

基于多视方程的高反光物体表面三维形貌测量

陈超文¹, 薛俊鹏^{1,2}, 张启灿^{1*}, 王亚军¹, 向卓龙¹

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065;

²四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065

摘要 双目结构光三维形貌测量技术在测量高反光物体的过程中,左右图像中对应物体表面的不同位置处出现过度曝光的现象,致使对应区域的相位数据无效。首先将投影系统作为反向相机并与双目系统共同组成多视系统,然后对物体表面的每一点进行多视系统匹配,接着通过调制度来判断每一像素对应相位的有效性,舍弃过曝光图像区域的像素以获得双视共线方程,最后由整体多视方程同时实现三维点云重建。该方法能够有效解决坐标系转换、多系统重建结果的数据冗余和融合误差等问题。实验结果表明,所提方法在 500 mm×700 mm 大小的视场范围内能够很好地对高反光物体进行完整的三维形貌测量。

关键词 测量; 三维形貌测量; 条纹投影; 高反光表面; 多视方程

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2212002

Three-Dimensional Shape Measurement of Shiny Surface Based on Multi-View Equation

Chen Chaowen¹, Xue Junpeng^{1,2}, Zhang Qican^{1*}, Wang Yajun¹, Xiang Zhuolong¹

¹College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

²School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract In the process of measuring highly reflective objects using binocular structured light 3D shape measurement technology, overexposure occurs at different positions of the corresponding object surface in the left and right images, resulting in invalid phase data in the corresponding area. First, the projection system as the reverse camera, and the multiple visual geometry system is composed of the binocular system and the projection system. Second, the more on every point on the surface of the object system matching. Then, the validity of the phase corresponding to each pixel is judged by modulation, and the two-view collinear equation is obtained by discarding the pixels in the over-exposed image region. Finally, the 3D point cloud reconstruction is realized by global multi-view equation. This method can effectively solve the problems of coordinate system transformation, data redundancy and fusion error of multi-system reconstruction results. The experimental results show that the proposed method can effectively measure the 3D shape of highly reflective objects in the field of view of 500 mm×700 mm.

Key words measurement; three-dimensional shape measurement; fringe projection; shiny surface; multi-view equation

OCIS codes 120.5050; 110.6880; 100.6890; 110.4190

1 引言

条纹投影轮廓术(Fringe Projection Profilometry,

FPP)因其具有非接触、速度快和精度高等优点而广泛应用于机器视觉、航空航天、工业检测、生物医疗和游戏娱乐等领域^[1-4],该技术的基本测量过程是投

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-08; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)、教育部“春晖计划”合作科研项目(2020703-8)、四川省重点研发项目(2020YFG0077)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

影一幅或一组条纹到物体上,首先由相机获取受物体高度调制的条纹,然后通过算法来解调出相位信息,最后由相位和高度之间的映射关系以及世界坐标系与图像坐标系之间的关系重建物体的三维信息^[5]。然而,对于反射率变化较大的物体(有局部光泽或高对比度),三维轮廓的测量仍然具有挑战性^[6],采集到的条纹图会因为物体的局部高反光而出现像素饱和,导致三维面形的重建误差较大或重建失败。

近年来,许多学者对于如何利用光学方法直接对高反光物体表面的三维重建进行了深入的研究并提出了一些解决方案。彭广泽等^[7]运用卷积神经网络对条纹图的过曝光区域进行修复,能够得到较好的条纹图,但是训练过程比较耗时。Chen 等^[8]引入了两个线偏振片并分别用于入射光路和反射光路,当它们的偏振方向垂直时,可以消除高反光,该方法虽然避免了饱和,但会降低整个场景图像的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)。Zhang 等^[9]提出了一种条纹图像融合方法,投影一组条纹图后对不同曝光时间下拍摄的多帧条纹图进行融合,即为图像中每个同名像素点选择不饱和且强度值最高的像素点参与融合,最终融合成高质量的条纹图。为了收集高质量的条纹图,根据相机收集到的图像自适应地改变投影仪的投射亮度也是研究人员提出的一种解决方法^[10-12]。

Feng 等^[13]使用双相机条纹投影系统来测量反光物体,利用不同角度的两个相机不太可能同时饱和的条件来互相补偿整个测量场景。Liu 等^[14]提出了一种单双目结构光结合的方法,用来获取高反光物体表面的三维形貌。由于高反光区域中数据的准确性高度依赖于照明和视角,为此在单双目结构光结合的方法中引入图像分割技术,可以确定系统中适合准确重建缺失点的单目系统,并使用该系统进行对应的三维重建。由于单目系统和双目系统重建的坐标系不一致,所以单双目结构光结合的方法需要进行坐标转换和数据融合。Wang 等^[15]采用双立体单目系统融合方法将双目结构光系统看作两个由相机-投影仪组成的单目系统,该系统能够重建出大面积反光物体的三维形貌,但为了匹配两个单目系统的非融合区域并使结果达到单目系统的融合精度,需要预先得到融合区域的刚性变换矩阵,这增加了系统的复杂性。

本文利用条纹投影双目系统来获取条纹图像,将投影仪看作一个反向相机,作为多视系统的某一

“目”,由此组成一个多视几何系统。对于获取到的任意一个饱和像素点,当求解其对应的物面三维坐标时,至少可以列出两个共线方程;当双相机所获取的对应像素点都是非饱和时,可以列出三个共线方程来求解其三维坐标。该方法计算得到的三维数据无需坐标转换和数据融合,也不用预先计算刚性变换矩阵。实验结果显示所提方法能够很好地重建高反光物体,并能有效扩大重建的区域。

2 基本原理

2.1 相移算法与饱和相位误差的计算

相移算法因其具有速度快和精度高的优势而广泛用于光学计量^[16]。当正弦条纹图案被投射到三维物体上时,成像系统所获取的变形条纹图像可以表示为

$$I_n(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos \left[\phi(u, v) + \frac{2\pi n}{N} \right], \quad (1)$$

