

文章编号 1004-924X(2010)07-1648-06

# 双振镜点扫描三维形貌测量系统

李旭东, 崔磊, 赵慧洁, 姜宏志

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**针对远距离大尺寸物体三维形貌测量的要求,设计并实现了基于激光三角法原理的双振镜点扫描三维形貌测量系统。介绍了系统的结构和测量原理,并对系统进行建模,推导了被测物体表面测量点的三维坐标计算公式。构建了原型系统,利用专用的二维平面靶标在测量空间内自由摆放数次,根据靶标上特征点及其像点间的位置关系,以坐标系转换为基础实现了测量系统结构参数的现场标定。利用李萨如图扫描模式分别对靶标平面、已知直径的球面及石膏像自由曲面进行了测量实验。结果表明,测量距离1 m处,测量点到拟合平面的距离误差均值为0.70 mm,球面直径测量误差均值为0.51 mm;测量距离10 m处,测量点到拟合平面的距离误差均值为17.85 mm。该系统可用于远距离大尺寸物体表面的三维形貌测量。

**关键词:**三维形貌测量;双振镜扫描;激光三角法;李萨如图扫描;均值误差

**中图分类号:** TB92; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101807.1648

## Three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirrors with point scanning

LI Xu-dong, CUI Lei, ZHAO Hui-jie, JIANG Hong-zhi

(School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to measure the three-dimensional shape of a large scale object in a long distance, a three-dimensional shape measurement system based on dual oscillating mirror scanning was designed and implemented. Firstly, the principle and the configuration of the system were presented and the system model was derived. Secondly, the field calibration of the structure parameters of the system was accomplished based on the coordinate transformation by taking pictures of a special planar board from different directions. Finally, the plane board, sphere and curved plaster figures were measured and reconstructed by using Lissajous scanning pattern. The measurement results show that the average errors of the distance between the measuring points and the fitted plane are 0.70 mm and 17.85 mm at the distance of 1 m and 10 m, and the average error of the fitted sphere diameter is 0.51 mm at the distance of 1 m. The system can be used for the three-dimensional shape measurement for large scale objects in the long distance.

收稿日期:2009-11-23;修订日期:2009-12-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60802044);中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助项目;长江学者和创新团队发展计划资助(No. IRT0705)

**Key words:** three-dimensional shape measurement; dual oscillating mirror scanning; laser triangulation; Lissajous scanning; average error

## 1 引言

随着航空航天、汽车工业和先进制造业的飞速发展,对大尺寸自由曲面高精度实时三维形貌测量的要求越来越迫切。传统的接触式形貌测量方法测量范围有限,容易对被测物体表面造成损伤,而且测量速度慢、效率低,测量过程难以实现自动化。光学非接触三维形貌测量由于具有非接触、自动化、高精度、高效率等优点,被广泛应用于工件的加工制造、缺陷检测和文物保护等领域<sup>[1-2]</sup>。常用的光学非接触式形貌测量方法包括立体视觉法、干涉法、莫尔条纹法和激光三角法等。其中干涉法测量精度高,但测量范围小;莫尔条纹法测量精度与激光三角法测量精度相仿,但受物体表面斜率影响较大;立体视觉法测量精度高,但对多幅图像上同名点的搜索及匹配困难,且容易受环境光照条件的影响;而激光三角法由于光束能量集中,适合于远距离测量,且系统结构简单、工作范围大,因此得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。传统的三角法形貌测量系统采用激光器移动或偏转<sup>[5-6]</sup>、多面体棱镜旋转<sup>[7]</sup>实现光束二维偏转,因驱动装置负载较大,不适用于快速测量;而采用声光偏转器<sup>[8]</sup>实现光束偏转可完成快速测量,但是测量范围小。

基于以上问题,本文设计并实现了双振镜点扫描三维形貌测量系统。该系统测量距离远、测量范围大,可按指定模式对物体实现扫描,稳定可靠地获取物体的三维形貌信息,提高了系统测量效率。

