文章编号　1004-924X(2024)09-1338-09

基于镜面和漫反射面标定板的系统参数标定

杨小娜[1]，倪育博[1]，孟召宗[1]，高　楠[1]，杨泽清[1]，张国锋[2]，
尹　伟[3]，赵洪伟[2,3]，张宗华[1*]
(1. 河北工业大学 机械工程学院，天津 300401；
2. 西安交通大学 机械工程学院，陕西 西安 710049；
3. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室，陕西 西安 710065)

摘要：为获取同一像素点镜面反射和漫反射两种反射特性的相位信息和标定数据，实现兼具镜面和漫反射面的复合表面物体三维形貌的全场测量，进而扩大测量范围，提出一种基于镜面/漫反射面标定板的系统参数标定方法。设计并制作镜面/漫反射面标定板，该标定板呈棋盘格样式，其表面带有相邻距离已知的标识。基于镜面/漫反射面标定板的特殊构型，通过限位平移的方式，结合外参约束和样条插值算法以融合获取完整参考相位。在同一坐标系下，逐像素标定空间距离、系统参数、像素位置和横向坐标XY间的映射关系。最后，利用完整参考相位和逐像素标定数据重建复合表面物体的三维形貌。实验结果表明：与非全场测量相比，基于镜面和漫反射面标定板的参数标定方法的测量范围扩大了1.5～2倍。该方法在不牺牲精度的同时，实现了非连续复合表面物体三维形貌的全场测量，扩大了测量范围，对复合表面物体的三维形貌测量有实际应用价值。

关　键　词：系统标定；镜面和漫反射面标定板；复合表面；全场测量
中图分类号：TP394.1；TH691.9　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.37188/OPE.20243209.1338

System parameter calibration based on a specular and diffuse calibration plate

YANG Xiaona[1], NI Yubo[1], MENG Zhaozong[1], GAO Nan[1], YANG Zeqing[1], ZHANG Guofeng[2],
YIN Wei[3], ZHAO Hongwei[2,3], ZHANG Zonghua[1*]

(1. *College of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin* 300401, *China*;
2. *College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*;
3. *National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an* 710065, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn*

Abstract: To achieve full-field measurement of composite surface objects and expand the measurement range, this paper proposes a system parameter calibration method using a specular and diffuse calibration plate. This method captures phase information and calibration data for both specular and diffuse reflections at the same pixel point. Initially, a specular and diffuse calibration plate with a checkerboard pattern and

收稿日期：2023-12-19；**修订日期**：2024-01-19.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. U2341275, No. 52075147)；河北省教育厅科学研究项目(No. JZX2024021)

known marker distances is designed and manufactured. Using the unique configuration of the calibration plate, the complete reference phase is derived through external parameter constraints and spline interpolation, facilitated by limit translation. Subsequently, spatial distance, system parameters, and the relationship between pixel position and horizontal coordinates XY are calibrated pixel-by-pixel within the same coordinate system. The 3D morphology of the composite surface object is then reconstructed using the complete reference phase and pixel-by-pixel calibration data. Experimental results indicate that this method extends the measurement range by 1.5-2 times compared to traditional non-full-field methods. The proposed approach not only maintains measurement accuracy but also enables full-field measurement of 3D morphology of discontinuous composite surfaces, proving to be of significant practical value for measuring the 3D morphology of composite surface objects.

Key words: system calibration; specular and diffuse calibration plate; composite surface; full-field measurement

1　引　言

条纹投影轮廓术[1-2]和相位偏折测量术[3-4]以其非接触、高精度等优势，在文物保护、航空航天、逆向工程及医学工程等领域[5-6]发挥着关键作用。然而，上述技术单独使用并不能满足兼具镜面和漫反射面的复合表面物体的测量需求。因此，复合表面物体三维形貌的高效、准确测量成为近年来的研究热点。

国内外研究人员针对复合表面物体三维形貌测量技术进行了大量研究。Sandner等[7]利用双目条纹投影轮廓术和相位偏折术对漫反射表面和镜面混合的表面进行测量。岳慧敏等[8]提出一种面结构光三维测量系统，通过复合迭代算法实现三维形貌重建。上述方法无法实现非连续复合表面物体的三维测量。为解决以上问题，张宗华等[9]直接建立相位和深度的关系，利用半透半反镜实现两个显示屏平行正对，重建非连续复合表面物体的三维形貌。然而，系统复杂不易调节，并且半透半反镜限制测量视场。刘硕等[10]引进透明显示屏简化系统结构，不受半透半反镜限制，可以同时测量非连续复合表面物体。