式中: (u, v) 表示像素坐标; $A(u, v)$ 表示光场背景强度; $B(u, v)$ 表示调制强度; n 表示条纹相移的步数, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$,其中 N 表示条纹相移的总步数; $\phi(u, v)$ 表示由物体高度调制的相位值,可表示为

$$\phi(u, v) = -\arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u, v) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u, v) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right)} \right]. \quad (2)$$

$\phi(u, v)$ 值被(2)式截断在 $-\pi \sim \pi$ 之间。为了获得连续的相位信息,需要采用相位展开算法来消除 2π 相位的不连续性。本文中,选择多频时间相位展开算法^[17]来获得对应的展开相位。

此外,条纹的调制度^[18]可表示为

$$M(u, v) = \frac{2}{N} \left\{ \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u, v) \sin \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(u, v) \cos \left(\frac{2\pi n}{N} \right) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (3)$$

条纹的调制度在物体表面反射率和表面形貌突变的区域变化很大,在物体表面反射率低的区域变化较小。这些区域中的相位信息不可靠,因此可以使用调制度作为相位信息可靠性的依据。

对于一个 8 bit 的灰度成像系统,其可记录图像的光强范围为 $0 \sim 255$ 。在给定曝光时间的条件下,成像系统会将光反射过强区域的强度值量化记录为饱和值 255。对于 N 步相移,图像的光强值可以描

述为

$$I'_{c,N}(u,v) = \begin{cases} I_{c,N}(u,v), & I_{c,N}(u,v) \leq 255 \\ 255, & I_{c,N}(u,v) > 255 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $I'_{c,N}(u,v)$ 表示由相机拍摄的光强； $I_{c,N}(u,v)$ 表示实际光强。由饱和引起的强度误差可表示为

$$\Delta I_{c,N}(u,v) = \begin{cases} 0, & I_{c,N}(u,v) \leq 255 \\ I_{c,N}(u,v) - 255, & I_{c,N}(u,v) > 255 \end{cases} \quad (5)$$

由饱和引起的相位误差^[19]可表示为

$$\Delta\varphi(u,v) = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \sin[\varphi(u,v) - 2\pi n/N]}{B(u,v)N/2} \Delta I_{c,N}(u,v) \quad (6)$$

由(6)式可以看出,增加相移步数 N 可以逐渐减小相位误差,然而投影过多的相移图案会降低测量效率。

2.2 反射机理对结构光系统的影响

物体表面的反射光一般由漫反射光和镜面反射光组成,如图 1 所示。漫反射是指物体反射光具有亮度各向同性,分布于反射光的各个方向。镜面反射包括镜面尖峰和镜面反射叶瓣,镜面尖峰主要集中在反射光方向,遵循反射定理,镜面尖峰方向与入射光的方向相对于表面法线对称分布;镜面反射叶瓣主要分布在镜面反射光线周围的一定角度范围内^[20]。光线 L 入射到物体表面点 O ,入射光线与法线之间的夹角为 i ,反射光线为 R 。与反射光线夹角为 θ 的观察方向 V 可观察到漫反射和镜面反射叶瓣。

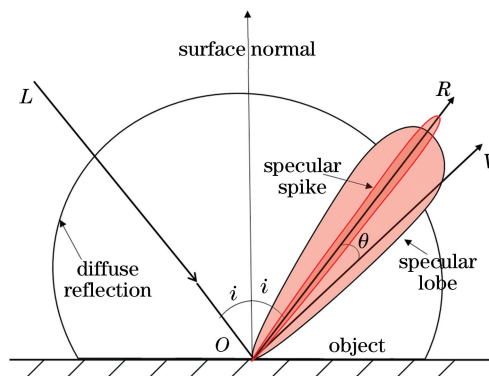


图 1 物体表面的光照模型

Fig. 1 Illumination model of surface of object

由物体表面的反射光强随表面点位置和成像记录方向的变化关系可知,当单一相机的成像角度与物体表面的镜面反射范围重合时,所得到的条纹图像会出现饱和。因此,为了避免图像饱和,可以移动相机位置或者调整物品的摆放姿态。但是,不同高反射物体的镜面反射方向不同,既定的测量系统不可能适应所有高反射物体,测量过程中面对不同物体来改变相机位置的过程极其繁琐甚至不可行。另外,当一个高反射物体在不同的方向上有多个镜面反射时,即便调整相机角度也难以同时避免所有像素发生饱和。

因此,为了解决这类问题,本文建立了图 2 的条纹投影双目系统。由于镜面反射仅在较小的观察角度内传播,所以同一个测量点在不同角度的两个摄像机像面上不可能同时饱和。一旦拍摄得到由双相机成像的条纹图像,就能保证获得不含同时饱和的条纹图案,最终能够计算出镜面反射局部区域的正确相位值。

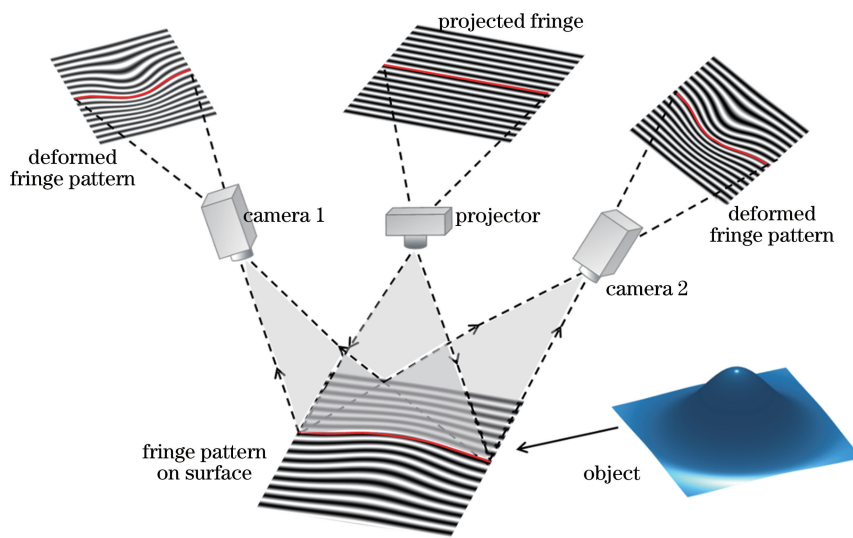


图 2 条纹投影双目系统的测量原理图

Fig. 2 Measuring principle diagram of fringe projection binocular system

2.3 结构光系统的标定

相机是一个针孔模型,物体上的一点 $W(x^w, y^w, z^w)$ 与其在相机的对应点 $q(u^c, v^c)$ 之间的关系可以表示为

$$s^c [u^c \ v^c \ 1]^T = A^c [R^c \ t^c] [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T = P^c [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T, \quad (7)$$

