doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202502006

基于互补格雷码结构光的陶瓷球缺陷无损检测

缪徐奕[1],汪韩蕾[1],顾国庆[2],颜井意[3],杜建周[4]

1. 盐城工学院 信息工程学院,江苏 盐城　224051;
2. 盐城工学院 土木工程学院,江苏 盐城　224051;
3. 江苏东浦精细陶瓷科技股份有限公司,江苏 连云港　222000;
4. 盐城工学院 材料科学与工程学院,江苏 盐城　224051

摘要:针对陶瓷球表面缺陷无损快速检测的需求,搭建了一套基于互补格雷码结构光技术的成像系统。通过自主搭建互补格雷码结构光平台,使用CCD相机采集陶瓷球表面缺陷,利用计算机对陶瓷球表面缺陷特征进行了分析,结合互补格雷码单目结构光点云重建实现缺陷陶瓷球表面的三维形貌重构,最后通过对具有凹坑、划痕两种缺陷的陶瓷球进行了检测试验,并与经典的正弦条纹投影结构光技术进行了对比。结果证明,互补格雷码结构光技术在抑制陶瓷球表面高镜面反射干扰的同时,能够精准重构陶瓷球表面凹坑、划痕等缺陷的三维形貌,为陶瓷球表面缺陷检测及质量评估提供了重要参考。

关键词:陶瓷球;缺陷检测;结构光;互补格雷码;三维重建

中图分类号:TQ174.1;TH741　**文献标志码**:A　**文章编号**:1671-5322(2025)02-0035-08

陶瓷球因具备轻量化、高硬度、高强度、低摩擦、高耐热性、电绝缘性及长寿命等诸多优势,在工业生产中得到了极大的应用[1-3]。然而陶瓷材料固有的脆性及其生产过程中容易产生的表面缺陷,使得陶瓷球在使用中更易出现早期疲劳失效[4]。因此,为了避免表面缺陷对性能的损害,必须对成品进行非破坏性检测。随着工业对陶瓷球需求的不断增加,如何准确、快速地检测陶瓷球表面缺陷已成为亟待解决的关键问题[5]。

当前,针对陶瓷球表面缺陷的检测方法主要包括人工检测、射线检测、超声波探伤、激光散斑检测以及基于机器视觉的智能检测技术等[6]。近年来,机器视觉系统借助计算机和工业相机等设备,能够实现毫米甚至微米级的表面缺陷特征捕捉,因此越来越多的研究者将其运用于陶瓷球缺陷检测领域。张小辉等[7]通过搭建陶瓷球检测平台并结合机器视觉技术,实现了对陶瓷球表面缺陷的高效识别;安冬等[8]提出一种基于Transformer的超分辨率残差网络,通过增强图像纹理和改进训练策略,有效提升陶瓷球滚动体表面缺陷检测的精度;廖达海等[9]提出一种基于剪切波变换的图像增强方法,结合多种图像处理方法,能够有效检测陶瓷球内圈沟道表面的缺陷。

结构光技术作为一种高效且精确的三维测量方法,凭借高精度和无接触的测量优势,在工业检测和3D扫描等领域得到了广泛应用,其中在生产线检测和复杂形状物体的扫描中表现尤其出色[10]。Zhang等[11]提出了一种基于条纹反射的陶瓷球表面缺陷检测方法,通过检测条纹反射图像的畸变来识别缺陷;Sun等[12]设计了一种基于条纹反射的陶瓷球表面缺陷快速视觉检测算法,通过图像预处理、灰度值累积差分定位、边缘检测、像素值逐行差分和模板匹配等进行特征点定位,提前对条纹进行处理,使陶瓷球表面反射图案为平行条纹图,从而减小了后续处理的难度。

上述研究虽然对陶瓷球缺陷检测提供了重

收稿日期:2024-10-24

基金项目:连云港市重大技术攻关揭榜挂帅项目(CGJBGS2202)。

作者简介:缪徐奕(2000—),男,江苏南通人,硕士生,主要研究方向为陶瓷球无损检测。

通信作者:顾国庆(1984—),男,江苏盐城人,副教授,博士,主要研究方向为结构安全监测。

要依据,但是缺乏对陶瓷球表面缺陷三维点云数据获取的研究。本文以陶瓷球为研究对象,基于互补格雷码结构光技术,利用其编码方式的互补性,能够有效抵消复杂光照条件下外部干扰因素,显著提高三维测量精度的优点[13],提出一种专门针对高反光陶瓷球表面缺陷的结构光优化方法[14]。实验结果表明,与已有方法相比,本方法更适用于高反光、小尺寸物体的表面缺陷检测。

