

文章编号: 0258-7025(2010)07-1832-05

# 基于反向摄影的三维坐标测量方法

边心田 苏显渝 陈文静

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出一种基于反向摄影的光学坐标测量方法。测量系统主要由微型摄像机、测杆和液晶显示器组成。测杆的一端固定微型摄像机,另一端是一个触发测头,液晶显示器上显示的是二维正弦条纹图。测量时,将液晶显示屏置于被测物体周围,触发测头接触被测物体表面,摄像机摄取显示器上的条纹图像。通过条纹图中所携带的相位信息确定摄像机主点在世界坐标系中的空间坐标和姿态,采用最小二乘优化的方法来获得测头在摄像机坐标系内的空间坐标,由此可以得到测头与被测物体点在世界坐标系中的三维坐标。实验结果表明,该方法简单、可靠,可以准确地得到光学坐标测量结果。

**关键词** 测量;光学坐标测量;反向摄影;摄像机标定;坐标变换;最小二乘优化

**中图分类号** O438.2; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1832

## A Novel Tree-Dimensional Coordinates Measurement Method Based on Inverse Photogrammetry

Bian Xintian Su Xianyu Chen Wenjing

(*Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*)

**Abstract** We present an optical coordinate measuring method using inverse photogrammetry. It mainly consists of micro-cameras, measuring rods and liquid crystal displays (LCD). One end of measuring rod is the fixed mini-cameras, on the other side is a trigger probe, LCD shows a two-dimensional sinusoidal fringe pattern. When measuring, the probe contacts the surface of the measured object, and then the camera captures the stripes image. The coordinates of camera principal point in the world coordinate system may be determined by the phase information that the fringe pattern carries. The relationship was determined between the principle point and the coordinates of the camera probes using least square optimization method. So that, the three-dimensional coordinate of the probe can be determined. The experimental results show that the method is simple, reliable, and can carry out optical coordinate with high precision.

**Key words** measurement; measurement of optical coordinates; inverse photogrammetry; camera calibration; coordinate transformation; least square optimization

## 1 引 言

近年来,随着科技的发展,对现代测量技术的要求越来越高,传统的三坐标测量机在测量速度、灵活性以及测量尺寸上已不能满足快速发展的工业测量要求。光学坐标测量作为一种先进的测量手段,以

其便携性好、精度高、测量范围大和柔性好等优点在工业环境中得到了广泛的应用<sup>[1~6]</sup>。传统的光学坐标测量技术主要是采用校正好的摄像机和一个辅助测量棒,进行光学坐标的测量<sup>[7~9]</sup>。辅助测量棒上有多个标记点和一个可以与被测物体接触的测头。

收稿日期: 2009-10-12; 收到修改稿日期: 2010-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 边心田(1978—),男,博士研究生,主要从事光学测量和信息光学等方面的研究。

E-mail: bianxt007@126.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

其中标记点和测头在辅助测量棒坐标系中的坐标在测量前已经精密测定。通过计算辅助测量棒上测头的坐标得出被测点的三维坐标。还有一种就是利用反向摄像测量技术<sup>[10]</sup>,将测头通过测杆与超轻摄像机固定,标靶上的目标控制点是事先经过精密测量的,通过计算测杆上测头的坐标得出被测点的三维坐标。

近年来,已有多家公司研制出较为成熟的产品,最具代表性的有两种:1)瑞士 Leica 公司推出的 T-pro 通用坐标测量机,该系统最大的特点是激光跟踪测距和摄像机视觉测量技术相结合,大大地提高了系统的测量精度和灵活性,在 17 m 的测量范围内测量精度达到 0.06 mm。2)德国 AICON 3D Systems 公司的 Procam 便携式坐标测量机,系统的测量精度在距离标靶 1 m 之内优于 0.1 mm,2 m 之内优于 0.2 mm。

本文在反向摄影测量技术的基础上提出一种基于傅里叶条纹分析的光学坐标测量方法。该方法是用一个条纹标靶代替传统的有多个标记点的普通标靶,通过条纹标靶上的相位信息确立摄像机图像坐标和标靶平面上点的空间坐标关系,特征点最大数量理论上等于条纹标靶在摄像机中成像的像素个数,其定位精度由相位测量精度保证。所以,该方法避开了复杂的标定特征点提取,大大增加了二维(2D)标定数据量,提高了测量精度。

## 2 反向摄影测量原理

### 2.1 摄像机成像模型

在理想的摄相机成像模型下,空间任何一点在局部世界坐标系和摄像机坐标系以及图像坐标下的对应关系为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $s$  为非零尺度因子,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_x & \gamma & u_0 \\ 0 & a_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  为系统内

参数矩阵,  $a_x, a_y$  分别为  $u, v$  轴上归一化焦距,  $\gamma$  为  $u, v$  轴方向上的倾斜因子,  $(u_0, v_0)$  为主点的图像坐标。  $\mathbf{R}, \mathbf{T}$  为摄像机的外部参数, 分别表示世界坐标系与摄像机坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。

实际的光学系统一般会存在不同程度的畸变,在测量时需要考虑摄像机的畸变。设  $(X', Y')$ ,  $(X,$

$Y)$  分别为像点在图像坐标系下的理想坐标和实际坐标。  $X, Y$  方向上的非线性畸变分别为  $\delta_X, \delta_Y$ , 畸变值与像点在图像中的位置有关, 可表示为

$$\begin{aligned} \delta_X(X, Y) &= k_1 X(X^2 + Y^2) + \\ &\quad [p_1(3X^2 + Y^2) + 2p_2 XY], \\ \delta_Y(X, Y) &= k_2 X(X^2 + Y^2) + \\ &\quad [p_2(3X^2 + Y^2) + 2p_1 XY], \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $k_1, k_2, p_1, p_2$  为畸变参数, 一般情况下, 一阶径向畸变足以描述非线性畸变。 令  $r = \sqrt{(X^2 + Y^2)}$ , 则摄像机成像模型可表示为

$$s \begin{bmatrix} u(1 + k_1 r^2) \\ v(1 + k_2 r^2) \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{A}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

### 2.2 条纹标靶的数据提取标定

用液晶显示屏作为平面标靶, 标靶上显示的是二维正弦条纹图, 其强度函数表示<sup>[11]</sup>为

$$I(x, y) = a + b_1 \cos(2\pi f_{0x}x + \varphi_{0x}) + b_2 \cos(2\pi f_{0y}y + \varphi_{0y}), \quad (4)$$

式中  $a, b_1, b_2$  分别为正常数,  $f_{0x}, f_{0y}$  分别为正弦条纹在  $x, y$  方向上的空间频率,  $\varphi_{0x}, \varphi_{0y}$  为对应的初始相位。

标靶上条纹图在摄像机中成像的强度函数为

$$I(u, v) = a(u, v) + b_1(u, v) \cos[\varphi_u(u, v)] + b_2(u, v) \cos[\varphi_v(u, v)], \quad (5)$$

式中  $a(u, v)$  为背景光强,  $b_1(u, v), b_2(u, v)$  为条纹对比度。 根据傅里叶变换分析的方法<sup>[12~14]</sup>对条纹图像提取相位, 有

$$\begin{cases} \varphi_u(u, v) = 2\pi f_{0x}x + \varphi_{0x} + c_1 \\ \varphi_v(u, v) = 2\pi f_{0y}y + \varphi_{0y} + c_2 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $c_1, c_2$  为常数, 其数值与相位展开起始点有关。

根据 2D 平面标靶的摄像机标定方法<sup>[15]</sup>, 先不考虑摄像机的畸变, 求出投影矩阵, 即内参数和外参数的混合矩阵; 对条纹标靶在不同位置拍摄  $n(n \geq 2)$  幅图像, 结合旋转矩阵的正交性, 建立由投影矩阵构造的线性方程组, 求解出摄像机的内、外参数。 然后再以计算出的参数为初值代入有畸变的成像模型, 优化求解出摄像机的各参数的准确值。

### 2.3 测杆的标定

测杆的标定主要就是测定摄相机主点与测头之间的坐标关系。 将测头置于点  $A$  不动, 变换摄像机的姿态, 使摄像机从不同的角度拍摄标靶上的条纹图。 在摄像机移动过程中, 摄像机主点与测头之间的距离保持不变, 所以摄像机主点的空间轨迹是在

以测头为球心,测头到摄像机主点的距离为半径的圆球面上。不失一般性,假设 $(x_A, y_A, z_A)$ 为测头在世界坐标系中的坐标, $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )为摄像机主点在世界坐标系中的坐标,摄像机的主点到测头的距离 $r$ 可以表示为

$$r = [(x_1 - x_A)^2 + (y_1 - y_A)^2 + (z_1 - z_A)^2]^{1/2} = [(x_2 - x_A)^2 + (y_2 - y_A)^2 + (z_2 - z_A)^2]^{1/2} = \dots = [(x_n - x_A)^2 + (y_n - y_A)^2 + (z_n - z_A)^2]^{1/2}, \quad (7)$$