系统标定是测量的重要环节，直接影响最终的测量结果。标定条纹投影系统通常使用白色平板，标定相位偏折系统常用平面镜[11-12]。张宗华等[13]利用表面带有离散标识点的白色平板标定条纹投影系统，通过建立多项式来确定标定板上每个像素点绝对相位和深度的关系。基于梯度积分的相位偏折系统常用的标定方法为透视n点法（Perspective-n-Point，PnP）。利用显示屏上的相位点、相机成像平面对应的像素坐标以及入射光线和反射光线，确定被测表面上各点的法线方向来计算显示屏与相机的位姿关系[14]。在同一坐标系下标定条纹投影和相位偏折系统，可以避免测量复合表面物体出现数据缺失、错位等问题。张宗华、肖月新等[15]将带有标识点的平面镜部分区域喷涂漫反射试剂制成复合标定板，用于标定测量系统。然而，由于复合标定板反射特性存在固有的限制，镜面和漫反射面部分都只能获取其对应反射特性的相位信息和相关的标定数据，无法实现复合表面物体三维形貌的全场测量。

为了实现复合表面物体三维形貌的全场测量，扩大测量范围，本文提出一种基于镜面/漫反射面标定板的系统参数标定方法。该方法利用镜面和漫反射面标定板，通过限位平移的方式，结合外参约束和样条插值算法以融合获取完整的参考相位。在同一坐标系下，逐像素标定空间距离和系统参数，以及像素位置和横向坐标XY的映射关系。最终，使每个像素点同时存在镜面和漫反射面的相位信息和标定数据，利用参考相位及标定数据，实现复合表面物体三维形貌的全场测量，扩大了复合表面物体三维形貌的测量范围。

2　原　理

复合表面测量系统模型如图 1 所示。液晶显示屏(Liquid Crystal Display, LCD)和透明显示屏(Transparent Display, TD)平行正对放置,镜面和漫反射面标定板、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)和投影仪位于两屏一侧。

镜面和漫反射面标定板位于参考位置时,LCD 和 TD 显示的正弦条纹图经镜面和漫反射面标定板反射,计算得参考相位 φ_l 和 φ_t;条纹图经被测物体镜面部分反射后计算为调制相位 φ_{tl} 和 φ_{tl};投影仪投射正弦条纹至镜面和漫反射面标定板由漫反射部分反射并计算,为参考相位 φ;条纹图经被测物漫反射部分调制后,得到相位 ψ。θ 为经镜面/漫反射面标定板镜面部分的反射光线与法线的夹角,α 为被测物上一点的切线与参考面的夹角。根据反射的基本原理可知,由被测物镜面反射的光线和参考面的夹角为 $\theta+2\alpha$。

根据模型中的几何关系,推导出复合表面测量系统相位与深度的关系:

$$h=\begin{cases}\dfrac{\Delta d(u,v)(\varphi_{tl}-\varphi_t)-d(u,v)\left[(\varphi_t-\varphi_l)-(\varphi_{tl}-\varphi_{ll})\right]}{(\varphi_{tl}-\varphi_{ll})+(\varphi_t-\varphi_l)} \\ \sum_{i=0}^{n}a_i(u,v)\left(\psi(u,v)-\varphi(u,v)\right)^i\end{cases}. \tag{1}$$

由式(1)可知,完成复合表面三维形貌测量需参考相位 φ_l, φ_t, φ, LCD 和 TD 的间距 $\Delta d(u,v)$, TD 和镜面/漫反射面标定板位于参考面位置时的距离 $d(u,v)$,以及条纹投影子系统参数 $a_i(u,v)$。

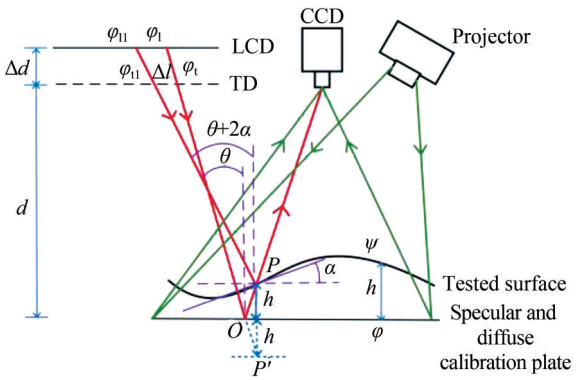


图 1　复合表面测量系统模型

Fig. 1　Model of composite surface measurement system

为在同一坐标系下标定测量模型中的参数,得到测量所需的完整参考相位,设计的镜面和漫反射面标定板如图 2 所示。图中,阴影部分为漫反射面,其余为镜面,镜面区域均匀分布圆环标识点。