式中: s^c 表示一个尺度因子; P^c 表示 3×4 的相机投影矩阵,系统中左右相机的投影矩阵分别为 P^l 和 P^r ; A^c 表示 3×3 的摄像机内参数矩阵; R^c 和 t^c 分别表示 3×3 和 1×3 的旋转和平移矩阵,它们为摄像机外参数矩阵。

投影仪可以看作一个反向相机^[21]。空间点 $W(x^w, y^w, z^w)$ 与其在投影仪图像传感器上的对应点 (u^p, v^p) 可以表示为

$$s^p [u^p \ v^p \ 1]^T = A^p [R^p \ t^p] [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T = P^p [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T, \quad (8)$$

式中: P^p 表示投影仪的投影矩阵。

首先,采用 Zhang^[22] 提出的方法以及改进后的相机标定方法^[23] 可以得到左右相机的内部参数,由于投影仪不能与相机一样捕捉图像,因此需要将相机得到的图像转为投影仪图像,再依靠相位来建立相机像素与投影仪像素之间的联系。由投影仪投影正交正弦光栅,经过相位解算后,投影仪坐标系和相机坐标系在投影光栅区域中的每个像素点都具有唯一的水平和垂直分布相位值,利用相位相等关系可以构建相机与投影仪之间的亚像素对应关系,表达式为

$$u^p = \frac{\Phi_v(u^c, v^c)}{2\pi} T_v, \quad (9)$$

$$v^p = \frac{\Phi_h(u^c, v^c)}{2\pi} T_h, \quad (10)$$

式中: Φ_v 和 Φ_h 分别表示沿垂直和水平方向的绝对相位图; T_v 和 T_h 分别表示沿垂直和水平方向的条纹周期。

在多视系统的标定过程中,由空间点 W 分别对双相机和投影仪进行标定,可以得到空间点 W 到左相机坐标系的外参 R_l 和 t_l ,同理得到右相机坐标系的外参 R_r 和 t_r 以及投影仪坐标系的外参 R_p 和 t_p 。设空间点 W 在世界坐标系、左相机坐标系、右相机坐标系和投影仪坐标系下的非齐次坐标分别为 W^w 、 W^l 、 W^r 和 W^p ,可分别表示为

$$\begin{cases} W^w = R_l \times W^l + t_l \\ W^w = R_r \times W^r + t_r \\ W^w = R_p \times W^p + t_p \end{cases} \quad (11)$$

选择左相机为坐标系,消去(11)式中的 W^w ,可得

$$\begin{cases} W^l = R_l^{-1} R_r W^r + R_l^{-1} \times (t_r - t_l) = R_{lr} \times W^r + t_{lr} \\ W^l = R_l^{-1} R_p W^p + R_l^{-1} \times (t_p - t_l) = R_{lp} \times W^p + t_{lp} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: R_{lr} 和 t_{lr} 分别表示左右相机坐标系之间的旋转矩阵和平移向量; R_{lp} 和 t_{lp} 分别表示左相机坐标系和投影仪坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。

结构光系统标定好后,可以获得(7)式中左右相机的投影矩阵 P^l 和 P^r ,以及(8)式中投影仪的投影矩阵 P^p 。

2.4 三维重建算法的原理

计算相机所拍摄到的变形条纹的相位以及调制度后,对调制度取阈值后进行二值化处理,所得结果作为模板来判断相机所获得的条纹信息是否具有有效性(2 表示有效,0 表示无效)。将两个相机和一个投影仪看作一个三视系统,如图 3 所示。当将条纹投影到光滑物体表面上时,在左相机的视角下, Q_1 处于镜面反射区域,其在左相机成像面上的像出现饱和,说明该区域的相位计算错误,模板值为 0,表明此区域与右相机匹配失败。 Q_1 在右相机的视角下呈漫反射,右相机上该区域的相位计算正确,模板值为 2(表示该区域有效),可用于指导其与投影仪正确匹配并进行正确的三维重建。 Q_3 在右相机成像面上的对应区域饱和,但在左相机的视角下得到的相位信息有效,所以左相机与投影仪能在该区域正确匹配重建。物体表面的 Q_2 在两个相机的视角下均呈漫反射,说明其在左右相机中的相位均有效,可由三个视角匹配重建。模板可表示为

$$M_{\text{mask}} = \begin{cases} 2, & M_{\min} \leq M(u, v) \leq M_{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: M_{\min} 和 M_{\max} 分别表示调制度阈值的最小值和最大值,由调制度的直方图分布来确定。

