

# 一种新的 360° 三维测量系统及标定技术

吴庆阳, 曾 增, 张佰春, 吴泽俊, 郑国梁, 李景镇

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** 针对现有的 360° 三维测量系统结构复杂、标定要求高、测量时间长等问题, 提出了一种结构简单、测量速度快的单传感器 360° 三维测量系统和一种操作方便、精度较高的标定方法。该系统由条纹投影系统、摄像机、两个前表面反射镜组成。测量时, 物体点云数据由三部分组成, 前表面通过摄像机获取, 对应于所拍图片的中间区域, 左右两面分别由左右两块前表面反射的平面镜获取, 分别对应图片的左右两区域。先对不含反射镜的系统进行标定, 然后加入两套反射镜, 利用透过式投影屏完成对左右两套系统的二次标定, 获得全局坐标系下的物体三维数据。实验表明, 该系统搭建成本较低, 标定精度较高, 重建速度快, 适合现场标定。

**关键词** 测量; 三维测量; 结构光; 标定

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0404002

## A 360° Three-Dimensional Measurement System and Its Calibration

Wu Qingyang, Zeng Zeng, Zhang Baichun, Wu Zejun, Zheng Guoliang, Li Jingzhen

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

**Abstract** Due to the complex system, high calibration standard and long measuring time in the current multi-sensor three-dimensional (3D) measurement systems, we present a simple high speed single-sensor 360° 3D measurement system and a convenient high-precision calibration method. The system consists of a projector apparatus, a CCD and two front surface mirrors. The point cloud data of the object is obtained from three parts. The front surface is acquired directly from CCD, corresponding to the middle area in the picture. The rest two parts are collected from the two mirrors respectively, corresponding to the left and right areas in the picture. Firstly the system without mirrors is calibrated. Then the right and left systems containing the front surface mirrors can separately be calibrated with a double-sided projector screen. The continuous surface point cloud data under the global coordinates is obtained eventually. The experimental result shows that the proposed system has low cost, high precision and high reconstruction speed, and it is applicable to field calibration.

**Key words** measurement; three-dimensional measurement; structure light; calibration

**OCIS codes** 120.5050; 150.1488; 150.6910; 100.6890; 130.6010

## 1 引 言

在非接触三维传感技术领域, 基于结构光的主动光学测量方法具有速度快、系统柔性好、测量精度高等特点, 被广泛用于机器视觉、逆向工程、实物仿形、生物医药等领域, 具有重要的研究意义和广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。该测量方法通过对待测物体表面投影正弦或者编码光栅图样, 成像系统从不同的角度进行图像采集并传到计算机, 最终由计算机进行处理从而得到物体表面三维点云数据信息。但是这种方法一次只能获取物体某一个视角的三维信息, 要获取被测物体 360° 面形信息, 必须采集不同视角的信息, 并对测量结果进行拼接融合。

收稿日期: 2016-10-31; 收到修改稿日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(61027014)、国家自然科学基金青年基金(11109052)、深圳市科技计划(JCYJ20140418091413574)、深圳市战略性新兴产业发展专项(JCYJ20120614085204873)

作者简介: 吴庆阳(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事三维传感和机器视觉方面的研究。E-mail: wuqy@szu.edu.cn