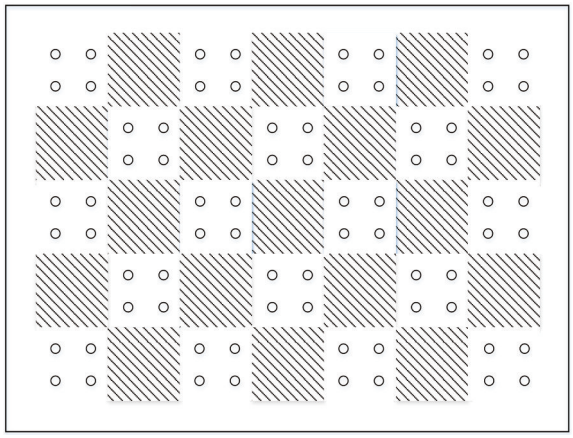


图 2　镜面和漫反射面标定板

Fig. 2　Specular and diffuse calibration plate

3　系统标定

3.1　融合参考相位

由于镜面/漫反射面标定板的特性,LCD, TD 和投影仪显示和投影的条纹图在镜面和漫反射面均表现不完整,导致有效相位信息也不完整。根据式(1)可知,复合表面物体全场测量需要完整的参考相位。

为得到光滑连续的完整参考相位,对相位数据中的缺失部分采用样条插值算法进行补充。然而,相位数据缺失较多,直接插值会导致

精度不足。因此，本文通过扩充有效相位数据点数量来提高插值精度。图 3 为完整参考相位的获取流程。在参考面位置对镜面和漫反射面标定板进行横向限位平移，空间位置上改变镜面和漫反射面标定板表面的反射特性，使得原本为漫反射面的区域变为镜面，镜面区域变为漫反射面。

平移后再次显示和投射条纹图，得到不同的相位信息。融合平移前后的相位信息，扩充有效相位数据，然后对小范围缺失数据进行样条插值，插值结果更为精准，构建镜面、漫反射面的完整参考相位。此时，镜面和漫反射面标定板上每个像素点同时存在镜面、漫反射面的相位信息。

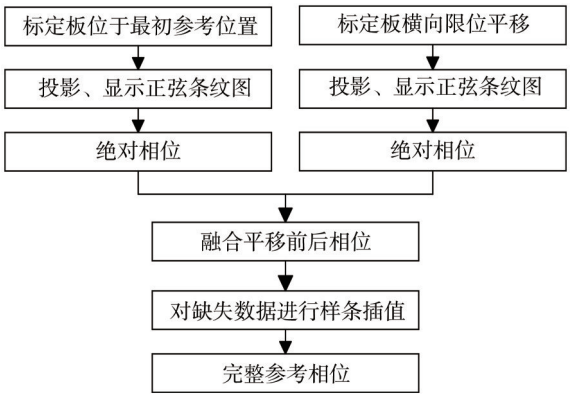


图 3　完整参考相位获取流程

Fig. 3　Aquirement process of complete reference phase

相机采集镜面和漫反射面标定板上的圆环标识点，提取圆环标识点边缘并拟合圆心，圆心坐标即像素坐标。通过已知的圆心距得到世界坐标，利用像素坐标、世界坐标和相机内参之间的转换矩阵得到镜面和漫反射面标定板相对于相机的外参。以外参为约束，将平移前标定板坐标系作为基准坐标系，对平移后标定板坐标系进行基准校正，保证标定板在限位平移过程中的准确性和一致性。如式(2)和式(3)所示，将平移后有效像素点转换到基准坐标系。经基准校正后，融合得到的完整参考相位是标定板像素点在同一坐标系下的相位信息分布。

$$\boldsymbol{R}_{ko}=\boldsymbol{R}_{k}^{-1}\times\boldsymbol{R}_{o}, \tag{2}$$

$$\left[x'\left((u,v)_k^b\right),y'\left((u,v)_k^b\right),z'\left((u,v)_k^b\right)\right]=\boldsymbol{R}_{ko}\times\left[x\left((u,v)_k^b\right),y\left((u,v)_k^b\right),z\left((u,v)_k^b\right)\right]^{\mathrm{T}}, \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{R}_o$为平移前标定板的外参，$\boldsymbol{R}_k$为平移后的外参，$\boldsymbol{R}_{ko}$为平移前后坐标系之间的转换矩阵，$\left[x\left((u,v)_k^b\right),y\left((u,v)_k^b\right),z\left((u,v)_k^b\right)\right]$，$\left[x'\left((u,v)_k^b\right),y'\left((u,v)_k^b\right),z'\left((u,v)_k^b\right)\right]$分别为校正前后有效点的像素坐标。

3.2　空间距离

空间距离(d)是指镜面和漫反射面标定板位于参考面位置时与TD之间的距离。图 4 为空间距离的标定模型。首先，TD 显示圆环阵列至镜面和漫反射面标定板，由相机拍摄标定板并提取该标定板上的圆环标识和 TD 显示的圆环标识的中心像素坐标。然后，通过标识点像素坐标与世界坐标计算单应性矩阵，进而得到标定板和 TD 上每个像素点的世界坐标$\left(x_w^m,y_w^m,z_w^m\right)$，$\left(x_w^t,y_w^t,z_w^t\right)$。最后将其转换到相机空间中，对应每个像素点在相机坐标系中的坐标为$\left(x_c^m,y_c^m,z_c^m\right)$，$\left(x_c^t,y_c^t,z_c^t\right)$。