三维重建算法的重建流程如下。

1) 投影和拍摄条纹后分别计算两个相机记录条纹图的绝对相位和模板值。

2) 由左相机上模板值为 2 的相位来查找右相机上的匹配点,正确匹配后将左右相机的模板值更改为 1,并由(9)式和(10)式计算投影仪图像的亚像素坐标。

3) 完成步骤 2) 的匹配后,分别找出左右相机中模板值仍为 2 的像素,接着计算投影仪上的亚像素坐标,并将其模板值设置为 1。

4) 完成步骤 2) 和步骤 3) 后获得了多视系统的

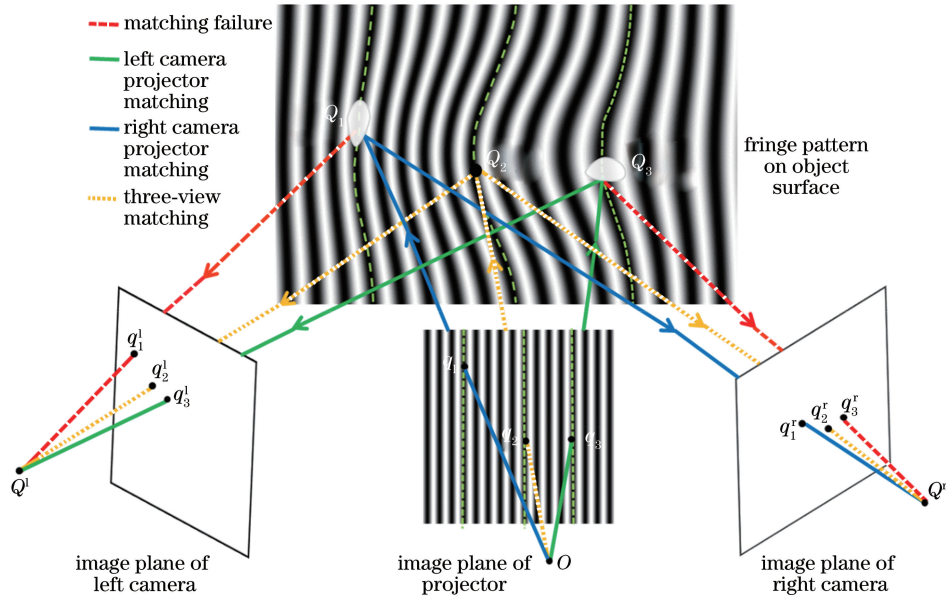


图 3 三视匹配的几何示意图

Fig. 3 Geometric diagram of three-view matching

对应匹配关系,空间点 W 的三维坐标可表示为

$$s^l [u^l \ v^l \ 1]^T \cdot m^l = P^l [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T \cdot m^l, \quad (14)$$

$$s^p [u^p \ v^p \ 1]^T = P^p [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T, \quad (15)$$

$$s^r [u^r \ v^r \ 1]^T \cdot m^r = P^r [x^w \ y^w \ z^w \ 1]^T \cdot m^r, \quad (16)$$

$$B\tilde{W} = \begin{bmatrix} u^l (P_3^l)^T m^l - (P_1^l)^T m^l \\ v^l (P_3^l)^T m^l - (P_2^l)^T m^l \\ u^p (P_3^p)^T - (P_1^p)^T \\ u^p (P_3^p)^T - (P_2^p)^T \\ u^r (P_3^r)^T m^r - (P_1^r)^T m^r \\ u^r (P_3^r)^T m^r - (P_2^r)^T m^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (17)$$

式中: m^l 和 m^r 分别表示左右相机变化后的模板值; \tilde{W} 表示空间点 W 的其次坐标; P_j 表示第 j 行投影矩阵, $j=1, 2, 3$ 。左图像中过曝光区域的 m^l 值为 0, 该区域的三维数据可以由 (15) 式和 (16) 式组成的双视共线方程来计算。同理, 右图像中过曝光区域的三维数据可以由式 (14) 式和 (15) 式来计算。整个三维重建过程可以由 (14)~(16) 式的整体多视方程同时计算, 最终表示为 (17) 式的其次坐标形式。空间点 W 可以通过矩阵 B 的奇异值分解来确定, 即矩阵 B 的最小奇异值所对应的解。

所提方法在系统标定的过程中, 预先选择了左相机所建立的世界坐标系, 所有三维数据均由多视系统同时匹配重建, 因此避免了三维数据的坐标转换和不同视角下三维数据的融合。

传统双目立体视觉系统可由 (14) 式和 (16) 式的联立求得被测点的三维坐标, 但受系统误差的影响,

由两式确定的两条射线并不相交, 需要利用最小二乘方法来计算该被测点的三维坐标^[24]。本文将投影仪与双相机组成多视系统, 由三条射线确定了 6 个方程, 增加了两个约束条件, 所以三维坐标的求取结果更为精确, 但双目系统的视差依赖于相机的公共视场。一幅图像中的某些相位值有效, 但缺乏公共视场, 从而导致该区域的三维数据缺失^[25]。在本文方法中, 任意一个相机的相位可靠区域均能计算出完整的三维数据, 因此物体表面的重建面积比双目系统大。

3 实 验

使用搭建的三维形貌测量系统来验证所提方法的正确性, 系统如图 4 所示, 该系统由一台分辨率为 800 pixel×1280 pixel 的投影仪和两台分辨率均为 1200 pixel×1600 pixel 的 CMOS (Complementary

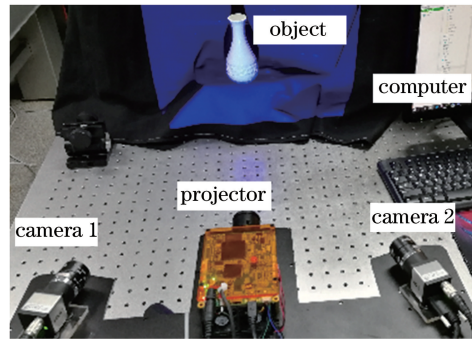


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

Metal Oxide Semiconductor) 相机组成, 两台相机的镜头焦距均为 12 mm。测量距离约为 65 mm, 视场大小约为 500 mm × 700 mm。使用投影仪投射垂直和水平方向的条纹, 条纹周期分别为 20.0 pixel 和 12.5 pixel。