1　格雷码编码技术

格雷码(Gray Code),也称反射二进制码(reflected binary code, RBC),是一种特殊的二进制编码方式。格雷码主要特性包括反射性、循环性和相邻性。反射性是指通过反射现有序列(即颠倒顺序)生成新的格雷码序列;循环性是指格雷码序列首尾相连时,每对相邻码之间仅有一位不同;相邻性则确保序列中任何两个相邻码之间只有一位不同,减少了多位同时变化带来的错误。格雷码的这些特性使其广泛运用于硬件设计和数字电路之中,有效减少了信号转换过程中的错误。

格雷码的生成方法主要有两种:递归法和迭代法。递归法通过反射$n-1$位格雷码序列生成n位格雷码;迭代法则是通过逐位计算二进制数的异或操作来生成。格雷码与二进制码之间的转换是通过一些简单的位操作实现的,具体操作如式(1)所示。

$$G_i=B_i\oplus B_{i+1},B_i=G_i\oplus G_{i+1} \tag{1}$$

式中:G_i为格雷码的第i位;B_i为二进制码的第i位;⊕为异或操作。

在式(1)的具体操作中,对于n位格雷码和二进制码,G_n和B_n保持不变。

2　互补格雷码结构光检测原理

2.1　互补格雷码结构光技术

互补格雷码结构光通过使用一对互补的编码图案,有效减少环境噪声和光照变化对测量精度的影响。互补格雷码结构光使用的4位互补格雷码如图1所示,基于互补格雷码的结构光系统工作流程如图2所示。由图2可知,首先利用投影仪和相机搭建结构光系统,然后对结构光系统进行标定以获取系统的内外参数,最后利用标定结果实现结构表面的点云重建,完成点云数据的获取。

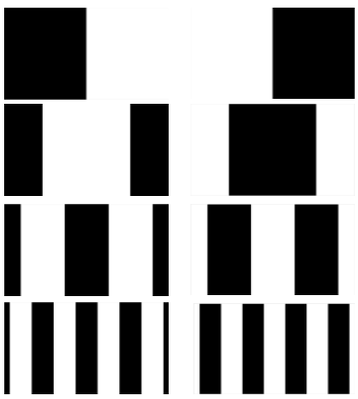


图1　4位互补格雷码

Fig. 1　4-bit complementary Gray code

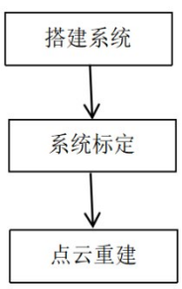


图2　基于互补格雷码的结构光系统工作流程

Fig. 2　The Workflow of structured light system based on complementary Gray code

结构光系统示意图如图3所示,投影仪首先投射一组格雷码图案到目标物体表面,并由相机捕捉其反射图像;随后将该组图案的互补编码(即每个比特位取反)投射到同一表面,再由相机捕捉反射图像;相机将这些携带物体表面几何形状的变形编码信息上传至计算机,由计算机对两组图像的互补性进行逻辑操作(如异或运算),在有效消除环境光照变化和表面反射不均带来误差的同时,得到更加准确的点云数据,从而完成待测物体表面形貌的测量。

2.2　系统标定及三维点云数据生成算法

相机在一个像素处获得的光强是由投影仪像素发出的光量(称为直接分量)与来自其他光源的光量(称为全局分量)的总和。设$S=\{I_1,I_2,\cdots,I_k\}$为一组反射图像集合,p为有效的像素位置,L_p为p处的光强,$L_p^+=\max\limits_{0<i\leqslant k}I_i(P)$,$L_p^-=\min\limits_{0<i\leqslant k}I_i(p)$,则$p$处的直接分量$L_d(p)$和全局分量$L_g(p)$分别为

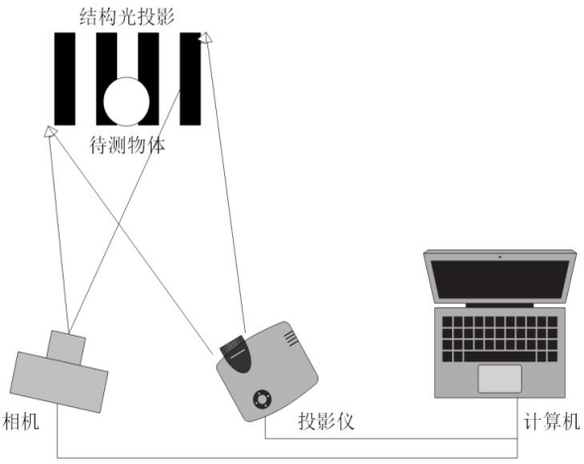


图3　结构光系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of a structured light system

$$L_{\mathrm{d}}(p)=\frac{L_p^{+}-L_p^{-}}{1-b},\ L_{\mathrm{g}}(p)=2\frac{L_p^{-}-bL_p^{+}}{1-b^2} \tag{2}$$