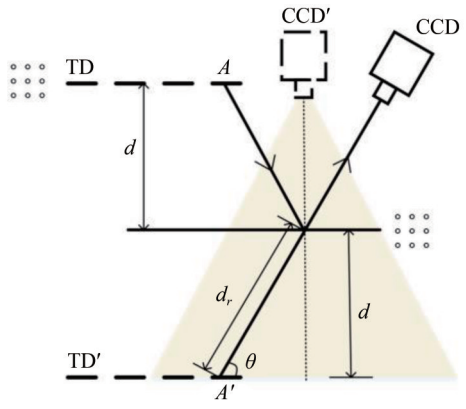


图 4　空间距离的标定模型

Fig. 4　Calibration model of spatial distance

如图 4 所示，当相机正对标定板时，标定板和透明显示屏之间的距离为：

$$d_r(u,v)=\sqrt{\left(x_c^m-x_c^t\right)^2+\left(y_c^m-y_c^t\right)+\left(z_c^m-z_c^t\right)}. \tag{4}$$

当相机与标定板有一定夹角时，相机旋转过的角度为：

$$\theta=\arccos\left(\frac{\mathrm{trace}(R_o)-1}{2}\right). \tag{5}$$

最后，TD与标定板每个像素点间的距离为：

$$d(u,v)=d_i(u,v)\sin\theta. \tag{6}$$

3.3 系统参数和两屏距离

图5为标定子系统参数$a_i(u,v)$和两屏距离$\Delta d(u,v)$的模型。首先，通过水平移动台在深度方向移动镜面/漫反射面标定板m个标定位置，且m个标定位置均在相机景深范围内。其次，LCD，TD分别显示、投影正弦条纹图至标定板并计算绝对相位。提供每组标定位置相对于参考面位置的深度及相位。h_r为参考面位置，且$h_r=0$；$h_1,\cdots,h_{r-1},h_{r+1},\cdots,h_m$为标定位置相对于参考位置的深度；$\varphi_t$为TD的参考相位；$\varphi_l$为LCD的参考相位；$\varphi_{t_{r+1}}\varphi_{t_{r-1}}$为标定板位于$h_{r+1},h_{r-1}$时，TD的绝对相位；$\varphi_{l+1},\varphi_{l-1}$为标定板位于$h_{r+1}$，$h_{r-1}$时，LCD的绝对相位；$\beta$为相机光轴与参考面法线的夹角；$\Delta l$为标定板移动前后透明显示屏相位的差值。

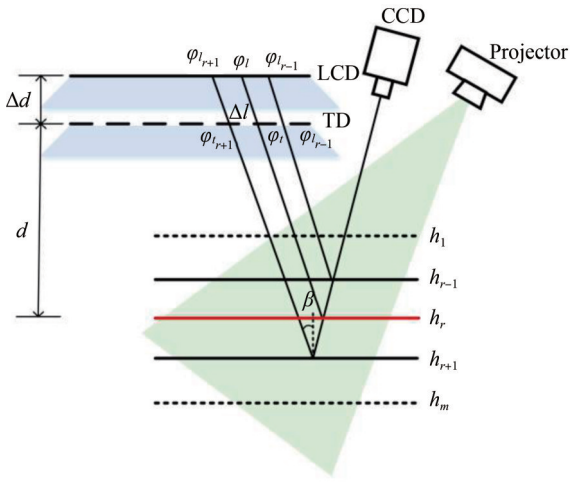


图5 系统参数和两异距离的标定模型

Fig. 5 Calibration model of system parameters and distance between two display screens

标定过程中，唯一具有完整相位数据的是参考面位置。标定板移动至各个标定位置，镜面和漫反射面都会出现新的有效相位像素点。因此，每个标定位置上有效的像素点集合需要足够的覆盖范围，以确保可以涵盖整个参考相位区域，这是逐像素标定的前提。

以镜面/漫反射标定板在h_{r+1}深度时为例，有：

$$(\varphi_t-\varphi_l)\cdot q/2\pi=\Delta d(u,v)\tan\beta, \tag{7}$$

$$(\varphi_t-\varphi_{t_{r+1}})\cdot q/2\pi=\Delta l, \tag{8}$$

$$2\big(h_{r+1}(u,v)-h_r(u,v)\big)\tan\beta=\Delta l, \tag{9}$$

$$\Delta d(u,v)=2\big(h_{r+1}(u,v)-h_r(u,v)\big)\times(\varphi_t-\varphi_l)/(\varphi_t-\varphi_{t_{r+1}}), \tag{10}$$