目前基于结构光的  $360^\circ$  三维测量系统主要分为单目结构和多目结构。传统的单目结构有三种测量方法。第一种方法是贴标记点的方法<sup>[4]</sup>, 先在被测物体上贴一些标记点, 然后在不同视角对物体进行拍摄测量, 最后利用标记点对各部分数据进行拼接, 从而得到完整三维数据, 该方法需要在被测物上贴标记, 拼接受到一定限制。第二种方法不需要贴标记点, 其主要原理是基于迭代就近点(ICP)算法, 该方法对形状比较复杂的物体有效, 但是对于球体等形状比较简单的物体则无法实现拼接<sup>[5-7]</sup>。第三种方法是依靠精密的机械结构来确定不同视角之间的相对位置关系<sup>[8]</sup>, 该方法需借助高精度的机械设备, 成本较高。综上所述, 大多数单目系统都存在缺陷, 且由于只有一个传感器, 必须通过多次采集才能获得不同视角的信息, 所以测量速度相对较慢。相对于单目系统, 多目结构测量系统通过多传感器多视角对物体进行测量, 然后拼接不同面形数据, 得到完整的三维面形数据<sup>[9-12]</sup>, 但是由于有多个传感器, 系统结构较为复杂、成本较高。同时多个传感器之间位置关系的标定也比较复杂, 通常采用特制的立体靶标进行标定, 立体靶标加工精度要求高、制作困难、成本较高。也可采用平面靶标进行标定, 但是标定过程复杂, 同时由于多传感器之间的误差叠加, 对测量结果的影响较大。

针对上述不足, 本文提出了一种基于单传感器的  $360^\circ$  桌面测量系统, 该系统由一个传感器和两个平面反射镜组成, 没有额外的机械装置, 极大地降低了设备成本。同时提出一种新标定方法, 该方法以透过式漫反射屏作为标定板, 通过在标定板两面投影条纹并同时获取标定板两面的图像, 实现相机、投影仪, 相机、投影仪、左侧反射镜, 相机、投影仪、右侧反射镜三个系统之间关系的标定。实验证明, 该系统具有较高可靠性和测量精度。

## 2 系统结构和原理

### 2.1 系统结构

构建的基于单传感器的  $360^\circ$  桌面测量系统结构如图 1 所示。该系统对物体全面形分前表面、左后侧、右后侧三部分测量, 测量系统也分为三部分, 前表面测量由投影仪和摄像机完成, 左后侧表面测量由投影仪、摄像机和左侧反射镜完成, 右后侧表面测量由投影仪、摄像机和右侧反射镜完成。测量前需根据前、左、右三个子系统所处的投影区间对投影仪的投射光栅和平面镜角度进行调整, 确保三个子系统的测量视角能完全覆盖物体整个表面。测量时, 三个子系统分别工作, 首先投影中间条纹, 完成对物体前表面的数据采集; 然后投影左侧条纹, 完成对物体左后表面的数据采集; 最后投影右侧条纹, 完成对右后表面的数据采集。由于摄像机获取的左、右部分是平面反射镜所成的虚像, 而中间部分是直接获取的实像, 所以三部分点云数据并不是基于相同的世界坐标系, 需要对系统进行二次标定, 将三个视角的物体点云数据转换到同一世界坐标系下, 从而得到完整的物体三维面形数据。

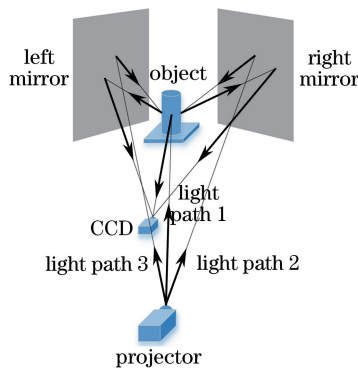


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Sketch of the system structure

### 2.2 前表面系统的标定

前表面测量系统由摄像机和投影仪组成, 对该部分标定结果的好坏会直接影响最终的三维物体点云重建效果。本文采用张正友<sup>[13]</sup>的摄像机标定方法, 获取摄像机的内外参数和畸变系数以及每次移动靶标时的

旋转和平移矩阵,同时对靶标投影水平方向正弦条纹图和格雷编码图,通过摄像机获取的图片求解绝对相位图,最后构建出特征点图像坐标  $(u, v)$  和特征点对应相位值  $\Phi$  与空间三维坐标,即世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  之间的一一对应关系<sup>[14]</sup>:

$$(X_w, Y_w, Z_w) = f(u, v, \Phi), \quad (1)$$

式中  $f$  即为三维重建函数。(1)式可用多项式表示为

$$\begin{cases} X_w = a_1 u^3 + a_2 v^3 + a_3 \Phi^3 + a_4 u^2 v + a_5 u^2 \Phi + a_6 v^2 u + a_7 v^2 \Phi + a_8 \Phi^2 u + a_9 \Phi^2 v + a_{10} u^2 + \\ \quad a_{11} v^2 + a_{12} \Phi^2 + a_{13} uv + a_{14} u\Phi + a_{15} v\Phi + a_{16} uv\Phi + a_{17} u + a_{18} v + a_{19} \Phi + a_{20} \\ Y_w = b_1 u^3 + b_2 v^3 + b_3 \Phi^3 + b_4 u^2 v + b_5 u^2 \Phi + b_6 v^2 u + b_7 v^2 \Phi + b_8 \Phi^2 u + b_9 \Phi^2 v + b_{10} u^2 + \\ \quad b_{11} v^2 + b_{12} \Phi^2 + b_{13} uv + b_{14} u\Phi + b_{15} v\Phi + b_{16} uv\Phi + b_{17} u + b_{18} v + b_{19} \Phi + b_{20} \\ Z_w = c_1 u^3 + c_2 v^3 + c_3 \Phi^3 + c_4 u^2 v + c_5 u^2 \Phi + c_6 v^2 u + c_7 v^2 \Phi + c_8 \Phi^2 u + c_9 \Phi^2 v + c_{10} u^2 + \\ \quad c_{11} v^2 + c_{12} \Phi^2 + c_{13} uv + c_{14} u\Phi + c_{15} v\Phi + c_{16} uv\Phi + c_{17} u + c_{18} v + c_{19} \Phi + c_{20} \end{cases} \quad (2)$$

系统标定参数可以用矩阵  $M$  表示:

$$M = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_{20} \\ b_1 & b_2 & b_3 & \cdots & b_{20} \\ c_1 & c_2 & c_3 & \cdots & c_{20} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$M$  是一个  $3 \times 20$  的矩阵,假如有  $n$  个特征点参与系统标定,为保证测量精度,要求  $n$  远大于待求解未知参数的个数,即  $n \gg 20$ ,则有

$$A = \begin{bmatrix} u_1^3 & u_2^3 & u_3^3 & \cdots & u_n^3 \\ v_1^3 & v_2^3 & v_3^3 & \cdots & v_n^3 \\ \Phi_1^3 & \Phi_2^3 & \Phi_3^3 & \cdots & \Phi_n^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 & \cdots & \Phi_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} X_{w1} & X_{w2} & X_{w3} & \cdots & X_{wn} \\ Y_{w1} & Y_{w2} & Y_{w3} & \cdots & Y_{wn} \\ Z_{w1} & Z_{w2} & Z_{w3} & \cdots & Z_{wn} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$A$  表示与特征点的图像坐标、相位信息相关的矩阵,大小为  $20 \times n$ ,  $B$  表示特征点的三维信息矩阵,大小为  $3 \times n$ ,可得

$$B = M \times A. \quad (6)$$

对物体所在区间进行多次采样并结合张正友标定方法可以获取矩阵  $A$ 、 $B$ ,求解矩阵方程得到  $M$ ,即完成系统三维重建公式中系数的标定。

### 2.3 左、右系统标定原理

完成前表面系统的标定之后,加入两块前表面反射镜,构成左右两套测量系统,其标定原理相同。标定过程采用的靶标是一块透过式的投影屏,通过更改投影仪控制程序,单独投影中间区域(靶标所处的区域),如图 2(a)所示光路,摄像机拍摄到的图像分成三个区域,中间区域是靶标前表面所成的像,左右两个区域投影光线透过投影屏,漫反射到平面镜,最终被摄像机获取并记录。