式中：$b\in[0,1)$表示无投影仪时的环境光量，本文设置b=0。

根据这些光分量，通过鲁棒的像素分类方法将结构光模式解码为投影仪的行列对应关系，即将角点坐标从相机图像坐标系转换到投影仪图像坐标系，并以棋盘格标定板角点坐标为中心提取小图像区域（如50 pixels×50 pixels），利用区域中所有正确解码的角点像素来计算从相机坐标系到投影仪坐标系的局部单应性矩阵。设q为所考虑区域中某点的解码投影仪像素，则能找到一个最小的单应性矩阵$\hat{\boldsymbol{H}}$，即

$$\hat{\boldsymbol{H}}=\arg\min_{\boldsymbol{H}}\sum\nolimits_{\forall p}\left\|\boldsymbol{q}-\boldsymbol{H}\boldsymbol{p}\right\|^2 \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{H}\in R^{3\times3}$，$\boldsymbol{p}=\left[x,y,1\right]^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{q}=\left[x_{\mathrm{col}},y_{\mathrm{row}},1\right]^{\mathrm{T}}$

式中：$\boldsymbol{H}$为单应性矩阵；x、y分别是相机图像坐标系下像素点p的坐标；x_{col}、y_{row}分别为投影仪图像坐标系下水平方向和竖直方向的坐标。

位于图像区域中心的目标角点$\bar{p}$，通过局部单应性矩阵$\hat{\boldsymbol{H}}$可以被转换为投影仪坐标系中的角点$\bar{q}$，即

$$\bar{q}=\hat{\boldsymbol{H}}\cdot\bar{p} \tag{4}$$

将世界坐标系固定到棋盘格标定板平面，使用张正友标定法基于相机角点位置和投影仪角点位置分别计算相机和投影仪的内部参数；在固定相机和投影仪内部参数的基础上，通过角点位置计算立体系统的外部参数。

张正友标定法采用针孔摄像机模型，该模型假设摄像机的投影是线性的，即

$$s\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix}=\boldsymbol{K}\left[\boldsymbol{A}\,|\,\boldsymbol{T}\right]\begin{bmatrix}X\\Y\\Z\\1\end{bmatrix} \tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}f_x&0&c_x\\0&f_y&c_y\\0&0&1\end{bmatrix}$，$\left[\boldsymbol{A}\,|\,\boldsymbol{T}\right]=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&r_{13}&t_x\\r_{21}&r_{22}&r_{23}&t_y\\r_{31}&r_{32}&r_{33}&t_z\end{bmatrix}$

式中：$[X,Y,Z,1]$为三维点坐标通过透视投影映射到二维图像平面$[u,v,1]$；$\boldsymbol{K}$为内参矩阵；$\boldsymbol{A}$和$\boldsymbol{T}$分别为旋转矩阵和平移向量，合称为外参矩阵；f_x、f_y分别表示X、Y方向上的焦距；c_x、c_y表示光心在图像平面上的坐标；r、t分别代表旋转变量和平移变量。

3　实验准备

3.1　实验系统搭建

为验证互补格雷码结构光技术的可行性，搭建了图4所示的三维重建系统。该系统主要由1台工业CCD相机（POINTGREY GS3-U3-51S5M-C）、1个工业镜头（Fujinon HF25SA-1）、1台工业投影仪（TEXAS INSTRUMENTS DLP 3010EVM-LC）以及1台计算机组成。实验前设置系统参数如下：相机的焦距为25 mm、光圈为F/8.0、分辨率为2 448 pixels×2 048 pixels、快门时间为13 ms、增益设置为20 dB，投影仪的分辨率为256 pixels×160 pixels。实验时，将通过C++生成的互补格雷码图像投影到待测物体表面，并由相机采集反射图像；通过系统标定与三维点云数据生成算法，获取系统标定参数和三维点云数据。

