

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210821

多视角沙姆成像的高精度结构光三维测量方法*

刘勇, 张国锋, 胡鹏宇, 邓惠文, 杨树明

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要:传统结构光测量方法在测量高反射率和复杂结构表面存在诸多挑战,且测量精度受到测量视场的限制。本文提出了一种基于结构光投影和多视角沙姆成像的高精度标定及三维测量方法,充分利用系统的景深范围。提出结构光多目视觉测量模型,将投影仪坐标系作为系统测量坐标系,通过建立“三维点-投影图像点-4个相机图像点”的对应关系对系统进行一体化标定,然后利用多视图几何成像约束,通过计算最小二乘解融合多个视角的观测信息,提高三维数据的计算精度。实验结果表明,所提方法和系统可以对高反射率和遮挡表面进行准确测量,测量精度达到 $5\ \mu\text{m}$,大大优于传统结构光测量方法。

关键词:多视图几何;沙姆成像;相移条纹投影;三维测量;系统标定

中图分类号: TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

High-precision structured-light 3D measurement method based on multi-view Scheimpflug imaging

Liu Yong, Zhang Guofeng, Hu Pengyu, Deng Huiwen, Yang Shuming

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Traditional structured-light (SL) measurement methods face challenges in measuring surface with high reflectivity and complex structure. The measurement accuracy is limited by the measurement field of view. This article proposes a high-precision calibration and 3D measurement method based on structured-light projection and multi-view Scheimpflug imaging, which can make full use of the depth range of the system. A novel structured-light multi-view stereo measurement model is proposed. The projector coordinate system is used as the measurement coordinate system, and the multi-view structured-light system is calibrated in an integrated way by establishing the corresponding relationship of "3D point-projection image point-4 camera image points". With the use of multi-view geometric imaging constraints, the observation information of multiple perspectives is fused by calculating the least square solution to improve the calculation accuracy of 3D data. Experimental results show that the proposed method and system can accurately measure high reflectivity and occluded surfaces, with a measurement accuracy of $5\ \mu\text{m}$, which is substantially superior to the traditional SL methods.

Keywords: multi-view geometry; Scheimpflug imaging; phase-shifting fringe projection; 3D measurement; system calibration

0 引言

结构光三维测量技术将一组带有时间或空间编码信息的图案投影到被测物体表面,并利用相机采集被物体表面变形的结构光图像,通过相应的解码算法得到包含被测物形貌信息的解码图像,然后基于结构光系统测量模型重建出被测物的三维形貌数据,测量效率高、准确性

好,目前已被广泛应用于航空航天、汽车工业、半导体以及生物医学等领域^[1]。

在过去几十年中,学者们先后提出了多种结构光编码方法,包括随机编码方法^[2]、二进制编码方法^[3]和正弦相位编码方法^[4]等。其中,条纹投影轮廓术(fringe projection profilometry, FPP)^[5]利用正弦相位编码的高空间分辨率的特点,将正弦条纹图案投影到被测对象表面,通过采集变形条纹并解码相位信息,最后恢复三维轮廓

收稿日期:2022-12-02 Received Date: 2022-12-02

* 基金项目:国家自然科学基金(52225507)、大连理工大学辽宁省微纳米技术及系统重点实验室开放课题基金项目资助

数据,可以实现高精度、高分辨率的三维轮廓测量。根据求解相位方式的不同,FPP技术可以分为傅里叶变换轮廓术^[6]和相移轮廓术^[7]。由于FPP技术使用了反正切函数来解调相位,因此得到的相位分布在 $-\pi \sim \pi$ 之间,需要通过相位展开算法来对包裹的相位进行处理得到全场连续的相位分布。常用的相位展开方法主要包括空间相位展开方法^[8]和时间相位展开方法^[9]。空间相位展开方法只能通过检查周围像素和去除相位周期跳变来生成相对相位图,会导致相位模糊,无法对多个孤立表面进行测量。以多频法^[10]和格雷码^[11]辅助法为代表的空间相位展开方法可以获得复杂场景的绝对相位分布,对环境光照和表面反射率引起的相位噪声具有更强的鲁棒性,因此在工业测量中得到了更多的应用。