3.1 精度评价

为了验证所提方法的测量精度, 采用陶瓷材料所制成的标准球作为待测评价工件, 其直径 $R = 50.7970$ mm。通过所提方法来计算球面的三维数

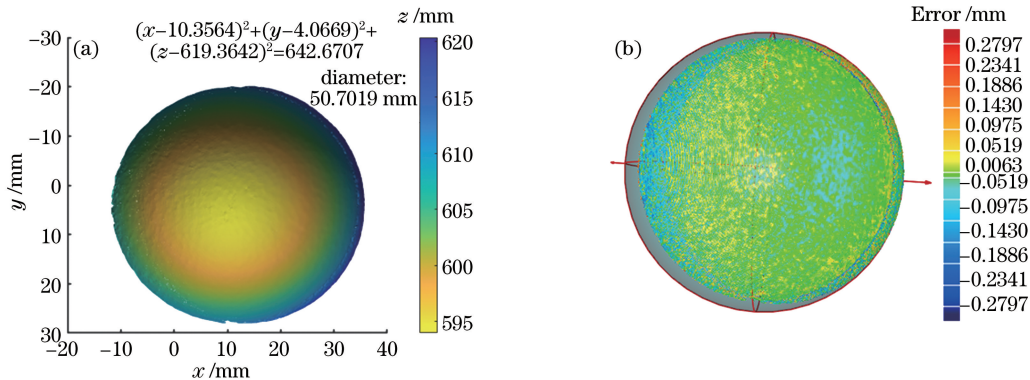


图 5 所提方法的精度分析结果。(a) 标准球的测量结果; (b) 标准球测量结果的误差分布

Fig. 5 Precision analysis results of proposed method. (a) Measurements of standard sphere; (b) error distribution of standard spherical measurements

采用传统双单目融合方法与本文方法对同一个标准球进行重建, 重建精度如表 1 所示。

表 1 直径为 50.7970 mm 的标准球在不同方法下的重建结果

Table 1 Reconstruction results of standard ball with diameter of 50.7970 mm under different methods

unit: mm			
Method	Fitting results	Error	STD
Proposed method	50.7019	-0.09451	0.0349
Dual-monocular method	50.6856	-0.11140	0.0509

从表 1 可以看到, 传统双单目融合方法的绝对误差和 STD 值均大于本文方法, 重建精度低于所提方法。

3.2 实物实验

本文首先对一个形状较为规则、釉面呈局部高反光的陶瓷杯进行测量, 实物如图 6(a) 所示。图 6(b) 和图 6(c) 分别为左右相机下的绝对相位, 可以发现所得结果中均有明显的相位值错误。图 6(d) 为图 6(b) 第 560 行的相位变化曲线, 图 6(e) 为图 6(c) 第 600 行的相位变化曲线, 其中虚线的相位值分别为 170 rad 和 180 rad。从图 6 可以看到, 左右相机所获取的反光区域处于两个相机像面上的不同位置且相位值不同, 后续以该相位信息进行系统匹配会存在重建误

据, 然后通过球面的点云数据来拟合球心坐标和球直径, 计算出直径的绝对误差作为精度评价指标, 实验测量结果如图 5 所示。

标准球的重建结果如图 5(a) 所示, 对重建陶瓷球的三维几何形状进行球面拟合, 实测球的直径为 50.7019 mm, 绝对误差为 0.09451 mm。标准球的直径误差分布如图 5(b) 所示, 测得标准球的直径标准偏差(Standard Deviation, STD)为 0.0349 mm。

差。左右相机分别与投影仪构成了不同的光照反射模型, 因此两个相机在同一测量点所获得的条纹图像中不可能同时饱和。反光区域在两个相机中的相位值相比于正常区域有较大的突变, 根据调制度阈值将该区域视为无效区域, 利用双目系统进行计算会因匹配错误而引起“孔洞”。

陶瓷杯的重建结果如图 7 所示, 图 7(a) 和图 7(b) 中的 A' 区域和 B' 区域分别对应图 6(b) 和图 6(c) 中的 A 区域和 B 区域。图 7(a) 为传统双目方法的重建结果, 因为 A 区域和 B 区域无法进行正确的匹配, 所以重建结果有两个区域的数据缺失。所提方法的重建结果如图 7(b) 所示, 可以看到反光区域的三维数据得到了很好的重建。

为了直观展示本文方法与双目方法的重建差异, 选取图 7(a) 和图 7(b) 的同一行三维数据, 比较两种方法所得三维数据的高度差异, 结果如图 7(c) 所示。断口线为双目方法重建结果的剖线, 可以看到线条在反光区域出现断裂, 断裂周围的三维数据有剧烈的高低起伏, 这种现象是由饱和像素侵蚀相邻非饱和像素导致的^[26], 即饱和像素影响了其相邻像素的光强度, 为此存在相位误差, 导致匹配错误, 双目方法的重建结果自然也较差。实线为本文方法

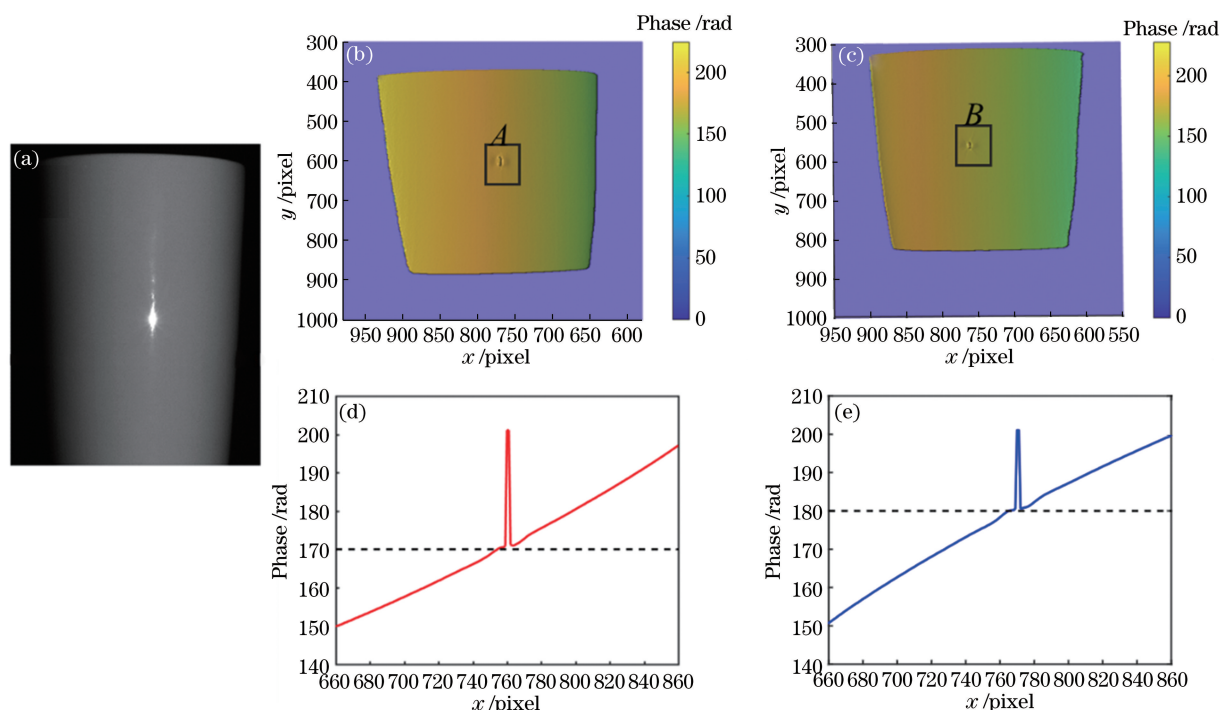


图 6 陶瓷杯的绝对相位。(a)陶瓷杯;(b)左相机下的绝对相位;(c)右相机下的绝对相位;(d)图 6(b)中第 560 行的相位变化曲线;(e)图 6(c)中第 600 行的相位变化曲线

Fig. 6 Absolute phase of ceramic cup. (a) Ceramic cup; (b) absolute phase from left camera; (c) absolute phase from right camera; (d) phase change curve in line 560 of Fig. 6(b); (e) phase change curve in line 600 of Fig. 6(c)

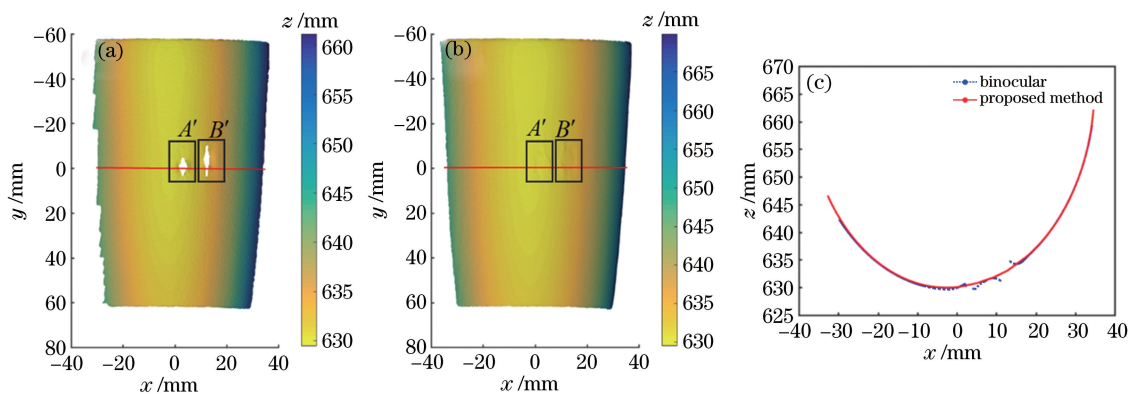


图 7 陶瓷杯的三维重建结果。(a)双目方法的重建结果;(b)本文方法的重建结果;(c)陶瓷杯三维数据其中一行的高度数据

Fig. 7 3D reconstruction results of ceramic cup. (a) Reconstruction result of binocular method; (b) reconstruction result of proposed method; (c) ceramic cup 3D data height data of one row

的重建结果,可以看到反光区域的重建结果完整,非反光区域的重建结果与双目方法的重建结果基本吻合。

此外,利用本文方法对抛光后高度光滑的金属铜部件表面进行测量,结果如图 8 所示。图 8(a)为金属铜件反射回来的右相机条纹图,图 8(b)和图 8(c)分别为图 8(a)的相位图和相位模板图,图 8(d)为金属铜件反射回来的左相机条纹图,图 8(e)和图 8(f)分别为图 8(d)的相位图和相位模板图。图 8(a)中实线框内有高光,而对应图 8(d)

的该区域为非高光,因此该区域符合图 3 的 Q_3 区域,该区域的 m^r 值为 0,该区域由左相机-投影仪匹配,三维数据可以由(14)式和(15)式来计算。图 8(d)中虚线框内有高光,而对应图 8(a)的该区域为非高光,因此该区域符合图 3 的 Q_1 区域,该区域的 m^l 值为 0,该区域由右相机-投影仪匹配,三维数据可以由(15)式和(16)式来计算。图 8(a)和图 8(d)中点线框内的左右相机像面上均有高光,因此该区域符合图 3 的 Q_2 区域,该区域由双相机-投影仪共同匹配,三维数据由(14)式和(16)式共