式中：q为条纹周期；$h_r(u,v)$为0或$z^{r}\left((u,v)_k^b\right)$。

逐像素计算TD与LCD间距离，得到：

$$\Delta d(u,v)=\begin{cases}2\big[h_1(u,v)-h_r(u,v)\big](\varphi_t-\varphi_l)/(\varphi_t-\varphi_{t_1})\\ \cdots\cdots\\ 2\big[h_{r-1}(u,v)-h_r(u,v)\big](\varphi_t-\varphi_l)/(\varphi_t-\varphi_{t_{r-1}})\\ 2\big[h_{r+1}(u,v)-h_r(u,v)\big](\varphi_t-\varphi_l)/(\varphi_t-\varphi_{t_{r+1}})\\ \cdots\cdots\\ 2\big[h_m(u,v)-h_r(u,v)\big](\varphi_t-\varphi_l)/(\varphi_t-\varphi_{t_m})\end{cases}. \tag{11}$$

移动过程中出现的新的有效像素点需与其深度对应。

根据式(1)可知，标定条纹投影子系统参数$a_i(u,v)(i=1,2,3,\cdots,n)$至少需要$(n+1)$个标定位置的深度及对应深度的相位，则标定位置满足$m\geqslant(n+2)$。移动过程中，每个像素点在$(n+2)$个标定位置出现的次数不同，因此，需根据每个像素点出现的标定位置拟合每个像素点的多项式系数，得到：

$$\begin{cases}\Delta h_1(u,v)=a_0+a_1(\psi_1-\varphi_r)^2+\cdots+a_n(\psi_1-\varphi_r)^n\\ \cdots\\ \Delta h_{r-1}(u,v)=a_0+a_1(\psi_{r-1}-\varphi_r)+a_2(\psi_{r-1}-\varphi_r)^2+\cdots+a_n(\psi_{r-1}-\varphi_r)^n\\ \Delta h_{r+1}(u,v)=a_0+a_1(\psi_{r+1}-\varphi_r)^2+a_2(\psi_{r+1}-\varphi_r)^2+\cdots+a_n(\psi_1-\varphi_r)^n\\ \cdots\\ \Delta h_m(u,v)=a_0+a_1(\psi_m-\varphi_r)+a_2(\psi_m-\varphi_r)^2+\cdots+a_n(\psi_m-\varphi_r)^n\end{cases}, \tag{12}$$

式中：φ_r为漫反射部分的参考相位；$\Delta h_m(u,v)$为每个标定位置相对于参考面的距离；ψ_m为漫反射部分在各标定位置的绝对相位，$m=1,2,3,\cdots$。

3.4　横向标定

横向标定是确定像素位置与横向坐标XY的关系。在每个标定位置获取圆环标识点像素坐标(u,v)，并根据文献[13]，结合世界坐标与像素点深度建立关系式：

$$\begin{cases} x = b_1(u,v)h_m{}^2 + b_2(u,v)h_m + b_3 \\ y = c_1(u,v)h_m{}^2 + c_2(u,v)h_m + c_3 \end{cases}, \tag{13}$$

式中：$b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$为映射关系系数；$x, y, h_m$为世界坐标。

4　实验与结果分析

4.1　实验系统

实验搭建基于镜面和漫反射面标定板的复合表面测量系统，如图6所示。CCD相机型号为SVCam-ECO445（964×1 296 pixel）；LCD13.3寸（2 560×1 440 pixel）；TD13.3寸（1 366×768 pixel）；投影仪为DLP® LightCrafter ™ 4500（1 140×912 pixel）；镜面/漫反射面标定板长度为216 mm，宽度为165 mm，厚度为5 mm，镜面和漫反射面均为边长为28 mm的正方形，镜面部分均匀分布圆心距为7 mm的圆环阵列；水平移动导轨为高精度GCD-203200M型号，精度为1 mm，移动距离可达200 mm。

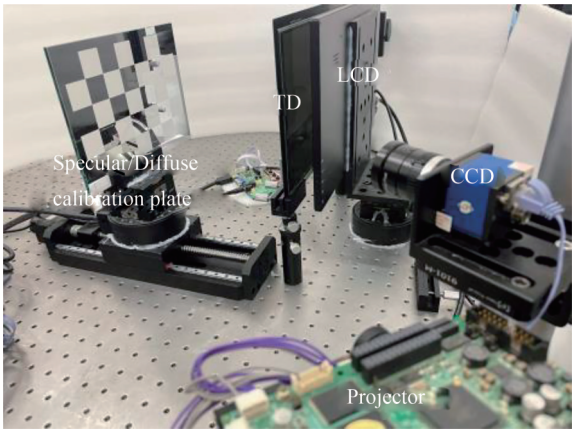


图6　基于镜面/漫反射面标定板的复合表面测量实验系统硬件

Fig. 6　Hardware of experimental system for composite surface measurement based on specular and diffuse calibration plate