式中包含了4个未知量,只要给出4个摄像机主点的坐标,就可以求解出各个未知量。但是由于测量误差的存在,一般摄像机拍摄的不同姿态下的图片都多于4幅。圆球面上各点到球心的距离都是相等的,所以可以根据最小二乘思想构建目标函数为

$$F(x_A, y_A, z_A, r) = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2 + (z_i - z_A)^2} - r]^2, \quad (8)$$

(7)式中的4个未知量 $(x_A, y_A, z_A)$ 和 $r$ 可以通过(8)式目标函数的最小化进行确定,在对目标函数(8)式的优化中,对未知量 $(x_A, y_A, z_A)$ 和 $r$ 而言,目标函数 $F$ 具有高非线性度,因此寻找的全局最小变量对应的 $(x_A, y_A, z_A)$ 和 $r$ 具有高精度。最后再结合(3)式,就可以得出测头在摄像机坐标系中的坐标 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。

## 2.4 空间点的三维测量

世界坐标系和摄像机坐标系的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (9)$$

由(9)式结合测头与摄像机坐标系的关系,对空间任意一点 $P$ ,在世界坐标系中的坐标可表示为

$$\begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} = \mathbf{R}_P^{-1} \begin{bmatrix} X_c + X_0 \\ Y_c + Y_0 \\ Z_c + Z_0 \end{bmatrix} - \mathbf{T}_P. \quad (10)$$

坐标测量原理如图1所示。测量时,测头与被测物体表面接触,摄像机拍摄标靶上的条纹图像,然后通过傅里叶条纹分析<sup>[12~14]</sup>和2D平面标靶的摄像机标定<sup>[15]</sup>的方法得出摄像机主点在世界坐标系中的坐标。最后将摄像机主点坐标代入(10)式,得到被测点的空间三维坐标。

## 3 实 验

实验中,摄像机为JAI公司的CV-A50黑白摄

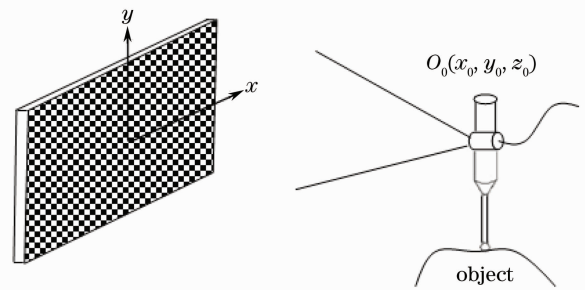


图1 坐标测量原理图

Fig. 1 Principle of measurement of coordinates

像机,分辨率为752 pixel $\times$ 582 pixel,像素尺寸为 $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ ,镜头焦距为12 mm。采用Philips170S87液晶显示器作为平面标靶,其分辨率为1280 pixel $\times$ 1024 pixel,显示的正弦条纹图像的周期为48 pixel。

实验中对10幅摄像机拍摄到的图像进行了标定,所用图像在摄像机下的空间位置如图2所示。其标定过程为,首先利用傅里叶条纹分析的方法<sup>[12~14]</sup>计算出标靶平面上两个方向的相位分布,再由(6)式计算出相位在靶面上对应的坐标分布。然后,对CCD获取的条纹图进行标定点提取,图3为CCD拍摄的其中一幅标靶图像。最后根据文献<sup>[15]</sup>提出的2D平面标靶的摄像机标定方法对摄像机进行标定,标定结果如表1所示。

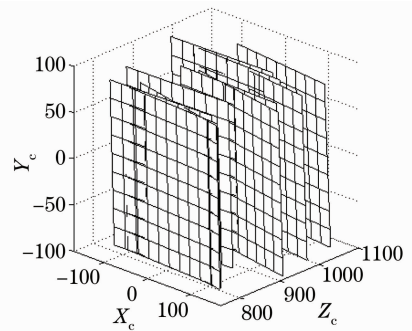


图2 2D平面标靶的空间位置

Fig. 2 Orientation of the 2D planes



图3 标靶测量图

Fig. 3 Measuring picture of the target

表 1 标定结果

Table 1 Calibration results

Focal length	Principle point	Pixel error
1458.61±1.36	348.46±0.31	0.015
1511.10±1.11	268.29±0.27	0.013

