

文章编号: 1002-1582(2025)04-0504-09

基于调整投影强度的高反光物体三维形貌测量

赵丽伟, 张宗华*, 付帅, 孟召宗, 高楠
(河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘 要: 条纹投影轮廓术是获取物体三维形貌最有效的方法之一, 但是在测量高反光物体时, 需要投影较多条纹图像, 且精度不高。为此, 提出一种基于调整投影强度的高反光物体三维形貌测量方法。通过计算物体表面系数并根据反射系数分布直方图求解最佳投影强度; 结合极线约束和相位信息计算相机和投影仪的坐标对应关系, 生成自适应条纹; 将自适应条纹投影到被测物体表面实现对物体的三维测量。实验结果表明, 测量高反光面台阶时, 最大绝对误差为 0.0249 mm, 比单一投影强度法减少 97.8%, 比现有调整投影强度法误差减少 18.6%, 投影图像数量减少 18 幅。所提方法在减少投影条纹数量的同时提高了测量精度。

关 键 词: 光学测量; 条纹投影; 高反光物体; 自适应条纹; 极线约束

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on adjusted projection intensity

ZHAO Liwei, ZHANG Zonghua*, FU Shuai, MENG Zhaozong, GAO Nan

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Fringe projection profilometry is one of the most effective methods to obtain the three-dimensional (3D) shape of objects. However, when measuring highly reflective objects, more fringe images need to be projected, and the accuracy is not high. Therefore, a method for measuring the 3D shape of highly reflective objects based on adjusting projection intensity is proposed. First, the optimum projection intensity is calculated according to the surface coefficient of the object. Then, the coordinate correspondence between camera and projector is calculated according to the polar constraint and phase information, and the adaptive fringe is generated. Finally, the adaptive fringes are projected onto the surface of the object under test to achieve three-dimensional measurement of the object. The experimental results show that when measuring the steps of high reflective surfaces, the maximum absolute error is 0.0249 mm, which is 97.8% less than the method of single projection intensity, 18.6% less than the existing method of adjusting projection intensity, and the number of projected images is reduced by 18. The proposed method can reduce the number of projection fringes and improve the measurement accuracy.

Keywords: optical measurement; fringe projection; highly reflective object; adaptive fringe; polar constraint

0 引 言

条纹投影技术作为一种先进的光学三维测量

手段, 凭借其非接触测量特性、高精度优势以及全场数据获取能力, 已在生物特征识别、逆向工程、产品质量检测等领域得到成果应用^[1-3]。然而

收稿日期: 2025-02-19; 收到修改稿日期: 2025-04-03

基金项目: 国家自然科学基金 (U2341275)

作者简介: 赵丽伟 (1999—), 女, 硕士研究生, 从事光学三维形貌测量研究。15531838703@163.com

张宗华 (1974—), 男, 教授, 博士, 从事光学三维测量、条纹投影轮廓术、相位偏折测量术等方面的研究。

* 通讯作者: zhzhang@hebut.edu.cn

在测量表面具有高反光特性的物体时,由于其表面反射率变化较大,会导致捕获图像中高反射率区域产生光强饱和现象,低反射率区光强过低导致信噪比低,这些都会对被测物体三维形貌的完整性产生影响,使测量精度下降。因此,为实现对高反光物体的高精度测量,国内外学者展开了大量研究,目前主流的方法主要有多重曝光时间法和调整投影强度法两类^[4]。

在多重曝光时间法方面,朱^[5]提出一种预处理二分选择曝光时间的方法,在低曝光时间下的条纹图像没有过曝点,高曝光时间下完全过曝,则两个曝光时间作为阈值,对曝光时间进行二分处理,该方法曝光时间的选择依靠经验,需要多次实验找到合适的时间。Zhu等^[6]提出使用设置一次曝光时间,投射两种不同强度的图像来估计反射率和曝光时间分布。该方法可以快速计算出测量被测物体的曝光时间,但精度较低。李等^[7]提出拍摄多组不同曝光时长的图像序列,然后基于相机响应曲线构建模型,计算所需的曝光时间,在不同的曝光时间下拍摄图像,将这些图像通过图像融合生成高质量条纹图进行相位解算。系统精度依赖于相机响应曲线的精确标定,同时,该方法需要拍摄大量图像,效率低。王等^[8]提出利用相机串扰来测量高反光物体三维形貌,投影蓝色条纹,分离出蓝色和绿色两个通道的条纹图合成自适应条纹图像,蓝绿两个通道分别代替不同曝光下的图像。该方法减少了投影条纹图的数量,但由于相机多通道之间存在串扰,测量精度低,且不具有普适性。Li等^[9]提出基于时间代价函数进行自适应优化曝光选择的方法。首先建立时间代价函数,评估各曝光时间的优先级,再迭代选择最优曝光序列。该方法的精度过度依赖初始曝光时间的选择,易导致测量结果准确性降低。汪等^[10]提出使用二分递归法计算饱和和亮度不足区域的最佳投影亮度。该方法只需额外投影少量图案,但精度较低。

在调整投影强度法方面,Zhang等^[11]使用直方图中的波峰和波谷预测投影光强的数量,即具有不同亮度的条纹图案的数量。然而,对于复杂的场景,如果直方图没有明显的波峰和波谷,而是相对均匀的分布,则该方法不起作用。毛等^[12]提出通过投影两幅强度不同的相移光栅图,并将两次变形光栅图融合,从而得到更完整的测量结果。该方法难以具体量化选择的投影强度,需要多次