如图 2(b)所示,点  $A$  是靶标前表面任意点,对应图像上像素坐标  $(u, v)$ ,单独投影中间靶标区域,  $A_1$ 、 $A_2$  分别是点  $A$  在左、右平面镜中所成的虚像,其像素坐标分别为  $(u_1, v_1)$ 、 $(u_2, v_2)$ 。实验通过对中间靶标区间投影水平、竖直方向相移图和格雷编码图,解算得到水平和竖直方向的绝对相位图,特征点  $A(u, v)$  对应的水平和竖直相位为  $\Phi_h(u, v)$ 、 $\Phi_v(u, v)$ ,分别在图像左、右侧区间通过相位插值的方法确定与  $\Phi_h(u, v)$  和  $\Phi_v(u, v)$  相等的点的像素坐标,左侧插值查找得到  $A_1(u_1, v_1)$ ,右侧插值查找得到  $A_2(u_2, v_2)$ 。

左、右系统标定原理相同,对左系统进行分析,更改投影仪投影区间,单独对左侧平面镜区域投影,水平和竖直方向相移图和格雷编码如图 3 所示,求解绝对相位图。同样已知给定靶标上的特征点  $A(u, v)$ ,以及

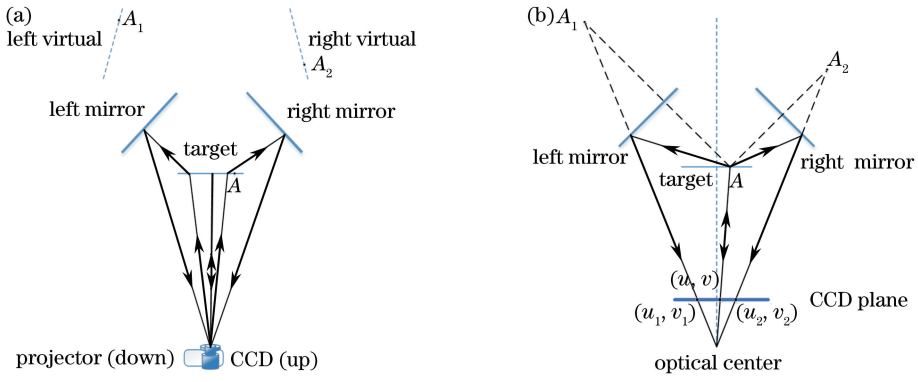


图 2 (a)二次标定投影中间区域;(b)像点到 CCD 的成像过程

Fig. 2 (a) Middle area of projection for second calibration; (b) imaging process on CCD

求解得到的相位值  $\Phi'_h(u, v)$ 、 $\Phi'_v(u, v)$ ，在左侧图像区间通过相位差值获取与点  $A(u, v)$  具有相同水平和竖直相位的特征点坐标  $A'_1(u'_1, v'_1)$ 。

理论上，所求取的  $A_1(u_1, v_1)$  和  $A'_1(u'_1, v'_1)$  的像素坐标相同，但由于实验误差两组对应点会产生偏差，定义阈值  $\Delta x$  ( $\Delta x$  取 0.5)，若满足

$$(u_1 - u'_1)^2 + (v_1 - v'_1)^2 \leq \Delta x^2, \quad (7)$$

则满足误差条件，两组点为有效点，反之两组点误差过大，剔除不做拟合计算。结合两组对应坐标，最终得到左侧修正后的像素坐标为  $[(u_1 + u'_1)/2, (v_1 + v'_1)/2]$ ，其对应的左侧水平相位值  $\Phi_L = \Phi'_h(u, v)$ ，点  $A(u, v)$  所对应的三维空间坐标为  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 。由上述三次多项式拟合关系可得到  $[(u_1 + u'_1)/2, (v_1 + v'_1)/2]$ ， $\Phi_L$  与  $(X_w, Y_w, Z_w)$  之间的对应函数关系为

$$(X_w, Y_w, Z_w) = f_L [(u_1 + u'_1)/2, (v_1 + v'_1)/2, \Phi_L]. \quad (8)$$

同理可得右侧系统像素坐标  $[(u_2 + u'_2)/2, (v_2 + v'_2)/2]$ ， $\Phi_R$  与  $(X_w, Y_w, Z_w)$  之间的对应函数关系为

$$(X_w, Y_w, Z_w) = f_R [(u_2 + u'_2)/2, (v_2 + v'_2)/2, \Phi_R]. \quad (9)$$

多次测量得到多组实验数据，依次代入(9)式解出  $f_L$ 、 $f_R$  以及  $f$  三组对应关系式，通过对待测量物体投影格雷编码图和相移图计算，将三个视角的点云数据在单个摄像机的条件下融合成一个完整自由面形。