3.2　实验系统标定

采用角点间距为2.5 mm、尺寸为12×9的棋

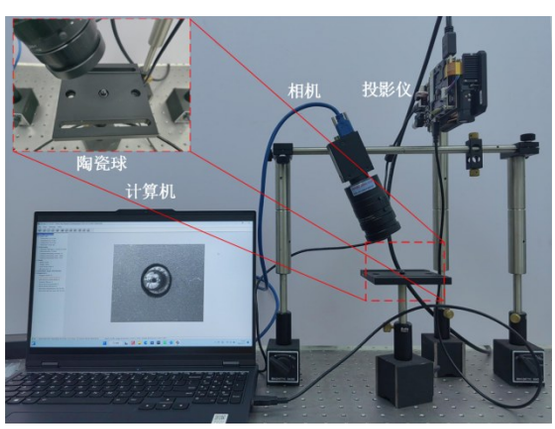
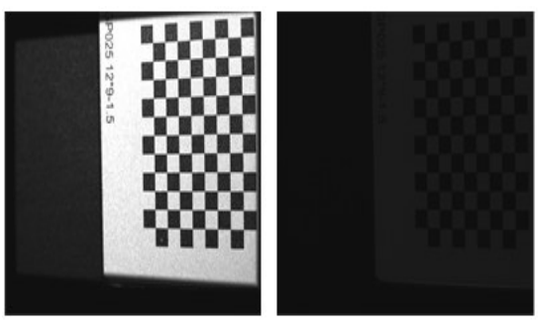


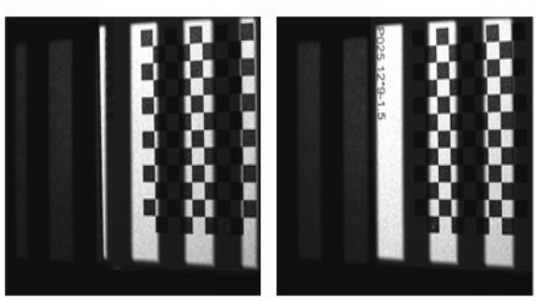
图4　互补格雷码结构光系统

Fig. 4　Complementary Gray code structured light system

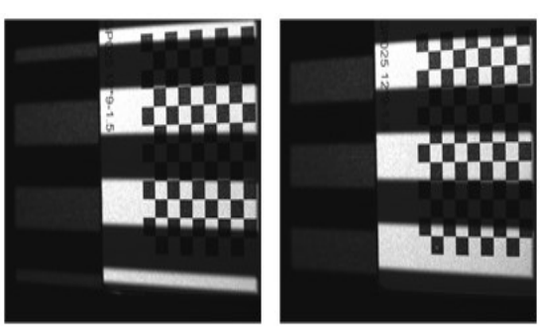
盘格标定板对互补格雷码结构光系统进行标定。标定时选择 8 位互补格雷码,依次投影全白、全黑、水平和竖直格雷码,拍摄 34 张图像作为一组;变更标定板位置,共拍摄 6 组标定图像,如图 5 所示。经过解码和角点识别处理,得到标定图像的解码结果如图 6 所示,标定结果系统参数如表 1 所示。



a　最大和最小照明亮度条件下的标定板



b　一组竖直方向互补格雷码结构光投影下的标定板



c　一组水平方向互补格雷码结构光投影下的标定板

图 5　标定图像

Fig. 5　Calibration image

由表 1 可知,相机与投影仪标定后重投影误差分别为 0. 228 px 和 0. 267 px, 均小于 0. 5 px,满足标定精度要求,证明标定结果精度的准确性。

3. 3　实验系统标定精度检验

为验证结构光相机的标定精度及其三维点云生成算法的准确性,利用已标定的结构光相机,对图 7 所示的直径为 40 mm 的标准球进行三维点云数据采集测试。具体方法是对直径 40 mm 的标准球投射高精度的格雷码,记录其在标准球表面上的变形;使用重建算法生成标准球的三维点云数据,采用球面拟合方法将采集的点云数据与标准球的已知几何参数进行对比,结果显示所拟球面直径为 40. 197 3 mm。该实验表明,系统在几何测量中的误差极小,能够达到高精度的重建效果,从而证明了其在后续实验中准确捕捉表面缺陷的能力。