然而,传统结构光测量技术在测量高反射率表面和遮挡表面时仍然存在挑战,被测物表面局部过曝光和曝光不足的区域以及遮挡盲区会造成数据缺失^[12]。为了解决该问题,Zhang等^[13]提出了高动态范围扫描方法,通过合成不同曝光时间下捕获的条纹图像序列,生成图像质量良好的条纹。但缺乏定量计算的方法来确定所需要的曝光时间,且为了获得高对比度的条纹,需要采集大量的条纹图像,效率较低。尽管在后续研究中,文献^[14-16]对上述方法进行改进以提高效率,但这类方法仍然面临条纹对比度和测量鲁棒性差的问题。自适应条纹投影方法^[17]通过相机和投影仪之间的坐标匹配关系以及投影条纹图案灰度的变化来解决投影亮度与采集图像之间的对应关系。该方法可以自适应地计算和调整投影条纹图案的灰度值,使相机采集最佳的调制条纹图案,然而条纹质量很容易受到匹配误差的影响。

近年来,学者们提出了结构光双目视觉方法来解决高反光表面的三维测量问题。Feng等^[18]使用双目相机从两个不同的方向测量反光表面,通过散斑图像的匹配,找到相机图像中的过曝光区域,然后通过融合两个视角的观测信息,解决局部区域过饱和的问题。Liu等^[19]提出了一种单-双目结合的结构光视觉测量方法,使用双目相机构成两个不同视角的单目投影仪系统,通过图像分割技术识别过曝光区域,然后基于双目坐标变换和高动态范围成像技术对观测信息进行融合。Wang等^[20]提出了双目结构光融合方法,将双目结构光系统看作两个单目结构光系统,构成不同的测量视角,用一个系统的数据来补充另一个系统因过曝光或遮挡而丢失的数据,实现两个系统测量数据的融合,并利用预定的刚性变换矩阵来提高融合区域的融合质量。然而,对于双目结构光测量系统,大多数三维点同时被左相机、右相机和投影光机观测到,而以上将双目结构光系统作为两个独立的单目结构光系统进行数据融合的方法,未考虑公共约束,从而限制了测量精度。此外,对于具有复杂结构的高反射率表面,双目结构光系统仍然存在数据缺失。

为实现对复杂高反射率表面的高精度三维测量,本文提出了一种基于结构光投影和多视角沙姆成像的高精度标定及三维测量方法,充分利用系统的景深范围。在此基础上,提出结构光多目视觉测量模型,将投影仪坐标系作为系统测量坐标系,通过建立“三维点-投影图像点-4个相机图像点”的对应关系对系统进行一体化标定,然后利用多视图几何成像约束,通过计算最小二乘解融合多个视角的观测信息,提高三维数据的计算精度。

1 测量原理

1.1 相移条纹投影

标准的 N 步相移轮廓术能够消除来自环境光和表面磁性的干扰,对系统的随机噪声具有一定的抑制作用,因此可以提供最高的测量分辨率和精度,是结构光测量方法中使用最多的一种方法。在标准的 N 步相移轮廓术中,将 N 幅相移条纹图案依次投影到物体表面,相机捕获的变形条纹图案的强度分布可以表示为:

$$I_i(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + 2\pi i/N) \quad (1)$$

式中: i 为相移次数, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$; (x, y) 表示二维像素点, $I_i(x, y)$ 表示采集到的第 i 幅图像的强度; $A(x, y)$ 表示背景光强, $B(x, y)$ 表示调制光强,与条纹对比度和材料表面的反射率有关; $\varphi(x, y)$ 为待求解的相位值,可以通过式(2)求解:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \times \sin(2\pi i/N)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \times \cos(2\pi i/N)}\right) \quad (2)$$

式中: $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 、 $\varphi(x, y)$ 为未知量,至少需要3幅相移图像进行相位的求解。由于使用了反正切函数,得到的相位值 $\varphi(x, y)$ 分布于 $[-\pi, \pi]$,为了消除包裹相位图中的 2π 不连续,需要对包裹相位进行相位展开。

在众多的相位展开算法当中,多频外差相位展开算法已被证明是最可靠的方法之一,通常使用3种频率的相位函数($f_1 > f_2 > f_3$)进行外差合成,由 f_1 和 f_2 合成 f_{12} ,由 f_2 和 f_3 合成 f_{23} ,最终由 f_{12} 和 f_{23} 合成 f_{123} ,通过选择适当的条纹数目,使最终的合成频率 f_{123} 在全场的周期数为1,然后再通过式(3)和(4)依次对 f_{12} 和 f_1 的包裹相位进行展开。

$$\varphi_{12}(x) = \varphi_{12}(x) + 2\pi \times \text{Round}\left(\frac{\varphi_{123}(x) \times f_{12}/f_{123} - \varphi_{12}(x)}{2\pi}\right) \quad (3)$$

$$\phi_1(x) = \varphi_1(x) + 2\pi \times \text{Round}\left(\frac{\phi_{12}(x) \times f_1 / f_{12} - \varphi_1(x)}{2\pi}\right) \quad (4)$$