## 2 系统组成及测量原理

双振镜点扫描三维形貌测量系统采用光学三角法原理实现物体表面非接触测量。系统由激光器、光束偏转子系统、图像采集子系统组成。光束偏转子系统由双振镜、电机、电机驱动板和电机控制卡组成。图像采集子系统由 CCD 相机和图像采集卡组成。

系统测量原理如图 1 所示。激光器发出的光

束经双振镜反射后入射到物体表面形成光斑,相机将光斑成像在 CCD 探测器上。通过图像处理可得到光斑在探测器上的位置,结合振镜的偏转角度可求得物体表面测量点的三维坐标,重建物体三维形貌。通过控制电机电压可按指定的模式对物体表面进行扫描,为了提高系统测量效率,采用李萨如图样的扫描模式。

图 1 中,双振镜轴线成垂直布置。以相机镜头中心为原点建立世界坐标系  $O-XYZ$  及相机坐标系  $O-X_cY_cZ_c$ ;像平面坐标系为  $O_1-uv$ 。X 轴为垂直振镜轴线指向相机的方向;Y 轴铅垂向下;Z 轴为水平振镜轴线指向被测对象的方向(被测对象参考平面与世界坐标系  $XOY$  平面平行)。X<sub>c</sub>、Y<sub>c</sub> 轴平行于像平面坐标系的  $u$ 、 $v$  轴;Z<sub>c</sub> 轴为相机光轴。

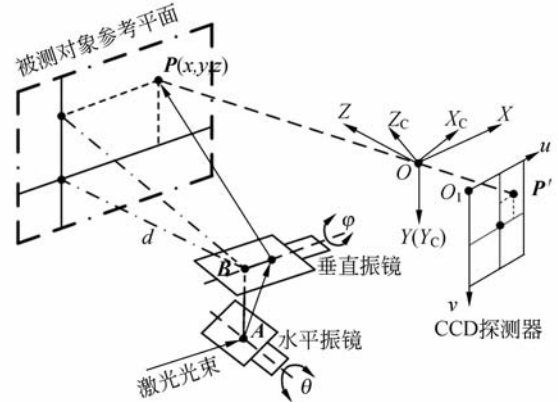


图 1 系统测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

振镜起始位置调整为与  $XOZ$  平面夹角  $45^\circ$ , 以保证光束经双振镜反射后传播方向与 Z 轴平行;调整激光器使其发出光束平行于 X 轴。记激光器入射到水平振镜的点为 A;水平振镜处于起始位置时,光束反射到垂直振镜的点为 B,在世界坐标系下坐标为  $B(x_B, y_B, z_B)$ ;振镜轴线间距为 AB;记水平振镜、垂直振镜相对于起始位置的偏转角分别为  $\theta, \varphi$ ,分别沿 Z 轴和 X 轴正方向看去顺时针转角为正;光束经两振镜反射后入射到物体表面上的点为 P,即为待求点,在世界坐标系下坐标为  $P(x, y, z)$ ;P 的像点为 P',在相机坐标系下坐标为  $P_c'$ ,在世界坐标系下坐标为  $P'(x_{P'}, y_{P'}, z_{P'})$ 。

$y_{p'}, z_{p'}$ ); 相机坐标系与世界坐标系转换关系由旋转矩阵  $\mathbf{R}$  及平移矩阵  $\mathbf{T}$  描述。

待求点  $\mathbf{P}$  的三维坐标求取过程如下:

像点  $\mathbf{P}'$  在世界坐标系与相机坐标系下转换关系如下:

$$\mathbf{P}_C' = \mathbf{R} \times \mathbf{P}' + \mathbf{T}. \quad (1)$$

由于像平面坐标系与相机坐标系的  $XOY$  面平行, 故像点  $\mathbf{P}'$  在相机坐标系下的坐标可表示为

$$\mathbf{P}_C' = [(u - u_0)d_x \quad (v - v_0)d_y \quad f]^T, \quad (2)$$

其中:  $u, v$  为像点  $\mathbf{P}'$  在像平面坐标系下坐标;  $u_0, v_0$  为相机光轴与像平面交点在像平面坐标系下坐标;  $d_x, d_y$  为 CCD 像元尺寸;  $f$  为相机镜头焦距。