4.2　标定结果及精度验证

4.2.1　标定结果

通过一系列实验测试确定最佳限位平移距离，使相位数据缺失的区域足够小并能够保证数据质量。图7为LCD，TD、投影仪分别显示和投影条纹图至标定板并计算相位，对比横向限位平移前后的有效相位数据可知，扩充了有效相位数据点，只需对少量（10%左右）缺失相位数据进行插值。

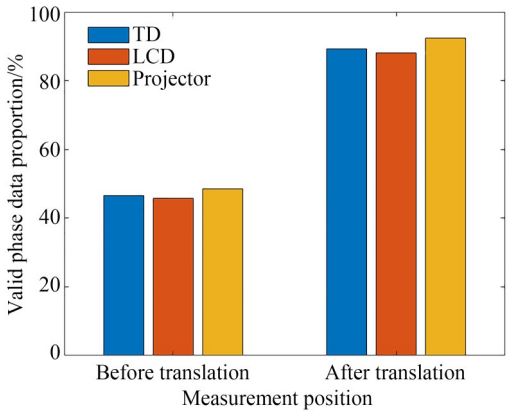


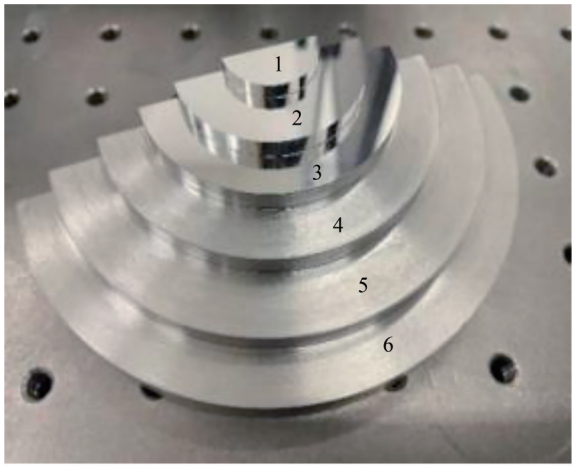
图7　平移前后有效相位数据

Fig. 7　Valid phase data before and after translation

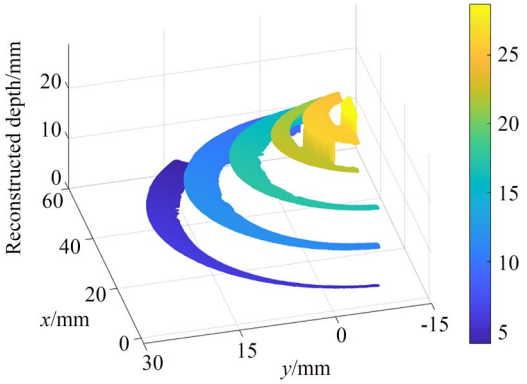
4.2.2　精度验证

通过测量非连续复合表面台阶（上面三阶为镜面反射，下面三阶为漫反射）三维形貌来验证所提方法的实验精度，如图8(a)所示。相机采集镜面部分条纹图和漫反射部分条纹图，利用八步相移和最佳三条纹选择法计算得到绝对相位，最终重建复合表面台阶的三维形貌，如图8(b)所示。通过平面拟合算法拟合台阶平面，计算台阶面上的点到拟合平面的距离的平均值作为相邻台阶距离。以ZEISS Calypso三坐标检测仪测得值为真值，测量结果如表1所示。

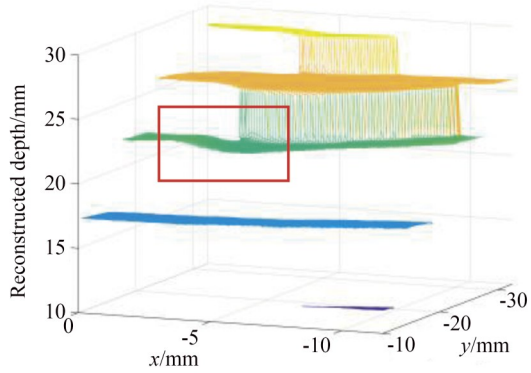
测量过程中，使用直接插值获得的完整参考相位和本文方法获得的完整参考相位测量同一复合表面台阶，三维形貌局部放大图如图8(c)和8(d)所示。图8(c)中误差明显，证明本文所提获取完整参考相位方法比直接插值得到参考相位更可靠。