式中: $\varphi_1(x)$ 、 $\varphi_2(x)$ 和 $\varphi_3(x)$ 分别为频率 f_1 、 f_2 和 f_3 的包裹相位函数, $\varphi_{12}(x)$ 合成频率 f_{12} 的相位函数, $\phi_{12}(x)$ 为 $\varphi_{12}(x)$ 的相位展开函数, $\phi_1(x)$ 为 $\varphi_1(x)$ 的相位展开函数, Round 表示四舍五入取整。

1.2 沙姆成像模型

由于景深范围的限制,一般相机在倾斜拍摄被测物体时,被测物体只有极小部分能够清晰成像,特别是随着放大率的增大,使物体清晰成像的范围将明显减小。沙姆相机又称为偏轴相机,其镜头的光学主平面和成像平面呈一定角度配置,即镜头的光轴不垂直于成像平面,从而使其在倾斜拍摄被测物体时有效保持景深范围。当像面倾斜于光轴的时候,与像面共轭的清晰聚焦的物平面也倾斜于光轴,如图1所示,其共轭关系可以描述为:

$$p_o \times \tan\theta = p_i \times \tan\beta \quad (5)$$

式中: θ 表示成像平面与透镜主平面的倾角, β 表示物平面与透镜主平面的倾角, p_o 为物距, p_i 为像距。

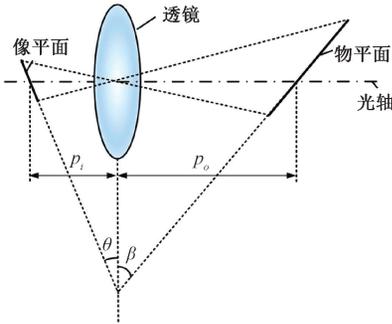


图1 沙姆成像原理

Fig. 1 Scheimpflug imaging principle

为了描述沙姆相机结构,本文在正轴针孔相机模型的基础上进行改进,建立如图2所示的坐标系。根据张正友相机标定法,正轴针孔相机模型可以描述为:

$$Z_c [u_c \ v_c \ 1]^T = K_c \times [R_w^c \ | \ t_w^c] \times [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad (6)$$

$$K_c = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_x \\ 0 & f_y & u_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: K_c 为相机的投影矩阵, f_x 、 f_y 代表像距, u_x 、 u_y 表示理想图像坐标系原点在像素坐标系下的坐标; R_w^c 和 t_w^c 分别为从世界坐标系到相机坐标系的旋转和平移变换矩阵。

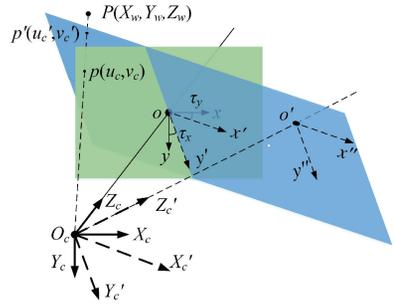


图2 沙姆成像数学模型

Fig. 2 Mathematical model of Scheimpflug imaging

对于沙姆相机,光轴绕 X_c 轴和 Y_c 轴的倾斜角 τ_x 和 τ_y 将引入新的投影变换和旋转变换,可以通过式(8)描述为:

$$Z_c [u'_c \ v'_c \ 1]^T = K_c \times K_\tau \times R_\tau \times [R_w^c \ | \ t_w^c] \times [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad (8)$$

式中: K_τ 为倾斜角 τ_x 和 τ_y 引入的投影矩阵,可表示为:

$$K_\tau = \begin{bmatrix} \cos(\tau_y) \cos(\tau_x) & 0 & \sin(\tau_y) \cos(\tau_x) \\ 0 & \cos(\tau_y) \cos(\tau_x) & -\sin(\tau_x) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

R_τ 为倾斜角 τ_x 和 τ_y 引入的旋转矩阵,可表示为:

$$R_\tau = \begin{bmatrix} \cos(\tau_y) & \sin(\tau_y) \sin(\tau_x) & -\sin(\tau_y) \cos(\tau_x) \\ 0 & \cos(\tau_x) & \sin(\tau_x) \\ \sin(\tau_y) & -\cos(\tau_y) \sin(\tau_x) & \cos(\tau_y) \cos(\tau_x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

此外,相机还存在成像畸变,可以通过中心位置的泰勒级数展开来表示:

$$\begin{cases} x_d = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_d = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{cases} \quad (11)$$

