R = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, T = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0 \\ -280.0 \\ -40.0 \end{pmatrix}$$

入射光面在振镜坐标系中的方程为:

$$Ax_w + By_w + Cz_w + D = 0, A = B = D = 0, C = 1$$

镜面在振镜坐标系中的方程为:

$$ax_w + by_w + cz_w + d = 0$$

由于振镜存在厚度,导致反射面离原点存在 d_m 的偏移,故:

$$a = 0, b = 1/\tan \varphi, c = 1, d = -d_m/\sin \varphi, d_m = 1.0 \text{ mm}。$$

镜面与 z_w 负半轴的夹角 $\varphi = \delta + i\sigma$,本系统采用的振镜是北京世纪索尼公司的 Ts8720 高速光学扫描振镜,输入电压范围为 $-10 \text{ V} \sim +10 \text{ V}$,最大扫描角度为 $-20^\circ \sim +20^\circ$,输入电压与振镜角度存在正比例关系,位置信号输入比例系数为 $0.5 \text{ V}/^\circ$,可通过标定确定输入电压时的振镜初始角度 δ ,再通过输入电压的改变量与比例系数确定振镜任意时刻的角度 φ 。

2.3 测量系数的优化确定

本系统的转化系数在测量中可能存在随机误差,因此,借助于三球立体靶标对该线性系统的系数进行优化。如图 4 所示,该三球立体靶标采用精密加工,A 球直径 $D_1 = 60.366$ mm,B 球直径 $D_2 = 60.369$ mm,C 球直径 $D_3 = 60.366$ mm,AB 球心距 $l_{AB} = 151.491$ mm,AC 球心距 $l_{AC} = 221.605$ mm,BC 球心距 $l_{BC} = 220.401$ mm。

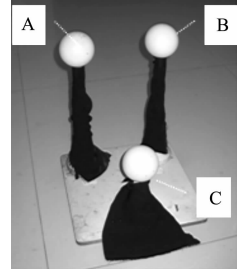


图 4 三球立体靶标

对光面转换系数 $ABCD$ 、振镜初始角度 φ 、焦距 f 、RT 转换系数赋予不同的加权系数 step,利用蒙特卡罗算法^[12]进行小范围内系数修正,如:

$$f_{\text{修正}} = f_{\text{初始}} + (4.0 \times \text{rand}() / 65536 - 1.0) \times \text{step}$$

其中:step = 0.1;函数 rand()产生 0 ~ 32767 的随机数。

利用修正后的系数借助式(3)求取该靶标的三维信息,并求取每个球的直径 D'_1, D'_2, D'_3 与球心距 $l'_{AB}, l'_{AC}, l'_{BC}$,并利用最小二乘法求取测量值与实际值的误差值 error,在经过多次(大于 30000 次)循环求解后,使误差值在测量允许的误差范围以内,便得到该测量系统测量系数的最优解。

优化后的最优系数为:

$$f = 8.482611, A = -0.075259,$$

$$B = 0.000000, C = 1.016714, D = 0.000000$$

$$R = \begin{pmatrix} 0.836397 & -0.037400 & -0.037400 \\ 0.105261 & 1.107684 & -0.065437 \\ 0.077359 & -0.068354 & 1.000341 \end{pmatrix},$$