相机坐标系与世界坐标系原点均为相机镜头中心, 故平移矩阵  $\mathbf{T} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$ , 因此像点  $\mathbf{P}'$  在世界坐标系下坐标为:

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} x_{p'} \\ y_{p'} \\ z_{p'} \end{bmatrix} = (\mathbf{R}^{-1}) \times \begin{bmatrix} (u - u_0)d_x \\ (v - v_0)d_y \\ f \end{bmatrix}. \quad (3)$$

如图 1 所示,  $d$  为点  $\mathbf{P}$  与垂直振镜上点  $\mathbf{B}$  在  $Z$  轴方向的距离, 由成像光线  $OPP'$  上点列交比不变性得

$$d = \frac{z_{p'}(x_B + AB \tan(2\theta)) - x_{p'}z_B}{x_{p'} - z_{p'} \tan(2\theta) / \cos(2\varphi)}. \quad (4)$$

由图 1 中几何关系知点  $\mathbf{P}$  在世界坐标系下坐标为:

$$\begin{cases} x = x_B + (AB + d / \cos(2\varphi)) \times \tan(2\theta) \\ y = y_B - d \times \tan(2\varphi) \\ z = z_B + d \end{cases}. \quad (5)$$

### 3 系统标定

系统标定包括 3 部分内容: 振镜偏转线性度标定、相机内参数矩阵标定和系统结构参数标定。

标定原理如图 2 所示。引入辅助坐标系  $O_P - X_P Y_P Z_P$ , 其  $X_P$  轴和  $Y_P$  轴建立在平面靶标上,  $Z_P$  轴与  $X_P$  轴、 $Y_P$  轴构成右手坐标系。

系统标定过程如下:

#### (1) 振镜偏转线性度标定

给定电压驱动水平(垂直)振镜偏转, 测量不同电压下光斑在  $X(Y)$  轴方向的位置变化量, 结合  $Z$  轴方向的距离计算振镜在不同电压下的实际偏转角度。

#### (2) 相机内参数矩阵标定

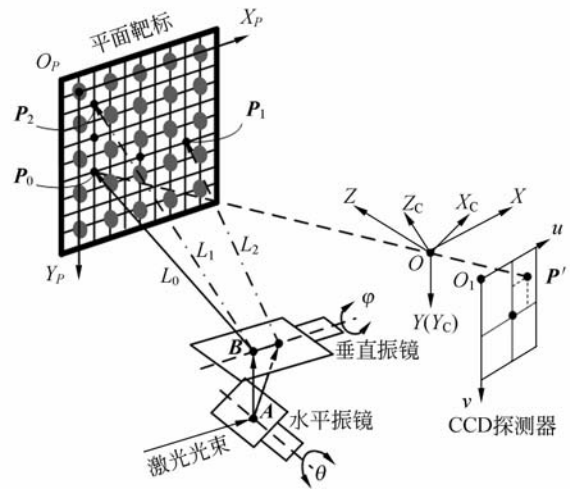


图 2 系统参数标定原理

Fig. 2 Calibration for system parameters

对平面靶标在测量空间内不同距离及不同角度拍摄 15 幅图像, 由张正友方法标定相机内参数矩阵及镜头畸变<sup>[9-10]</sup>。

系统结构参数标定步骤如下:

(1) 靶标在系统前方不同位置自由摆放  $n$  次, 分别标定辅助坐标系与相机坐标系之间的外参数矩阵  $\mathbf{R}_j$  和  $\mathbf{T}_j$  ( $j=1, \dots, n$ )。