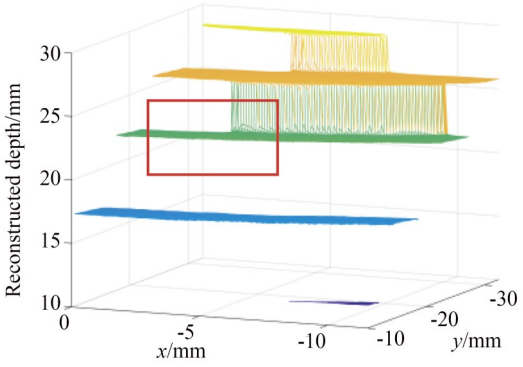
(a) 台阶纹理
(a) Texture of step



(b) 台阶重建深度
(b) Reconstructed depth of step



(c) 直接插值法局部放大图
(c) Partial enlarged view by direct interpolation method



(d) 本文所提方法局部放大图
(d) Partial enlarged view by proposed method

图 8　非连续复合表面台阶的测量结果

Fig. 8　Measurement result of discontinuous composite surface step

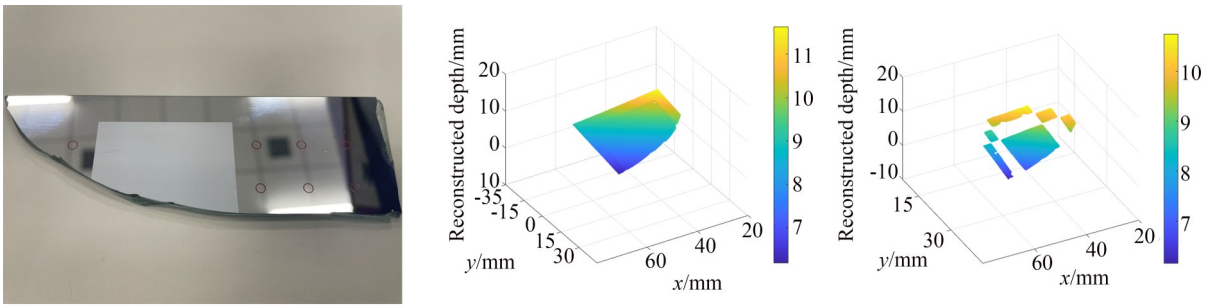
表 1　复合表面台阶相邻台阶面的测量结果

Tab. 1　Measurement results of adjacent steps of composite step　(mm)

Step surface	ZEISS Calypso	Proposed method	Absolute error
1-2	3.000 16	2.972	0.028
2-3	4.000 15	4.027	0.027
3-4	5.000 26	4.967	0.033
4-5	5.500 40	5.522	0.022
5-6	6.500 38	6.480	0.020

4.3　全场测量验证

为验证所提方法的全场测量效果，对中间部分为漫反射面，周边为镜面的复合表面物体进行三维形貌测量，如图 9(a)所示。LCD，TD 和投影仪显示、投影正弦条纹图，相机采集经复合表面调制的条纹图，利用八步相移和最佳三条纹选择法计算绝对相位。图 9(b)为利用本文方法通过完整参考相位和逐像素标定结果全场测量得到的三维形貌。图 9(c)为非全场测量得到的三维形貌，因参考相位与标定数据缺失，无法获得完整三维形貌，只能恢复整个物体的 65%。采用相同测量步骤重建一半镜面一半漫反射面的复合表面台阶三维形貌，如图 10(a)所示。图 10(b)为全场测量结果，图 10(c)为非全场测量结果，非全场测量只能恢复整个物体的 52%。