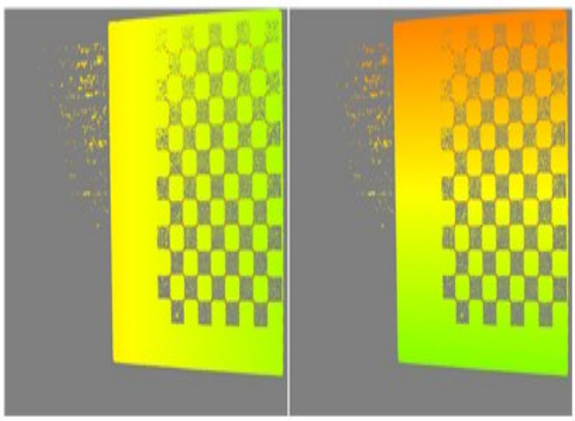


图 6　水平方向和竖直方向解码图

Fig. 6　Decoded images in the horizontal and vertical directions

4　陶瓷球的三维重建实验

为了进一步验证该系统及算法在陶瓷球表面缺陷检测中的实际应用效果,进行了 2 组实验。首先,针对图 8 所示具有凹坑缺陷的直径 7 mm 陶瓷球样品进行三维点云数据采集,该陶瓷球表面存在直径为 2 mm 的凹坑缺陷。通过同样的格雷码投射与解码流程,系统成功地重建了陶瓷球的三维形貌,如图 8d 所示,并准确捕捉到凹坑的尺寸和位置,表明该系统对局部缺陷的检测具有较高的敏感度和精度。

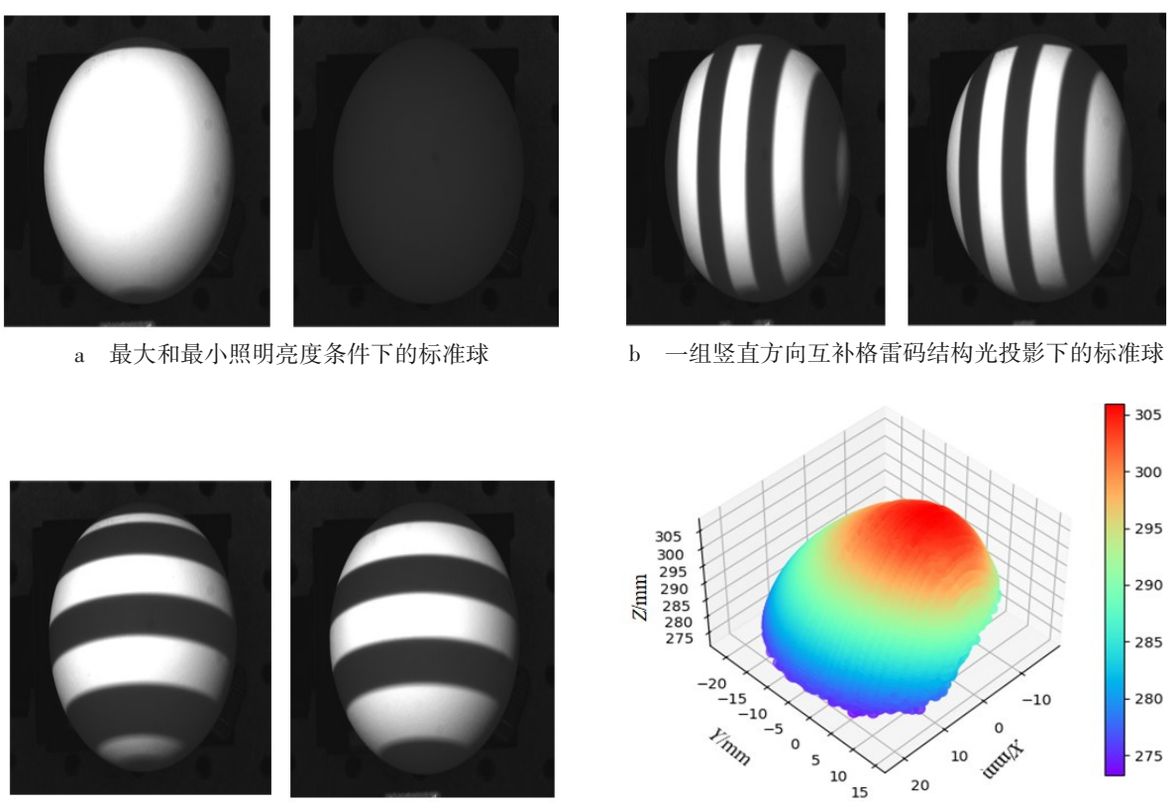
在第二组实验中,针对图 9 所示具有划痕缺陷的直径 25 mm 陶瓷球进行表面数据采集,该陶瓷球表面存在 5 mm 长度的划痕缺陷。与凹坑缺陷检测相似,系统通过投射和解码格雷码图案,重建了划痕缺陷的陶瓷球三维形貌,如图 9d 所示。通过对划痕的三维轮廓进行分析,系统能够清晰地展示划痕的深度和长度等几何特征,进一步验证了该算法在更小面积表面缺陷检测中的适用性。