(2) 记振镜处于起始位置时靶标上的光点为  $\mathbf{P}_{0j}$ ; 水平振镜偏转角度  $\theta$ , 垂直振镜处于起始位置时靶标上的光点为  $\mathbf{P}_{1j}$ ; 垂直振镜偏转角度为  $\varphi$ , 水平振镜处于起始位置时靶标上的光点为  $\mathbf{P}_{2j}$  ( $j=1, \dots, n$ )。

在相机坐标系下分别拟合直线  $L_0$ 、直线  $L_1$ 、直线  $L_2$ ; 拟合  $\mathbf{P}_{0j}$  点和  $\mathbf{P}_{1j}$  点构成的平面  $\pi_1$  和  $\mathbf{P}_{0j}$  点和  $\mathbf{P}_{2j}$  点构成的平面  $\pi_2$ 。

(3) 计算世界坐标系与相机坐标系之间的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  和平移矩阵  $\mathbf{T}$ ; 直线  $L_1$  与平面  $\pi_2$  交点  $\mathbf{A}$ , 直线  $L_2$  与平面  $\pi_1$  交点  $\mathbf{B}$  在相机坐标系下的坐标; 标定振镜轴线间距  $AB=6.702$  mm。

(4) 计算世界坐标系下  $\mathbf{B}$  点坐标为:

$$(x_B, y_B, z_B) = (-96.792, -12.598, -120.837) \text{ mm}.$$

### 4 测量实验与结果

构建的测量系统样机如图 3 所示。用其分别对平面、球面及自由曲面进行测量实验。

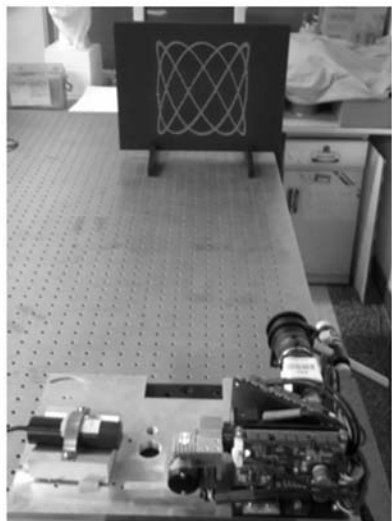


图3 测量系统样机

Fig. 3 System prototype

为了验证系统在远距离测量时的有效性,在0.5~10 m的距离内,分段对平面进行测量,对测量点进行最小二乘平面拟合,以测量点到拟合平面的距离误差均值来评定系统的测量精度。测量数据如表1所示。距离1 m处靶标平面重建图如图4所示,测量点到拟合平面的距离误差均值为0.70 mm。

表1 不同距离平面测量结果(单位:mm)

Tab.1 Results of plane measurement (Unit: mm)

测量距离	测量范围	误差均值	相对误差
500	240×180	0.30	0.06%
1000	490×360	0.70	0.07%
3000	1 500×1 100	3.41	0.11%
5000	2 600×1 900	6.38	0.13%
8000	4 000×3 000	11.69	0.15%
10000	5 000×3 900	17.85	0.18%

球面测量范围120 mm×120 mm,深度范围950~1 020 mm。重建球面如图5所示。对球面测量点进行最小二乘拟合,计算球面直径,测量数据如表2所示。实验用球面直径为209.36 mm,球面直径测量误差均值为0.51 mm。球面重建模型边缘点误差较大,主要是由于球面扫描过程中光点散射明显,图像光心提取精度降低,影响了测量结果。