投影确定合适的强度。Zhang等^[13]提出建立表面系数查找表来计算投影强度的方法对表面反射率变化较大的物体进行测量。首先建立相机拍摄像素的投影强度模型,然后投影低强度条纹计算被测物体表面系数,建立查找表,最后根据该表计算出每个像素的最佳投影强度。该方法可以准确地调整投影强度,提高了测量精度,但对于表面过饱和和区域较大的物体,计算复杂,效率较低。冯等^[14]提出了一种结合图像融合和差值预测的高反光表面三维形貌测量方法。首先基于掩膜图像融合得出物体的饱和区域,通过差值预测求出该区域的最佳投影强度。然后降低整体投影强度,在确保没有饱和像素点的条件下进行坐标匹配,从而生成自适应条纹图。该方法可以有效测量高反光物体三维形貌,但是仅适合应用于在理想场景下进行测量,在实际测量过程中,反射率变化、环境光干扰和噪声等均会影响测量精度。Zheng等^[15]提出采用Otsu多阈值算法对被测物体表面反射率分布的直方图进行分类,根据光强响应函数生成多组光强最优的条纹图案。将不同光强下获得的原始条纹图逐像素合成高动态范围条纹图,并采用四步相移算法从合成图像中获取展开相位。该方法可以准确获得展开相位,但是仍存在投影条纹图像过多的问题。

除上述方法,研究学者也提出了其他的方法对高反光物体进行测量,如多相机技术^[16]、偏振滤光片法^[17,18]及一些其他技术^[19,20],这些方法系统复杂,增加了成本。目前的方法虽然能够实现对高反光物体的测量,但仍存在测量时投影图像过多,效率较低,且测量精度不高的问题。

为解决上述问题,本文提出先计算出物体表面系数,根据反射系数分布直方图对像素点进行分组,计算每组的最佳投影强度,利用极线约束和相位结合进行坐标映射,生成自适应条纹图,投影到被测物体表面得到变形条纹图,再进行相位解算和三维形貌恢复。

1 原理与方法

1.1 计算最佳投影强度

在条纹投影系统中,射进相机的光分为三种:物体表面反射的投影光 rI_p 、物体表面反射的环境光 rI_a 和相机直接采集的环境光 I_b , r 为被测物体表面的反射率,如图1所示。

在对高反光物体的三维测量中,相机采集到

的实际光强可表示为

$$I_c = kt(rI_p + rI_a + I_b) \quad (1)$$

式中, k 为相机响应感光度; t 为相机曝光时间; I_p 为投影仪发出的光强; I_a 为投射到物体表面的环境光。

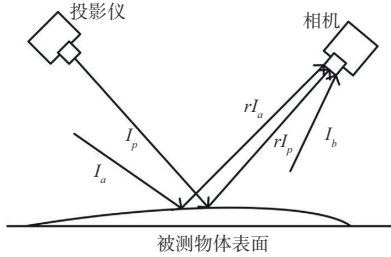


图1 进入相机的光线组成

设 $\alpha = ktr$ 为反射系数, $T_1 = kt(rI_a + I_b)$ 为环境系数, 式 (1) 可简化为

$$I_c = \alpha I_p + T_1 \quad (2)$$

由此可得投影灰度值为

$$I_p = \frac{I_c - T_1}{\alpha} \quad (3)$$

为确定被测物体的饱和区域, 投影并拍摄一张强度为 255 的条纹图像, 如果像素的灰度值高于灰度阈值, 认为该像素为饱和像素。考虑到噪声的影响, 需要保留一定的灰度值空间, 因此将灰度的阈值设置为 250, 生成掩膜表示为

$$M = \begin{cases} 1 & I_c > 250 \\ 0 & I_c \leq 250 \end{cases} \quad (4)$$

为得到饱和区域的反射系数 α 和环境系数 T_1 , 投影一系列低强度条纹图表示为

$$I_p^{(i)} = I + G \times i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

式中, I 为初始投影灰度值; G 为相邻灰度图像序列的灰度差; i 为拍摄的图像数。

由式 (2) 可知, 当相机采集条纹图像没有过饱和区域时, 已知投影图像强度和相机拍摄条纹图像强度, 即可计算出反射系数 α 和环境系数 T_1 。因此投影多幅低强度条纹图像, 反射系数和环境系数表示为

$$\begin{cases} I_c^{(1)} = \alpha I_p^{(1)} + T_1 \\ I_c^{(2)} = \alpha I_p^{(2)} + T_1 \\ \dots\dots \\ I_c^{(n)} = \alpha I_p^{(n)} + T_1 \end{cases} \quad (6)$$

由于一种投影光强可以适应一定范围的表面反射率变化, 故无需计算每个像素的最佳投影强度。利用式 (3) 计算最佳投影强度时, 提取图像中具有相近反射系数的像素点, 计算出反射系数的平均值 $\bar{\alpha}$ 和环境系数的平均值 $\bar{T}_1$, 同时, 考虑到噪声和平均值的影响, I_c 定为 250, 因此, 投影仪

的最佳投影光强为

$$I_{\text{pideal}} = \frac{250 - \bar{T}_1}{\bar{\alpha}} \quad (7)$$

1.2 坐标映射

上述计算过程基于相机像素坐标系完成, 所得最佳投影光强分布需要转换到投影仪像素坐标系下, 即需要建立相机与投影仪之间的坐标对应关系。本文采用极线约束和相位信息相结合的方法计算相机和投影仪的坐标对应关系。

极线约束原理如图 2 所示, 投影仪光心 O_p 、相机光心 O_c 和被测物体上一点 P 构成极平面, $O_p O_c$ 为基线, 基线与投影仪成像平面和相机成像平面的交点 e_p 、 e_c 为基点, 极平面与图像平面相交于 $e_p P_p$ 、 $e_c P_c$, 称为极线。 P 在投影仪平面和相机平面上的像点一定在极线上, 故相机上的像点 P_c 的匹配点一定在投影仪成像平面的极线上。