式中: (x, y) 为理想坐标, (x_d, y_d) 为带畸变的实际坐标, $r^2 = x^2 + y^2$; k_1 、 k_2 和 k_3 为待求解的畸变参数。至此,建立了单个沙姆相机的成像模型,需要标定的参数主要包括:外参数 R_w^c 和 t_w^c ,内参数 K_c 、 τ_x 和 τ_y ,以及畸变参数 k_1 、 k_2 和 k_3 。

1.3 系统测量模型

在已有的方法中,双目结构光系统被看作两个单目结构光系统,根据每个相机的绝对相位图,利用结构光测量模型重建三维坐标,可以描述为:

$$Z_c [u_c \ v_c \ 1]^T = K_c \times [R_w^c \ | \ t_w^c] \times [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad (12)$$

$$Z_p [u_p \ v_p \ 1]^T = K_p \times [R_w^p \ | \ t_w^p] \times [X_w \ Y_w \ Z_w \ 1]^T \quad (13)$$

$$u_p = \Phi / (2\pi f) \quad (14)$$

式中: K_c 为相机的投影矩阵, K_p 为投影仪的投影矩阵, R_w^c 和 t_w^c 分别为世界坐标系到相机坐标系的旋转和平移矩阵, R_w^p 和 t_w^p 分别为世界坐标系到投影仪坐标系的旋转和平移矩阵, Φ 是像素点 (u_c, v_c) 处的相位值, f 是相移条纹的周期数。

然而该模型不适用于结构光多目视觉系统。一方面, 该模型将三维世界坐标作为测量坐标, 而世界坐标系是建立在标定板上的。在系统标定过程中, 三维世界坐标系在随着标定板位置的变化而变化, 因此变换矩阵 R_w^c , t_w^c , R_w^p 和 t_w^p 也在变化, 而选择标定板在某个位置下的变换矩阵去求解式 (12) ~ (14) 将会产生随机误差。另一方面, 对于结构光多目视觉系统, 大部分的三维点是由多视角相机和投影仪同时观测的, 为了更好地利用多视图观测信息, 可以在传统的结构光测量模型的基础上增加另一台相机的成像约束, 以进一步提高测量精度和鲁棒性。

本文提出了一种结构光多目视觉测量模型, 如图 3 所示, 将投影仪坐标系作为系统测量坐标系, 通过对每个视角下的相机和投影仪进行立体标定, 将所有视角的三维坐标计算均统一到投影仪坐标系下。

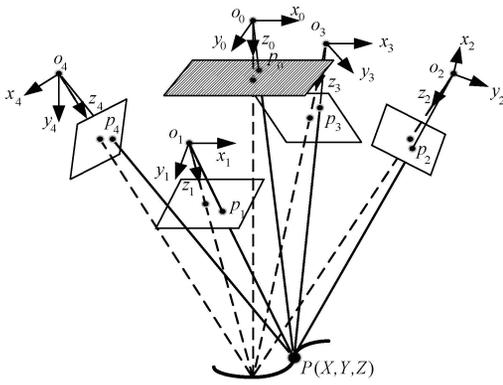


图3 相机坐标系和投影仪坐标系关系

Fig. 3 Relationship between camera coordinate system and projector coordinate system

$$Z_c^i \begin{bmatrix} u_c^i & v_c^i & 1 \end{bmatrix}^T = K_c^i \times [R_p^{c(i)} | t_p^{c(i)}] \times [X_p \ Y_p \ Z_p \ 1]^T \quad (15)$$

$$Z_p \begin{bmatrix} u_p & v_p & 1 \end{bmatrix}^T = K_p \times [X_p \ Y_p \ Z_p \ 1]^T \quad (16)$$

$$u_p = \Phi / (2\pi f) \quad (17)$$

式中: K_c^i 为第 i 个相机的投影矩阵, $R_p^{c(i)}$ 和 $t_p^{c(i)}$ 分别为投影仪坐标系到第 i 个相机坐标系的旋转和平移矩阵。经过系统标定后, 可以得到 K_c^i , K_p , $R_p^{c(i)}$ 和 $t_p^{c(i)}$ 。对于给定像素点 (u_c, v_c) , 通过联立式 (15) ~ (17) 构成的超定方程组, 利用多视图几何约束计算最小二乘解, 可以得到三维点 (X_p, Y_p, Z_p) 。