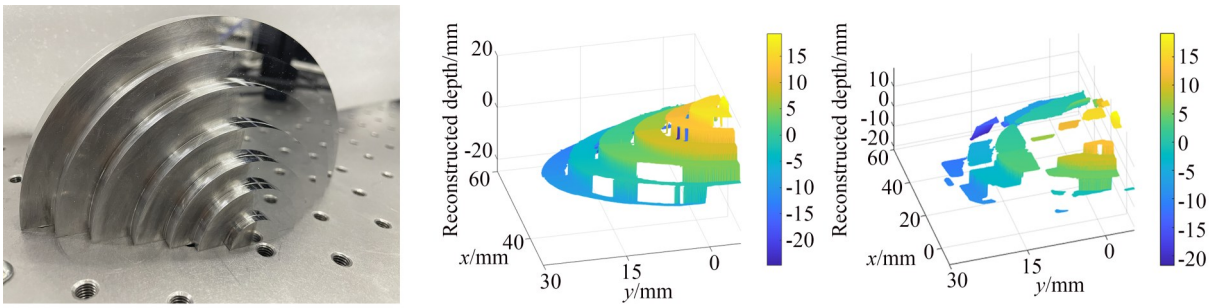
(a) 复合表面物体
(a) Composite surface object

(b) 全场测量
(b) Full-field measurement

(c) 非全场测量
(c) Non-full-field measurement

图 9　复合表面物体的测量结果

Fig. 9　Measurement results of composite surface object



(a) 复合表面台阶纹理
(a) Texture of composite surface step

(b) 全场测量
(b) Full-field measurement

(c) 非全场测量
(c) Non-full-field measurement

图 10　复合表面台阶测量结果

Fig. 10　Measurement results of composite surface step

5　结　论

为实现兼具镜面和漫反射面的复合表面物体三维形貌的全场测量，扩大测量范围，本文提出了一种基于镜面和漫反射面标定板的系统参数标定方法，并设计了适合测量系统的镜面和漫反射标定板，通过限位平移的方式，结合外参约束和样条插值算法融合获得测量所需的完整参考相位。在同一坐标系下，逐像素建立绝对相位与三维数据间的精准对应关系，使每个像素点同时具有镜面反射和漫反射两种反射特性的相位信息和标定数据，以此重建复合表面物体的三维形貌。实验结果表明，所提方法测量标准复合表面台阶的最大绝对误差为 0.033 mm，最小绝对误差为 0.200 mm。该方法在不牺牲精度的同时，实现了复合表面物体三维形貌的全场测量，测量范围扩大了 1.5～2 倍。

参考文献：

[1] 张昂，孙亚琴，高楠，等. 三灰度编码相位展开方法条纹投影轮廓术[J]. 光学 精密工程，2022，30(5)：518-526.
ZHANG A，SUN Y Q，GAO N，*et al*. Fringe projection profilometry by ternary-gray encoded phase unwrapping method [J]. *Opt. Precision Eng.*，2022，30(5)：518-526.(in Chinese)

[2] 吴周杰，张启灿. 基于条纹投影的三维形貌与形变测量技术研究进展[J]. 液晶与显示，2023，38(6)：730-747.
WU Z J，ZHANG Q C. Recent progress on 3D shape and deformation measurement based on fringe projection [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*，2023，38(6)：730-747.(in Chinese)

[3] 张凯龙，钱莉，朱春雷. 基于相位测量偏折法的类镜面缺陷检测[J]. 激光与光电子学进展，2022，59(5)：0512004.
ZHANG K L，QIAN L，ZHU C L. Defect detec-

tion in mirror-like surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0512004. (in Chinese)

[4] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(6): 1483-1502.
ZHANG Z H, LIU W, LIU G D, *et al*. Overview of the development and application of 3D vision measurement technology [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021, 26(6): 1483-1502. (in Chinese)

[5] ZHAI J Y, WANG B Q, XU M, *et al*. A 3-dimensional measurements of bone and airway variables after le fort I distraction osteogenesis in patients with cleft lip and/or palate-induced midface hypoplasia: a retrospective study[J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2022, 34(2): 584-590.

[6] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(5): 528-532.
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532. (in Chinese)

[7] SANDNER M. Hybrid Reflectometry-3D shape measurement on scattering and reflective surfaces [C]. 115*th Annual Meeting of the DGaO*, 2014.

[8] 岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 一种面结构光三维测量系统: CN106197322A[P]. 2016-12-07.
YUE H, LI R, PAN ZH P, *et al*. Face structure light three-dimensional measuring system: CN106197322A[P]. 2016-12-07. (in Chinese)

[9] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303015.
ZHANG Z H, LIU X H, GUO ZH N, *et al*. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303015. (in Chinese)

[10] 刘硕, 张宗华, 高楠, 等. 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法[J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220340.
LIU SH, ZHANG Z H, GAO N, *et al*. Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(4): 220340. (in Chinese)

[11] PETZ M, TUTSCH R. Reflection grating photogrammetry: a technique for absolute shape measurement of specular free-form surfaces[C]. *SPIE Proceedings, Optical Manufacturing and Testing VI. San Diego, California, USA*. SPIE, 2005, 58(69): 355-366.

[12] 王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维面形测量综述[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(5): 1014-1027.
WANG Y M, ZHANG Z H, GAO N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1014-1027. (in Chinese)

[13] ZHANG Z H, MA H Y, GUO T, *et al*. Simple, flexible calibration of phase calculation-based three-dimensional imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1257-1259.

[14] TAKAHASHI K, NOBUHARA S, MATSUYAMA T. Mirror-based camera pose estimation using an orthogonality constraint [J]. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 2016, 8: 11-19.

[15] 肖月新, 张宗华, 刘硕, 等. 基于条纹投影和双屏透射显示的复合表面三维测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(3): 3788/LOP222871.
XIAO Y X, ZHANG Z H, LIU SH, *et al*. Method for three-dimensional shape measurements of composite surface based on fringe projection and dual-transparent display screens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60 (3): 3788/LOP222871. (in Chinese)

作者简介：

杨小娜(1998—),女,河北张家口人,硕士研究生,2021年于河北工程大学获得学士学位,主要研究方向为多维光视精密测量原理、方法及系统。E-mail: nuyoah996@126.com

通讯作者：

张宗华(1974—),男,江苏徐州人,博士,教授,1996年、1998年、2001年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析方面的研究。E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn