

文章编号:1005-4642(2021)03-0037-05

学
生
园
地



瓷砖划痕的单像素检测实验

欧阳浩艺,陈婉钧,杨初平

(华南农业大学 应用物理系,广东 广州 510642)

摘 要:为了检测瓷砖表面划痕,设计了使用单像素探测器的实验. 实验采用特别的照度设计实现瓷砖表面面向探测器的辐射通量分布均匀化,实现均匀的检测灵敏度,并把划痕引起反射率分布异常转化为反射率累积异常(或者总辐射通量异常). 研究了 4 种不同类型合格瓷砖各自的总辐射通量和划痕引起的总辐射通量异常,结果显示划痕导致总辐射通量的明显改变,证明该方法具有可行性.

关键词:信息光学;反射率异常;辐射通量;单像素检测

中图分类号:O432. 2;TN247

文献标识码:A

DOI:10. 19655/j. cnki. 1005-4642. 2021. 03. 008

瓷砖表面品质异常诸如划痕、裂纹等与表面反射率异常相关,常用的基于像素阵列传感器成像技术的图像分析方法能够逐点检测和判定,具有非接触、速度快等特点而受到广泛关注. 为了提高精确性,提出了图像与模板的差分算法^[1]、裂纹和孔洞检测的区域生长法^[2]、分离缺陷与花纹、背景的算法^[3-6]、多算子联合缺陷特征提取方法^[7-9]等.

依据光强度涨落相关^[10-11]或频谱重建^[12-13]原理,采用单一像素探测器也能够实现物体表面反射率成像,但为了获得良好的分辨率,需要按顺序投射多帧二维随机灰度条纹或者不同空间频率的二维余弦灰度条纹,导致成像时间长. 因此采用单像素而非成像探测进行表面品质检测有现实意义,可以提高检测的速度. 本实验采用单像素探测器对瓷砖表面划痕进行检测,结合单帧投影和特别的照度设计,实现瓷砖表面面向探测器的辐射通量均匀化和检测灵敏度均匀化,将瓷砖划痕引起的反射率分布异常转化为反射率累积异常进行检测.

1 表面反射率异常的单像素检测原理

建立如图 1 所示坐标系,待测平面位于 xoy

平面并相对于坐标轴对称;单像素探测器的小矩形面元 ds_0 位于与 xoy 平面平行的平面 $x'o'y'$ 上,相对原点 o' 小矩形面元中心坐标为 (x_0, y_0) . 2 个平面的距离为 z . 2 个面元连线距离为 $r^2 = (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2$. 因此,可以得到待测面元 ds 法向 n 和探测器 ds_0 法向 n' 分别与 2 个面元连线 r 的夹角 θ 和 θ' 的余弦:

$$\cos \theta = \cos \theta' = \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}} \quad (1)$$

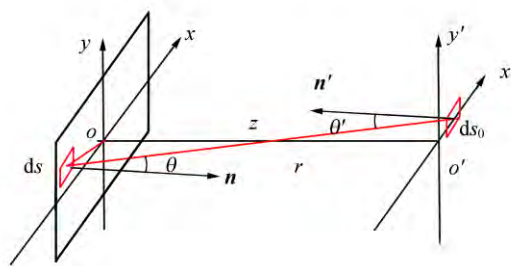


图 1 测量坐标系

物体表面的光强反射率为 $R(x, y)$, 受到光照后,相当于具有亮度分布 B 的发光面元集合,

$d\Omega = \frac{ds_0 \cos \theta'}{r^2}$ 表示探测器面元相对于某个发光面

收稿日期:2020-09-20;修改日期:2020-12-01

基金项目:华南农业大学质量工程资助项目(No. zlgc16032);岭南现代农业科学与技术广东省实验室资助项目

作者简介:欧阳浩艺(1999-),男,广东广州人,华南农业大学应用物理系 2017 级本科生.

通讯作者:杨初平(1970-),男,广东揭阳人,华南农业大学应用物理系副教授,硕士,主要从事光电检测技术研究. E-mail:yangchp@scau.edu.cn



元的立体角. 发光面元 ds 面向探测器 ds_0 的辐射通量 $d\varphi(x, y)$ 为

$$d\varphi(x, y) = B d\Omega ds \cos \theta = B \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta' \cos \theta ds. \quad (2)$$

考虑理想漫射体表面亮度 B 与照度 $E(x, y)$ 的关系为 $B = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi}$, 则整个物体表面面向

探测器 ds_0 的总辐射通量 Φ 为

$$\Phi = \int_S d\varphi(x, y) = \int_S \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta' \cos \theta ds. \quad (3)$$

于是探测器的线性输出信号表示为

$$D = c_0 + c\varphi_0 + c\Phi = c_0 + c\varphi_0 + c \int_S E(x, y) \cos \theta \cos \theta' \frac{R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} ds. \quad (4)$$

式中 c_0 表示探测器的本底输出, c 表示线性响应系数, φ_0 表示环境辐射通量.

1.1 辐射通量分布均匀化的照度设计

若 $E(x, y)$ 为均匀照度, 则待测表面每个面元面向探测器的辐射通量为

$$d\varphi(x, y) = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' ds = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{z^2}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2} ds_0 ds, \quad (5)$$

式(5)显示在照度 $E(x, y)$ 的均匀照明下, 面向探测器的辐射通量与照度和反射率成正比关系, 但分布并不均匀, 距离越大, 辐射通量越小.

为了使探测器对每个面元的反射率异常具有均匀灵敏度, 必须确保每个面元面向探测器的辐射通量相同, 也就是实现辐射通量空间分布均匀化. 因此需要对被测表面的照度空间分布进行设计. A 表示光源的照度系数, 在式(5)若令被测平面照度分布为

$$E(x, y) = A \frac{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2}{z^2}, \quad (6)$$

则每个面元被探测的辐射通量为

$$d\varphi(x, y) = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' ds = A \frac{R(x, y)}{\pi} ds_0 ds, \quad (7)$$

式(7)显示: 若表面反射率 $R(x, y)$ 均匀, 采用特别的照度设计实现了每个面元被探测的辐射通量是均匀的. 在这种情况下, 相同的反射率变化将

产生相同的辐射通量改变, 从而具有相同的检测灵敏度. 整个被测试平面被接收的总辐射通量为

$$\Phi = \iint_S d\varphi_i(x, y) = \iint_S A \frac{R_i(x, y)}{\pi} ds_0 ds = A \frac{ds_0}{\pi} \iint_S R(x, y) ds. \quad (8)$$

1.2 检测灵敏度分析

假设反射率异常表示为 $dR(x, y)$, 平整表面各区域反射率异常引起的总辐射通量改变为

$$d\Phi = d \left[\sum_{i=1}^N d\varphi_i(x, y) \right] = d \left[\sum_{i=1}^N \frac{A ds_0}{\pi} \Delta s R_i(x, y) \right] = \frac{A ds_0}{\pi} \sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s], \quad (9)$$

式(9)中 N 表示被测试表面的空间分辨率, 即被均匀分区的数目. 式(9)表明总辐射通量的异常

来自表面反射率累积异常 $\sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s]$, 它产生的电信号异常为

$$dD = c \left\{ \frac{A ds_0}{\pi} \sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s] \right\}. \quad (10)$$

反射率异常判定可以表示为

$$dD = c \left[\frac{A ds_0}{\pi} \sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s] \right], \quad (11)$$

$dD \leq V_n$ 合格; $dD > V_n$, 不合格. 单像素检测技术把反射率分布异常转化为反射率累积异常, 可以根据反射率累积异常引起的信号异常与阈值 V_n 的关系做出判断.

阈值 V_n 来自于表面质量正常的信号起伏. 依据式(7), 在辐射通量均匀化照明条件下, 信号起伏来自如下因素:

$$V_n = dc_0 + c(d\varphi_0) + c(d\Phi) = dc_0 + c(d\varphi_0) + c(dA) \left\{ ds_0 \sum_{i=1}^N [R_i(x, y) \Delta s] / \pi \right\} + c \left\{ \sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s] \right\} [A ds_0 / \pi], \quad (12)$$

式(12)中, 由于表面质量正常、反射率异常特别小, 有: $c \sum_{i=1}^N [dR_i(x, y) \Delta s] [A ds_0 / \pi] \rightarrow 0$; 遮光良好的条件下, 环境光通量起伏 $d\varphi_0 \approx 0$; 忽略电路本底信号起伏 dc_0 ; 故反射率正常情况下的信号起伏主要是 $V_n = c(dA) ds_0 \sum_{i=1}^N [R_i(x, y) \Delta s] / \pi$, 即由光源照度系数起伏 dA/A 引起的.

信号起伏越小, 即 $V_n < dD$, 也就是 $dA/A <$

$\sum_{i=1}^N [dR_i(x,y)] / \sum_{i=1}^N R_i(x,y)$, 只要光源照度系数的相对变化量 dA/A 小于表面反射率累积的相对变化量 $\sum_{i=1}^N [dR_i(x,y)] / \sum_{i=1}^N [R_i(x,y)]$, 就可以检测到更小的反射率累积异常。

2 实验

实验对象是尺寸为 30 cm×30 cm 的瓷砖表面。系统包含:计算机、数字投影仪 DLP、滨松公司的 S1227-1010BR 光电二极管、卓立汉光的电流电压转换器、数据采集器 National Instruments USB-6002,如图 2 所示。

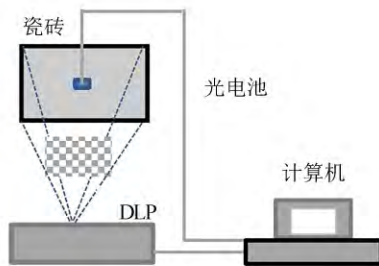


图 2 系统结构

计算机输出的照度设计经投影仪照射到瓷砖表面,漫射光由光电二极管探测、放大、数据采集器 AD 转换后由计算机采集处理。

2.1 照度-光电信号的关系

为了获取照度-光电信号关系曲线的线性区。对被测试的瓷砖表面,光源以均匀照度从 0 逐渐增加到 255 照射到物体表面,同步测试探测器产生的信号,可以获得照度-光电信号的关系曲线,如图 3 所示。其中线性响应区域灰度 G 范围为

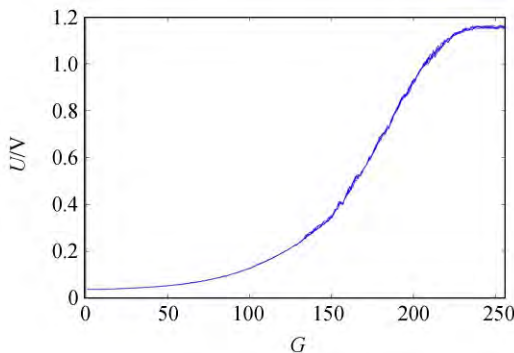


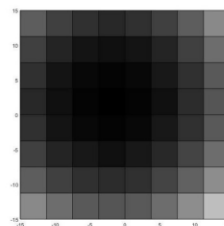
图 3 均匀照度下的照度-光电信号曲线

160~210。因此,在测量过程中依照辐射通量分布均匀化要求,调整光源的照度,使信号输出位于照度-光电信号关系的线性输出区。

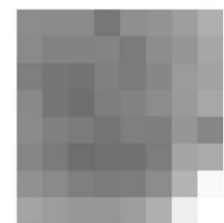
2.2 辐射通量均匀化的理论和实际照度设计

按图 1 建立实验装置的坐标系。物体表面分割的区域越多,检测灵敏度越高,但照度设计的数据处理量也越多。为了验证方法的可行性,实验上把测量表面分割为 $8 \times 8 = 64$ 个方块,得到每个方块中心坐标以及探测器的坐标,然后按照辐射通量分布均匀化要求,依据式(6)计算每个方块需要的理论照度,结果如图 4(a)所示。

为了把理论照度分布与实际照度分布比较,面向探测器辐射通量均匀化的实际照度设计如下:对每个方块所在的区域,单独采用投影仪照明该区域,照度从 0~255 逐渐升高扫描,并同步测量探测器的输出信号,得到每个方块的照度-辐射通量(电压)曲线;然后按照辐射通量空间分布均匀化的要求,选择每个方块所需的照度,则所有方块的照度构成表面实际照度分布,如图 4(b)所示。对比图 4(a)和 4(b),发现 2 种照度设计分布基本相似。图 4 的(a)与(b)图之所以呈现差异,主要原因为:a. 理论照度分布假定每个方块的反射率相等;b. 假定测试表面是理想漫反射。实际情况是瓷砖(特别是有花纹的)表面上的每个方块,这 2 方面均不严格符合,因而实际照度分布相对于理论照度分布有所偏离。



(a) 理论照度



(b) 实际照度

图 4 实现辐射通量分布均匀化

2.3 瓷砖检测

实验检测对象是瓷砖平整表面,平整表面分辨率为 8×8 . 采用辐射通量均匀化的照度设计,将其投影到瓷砖表面的检测区域,由点探测器采集总辐射通量.

1) 合格瓷砖的辐射通量

对 4 种合格的瓷砖样品,每种选取 8 个样品(编号分别为 #1~#8)分别测量总辐射通量(电压),并且计算每种瓷砖的辐射通量的标准偏差,实验结果如表 1 所示. 测量数据结果显示:4 种合格瓷砖样品的总辐射通量的标准偏差均不超过 0.03 V.

表 1 4 种瓷砖样品的总辐射通量统计

瓷砖类型	Φ/V								σ_{Φ}/V
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	
a	2.323	2.351	2.355	2.321	2.315	2.322	2.301	2.330	0.017
b	1.967	1.949	1.929	1.970	1.977	1.970	1.974	1.973	0.015
c	2.057	2.079	2.052	2.046	2.115	2.076	2.122	2.122	0.030
d	1.866	1.861	1.868	1.874	1.921	1.906	1.919	1.936	0.028

注:每个样品的信号值是连续测量 10 次的平均值.