2 系统标定

本文开发了一套结构光多目视觉三维测量系统, 如图 4 所示, 系统由 4 个工业 CMOS 相机 (型号: 大恒 MER-502-79U3M) 和一个 DLP 投影仪 (型号: Texas Instruments DLP4500) 组成, 相机分辨率为 $2\ 448 \times 2\ 048$ 像素, 镜头焦距为 25 mm, 工作距离为 225 mm, DLP 投影仪的本征分辨率为 $912 \times 1\ 140$, 投影视场大小为 $130\ \text{mm} \times 80\ \text{mm}$ 。DLP 投影仪的光轴垂直于被测物平台, 用以投射条纹图像, 光线经过投影仪镜头照射在被测物体上, 产生经物体表面高度调制的变形条纹图形。4 个沙姆相机从不同角度采集被测物表面的条纹图像, 每个相机的光轴与投影仪光轴之间的夹角约为 30° , 根据式 (5), 设计所需的像面沙姆角约为 3.67° 。使用的沙姆结构使得相机景深范围与被测物平台充分重合, 可有效解决小视场高放大率情况下的景深过小的问题, 提高三维测量精度。

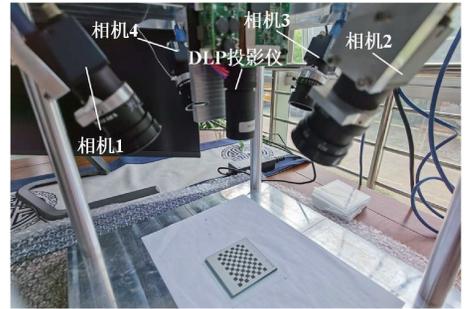


图4 结构光多目视觉测量系统

Fig. 4 Structured light measurement system with multi-camera vision

基于本文提出的结构光多目视觉测量模型, 对搭建的系统进行了一体化标定。使用标定板对投影光机参数进行标定时, 需要准确计算标定板角点处的水平和竖直方向的绝对相位值。而棋盘格标定板在黑白相间的角点处的灰度变化比较剧烈, 导致条纹图像在角点处产生偏移, 从而对角点处的相位求解引入较大误差, 因此棋盘格标定板不适用于投影光机的参数标定。本文采用黑底白圆的高精度非对称圆形标定板对投影光机参数进行标定, 标定过程如图 5 所示。

具体操作步骤为:

1) 控制 4 个沙姆相机各采集一幅圆点标定板的图像, 然后控制 DLP 投影仪将 1 组水平和垂直分布的三频四步相移条纹图像投影到圆点标定板上, 4 个沙姆相机同步采集标定板条纹图像;

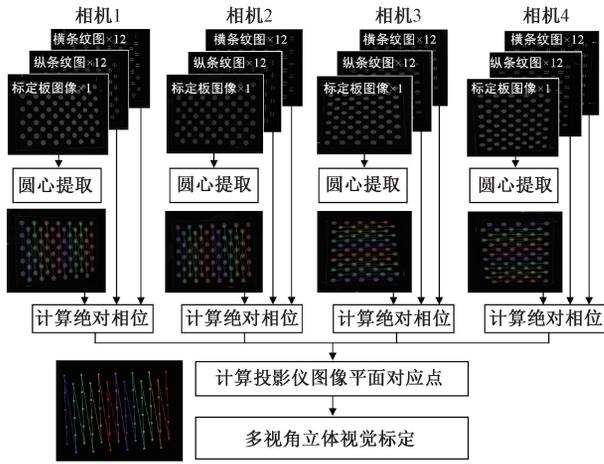


图5 系统标定流程

Fig. 5 System calibration flow

2) 利用每个相机采集的第1幅标定板图像,提取并记录图像中所有圆形标志点中心的亚像素坐标;

3) 利用每个相机采集到的纵横方向的多频相移条纹图像,使用多步相移算法和多频外差原理计算出垂直和水平方向的绝对相位值,然后根据每个方向的绝对相位值确定对应的投影条纹图像中的1条垂直线 u_p^i 和水平线 v_p^i ,两条线的交点即对应相机图像中的某个角点坐标 (u_c^i, v_c^i) ,可以表示为:

$$u_p^i = \frac{\phi_v(u_c^i, v_c^i)}{2\pi f} \times w \quad (18)$$

$$v_p^i = \frac{\phi_h(u_c^i, v_c^i)}{2\pi f} \times h$$

式中: $\phi_v(u_c^i, v_c^i)$ 和 $\phi_h(u_c^i, v_c^i)$ 分别为第 i 个相机图像中,角点 (u_c^i, v_c^i) 水平和垂直方向的相位值, f 为条纹数, w 和 h 分别为条纹图案的宽度和高度。由于误差的存在,分别采用4个相机图像计算得到的投影条纹图像角点坐标 (u_p^i, v_p^i) 不会完全相等,因此选4个角点的重心点作为最终的唯一对应点;