表 1　标定结果系统参数

Table 1　System parameters of calibration results

参数	相机	投影仪
$\boldsymbol{K}$	$\begin{bmatrix} 9\,841.319 & 0 & 1\,212.479 \\ 0 & 9\,309.036 & 1\,090.028 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\,383.793 & 0 & 433.419 \\ 0 & 2\,415.151 & 454.330 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
k_1	−0.808	−0.970
k_2	1.193	36.585
k_3	−0.012	−0.011
p_1	0.003	−0.030
p_2	0	0
重投影误差	0.228	0.267
$[\boldsymbol{A}\|\boldsymbol{T}]$	$\begin{bmatrix} 0.882 & 0.012 & -0.470 & 94.771 \\ -0.011 & 0.999 & 0.005 & -9.066 \\ 0.470 & 0.001 & 0.882 & 241.671 \end{bmatrix}$	

注：表中 k_1、k_2、k_3 为径向畸变参数，p_1、p_2 为切向畸变参数。



a　最大和最小照明亮度条件下的标准球　　b　一组竖直方向互补格雷码结构光投影下的标准球

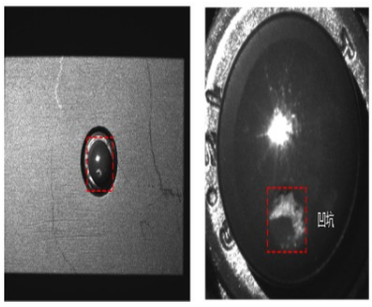
c　一组水平方向互补格雷码结构光投影下的标准球　　d　标准球三维点云图

图 7　标准球实验及三维点云结果

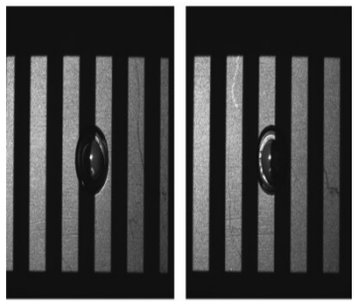
Fig. 7　Experiment on standard sphere and 3D point cloud results

5　与经典的正弦条纹投影结构光技术的对比

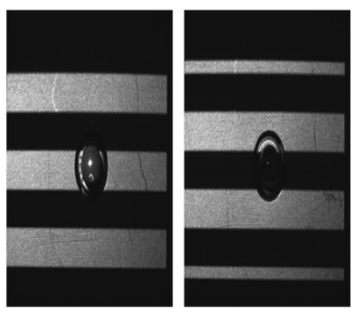
正弦条纹投影结构光通过向目标物体表面投射连续变化的正弦光强条纹，利用相机捕捉条纹的变形量和相位信息，实现三维形貌的重建。由于正弦条纹光强的灰度变化连续且细微，环境光的变化易导致条纹光强分布失真，从而影响相位解码的精度；此外，对于具有陡峭曲率变化或存在遮挡的表面，条纹形状可能发生严重失真，