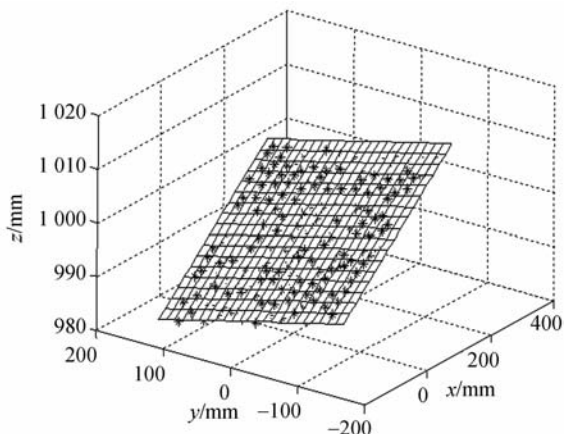


图4 靶标平面重建图

Fig. 4 Reconstructed plane

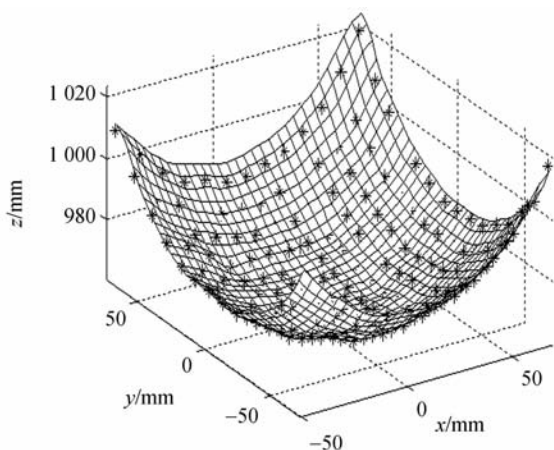


图5 球面重建图

Fig. 5 Reconstructed sphere

表2 球面测量结果(单位:mm)

Tab.2 Results of sphere measurement (Unit: mm)

测量次数	球面直径	绝对误差	相对误差
1	208.08	1.28	0.61%
2	208.78	0.58	0.28%
3	208.48	0.88	0.42%
4	209.22	0.14	0.07%
5	209.44	0.08	0.04%
6	209.66	0.30	0.14%
7	209.08	0.28	0.13%

自由曲面测量范围300 mm×350 mm,深度范围1 420~1 520 mm。自由曲面测量如图6所示。重建自由曲面如图7所示。

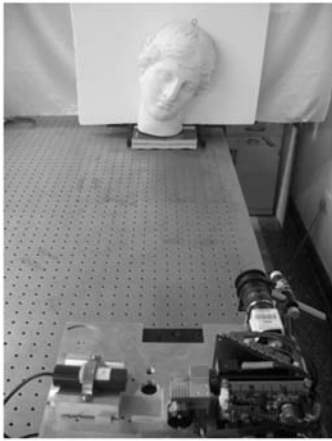


图 6 自由曲面测量

Fig. 6 Free-form surface measurement



图 7 自由曲面重建图

Fig. 7 Reconstructed free-form surface

## 参考文献:

- [1] 田庆国, 葛宝臻, 杜朴, 等. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 84-88.  
TIAN Q G, GE B ZH, DU P, *et al.*. Measurement of human figure size based on laser 3D scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 84-88 (in Chinese).
- [2] 吴斌. 大型物体三维形貌数字化测量关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.  
WU B. *Study on the key technologies of 3D digital measurement of large-scale objects* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [3] 杜颖, 李真, 张国雄. 三维曲面的光学非接触测量技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(3): 1-5.  
DU Y, LI ZH, ZHANG G X. Optical non-contact measurement technology for 3D surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(3): 1-5. (in Chinese)

重建模型在鼻侧及眼部等处有数据缺失, 主要是由于入射光束与测量表面法线夹角过大, 导致光点在测量表面呈彗尾状, 图像光心提取精度降低或失效; 下巴至脖颈区无数据是由于测量盲区所致, 可通过改变测量角度然后进行拼接的方法克服。

## 5 结 论

本文基于三角法原理设计并实现了适用于远距离大尺寸物体形貌测量的双振镜点扫描三维形貌测量系统。利用该系统分别对靶标平面、已知直径的球面及自由曲面进行测量, 实验结果显示, 测量距离为 1 m 时, 测量点到拟合平面的距离误差均值 0.70 mm; 球面直径测量误差均值 0.51 mm; 测量距离为 10 m 时, 测量点到拟合平面的距离误差均值 17.85 mm, 表明系统可适用于远距离大尺寸物体的三维形貌测量。