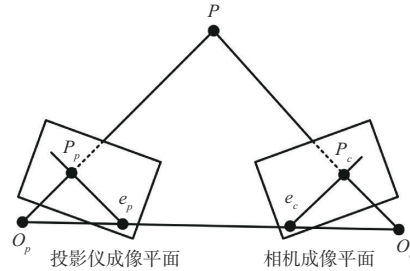


图2 极线约束原理

被测物体上点 P 与其在相机平面上的像点 P_c 和在投影平面上的像点 P_p 可通过相机的外参矩阵 $[R_c \ T_c]$ 和投影仪的外参矩阵 $[R_p \ T_p]$ 建立关系, 可表示为

$$P_c = R_c P + T_c \quad (8)$$

$$P_p = R_p P + T_p \quad (9)$$

相机与投影仪的外参矩阵均由标定获得。

假设 $[R \ T]$ 为相机和投影仪之间的外参矩阵, 则利用式 (8) 和式 (9) 可得点 P 在相机和投影仪坐标系中的像点的关系为

$$P_c = R_c R_p^{-1} P_p - R_c R_p^{-1} T_p + T_c = [R \ T] P_p \quad (10)$$

相机与投影仪的外参矩阵可表示为

$$R = R_c R_p^{-1} \quad T = T_c - R T_p \quad (11)$$

根据系统的外参矩阵, 可得出本质矩阵为

$$E = tR \quad (12)$$

式中, t 是平移向量 T 的反对称矩阵。

已知相机平面一点 P_c , 将 P_c 坐标进行归一化处理为 P_{c1} , 则

$$P_{c1} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用式 (12) 和式 (13) 可计算出极线方程的系数 l_p 为

$$l_p = EP_{c1} = \begin{bmatrix} a_p \\ b_p \\ c_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

利用式 (14) 可得 P_c 对应的投影仪图像平面的极线方程, 表示为

$$a_p x + b_p y + c_p = 0 \quad (15)$$

式中 l_p 是一个 3×1 向量, a_p 、 b_p 和 c_p 为极线方程的系数。

极线约束只能将匹配范围缩小至一条直线上, 要想获得投影仪与相机的对应点, 还要有另一个方向的约束, 本文选择用相位信息确定另一个方向。利用四步相移法和最佳三条纹选择法对相机获取的条纹图像进行相位解算, 得到图像中各像素点的绝对相位。对于投影仪上的像素点 $P_p(u_p, v_p)$, 其横坐标与相位的关系为

$$u_p = \frac{V\varphi_v}{2\pi T_2} + \frac{V}{2} \quad (16)$$

式中, φ_v 为变形条纹的绝对相位; V 为投影条纹图的宽度; T_2 为用于计算的投影条纹数目。

结合式 (15) 和式 (16), 投影仪平面上两条直线相交于一点, 便确定了相机平面上一点 P_c 在投影仪平面上唯一对应点 P_p , 如图 3 所示。

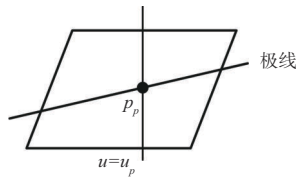


图3 坐标匹配

1.3 生成自适应条纹

为获得饱和区域的相位信息, 需要找到使该区域像素均不过曝的投影强度。首先, 根据式 (4) 确定饱和像素的坐标位置, 遍历拍摄的灰度图像序列中的饱和区域。如果拍摄的图像 $I_c^{(i)}$ 不存在饱和像素, 且下一幅图像 $I_c^{(i+1)}$ 中存在饱和像素, 找到 $I_c^{(i)}$ 中不饱和且 $I_c^{(i+1)}$ 中饱和的像素点, 并找到这些点中灰度值变化最大的点, 设为 (x_0, y_0) , 根据式 (2) 认为该点的表面反射系数最大, 可以作为生成低强度条纹图的依据。然后, 查找 (x_0, y_0) 处的反射系数, 根据式 (3) 计算低投影强度。灰度值为 250 的像素保持高信噪比, 故设 I_c 为 250。最后, 将该强度的条纹投影到被测物体表面, 计算出饱和区域的相位信息。

通过上述步骤得到的低强度投影条纹在低表

面系数区域的信噪比非常低, 不能计算出该区域的相位。根据饱和区域的相位信息和极线约束相结合, 可计算出相机和投影仪的坐标对应关系, 准确找到自适应条纹中需要调整的区域。

向被测物体表面投影一幅强度为 255 的正弦条纹图, 根据式 (4) 确定饱和区域, 再投影一系列低强度投影条纹, 确保饱和区域内像素点不饱和, 找出该区域内表面反射系数最大的点, 计算出该点不饱和时的强度。将这个强度的条纹投影到物体表面, 计算出饱和区域内的相位信息, 结合极线约束确定相机和投影仪的坐标对应关系。根据对应关系确定投影仪每个像素点的投影光强, 得到自适应条纹图像, 生成自适应条纹图的流程图如图 4 所示。通过投影和采集该图像, 利用四步相移法和最佳三条纹选择法进行相位解算, 根据相位与三维坐标之间的关系, 恢复物体表面三维形貌^[21]。