2) 划痕瑕疵

在相同的测量环境下,首先对样品在零划痕状态测量总辐射通量;接着给予零划痕样品不同次数(5,10,15 次)的机器划痕,划痕长度 6 cm,以在瓷砖表面获得不同深度的划痕,在不同的划痕状态分别测试样品的辐射通量,并与零划痕样品

比较. 实验数据如表 2 所示,其中 S 表示辐射通量信号(电压), $|\Delta|$ 表示同一瓷砖不同划痕次数样品的辐射通量信号与零划痕的辐射通量信号之差的绝对值. 数据显示随着划痕次数增加,辐射通量信号值降低,这是由于划痕导致表面反射率降低;划痕越多,反射率累积异常越明显.

表 2 不同深度划痕样品的总辐射通量

瓷砖类型	信号	Φ/V			
		5 次	10 次	15 次	零划痕
a	S	2.003	1.990	1.980	2.017
	$ \Delta $	0.014	0.027	0.037	
b	S	2.062	2.041	2.022	2.084
	$ \Delta $	0.022	0.043	0.062	
c	S	2.062	2.049	2.033	2.073
	$ \Delta $	0.010	0.024	0.040	
d	S	1.662	1.652	1.645	1.674
	$ \Delta $	0.013	0.022	0.030	

3 讨 论

1) 基于单像素探测,设计了瓷砖表面划痕缺陷的检测实验,使用面向探测器的辐射通量分布均匀化的分区照明设计获得均匀检测灵敏度,把反射率分布异常转化为反射率累积异常,无需逐点检测便可判断瓷砖表面品质,提高检测速度,适合规范化质量控制的平整表面反射率缺陷检测.

2) 测量数据显示:在同一时间段连续多次测

量,数据离散比较小;不同时间段的测量数据之间离散有所增大;因此,相对于一段时间内光源的稳定性,不同时间段之间光源的起伏比较大;这说明提高光源的稳定度,特别是长时间内保持稳定,使光源照度系数相对变化量小于反射率累积的相对变化量,能够有效地提高对反射率异常缺陷的检测灵敏度.

3) 表面花纹的存在降低表面的反射率,因而有花纹表面的缺陷检测灵敏度要弱于无花纹表面

的缺陷检测。

4) 确保瓷砖摆放位置的重复性是必要的。

参考文献:

- [1] 王明超. 瓷砖表面瑕疵检测方法的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
- [2] 李光亚, 邹国锋, 傅桂霞. 基于 Gabor 变换与区域生长的瓷砖表面缺陷视觉检测方法研究[J]. 现代计算机, 2019(24): 37-42.
- [3] 段春梅, 张涛川. 基于傅里叶变换的随机纹理瓷砖的高精度表面缺陷检测[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(10): 27-30, 35.
- [4] 张军, 张海云, 赵玉刚, 等. 基于机器视觉的瓷砖裂纹检测[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 146-150.
- [5] 张军. 基于数字图像处理的瓷砖表面缺陷检测研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2018.
- [6] 段春梅, 张涛川. 基于机器视觉的瓷砖素坯表面缺陷无损检测算法研究[J]. 智能计算机与应用, 2017, 7(3): 37-40.
- [7] 李军华, 权小霞, 汪宇玲. 多特征融合的瓷砖表面缺陷检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(15): 191-198.
- [8] 郭萌, 胡辽林, 赵江涛. 基于 Kirsch 和 Canny 算子的陶瓷碗表面缺陷检测方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 27-33.
- [9] 刘利, 于正林. 彩色带花纹瓷砖缺陷检测的算法研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(19): 32-36.
- [10] Meyers R, Deacon K S, Shih Y. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. Physical Review A, 2008, 77(4): 041801.
- [11] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [12] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. Nature Communication, 2015, 6(1): 6225.
- [13] 姚伟强, 郑周彦, 汤莎, 等. 单像素探测成像实验研究[J]. 物理实验, 2017, 37(1): 56-58.

Ceramic tile scratch detection experiment using a single pixel detector

OU-YANG Hao-yi, CHEN Wan-jun, YANG Chu-ping

(Department of Physics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: To detect the scratch on the ceramic tile surface, a detection experiment using a single pixel detector was designed. A special illumination design was used to realize the uniform radiation flux distribution on the ceramic tile surface and the uniform detection sensitivity, and the abnormal reflectivity distribution caused by the scratch was transformed into the cumulative reflectivity anomaly (or the total radiation flux anomaly). In the experiment, the total radiation flux of four different types of qualified ceramic tile and the abnormal total radiation flux caused by scratch were studied. The results showed that the total radiation flux changed significantly due to scratch. Therefore, the feasibility of this method was proved.

Key words: information optics; reflectivity anomaly; radiation flux; single pixel detection

[责任编辑:郭伟]