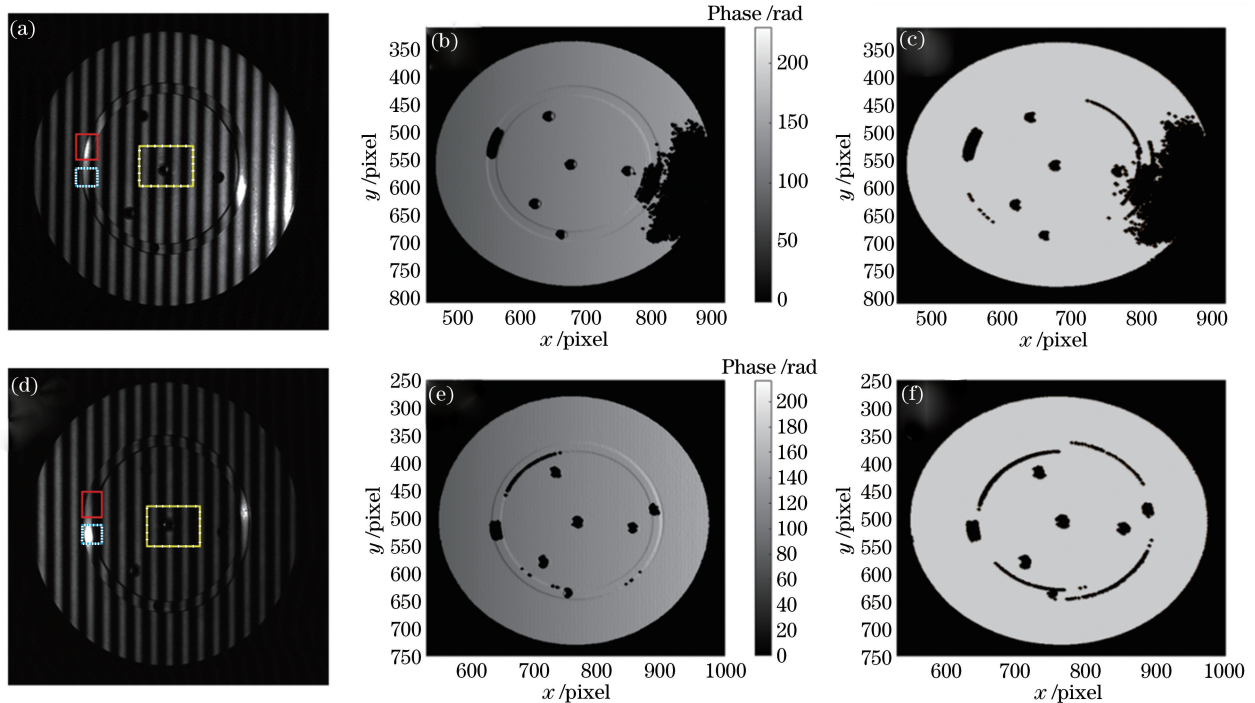


图 8 金属铜部件的测量图像。(a)右相机所拍摄的条纹图;(b)右相机的绝对相位;(c)右相机的相位模板;(d)左相机所拍摄的条纹图;(e)左相机的绝对相位;(f)左相机的相位模板

Fig. 8 Measurement images of metallic copper component. (a) Fringe images taken with right camera; (b) absolute phase of right camera; (c) right camera phase mask; (d) fringe images taken by left camera; (e) absolute phase of left camera; (f) left camera phase mask

同求解。

金属铜部件的表面测量结果如图 9 所示,图 9(a)为传统双目方法的重建结果,从实线框和虚线框区域可以看到,传统双目方法只要其中一个相机像面上有高反光区域,就难以重建出完整的三维数

据。图 9(b)为本文方法的重建结果,对于金属铜部件表面的所有反光区域,均可以正确重建出完整的三维数据且所有三维数据均无冗余。本文方法的重建结果中部件右侧区域有周期性的起伏,这应该是由设备的非线性响应和视角因素引起条纹质量下降。

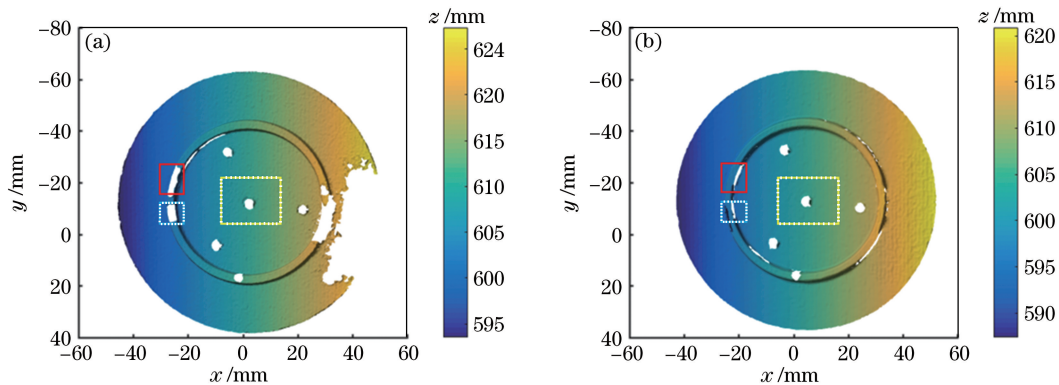


图 9 金属铜部件的重建结果。(a)双目方法的重建结果;(b)本文方法的重建结果

Fig. 9 Reconstruction result of metallic copper part. (a) Reconstruction result of binocular method; (b) reconstruction result of proposed method

为了验证本文方法测量复杂物体的有效性,对一个具有花纹的瓷瓶进行重建,结果如图 10 所示。由于瓷器本身的材质特性,瓶子表面容易形成镜面反射区域,并且瓷瓶表面容易形成多个反光区域,

图 10(a)和图 10(b)分别为左右相机所拍摄的瓷瓶纹理图,由瓷瓶的特征和光照模型可以得到不同视角下的不同反光区域。这些反光区域很难通过改变相机的曝光时间或者投影仪的投射亮度来彻底消