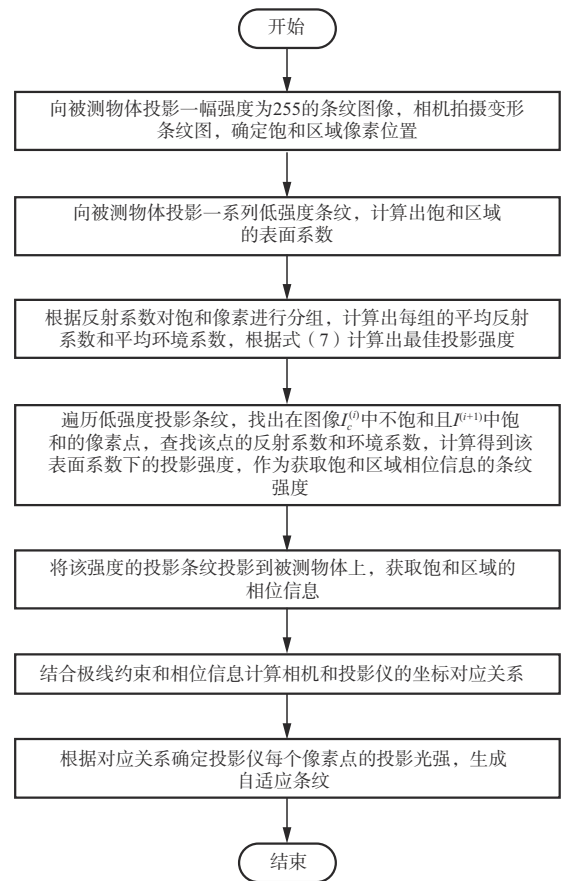


图4 生成自适应条纹的流程图

2 实验结果与分析

2.1 硬件系统

为验证本文所提方法的有效性, 搭建了条纹投影高反光物体三维测量系统, 如图 5 所示。系统包含一个投影仪、一个 CCD 相机和一个水平移动

台。其中,投影仪型号为 VisionFly 6500,其分辨率为 $1920\text{pixel}\times 1080\text{pixel}$ 。相机型号为 SVS-eco655CVGE,其分辨率为 $2448\text{pixel}\times 2050\text{pixel}$ 。水平移动台型号为 GCD203300M,精度为 $1\mu\text{m}$ 。

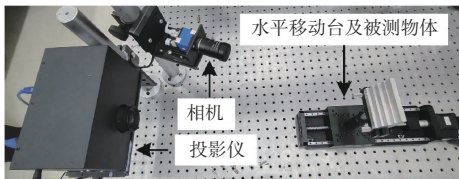
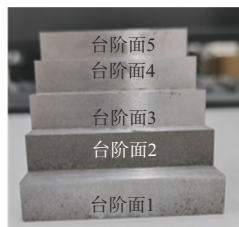


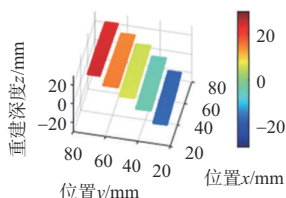
图5 测量系统图

2.2 坐标映射精度验证

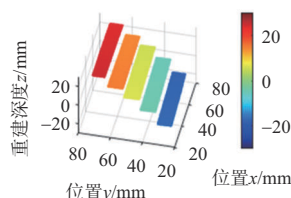
本文所提方法需要进行相机和投影仪的坐标匹配,匹配精度直接影响到被测物体的测量精度。因此要对所提坐标映射方法进行精度验证。用高反光面台阶对坐标映射精度进行验证,台阶面的高度值由三坐标测量机获得。



(a) 高反光面台阶



(b) 本文所提坐标映射方法得到的三维形貌



(c) 现有坐标映射方法得到的三维形貌

图6 高反光面台阶以及两种坐标映射方法得到的三维形貌

表1 两种坐标映射得到的台阶面数据对比

台阶面	1~2	2~3	3~4	4~5
台阶标准值 h_0/mm	9.7717	9.0197	10.9840	13.0066
测量结果 h/mm	现有方法 9.8029	8.9911	11.0055	13.0259
	本文方法 9.7966	8.9960	11.0038	13.0235
绝对误差 Δ/mm	现有方法 0.0312	-0.0286	0.0215	0.0193
	本文方法 0.0249	-0.0237	0.0198	0.0169

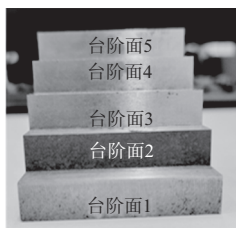
2.3 高反光物体测量实验

本文通过测量金属球面工件、非连续平面金属零件和高反光面台阶来验证所提方法的有效性和准确性。如图7所示。

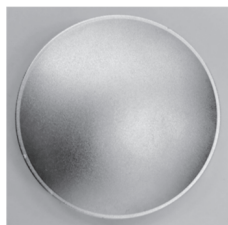
首先投影强度为255的蓝色条纹在高反光面台阶上,确定饱和区域,再通过式(5)和式(6)投影低

现有坐标映射方法为向被测物体表面投影水平方向和竖直方向的正弦条纹,解算出两个方向的绝对相位,两个方向的约束确定一点,即可计算出相机和投影仪的坐标对应关系。用本文所提的计算最佳投影强度的方法计算出高反光面台阶表面的最佳投影强度,分别用本文所提坐标映射方法和现有坐标映射方法对投影仪每个像素点的光强进行调整,生成自适应条纹,分别投影到被测物体表面,解算出绝对相位并恢复被测物体的三维形貌。如图6所示为高反光面台阶以及两种坐标映射方法得到的三维形貌,设台阶标准值为 h_0 ,测量结果为 h ,绝对误差为 Δ 。表1为得到的台阶面的数据对比结果。从表1可以看出,本文坐标映射方法得到的绝对误差最大为 0.0249mm ,现有坐标映射得到的最大绝对误差为 0.0312mm ,本文所提坐标映射方法误差减少 20.2% ,满足精度要求。