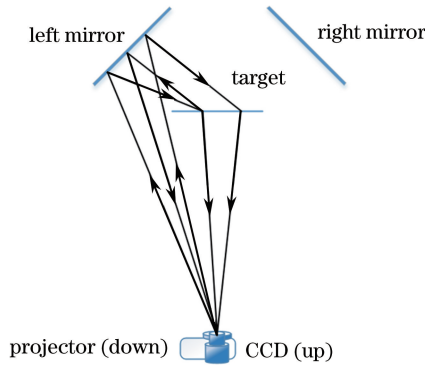


图 3 二次标定投影左侧区域

Fig. 3 Left area of projection for second calibration

### 3 实验及结果

实验以雕像为待测量物体模型，具体的实验装置如图 4 所示，其中投影仪型号为三星 SP-P410M，摄像机为 Point Grey 公司出品的 FL2G-13S2M-C 工业相机，采用 Computar 公司的镜头，焦距为 8 mm。

实验步骤如下。

1) 计算待测物体所在空间位置，调整投影仪以及摄像头位置，调整光圈大小，保证被测物体的前后表面都能够清晰成像，标定摄像机和整套系统，系统标定采用水平相位。

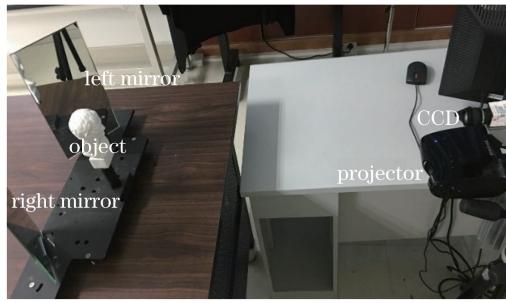


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

2) 首先对靶标前表面分别投影水平方向、竖直方向两组条纹,并用摄像机记录下条纹图像;对图像进行处理可得到靶标水平方向和竖直方向绝对相位图;根据中间区域的像素点坐标  $A(u, v)$  及其对应的水平绝对相位值,利用(1)式求出这些点对应的世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ;根据水平和竖直绝对相位图基于等相位的方式分别在左、右侧区域查找与点  $A$  具有相等水平和竖直相位的点  $A_1(u_1, v_1)$ 、 $A_2(u_2, v_2)$ 。图 5(a)为透过式投影靶标,图 5(b)为投影条纹到中间区域获取的图像,图 6(a)、(b)分别表示水平和竖直绝对相位,图 6(c)、(d)表示中间点以及根据中间点在左、右侧区域查找到的点。

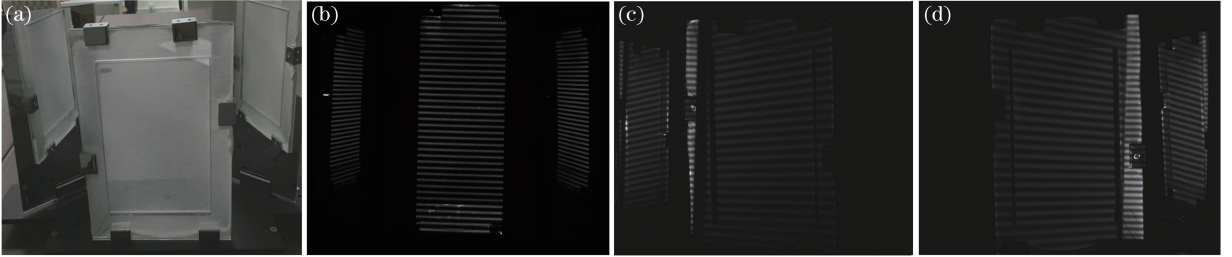


图 5 (a)透过式投影屏;(b)投影中间获取的图像;(c)投影左侧获取的图像;(d)投影右侧获取的图像

Fig. 5 (a) Transmitting projector screen; (b) image of projection in the middle area; (c) image of projection in the left area; (d) image of projection in the right area