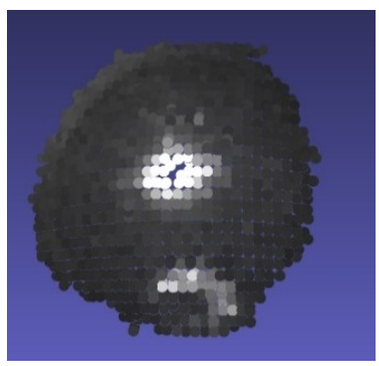
a　最大照明条件下的凹坑缺陷陶瓷球



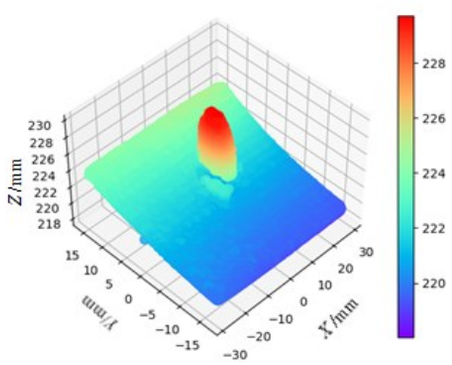
b　一组竖直方向互补格雷码结构光投影下的凹坑缺陷陶瓷球



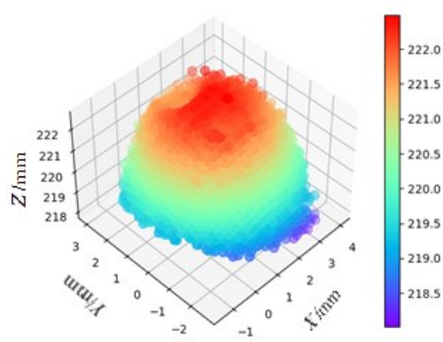
c　一组水平方向互补格雷码结构光投影下的凹坑缺陷陶瓷球



d　重建表面缺陷的陶瓷球三维形貌



e　凹坑缺陷陶瓷球三维点云全图



f　凹坑缺陷陶瓷球三维点云球面局部图

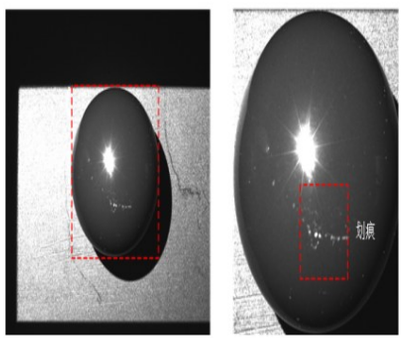
图 8　凹坑缺陷陶瓷球实验及三维点云结果

Fig. 8　Experiment on ceramic balls with pit defects and 3D point cloud results

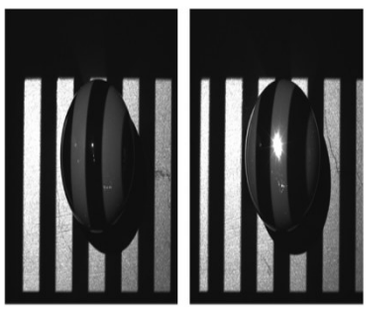
导致解码困难;另外,在高反光表面,条纹过曝或反射强度不均也会引发局部数据丢失和误差,从而导致解码结果不连续,对缺陷检测效果产生显著影响。相比之下,本文提出的互补格雷码结构光技术通过投射互补编码图案,既能够有效识别和捕捉表面缺陷,具备处理复杂表面形貌的能力,又能有效抑制高反光区域的干扰,显著降低了失配问题,增强了系统对复杂表面的适应能力和检测可靠性。

6　结论

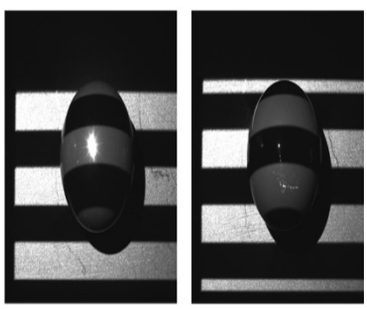
本文设计了一种基于互补格雷码结构光技术的陶瓷球表面三维重建系统,通过自主搭建互补格雷码结构光平台,使用CCD相机采集陶瓷球表面缺陷,利用计算机对陶瓷球表面缺陷特征进行了分析,最后通过对具有凹坑、划痕两种缺陷的陶瓷球进行了检测实验,并与经典的正弦条纹投影结构光技术进行了对比。结果证明,本文提出的互补格雷码结构光技术通过投射互补编码



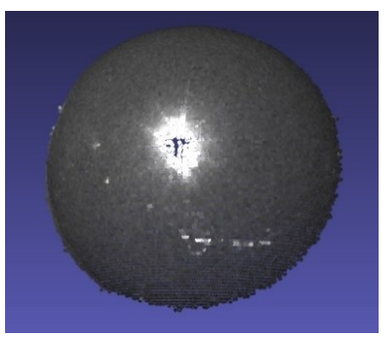
a　最大照明条件下的划痕缺陷陶瓷球



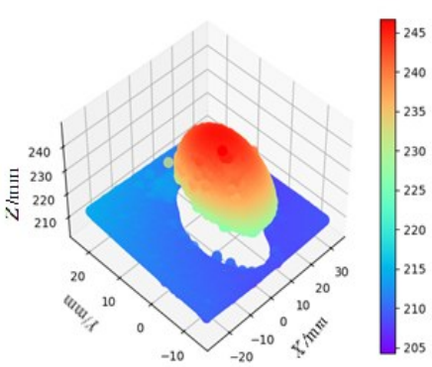
b　一组竖直方向互补格雷码结构光投影下的划痕缺陷陶瓷球



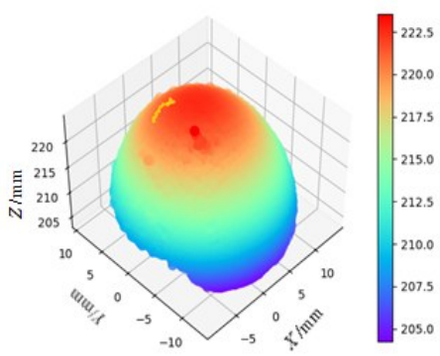
c　一组水平方向互补格雷码结构光投影下的划痕缺陷陶瓷球



d　重建划痕缺陷的陶瓷球三维形貌



e　划痕缺陷陶瓷球三维点云全图



f　划痕缺陷陶瓷球三维点云球面局部图

图 9　划痕缺陷陶瓷球实验及三维点云结果

Fig. 9　Experiment on ceramic balls with scratch defects and 3D point cloud results