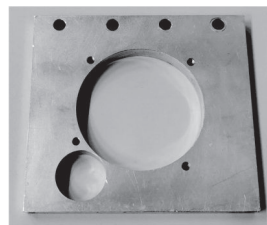
强度条纹计算饱和区域表面系数。在实际测量环境下,投影强度为36时相机拍摄的图像无法识别到清晰的条纹信息,而清晰的条纹才能解算出正确的相位信息。为保证初始投影强度下拍摄的图像中条纹清晰,式(5)中的初始投影强度 I 设为40。相邻灰度图像的灰度差的选择要能反映饱和区域像素捕获强度随投影强度的变化,便于后续计算,且尽可能拍摄较少的图像以保证测量效率。实验测试了灰度差分别为5、10、15的情况。当灰度差为5时,需要拍摄较多图像才能使饱和区域内全部像素不饱和;而当灰度差为15时,拍摄的图像不能很好地反映饱和区域像素捕获强度随投影强度的变化。因此,将灰度差定为10。得出反射系数的分布直方图,如图8所示为高反光面台阶饱和



(a) 高反光面台阶



(b) 金属球面



(c) 非连续平面金属零件

图7 金属工件

区域及其像素点反射系数分布直方图。根据分布直方图确定分组,计算每组平均反射系数和平均环境系数,根据式(7)计算最佳投影强度。

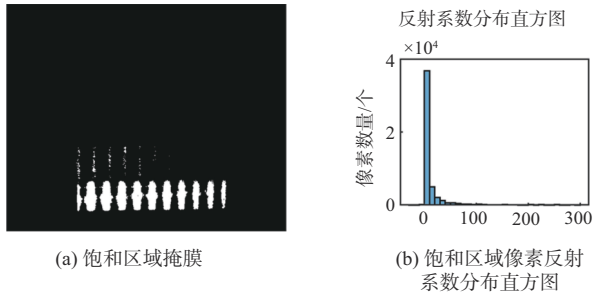


图8 高反光面台阶饱和区域及其像素点反射系数分布直方图

本文将反射系数相差不超过10定义为相近。此数据根据实验得到,将过饱和区域中每个像素的最佳投影光强计算出来,将投影光强相差不超过20的像素点分为一组。经实验验证,该光强差值为本实验环境下不会影响被测物体绝对相位的最大差值。将每组像素点的反射系数进行分析,10为反射系数差值的最佳值。

计算出最佳投影强度后,根据1.2所提坐标映射方法生成自适应条纹图,如图9所示。自适应条纹图中对应饱和区域的亮度为69、92、118、135四个亮度的条纹。传统测量方法是向被测物体表面投影单一强度的条纹,经物体调制后产生变形条纹。相机采集变形条纹,经相位解算后恢复物体三维形貌,传统测量方法仅用亮度为115的条纹投影。本文所提方法生成的自适应条纹中包含多个投影亮度的像素,较传统方法更适合测量表面反射率变化范围大的物体。为准确验证本方法,分别用本文所提方法、传统测量方法、文献[5]中的方法、文献[15]中的方法分别对零件进行测量,其中的文献[5]方法属于多重曝光法,文献[15]的方法属于调整投影强度法。

分别用四种方法对高反光面台阶进行测量,得到的结果如图10所示。台阶面的高度标准值由

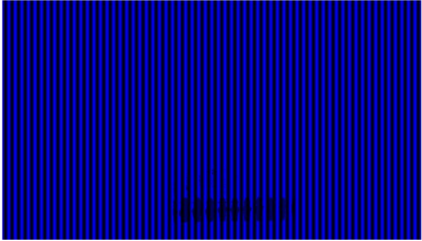


图9 高反光面台阶自适应条纹图

三坐标测量机(精度为 $1\mu\text{m}$)获得,计算出测量值与标准值之间的差值进行精度评估,数据对比结果如表2所示。由此可以看出,传统测量方法由于相机过曝使三维形貌产生空洞,误差较大。本文方法最大绝对误差为 0.0249mm ,传统测量方法的最大绝对误差为 -1.1415mm ,文献[5]的方法最大绝对误差为 0.0342mm ,文献[15]的方法最大绝对误差为 0.0306mm 。本文方法相比传统测量方法,误差减少97.8%,与文献[5]的方法相比误差减少27.2%,与文献[15]的方法相比误差减少18.6%,所提方法对比现有方法精度得到提高。

此外,从投影图像的数量进行分析,如表3所示。传统测量方法需要投影12幅条纹图像,但是无法获得高反光面台阶的完整三维形貌。文献[5]的方法需要投影2幅条纹图确定曝光时间阈值,再二分选择曝光时间采集条纹图像,最后进行图像融合求出物体三维形貌,每个曝光时间投射一组12幅图像,共需50幅图像重建台阶三维形貌。文献[15]的方法需要投影一张条纹图确定最佳投影强度,算出有4个最佳投影强度,每个投影强度投射一组12幅图像,共需49幅图像。本文方法需要1幅图像确定饱和区域,6幅图像计算最佳投影强度,12幅图像确定相位信息,生成自适应条纹后再投影12幅图像获得三维形貌,共31幅条纹图像。因此,本文方法在保证三维形貌完整的基础上提高了测量效率。