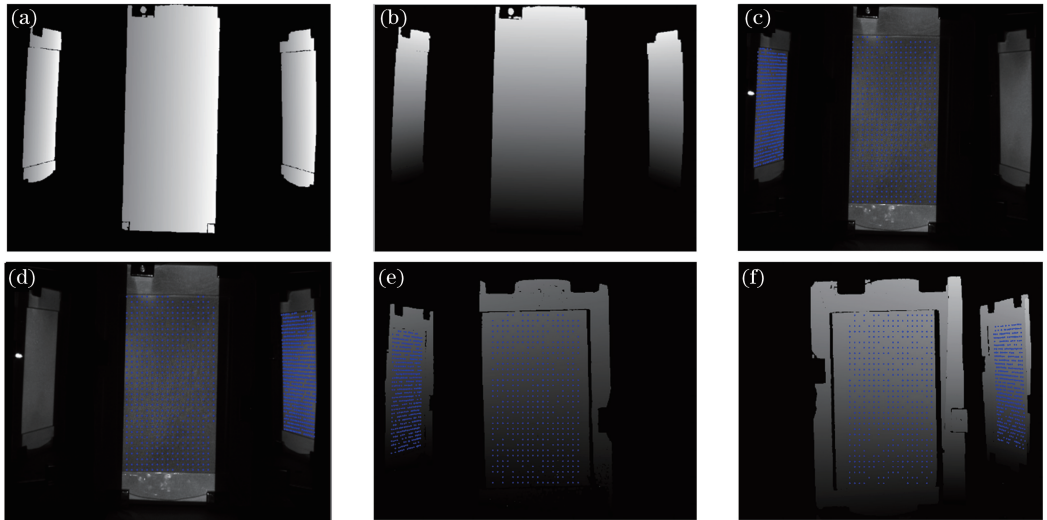


图 6 (a)水平绝对相位;(b)竖直绝对相位;(c)右区间找到的对应等相位点;(d)左区间找到的对应等相位点;  
(e)单独投影左侧基于中间点找到的左侧对应点;(f)单独投影右侧基于中间点查找到的右侧对应点

Fig. 6 (a) Absolute phase in horizontal direction; (b) absolute phase in vertical direction; (c) points with equal phase in right area; (d) points with equal phase in left area; (e) points with equal phase in left area for projection in the left area alone; (f) points with equal phase in right area for projection in the right area alone

3) 向左侧投影水平条纹和竖直条纹到靶标后表面(通过平面镜反射),并用摄像机记录图片,解算绝对

相位以获取单独投影左侧时的水平和竖直绝对相位值,根据中间点  $A(u, v)$  在左侧插值查找对应点  $A'_1(u'_1, v'_1)$ 。图 5(c)为投影左侧获取的图片,图 6(e)为单独投影左侧基于中间点查找到的左侧对应点。

4) 通过(4)式修正特征点坐标并求得最终左侧特征点像素坐标以及对应的水平相位值  $\Phi_L$ ,结合对应中间点的世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  得到拟合关系式  $f_L$ ,同理得  $f_R$ ,图 5(d)为单独投影右侧获取的图片,图 6(f)为投影右侧基于中间点查找到的右侧对应点。

5) 结合三组拟合关系式  $f_L, f, f_R$  对物体进行三维重建,数据导入 Geomagic Studio,得到最终物体的完整三维重构图,图 7(a)、(b)分别为从左侧和右侧单独对物体投影的条纹图,图 8(a)为待测量物体的实物图,图 8(b)~(d)所示为完整面形的三个视图。