$$T = \begin{pmatrix} -1.693372 \\ -279.264587 \\ -45.360275 \end{pmatrix},$$

$$d_{mm} = 1.000\ 000, \varphi = 0.643\ 357$$

由于摄像机存在一定的透射畸变,由相机参数计算畸变系数 $k = 2.37 \times 10^{-8}$,对像素坐标进行补偿。

3 误差分析与测量实例

利用该系统对半径 $R = 30.063\ \text{mm}$ 标准球体进行多次测量,用 *surfacar* 软件对测量数据拟合,如表 1 所示。

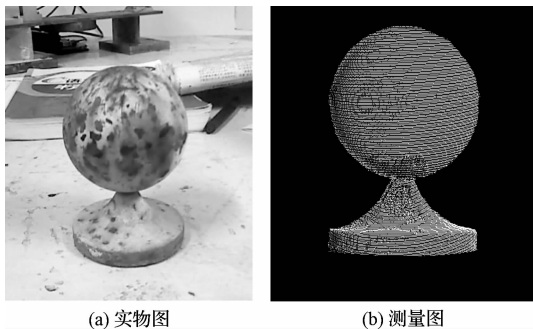
表 1 测量数据拟合

放置方式	拟合 R/mm	点到拟合面平均距离 d/mm
近处	30.066	0.030
	30.062	0.046
远处	30.058	0.091
	30.072	0.089
平均	30.064	0.064

从表中可以看出,在距离镜头不同位置下测量数据拟合球的半径都接近于实际半径,测量数据平均值与实际值相差仅为 $0.001\ \text{mm}$,离散点到拟合球面的平均距离为 $0.064\ \text{mm}$,测量精度可以满足一般工业需求。

由于测量过程受镜头焦距及摄像机视场范围影响,因此该测量系统的最佳测量范围为相机坐标系 z 方向(镜头轴向)距镜头 $900\ \text{mm} \sim 1\ 200\ \text{mm}$, x 方向径向 $0 \sim 400\ \text{mm}$, y 方向径向 $0 \sim 400\ \text{mm}$,对超过测量范围的大型工件可进行分部测量,然后进行数据拼接。

标准球与测量数据图像显示如图 5 所示,从图中可以看出,测量数据能较好地反映被测物体的主要特征信息,具有较高的分辨率。



(a) 实物图

(b) 测量图

图 5 标准球体实物图与测量图

4 结束语

现有的三维测量方法存在测量速度慢、精度低、成本高等缺点,为克服这些缺陷,实现对大型工件的快速精确测量,本研究提出了一种由 CCD 摄像机、激光线投射器和振镜组成的一种线结构光自扫描测量系统。利用平面靶标对摄像机进行了标定,并利用已知的三球立体靶标及设备本身参数对测量转化系数进行了优化确定,实现了对复杂工件的快速精确测量。

误差测试和分析结果表明,该系统具有较高的测量精度;对样件的测量试验结果表明,该系统具有较高的测量速度和分辨率。

参考文献(References):

- [1] 刘浩,程培元,杜华平. 逆向工程设计[J]. 汽车工程设计,2002(6):4-5.
- [2] 祝世平,强锡富. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. 光学精密工程,2000,4(2):192-197.
- [3] ZHANG Guang-jun, WEI Zhen-zhong. A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection[J]. *Optics & Laser Technology*,2002,34(5):373-380.
- [4] VALKENBURG R J, MCIVOR A M. Accurate 3D measurement using a structured light system[J]. *Image and Vision Computing*,1998,16(2):99-110.
- [5] SON S, PARK H, LEE K H. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*,2002,42(8):889-897.
- [6] 解则晓,张梅凤,张志伟. 全场视觉自扫描测量系统[J]. 机械工程学报,2007,43(5):189-193.
- [7] ZHANG Jian-xin, DJORDJEVICH A. Study on laser stripe sensor[J]. *Sensor and Actuators*,1999,72(3):224-228.
- [8] 蔡文贵. CCD 技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,1992:35-41.
- [9] 贺俊吉,张广军,杨宪铭. 基于交比不变性的镜头畸变参数标定方法[J]. 仪器仪表学报,2004,25(5):597-599.
- [10] 张勇斌,卢荣胜. 线结构光视觉测量系统的标定方法[J]. 传感器世界,2003(8):10-13.
- [11] 段发阶,刘凤梅,叶声华. 一种新型线结构光传感器结构参数标定方法[J]. 仪器仪表学报,2000,21(1):108-110.
- [12] 雷桂媛. 关于蒙特卡罗及拟蒙特卡罗方法的若干研究[D]. 杭州:浙江大学理学院,2003. [编辑:柴福莉]