为进一步验证本文方法的普适性,选用金属球面和非连续平面金属零件进行测量。如图11所示为四种方法分别对金属球面进行测量得到的展

表2 高反光面台阶的测量结果

台阶面		1~2	2~3	3~4	4~5
台阶标准值 h_0/mm		9.7717	9.0197	10.9840	13.0066
测量结果 h/mm	传统测量方法	8.6302	8.9908	11.0110	13.0385
	文献[5]方法	9.8059	8.9914	11.0097	12.9874
	文献[15]方法	9.8023	9.0492	10.9605	13.0255
	本文方法	9.7966	8.9960	11.0038	13.0235
绝对误差 Δ/mm	传统测量方法	-1.1415	-0.0289	0.0270	0.0319
	文献[5]方法	0.0342	-0.0283	0.0257	-0.0192
	文献[15]方法	0.0306	0.0295	-0.0235	0.0189
	本文方法	0.0249	-0.0237	0.0198	0.0169

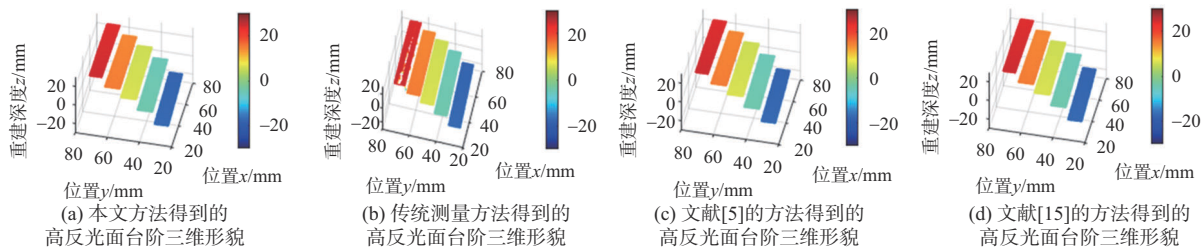


图 10 不同方法测得的高反光面台阶三维形貌对比

表 3 不同方法测量高反光面台阶所需条纹图像的数量

方法	预投影条纹数	测量条纹数	总条纹数
传统测量方法	0	12	12
文献[5]方法	2	12×4	50
文献[15]方法	1	12×4	49
本文方法	$1+6+12$	12	31

开相位及恢复的三维形貌。由于过曝现象，传统方法得到的展开相位及三维形貌会有数据缺失。其余方法的结果对比肉眼无法看出区别，因此选取第 1000 行对应的剖面图进行对比。剖面曲线对比如图 12 所示，本文方法剖面图平滑，无数据缺失或跳变，而传统方法剖面图数据存在波动，另外两种方法也均存在缺失或波动。

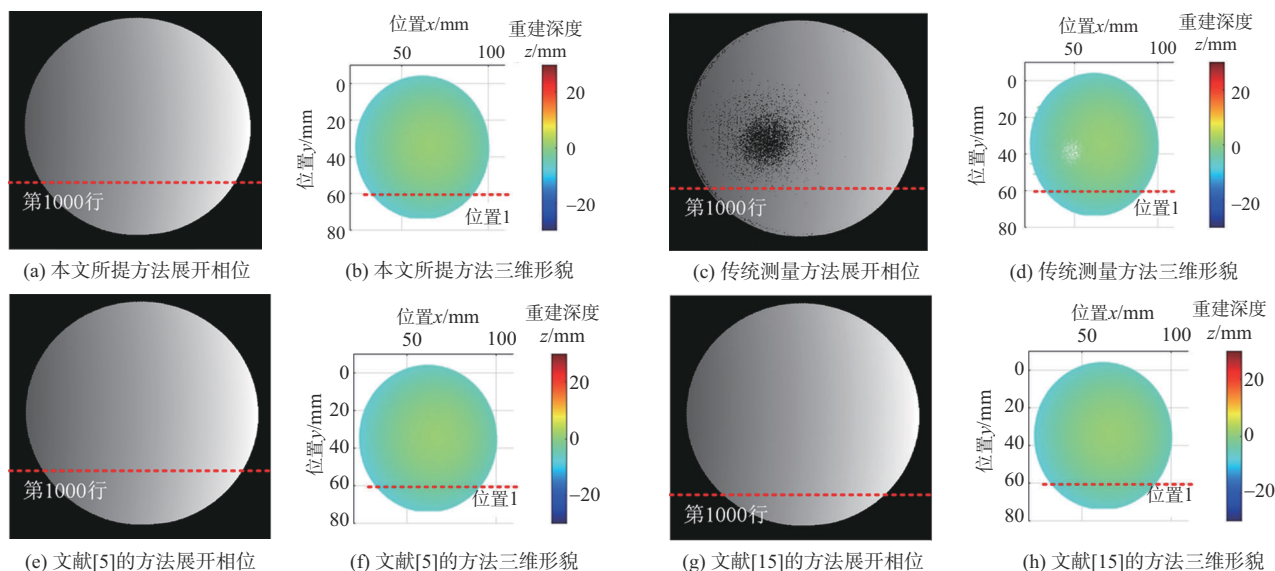


图 11 四种方法对金属球面零件的测量结果

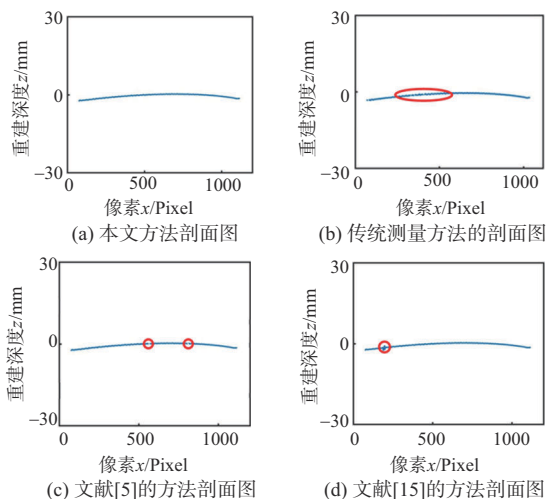


图 12 四种方法剖面图对比

用同样的四种方法对非连续平面金属零件进行测量，测量结果如图 13 所示。传统方法得到的

测量结果存在明显的数据缺失，而其余三种方法得到的展开相位及三维形貌完整。选取第 500 行对应的剖面曲线如图 14 所示，可以看出本文方法得到的该位置的剖面图无数据缺失或明显波动，而传统测量方法得到的剖面图存在波动，文献[5]的方法得到的剖面图存在数据缺失，文献[15]方法得到的剖面图存在跳变。