图案，既能够有效识别和捕捉表面缺陷，具备处理复杂表面形貌的能力，又能有效抑制高反光区域的干扰，显著降低了失配问题，增强了系统对复杂表面的适应能力和检测可靠性，从而为后续更复杂的表面高反光区域的补偿和缺陷检测提供了坚实的技术基础。

参考文献：

[1] 傅军军，张斌. 浅谈陶瓷绝缘材料在新能源汽车上的应用[J]. 陶瓷科学与艺术，2024，58(1)：69.

[2] 赵家存，张光磊，张诚，等. Si_3N_4陶瓷在现代产业中的应用[J]. 中国陶瓷工业，2024，31(1)：35-43.

[3] 郑艳伟，刘公平，赵滨海，等. 高温高速混合陶瓷球轴承性能分析与试验研究[J]. 航空动力学报，2024，39(8)：496-504.

[4] 李颂华，魏超，吴玉厚，等. 面向极端工况的Si_3N_4全陶瓷轴承关键技术与研究进展[J]. 轴承，2023(9)：1-10.

[5] 石怀涛，刘子濛，白晓天，等. 全陶瓷轴承外圈裂纹位置识别方法[J]. 航空学报，2022，43(8)：93-102.

[6] YU D L, ZHU Z X, MIN J L, et al. Multi-scale decomposition enhancement algorithm for surface defect images of Si_3N_4 ceramic bearing balls based on stationary wavelet transform[J]. Advances in Applied Ceramics, 2021, 120(1): 47-57.
[7] 张小辉, 邹闽强, 马云青, 等. 基于机器视觉的氮化硅陶瓷轴承表面缺陷检测技术[J]. 中国陶瓷工业, 2021, 28(2): 50-52.
[8] 安冬, 胡荣华, 王丽艳, 等. 基于Transformer的陶瓷轴承表面缺陷检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(2): 160-163, 168.
[9] 廖达海, 殷明帅, 罗宏斌, 等. 基于剪切波变换对Si_3N_4陶瓷轴承内圈沟道表面缺陷检测的分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 226-234.
[10] 邓锋, 赵德安, 姬伟, 等. 基于双目结构光的手机中框特征提取研究[J]. 软件导刊, 2024, 23(7): 153-159.
[11] ZHANG K, FU L H, WANG Z, et al. Research on surface defect detection of ceramic ball based on fringe reflection[J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 104104.
[12] SUN Y, FU L H, WANG ZH. A fast detection algorithm for ceramic ball surface defects based on fringe reflection[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation. 2020,11(1):28-37.
[13] 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): 70-82.
[14] 孙帮勇, 吴思远. 格雷码与六步相移编码融合的三维结构光学测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(2): 17-23.

Nondestructive Detection of Ceramic Ball Defects Based on Complementary Gray Code Structured Light

MIAO Xuyi[1], WANG Hanlei[1], GU Guoqing[2], YAN Jingyi[3], DU Jianzhou[4]

(1. School of Information Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
2. School of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China;
3. Jiangsu Dongpu Fine Ceramic Technology Co. Ltd., Lianyungang Jiangsu 222000, China;
4. School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

Abstract: To meet the demand for non-destructive and rapid detection of surface defects on ceramic balls, an imaging system based on complementary Gray Code structured light technology was developed. By independently building a complementary Gray Code structured light platform, a CCD camera is used to collect surface defects of ceramic balls. The computer is utilized to analyze the surface defect characteristics of ceramic balls. Combined with the point cloud reconstruction of complementary Gray Code monocular structured light, the 3D topography reconstruction of the surface of defective ceramic balls is realized. Finally, detection tests are carried out on ceramic balls with two types of defects, namely pits and scratches, and a comparison is made with the classic sine stripe projection structured light technology. The results show that the complementary Gray Code structured light technology can not only suppress the high specular reflection interference on the surface of ceramic balls, but also accurately reconstruct the 3D topography of defects such as pits and scratches on the surface of ceramic balls, providing an important reference for the surface defect detection and quality evaluation of ceramic balls.

Keywords: ceramic ball; defect detection; structured light; complementary Gray Code; three-dimensional reconstruction

(责任编辑:邵 茗)