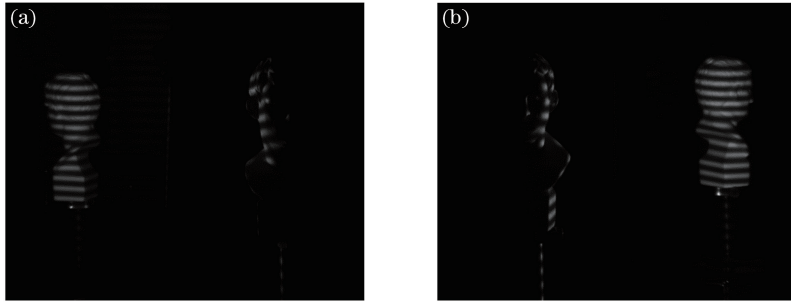


图 7 (a)左侧对物体投影条纹图;(b)右侧对物体投影条纹图

Fig. 7 (a) Projecting fringe pattern in left side; (b) projecting fringe pattern in right side

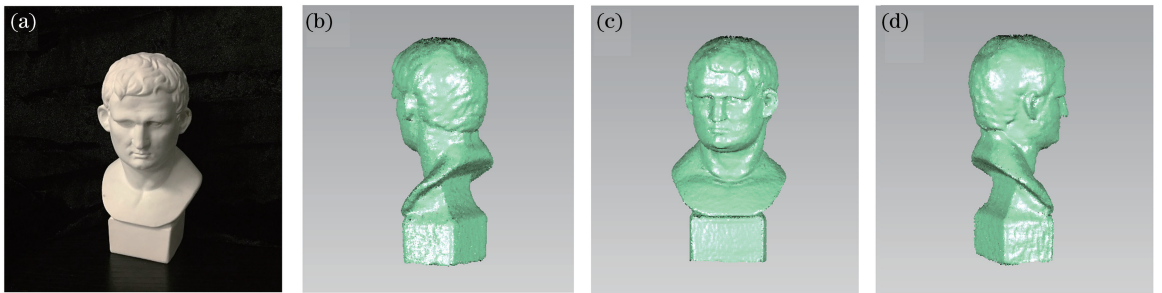


图 8 (a)实物图;(b)左面三维数据;(c)中间面三维数据;(d)右面三维数据

Fig. 8 (a) Picture of object; (b) 3D data of left side; (c) 3D data of front surface; (d) 3D data of right side

#### 4 系统误差评估

系统的误差评估过程是对标定块进行测量,得到标定块的三维数据,并分析标定块表面标准偏差和两侧面夹角。图 9(a)为标定块实物图,图 9(b)是标定块的三维重建图,图 9(c)是标定块取一条线得到的结果,将标定块一个面和相邻两个面的数据导入 Imageware 软件,对重建的标定块表面和面夹角进行评估分析。图 10为重建的标定块一个面相对于理想平面的点云数据标准偏差的颜色梯度示意图和标准偏差的详细数

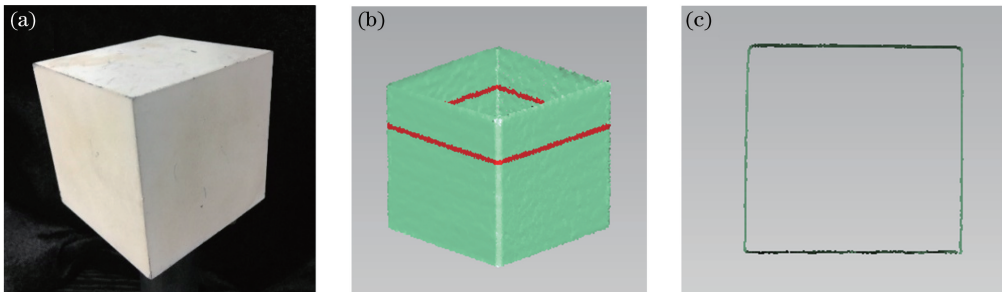


图 9 (a)标定块实物图;(b)标定块三维点云数据;(c)标定块取一条线的示意图

Fig. 9 (a) Calibration part; (b) 3D point cloud data of calibration part; (c) schematic of a line removed from calibration part