对选定的金属球面上的位置 1 和非连续平面金属零件上面的位置 2 的剖面数据剔除缺失数据与异常数据，对其余数据进行拟合，分析这些数据的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE)、最大残差与相关系数，设最大残差用 e_m 表示，相关系数用 r 表示，结果如表 4 所示。对于均方根误差，本文方法比传统方法减少 54.2%，比文献[5]的方法减少 23.6%，比文献[15]的方法减少 10.8%。对于

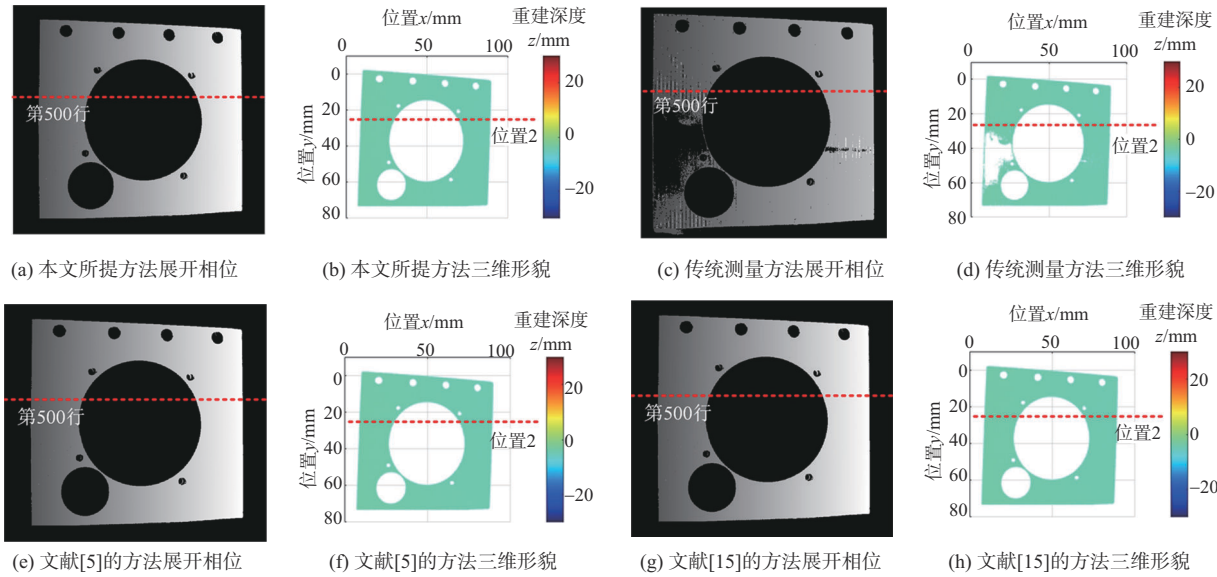


图 13 四种方法对非连续平面金属零件的测量结果

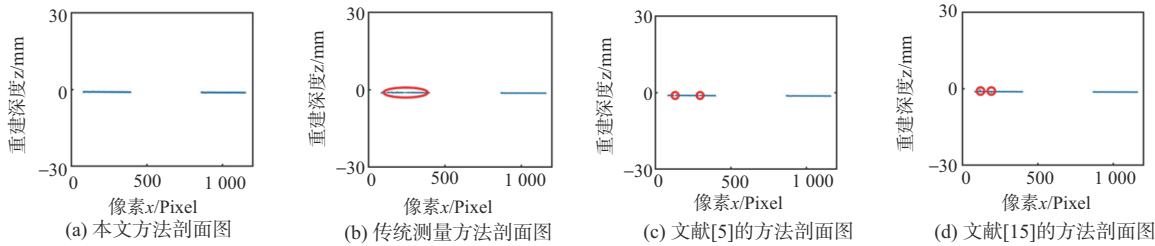


图 14 四种方法剖面图对比

最大残差，本文方法比其余三种方法均有所降低。本文方法测量数据更加平滑，测量精度有所提高。

表 4 两个不同位置误差数据分析

位置		位置 1	位置 2
均方根误差 RMSE/mm	传统测量方法	0.0523	0.0614
	文献[5]方法	0.0302	0.0368
	文献[15]方法	0.0286	0.0313
	本文方法	0.0255	0.0281
最大残差 e_m /mm	传统测量方法	0.2321	0.3437
	文献[5]方法	0.1195	0.1284
	文献[15]方法	0.1152	0.1309
	本文方法	0.1093	0.1022
相关系数 r	传统测量方法	0.9994	0.9996
	文献[5]方法	0.9999	0.9998
	文献[15]方法	0.9998	1.0000
	本文方法	0.9999	1.0000

3 结 论

针对高反光物体三维测量时投影图像数过多且精度不高的问题，本文提出根据物体表面系数计算最佳投影强度，结合极线约束与相位信息计算相机和投影仪坐标对应关系，计算出过饱和和区域最佳投影强度。然后根据该对应关系生成自适