4) 通过将标定板移动到至少3个不同的位置,重复步骤1)~3),获得多组“三维点-投影图像点-4个相机图像点”的对应组合,基于立体视觉标定方法得到每个标定板位置下的 R_w^c, t_w^c, R_w^p 和 t_w^p ,然后根据空间变换关系:

$$\begin{bmatrix} R_p^c & t_p^c \\ \mathbf{0}^T & I \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_w^p & t_w^p \\ \mathbf{0}^T & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_w^c & t_w^c \\ \mathbf{0}^T & I \end{bmatrix} \quad (19)$$

联立不同标定板位置下的式(19),通过计算最小二乘解即可得到 R_p^c 和 t_p^c ,完成结构光多目立体视觉系统的坐标系标定。

根据上述步骤,共采集了10组不同位置下的标定板图像,每组图像包括1幅标定板图像、12幅垂直条纹图像以及12幅水平条纹图像。利用三维点到二维点的对应关系,计算4个相机个投影仪的内外参数,然后使用求得的内参数对三维点进行重投影,重投影误差如图6所示,从图6中可以看出,4个相机标定的重投影误差最大为0.1 pixel,平均误差为0.05 pixel,投影仪标定的重投影误差最大为0.13 pixel,平均误差为0.08 pixel,说明该标定精度较高。

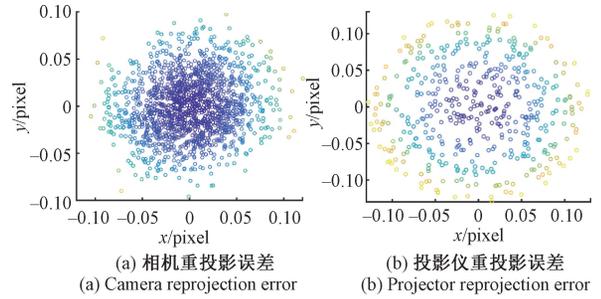


图6 系统标定结果

Fig. 6 System calibration results

3 实验分析

3.1 有效性测试

为了验证本文所提出的方法在测量高反射率和遮挡表面方面的有效性,实验对1个高反光铝合金零件进行了测量。首先,控制DLP投影仪向被测物表面投影多频相移条纹图案(条纹频率分别为70、65和61),同步触发4个工业CMOS相机采集被测物图像。图7(a)显示了4个相机分别采集到的第1幅条纹图像,从图中可以看出,4个相机采集到的图像中存在局部过曝光区域,且由于视角的不同,过曝光的区域位置不同。

然后,利用每个相机采集到的条纹图像,采用三频四步相移算法计算被测物表面的绝对相位分布,并通过计算和判断背景阈值,去除相位图中过曝光的区域,得到4个相机视角下的相位图分别如图7(b)所示。最后,利用得到的4个视角的绝对相位图,根据本文提出的结构光多目视觉测量模型,逐像素计算三维坐标,得到被测物的三维轮廓点云数据如图7(c)所示,图7(d)显示了表面重建结果。

由图7可知,通过融合多个视角的观测信息,有效地弥补了单一视角下被测物表面过曝光引起的数据丢失问题,得到了被测物完整的三维轮廓数据,重建质量较高,

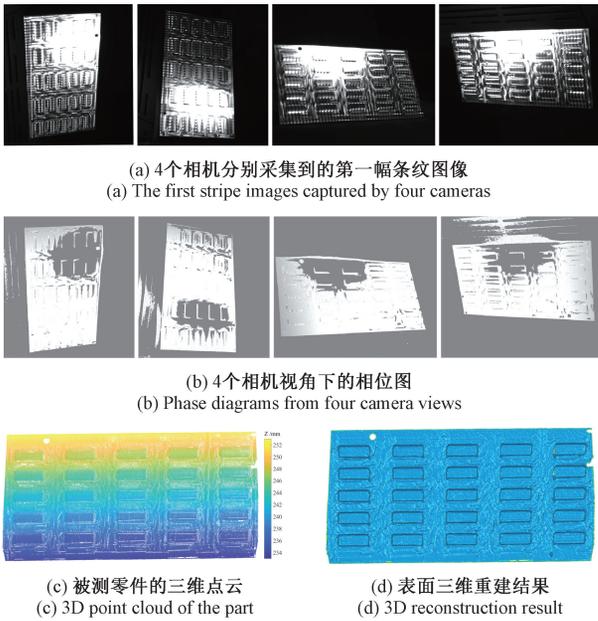


图7 高反光零件测量结果

Fig. 7 Measurement result of highly reflective part

细节分辨率良好。实验结果表明,本文所提出的方法可以对高反射率和遮挡表面进行准确测量。

3.2 精度测试

为了测试本文提出的结构光多目视觉测量模型的测量精度,参考 VDI/VDE-2634 标准,该标准是由德国照相测量和遥感协会的近距离摄影工作组与 VDI/VDE 协会共同提出的测量领域的权威标准。根据此标准,本文采用球体空间测量误差对系统精度进行评估,对球 A 直径 9.993 2 mm、球 B 直径 10.005 5 mm、球心距为 29.955 0 mm 的标准陶瓷球进行测量,测量结果如图 8 所示。