系统标定好以后,将二维平面标靶固定不动,改变测头的位置,摄像机摄取不同位置的标靶条纹图像,通过计算就可以得出被测点在世界坐标系下的三维坐标。为了检验该测量方法的可行性和准确

表 2 移动方向平行于靶面的测量误差结果

Table 2 Measuring results in the parallel direction of target

Movement distance	5	10	15	20	25
1	-0.0265	0.0231	-0.0225	0.0381	-0.0212
2	-0.0396	0.0249	-0.0260	0.0460	-0.0238
3	-0.0175	0.0279	-0.0250	0.0366	-0.0061
4	-0.0250	0.0332	-0.0084	0.0276	-0.0095
5	-0.0419	0.0298	-0.0073	0.0287	-0.0177
6	-0.0325	0.0165	-0.0079	0.0387	-0.0035
Std	0.0093	0.0058	0.0092	0.0069	0.0084

表 3 移动方向垂直于靶面的测量误差结果

Table 3 Measuring results in the vertical direction of target

Movement distance	5	10	15	20	25
1	0.0214	0.0294	-0.0044	-0.0770	0.0198
2	0.0322	0.0204	0.0061	-0.0775	0.0207
3	0.0292	0.0178	-0.0071	-0.0720	0.0247
4	0.0247	0.0195	0.0022	-0.0764	0.0176
5	0.0075	0.0281	-0.0078	-0.0839	0.0237
6	0.0151	0.0201	0.0030	-0.0800	0.0256
Std	0.0092	0.0049	0.0058	0.0040	0.0031

由表 2,3 中的测量结果可以看出,摄像机在平行于靶面和垂直于靶面方向上测量的标准差均优于 0.01 mm。

## 4 结 论

提出了一种新的光学三维坐标测量方法,该方法将条纹标靶引入测量中,结合条纹标靶上的相位信息对摄像机进行标定。摄像机的标定精度跟特征点的数量和定位精度有关,在该方法中,特征点最大数量理论上等于条纹标靶在摄像机中成像的像素个数,其定位精度由相位的测量精度来保证,提高了摄像机的标定精度,因此得到的测量结果也会更为精确。实验结果表明,该测量方法具有较高的测量精度。

## 参 考 文 献

1 Guiyun Tian, Rongsheng Lu, Duke Gledhill. Surface

性,将摄像机固定于精密电控平移台上(精密电控平移台能准确地显示它所控制的摄像机每次移动的距离),通过分析精密电控平移台记录的摄像机移动距离与通过计算得出的距离值验证该方法的有效性。摄像机初始位置在距离标靶 1 m 远的位置,然后通过操作电控平移台控制摄像机移动并在不同位置进行拍摄,每个位置拍摄 6 次,共在 6 个位置进行拍摄,电控平移台记录的距离分别与其他应用该方法计算出的距离作差,其结果如表 2 和表 3 所示。

measurement using active vision and light scattering [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(1): 131~139

2 Su Xianyu, Li Jitao. *Information Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999

苏显渝,李继陶. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,1999

3 Huang Fengshan. Study on the key technique of single camera 3D coordinate vision measurement system using a light pen [D]. Tianjin: Tianjin university, 2005

黄风山. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统关键技术的研究[D]. 天津:天津大学,2005

4 Wu Qingyang, Li Jingzhen, 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

5 Zhang Guangjun. *Vision Measurement* [M]. Beijing: Science Press, 2008

张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008

6 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Waverfront measurement for transparent object by active deflectometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 515~518

刘元坤,苏显渝,吴庆阳. 基于主动条纹偏折术的透明相位物体波前测量方法[J]. 中国激光,2007, **34**(4): 515~518

- 7 Zhu Jigui, Wang Dawei, Wang Xin *et al.*. Key techniques on optical coordinate measuring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 296~299  
郝继贵, 王大为, 王 鑫 等. 光学坐标测量系统中的关键技术[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 296~299
- 8 Huang Guiping. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005  
黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2005
- 9 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
- 10 Werner Bosemann. Advances in photogrammetric measurement solutions [J]. *Computers in Industry*, 2005, **56**(8-9): 886~893
- 11 Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(6): 149~153  
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(6): 149~153
- 12 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 13 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**: 263~284
- 14 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233  
苏显渝, 谭松新, 向立群 等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 15 Zhengyou Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334