应条纹，实现了对高反光物体三维形貌的精确测量。对于高反光台阶的测量，本文方法的测量误差比传统方法减少了 97.8%，比文献[5]的方法减少了 27.2%，比文献[15]的方法减少了 18.6%。投影条纹数比文献[5]的方法减少了 19 幅，比文献[15]的方法减少了 18 幅。针对金属球面零件和非连续金属平面零件的测量，本文方法的均方根误差比传统方法减少 54.2%，比文献[5]的方法减少 23.6%，比文献[15]方法减少 10.8%，本文方法最大残差比其余三种均有所降低。实验结果表明，所提方法可以更加快速准确的获得高反光物体的三维形貌。本文方法只适合静态高反光物体的测量，对动态高反光物体的测量存在局限性，下一步将研究如何将本文所提方法进行改进来测量动态高反光物体的三维形貌。

参考文献：

[1] 孙超, 石久烨, 王梅渊, 等. 单目线结构光三维重建系统标定方法研究[J]. 光学技术, 2024, 50(6):698—705.
Sun Chao, Shi Jiuye, Wang Meiyuan, et al. Research on the calibration method of monocular camera line structured light three-dimensional reconstruction system[J]. Optical Technique, 2024, 50(6):698—705.
[2] 王晨, 张宗华, 丁宇航, 等. 基于立体标靶的双目系统标定研

- 究[J]. 光学技术, 2020, 46(3):322—329.
- Wang Chen, Zhang Zonghua, Ding Yuhang, et al. Research on the calibration of binocular system based on stereoscopic target[J]. Optical Technique, 2020, 46(3):322—329.
- [3] 刘泉新, 林世治, 吴光强, 等. 大视场光电测量系统广角相机标定方法研究[J]. 光学技术, 2022, 48(4):452—458.
- Liu Quanxin, Lin Shizhi, Wu Guangqiang, et al. Research on calibration method of wide-angle camera for large field of view photoelectric measurement system[J]. Optical Technique, 2022, 48(4):452—458.
- [4] 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 Zonghua, Yu Jin, Gao Nan, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3):104—116.
- [5] 朱坡. 彩色高反光物体三维形貌测量技术[D]. 天津:河北工业大学, 2023:19—24.
- Zhu Po. 3D shape measurement technology of color highly reflective objects[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023:19—24.
- [6] Zhu Zhenmin, Dong Yawen, Peng Xiang, et al. Rapid exposure time estimation method for high-dynamic range surface[J]. Optik, 2023, 273:170467.
- [7] 李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11):167—174.
- Li Zhaojie, Cui Haihua, Liu Changyi, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11):167—174.
- [8] 王张颖, 张宁宁, 高楠, 等. 基于单色条纹投影的高动态范围物体表面形貌三维测量[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8):196—204.
- Wang Zhangying, Zhang Ningning, Gao Nan, et al. High dynamic range 3D surface shape measurement based on monochrome fringe projection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(8):196—204.
- [9] Li Ji, Guan Jingtian, Chen Xiaobo, et al. Adaptive optimal exposure selection based on time cost function for 3D reconstruction of high dynamic range surfaces[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(12):ACF330.
- [10] 汪锦航, 卢荣胜, 刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(19):145—154.
- Wang Jinhang, Lu Rongsheng, Liu Duanmao. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19):145—154.
- [11] Zhang Liang, Chen Qian, Zuo Chao, et al. High dynamic range 3D shape measurement based on the intensity response function of a camera[J]. Applied Optics, 2018, 57(6):1378—1386.
- [12] 毛翠丽, 卢荣胜. 高动态范围表面三维形貌重建新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7):151—160.
- Mao Cuili, Lu Rongsheng. A new method for 3D shape reconstruction with a high dynamic range surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7):151—160.
- [13] Zhang Mingda, Chen Chen, Xie Le, et al. Accurate measurement of high-reflective surface based on adaptive fringe projection technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 172:107820.
- [14] 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):119—127.
- Feng Wei, Tang Shaojing, Zhao Xiaodong, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5):119—127.
- [15] Zheng Renhao, Li Lijing, Wan Maosen, et al. Automatic optimization of projection intensity for high dynamic range 3D surface measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 177:107888.
- [16] Feng Shijie, Chen Qian, Zuo Chao, et al. Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces[J]. Optics Communications, 2017, 382:18—27.
- [17] 郝婧蕾, 赵永强, 赵海盟, 等. 偏振多光谱机器视觉的高反光无纹理目标三维重构方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(6):816-824.
- Hao Jinglei, Zhao Yongqiang, Zhao Haimeng, et al. 3D reconstruction of high-reflective and textureless targets bases on multispectral polarization and machine vision[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(6):816—824.
- [18] Kupinski M, Bradley C, Diner D, et al. Estimating surface orientation from microfacet Mueller matrix bidirectional reflectance distribution function models in outdoor passive imaging polarimetry[J]. Optical Engineering, 2019, 58(8):082416.
- [19] Liu Yanzhao, Fu Yanjun, Zhuan Yuhao, et al. High dynamic range real-time 3D measurement based on Fourier transform profilometry[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 138:106833.
- [20] Martino F, Patruno C, Mosca N, et al. Material recognition by feature classification using time-of-flight camera[J]. Journal of Electronic Image, 2016, 25(6):061412.
- [21] 陈超. 基于条纹投影的三维形貌测量技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2018:17—19.
- Chen Chao. Research on three-dimensional profilometry techniques based on fringe projection[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018:17—19.