- [4] 吴兆喜, 黄元庆. 基于光学原理的三维形貌测量技术研究[J]. 光学技术, 2006, 8(32): 654-658.  
WU ZH X, HUANG Y Q. Study on optical methods for 3D shape measurement[J]. *Optical Technique*, 2006, 8(32): 654-658. (in Chinese)
- [5] DAVID A, OLMER G, JORGE A. Laser triangulation for shape acquisition in a 3D scanner[C]. *Proc of IEEE Conference on Electronics, Robotics and Automotive Mechanics, Canadian*, 2006: 563-572.
- [6] GUILHERME J, FRANCA D M, GAZZIRO M A. A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view[C]. *Proc of IEEE Conference on International Conference on Image Processing, Genoa, Italy*, 2005: 741-750.
- [7] WANG G Y, ZHENG B, HOUKES Z. Modeling and calibration of the laser beam-scanning triangulation measurement system[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 40(4): 267-277.
- [8] 张红民, 吕晓华, 占成, 等. 基于 LabVIEW 的随机扫描成像系统高速时间同步方法[J]. 仪器仪表学报,

2007,28(3):404-407.

ZHANG H M, LV X H, ZHAN CH, *et al.*. High-speed synchronization scheme for random scanning microscopy based on LabVIEW programming[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007,28(3):404-407. (in Chinese)

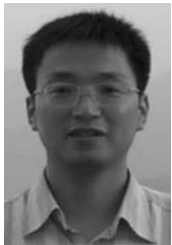
- [9] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22 (11):

1330-1334.

- [10] 刘国忠,王伯雄,史辉,等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7):1124-1129.

LIU G ZH, WANG B X, SHI H, *et al.*. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1124-1129. (in Chinese)

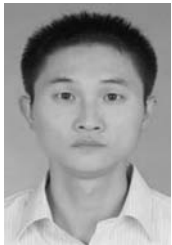
#### 作者简介:



李旭东(1974—),男,陕西蓝田人,副教授,2003年于北京航空航天大学获博士学位,主要从事光电检测及信息处理等方面的研究。E-mail:xdli@buaa.edu.cn



赵慧洁(1966—),女,辽宁人,教授,博士生导师,1994年于哈尔滨工业大学精密仪器系精密仪器专业获博士学位,主要从事光电检测、机器视觉及信息处理等方面的研究。E-mail:hjzhao@buaa.edu.cn



崔磊(1984—),男,黑龙江伊春人,硕士研究生,2006年于燕山大学获得学士学位,主要从事光电检测及三维形貌测量方面的研究。E-mail:cuilei125@163.com



姜宏志(1978—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,2004年于大连交通大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及三维形貌测量等方面的研究。E-mail:jhz1862@126.com

#### ●下期预告

## 过电铸工艺制造金属微细阵列网板技术

胡洋洋,朱 菝,李寒松

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室,江苏 南京 210016)

金属微细阵列网板结构在航空航天、医药卫生等领域均有广泛应用,尺度小于  $10\ \mu\text{m}$  的超小微细阵列网板的制造非常困难。本文采用过电铸工艺方法制造超小尺寸微细阵列网板。建立了过电铸工艺过程电场模型,利用有限元分析技术对过电铸工艺过程进行模拟仿真。选取优化的工艺参数(烘胶  $120\ ^\circ\text{C}/60\ \text{min}$ ,曝光  $3\ 000\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ ,显影  $2\ \text{min}$  等)光刻制作了高度为  $50\ \mu\text{m}$ 、直径为  $50\ \mu\text{m}$  的 AZ EXP 125nXT-10A 光刻胶膜柱结构,以此胶膜结构作为模具进行过电铸工艺实验,并与仿真结果进行对比,证明了有限元仿真的正确性。最终通过过电铸缩孔  $2\ \text{h}$  获得了厚度达  $70\ \mu\text{m}$ 、孔径为  $4\ \mu\text{m}$  的微细阵列网板结构。实验表明,过电铸工艺是一种低廉、安全、可批量生产的制作超小阵列网板的方法。