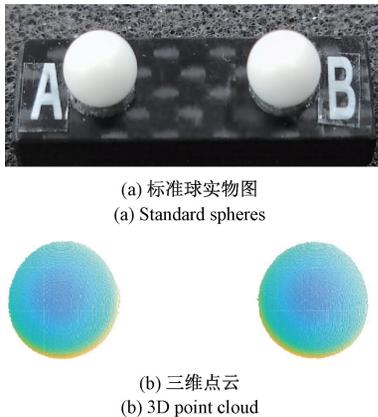


图8 标准球测量结果

Fig. 8 Measurement results of standard spheres

分别使用传统结构光测量模型以及本文提出的多视角结构光测量模型,从不同的角度和位置测量了 10 次。利用生成的三维点云对两个陶瓷球进行拟合,可以得到两个陶瓷球的球径和球心距离。以上两种方法测得的球 A 直径、球 B 直径和球心距结果对比如图 9 所示。从图 9 中可以看出,采用本文方法的测量结果更接近真实值。进一步计算得到其平均绝对误差(mean absolute error, MAE)和均方根误差(root mean square error, RMSE)结果如表 1 所示。表中数据显示,本文提出的多视角结构光测量模型的测量精度可以达到 0.005 mm,比传统方法的测量精度更高。测量精度的提升主要是因为引入了多个斜置沙姆相机的多视图几何约束,提高了三维数据的求解精度。

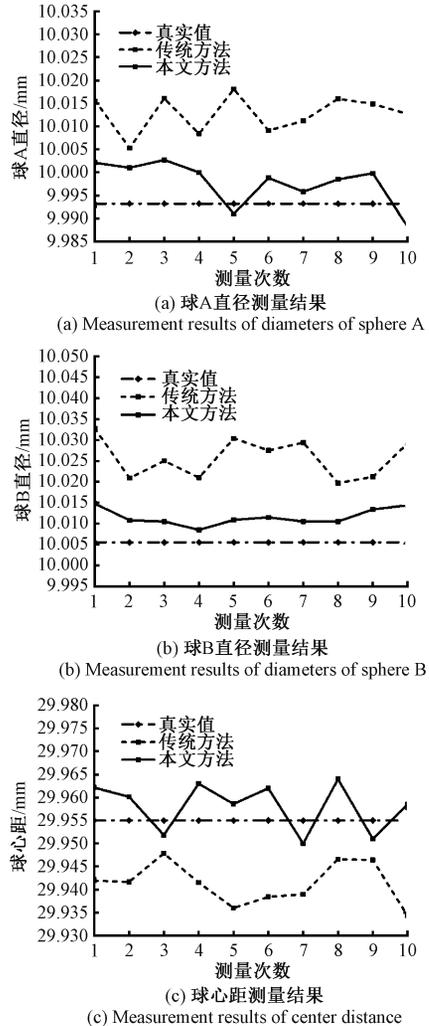


图9 标准球测量结果对比

Fig. 9 Comparison of standard spheres measurement results

表1 本文方法和传统方法的测量精度对比

Table 1 Accuracy comparison between the proposed method and the conventional method

方法		传统结构光 测量模型	多视角结构光 测量模型
球 A 直径	MAE	0.021	0.006
	RMSE	0.022	0.006
球 B 直径	MAE	0.020	0.006
	RMSE	0.021	0.006
球心距	MAE	0.014	0.003
	RMSE	0.015	0.004
平均值	MAE	0.018	0.005
	RMSE	0.019	0.005

4 结 论

本文提出了一种基于结构光投影和多视角沙姆成像的高精度标定及三维测量方法,采用投影仪垂直投影和多视角沙姆成像的方案,充分利用系统的景深范围。在此基础上,提出了结构光多目视觉测量模型,将投影仪坐标系作为系统测量坐标系,通过建立“三维点-投影图像点-4个相机图像点”的对应关系实现对系统内外参数的一体化标定,然后利用多视图几何成像约束,通过计算最小二乘解融合多个视角的观测信息,实现了被测物表面完整形貌测量。相比传统的单目结构光视觉测量方法,本文方法利用多个视角进行互补测量,有效解决了测量高反射率物体时过曝光导致的局部数据缺失,以及测量复杂结构表面时的表面遮挡导致的数据缺失,提高了物体表面形貌测量数据的完整性。另一方面,相比传统的多目结构光视觉测量方法,本文方法充分考虑了多个视角的公共约束,提高了三维测量精度。