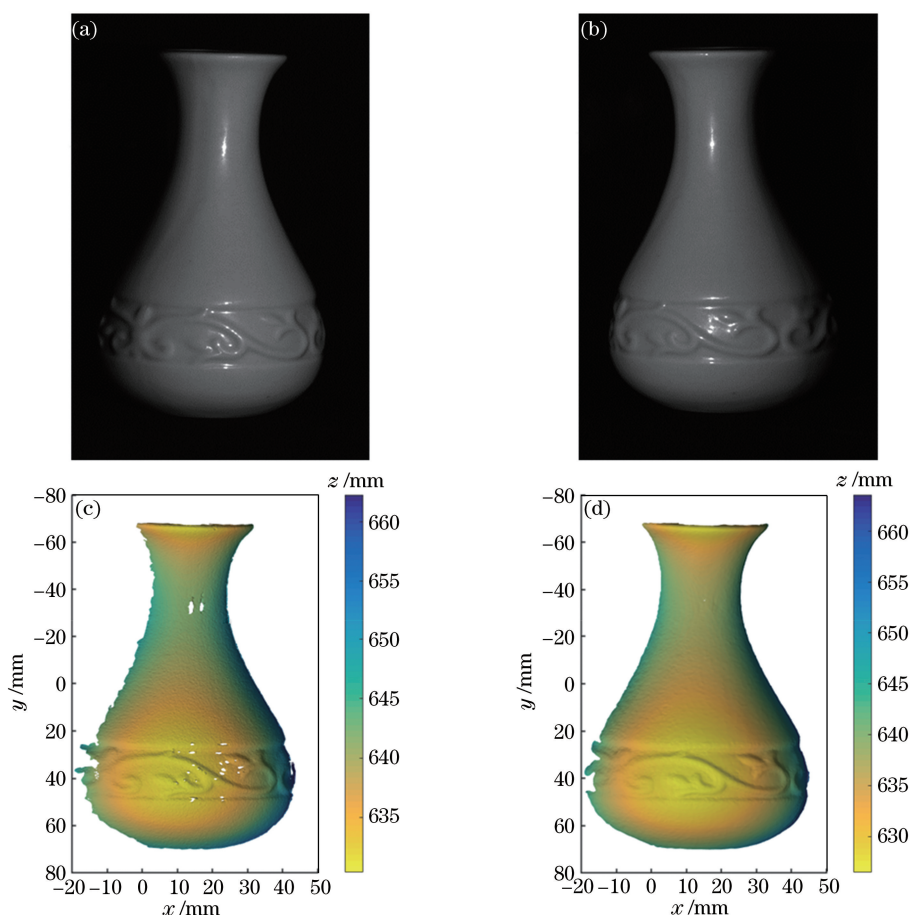


图 10 雕花瓷瓶的重建结果。(a)左相机所拍摄的纹理图;(b)右相机所拍摄的纹理图;(c)双目方法的重建结果;(d)本文方法的重建结果

Fig. 10 Reconstruction result of porcelain bottle. (a) Texture image taken by left camera; (b) texture image taken by right camera; (c) reconstruction result of binocular reconstruction (d) reconstruction result of proposed method

除,因此利用传统双目方法重建会出现图 10(c)的孔洞。利用所提方法能够正确重建出瓷瓶的完整三维数据,而且能够同时重建出非双目公共视场的更多三维数据信息,重建结果如图 10(d)所示。

以上这些实验结果均证实了所提方法可以成功重建镜面反射表面,能够实现完整、更大区域的三维重建,不会增加太多的计算成本和设备成本。

4 结 论

本文提出了一种利用多视方程测量高反射物体表面的方法,该方法利用了多视系统的优势。对于物体表面的高反光区域,只要在一个视角获得正确的相位,即使该区域在另一视角处于饱和状态,只要其在投影设备的图像中能够明确确定,也可以利用类似双目视差的方法来重建三维数据。当区域在所有视角均不发生饱和时,由多视方程可以确定物体的三维数据。所有三维数据均由多视系统同时匹配,再由共线方程得出。此外,本文方法是直接利用

具有高反光的条纹图,因此不需要繁琐的预处理过程和重建后的点云后处理过程。实验结果表明,该方法在保持结构光系统高精度的情况下能够成功测量具有较高表面反射率的典型物体,而且测量出的三维数据信息区域比传统双目方法更大。

参 考 文 献

- [1] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [2] Xue J P, Zhang Q C, Li C H, et al. 3D face profilometry based on galvanometer scanner with infrared fringe projection in high speed[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1458.
- [3] Cai N, Chen Z B, Lin B, et al. High-quality three-dimensional shape measurement based on binary particle swarm dithering optimization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1004003.

- 蔡宁, 陈浙泊, 林斌, 等. 基于离散粒子群抖动优化的高质量三维形貌测量[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1004003.
- [4] Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004.
张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004.
- [5] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- [6] 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): 0303006.
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): 0303006.
- [7] Peng G Z, Chen W J. Fringe pattern inpainting based on convolutional neural network denoising regularization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(18): 1810002.
彭广泽, 陈文静. 基于卷积神经网络去噪正则化的条纹图修复[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1810002.
- [8] Chen T B, Lensch H P A, Fuchs C, et al. Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects [C]//2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 2007, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 2007: 738098.
- [9] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optics Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [10] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [11] Wang L, Chen C, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 373-378.
王柳, 陈超, 高楠, 等. 基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量[J]. 应用光学, 2018, 39(3): 373-378.
- [12] Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512003.
冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0512003.
- [13] 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.
- [14] Liu G H, Liu X Y, Feng Q Y. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4557-4565.
- [15] Wang D C, He K J, Sui C Y, et al. Highly reflective surface measurement based on dual stereo monocular structured light system fusion [C]//2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 6-8, 2019, Dali, China. New York: IEEE Press, 2019: 1762-1768.
- [16] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [17] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [18] Su L K, Su X Y, Li W S, et al. 3-D profilometry based on modulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1257-1262.
苏礼坤, 苏显渝, 李万松, 等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1257-1262.
- [19] Qi Z S, Wang Z, Huang J H, et al. Error of image saturation in the structured-light method [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(1): A181-A188.
- [20] Phong B T. Illumination for computer generated pictures [J]. *Communications of the ACM*, 1975, 18(6): 311-317.
- [21] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Optical Engineering* 2006, 45(8): 083601.
- [22] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [23] Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0304008.
卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47

- (3): 0304008.
- [24] Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. A calibration method for trinocular stereovision system consisting of a projector and dual cameras [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1115001.
周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法 [J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1115001.
- [25] Li C H, Xue J P, Lang W, et al. Method for interpolation of missing point cloud based on phase mapping in binocular vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111019.
李承杭, 薛俊鹏, 郎威, 等. 基于相位映射的双目视觉缺失点云插补方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111019.
- [26] Zhang L, Chen Q, Zuo C, et al. High-dynamic-range 3D shape measurement based on time domain superposition [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(6): 065004.