据。图 11 为两个面的夹角示意图,从数据可看出,重建面的标准偏差约为 0.05 mm,两个面的夹角为 89.99°,能够满足工业生产的需求。

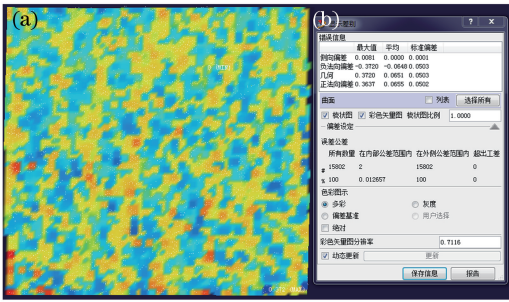


图 10 (a)面点云数据梯度图和(b)误差数据

Fig. 10 (a) Point color gradient image and (b) error of reconstructed surface



图 11 两侧面的夹角

Fig. 11 Angle of intersection between two planes

## 5 结 论

构建了一种简单可行的单传感器桌面 360°三维测量系统,并提出了一种简单高效的系统标定方法。采用透过式双面投影屏代替专用三维靶标,利用相位匹配的方法,完成了不同视角对应点的匹配,建立像素点坐标和相应相位值到三维坐标点的映射关系,最终实现了被测物体 360°三维面形的测量。

## 参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Jia Bo, Su Xianyu, Guo Lürong. 3D measurement for turbine blade profile by light knife[J]. Chinese J Lasers, 1992, 19(4): 271-275.  
贾 波, 苏显渝, 郭履容. 采用激光光刀的叶片三维测量方法[J]. 中国激光, 1992, 19(4): 271-275.
- [3] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [4] Xie Guanghui, Sun Junhua, Yang Zhen. 3D data registration method for vision measurement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(7): 877-881.  
谢光辉, 孙军华, 杨 珍. 一种自由曲面视觉测量三维数据拼接算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(7): 877-881.
- [5] Tu Zhiqiang, Zhang Ke, Yang Chenglong. Improved ICP registration in 3-D model reconstruction[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(1): 97-101.  
涂志强, 张 珂, 杨成龙. 三维模型重建中点云 ICP 拼接算法的改进[J]. 焊接学报, 2013, 34(1): 97-101.
- [6] Yu Yahui, Kuang Liqun, Han Xie. Reconstruction of three-dimensional objects based on Kinect camera and improved ICP[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(10): 3574-3578.  
于雅慧, 况立群, 韩 燮. 基于 Kinect 相机和改进 ICP 的三维物体重建[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(10): 3574-3578.
- [7] Guo Qingda, Quan Yanming, Yu Guangping, et al. Improved binocular stereo vision calibration based on ICP algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1215003.  
郭清达, 全燕鸣, 于广平, 等. 基于 ICP 算法的双目标定改进方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1215003.
- [8] Wu Qingyang, Li Jingzhen, Su Xianyu. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1224-1228.  
吴庆阳, 李景镇, 苏显渝. 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): 1224-1228.
- [9] Zhang Weiguang, Zhao Hong. 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. 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.
- [10] Zou Xiaoping. Research on computer-assistant shoes measurement: system calibration and 3D reconstruction [D].

Chengdu: Sichuan University, 2003.

邹小平. 脚型计算机辅助测量: 系统校准与三维重建[D]. 成都: 四川大学, 2003.

- [11] Li Xinhua, Cheng Taojun, Ma Chun. Research of foot parameters measurement based on line structured light and plantar scanning[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(18): 260-264.  
李新华, 程涛军, 马 春. 基于线结构光和足底扫描的足部参数测量研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(18): 260-264.
- [12] Wu Mengqi, Li Zhongwei, Zhong Kai, *et al.* Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 32(2): 0215002.  
伍梦琦, 李中伟, 钟 凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 32(2): 0215002.
- [13] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [14] Huang J H, Wu Q Y. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52: 115-122.