参考文献

- [1] 李茂月, 马康盛, 王飞, 等. 基于结构光在机测量的叶片点云预处理方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 55-66.
LI M Y, MA K SH, WANG F, et al. Research on the preprocessing method of blade point cloud based on structured light on-machine measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 55-66.
- [2] 唐苏明, 张旭, 屠大维. 伪随机编码结构光系统的标定[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 1354-1362.
TANG S M, ZHANG X, TU D W. Calibration of structured light system using pseudo-random coding [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(6): 1354-1362.
- [3] 于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍, 等. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2007(12): 2152-2157.
YU X Y, WU H B, YIN L P, et al. 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(12): 2152-2157.
- [4] 邓吉, 李健, 封皓, 等. 编码条纹投影技术的阶次校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 250-258.
DENG J, LI J, FENG H, et al. Fringe order correction algorithm for code-based fringe projection profilometry [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 250-258.
- [5] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106193.
- [6] SU X, CHEN W. Fourier transform profilometry: A review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [7] ZUO C, FENG S, HUANG L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [8] ZHAO M, HUANG L, ZHANG Q, et al. Quality-guided phase unwrapping technique: Comparison of quality maps and guiding strategies [J]. Applied Optics, 2011, 50(33): 6214-6224.
- [9] ZHANG S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: A review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 28-37.
- [10] 马孟超, 邓华夏, 张进, 等. 快速离焦投影三维测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2564-2572.
MA M CH, DENG H X, ZHANG J, et al. High speed 3D shape measurement using projector defocusing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2564-2572.
- [11] 关丛荣, 于晓洋, 吴海滨, 等. RGB颜色格雷码结构光三维测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2007(4): 663-666.
GUAN C R, YU X Y, WU H B, et al. RGB color Gray code based structured-light 3D measurement

technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007(4): 663-666.

- [12] 詹瑜, 胡丹, 刘凯. 面向高反光区域的自适应结构光[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 115-123.
ZHAN Y, HU D, LIU K. Adaptive structured light for high-reflective areas [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 115-123.
- [13] ZHANG S, YAU S T. High dynamic range scanning technique [J]. Optical Engineering, 2009, 48(3): 033604.
- [14] ZHAO H, LIANG X, DIAO X, et al. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 54(1): 170-174.
- [15] 张宗华, 于瑾, 高楠, 等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 104-116.
ZHANG Z H, YU J, GAO N, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces [J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 104-116.
- [16] SURESH V, WANG Y, LI B. High-dynamic-range 3D shape measurement utilizing the transitioning state of digital micromirror device [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 176-181.
- [17] CHEN C, GAO N, WANG X, et al. Adaptive projection intensity adjustment for avoiding saturation in three-dimensional shape measurement [J]. Optics Communications, 2018, 410: 694-702.
- [18] FENG S J, CHEN Q, ZUO C, et al. Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces [J]. Optics Communications, 2017, 382: 18-27.
- [19] LIU G, LIU X, FENG Q. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity[J]. Applied Optics, 2011, 50(23): 4557-4565.
- [20] WANG D, HE K, SUI C, et al. Highly reflective surface measurement based on dual stereo monocular structured light system fusion[J]. IEEE Press, 2019: 1762-1768.

作者简介



刘勇, 2002年于西安交通大学获得学士学位, 2013年于西安交通大学获得硕士学位, 现为西安交通大学博士研究生, 主要研究方向为结构光三维测量技术。

E-mail: lyon@fieldopt.com

Liu Yong received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2002 and 2013, respectively. He is currently a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. His main research interest is structured-light 3D measurement technology.



张国锋 (通信作者), 2013年于西安工业大学获得学士学位, 2015年于西安交通大学获得硕士学位, 2020年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学助理教授, 主要研究方向为微纳测量与机器视觉。

E-mail: guofeng.zhang@xjtu.edu.cn

Zhang Guofeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Technological University in 2013, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2015 and 2020. He is currently an assistant professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include micro/nano measurement and machine vision.



杨树明, 2002年于西安交通大学获得学士学位, 2005年于西安交通大学获得硕士学位, 2009年于英国哈德斯菲尔德大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为微纳制造与测量。

E-mail: shuming.yang@mail.xjtu.edu.cn

Yang Shuming received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Xi'an Jiaotong University in 2002 and 2005, and Ph. D. degree from University of Huddersfield, UK in 2009. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include micro/nano fabrication and measurement.