

平整表面反射率异常的单像素检测理论

欧阳浩艺, 陈婉钧, 李海^{**}, 杨初平^{*}

华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642

摘要 为了检测出规范化质量控制下品质异常的平整表面, 提出一种关于平整表面反射率异常的单像素检测理论, 该方法使用单像素探测器并且只需投影单幅结构光图像。推导关于平整表面反射率异常的单像素检测的辐射通量分布, 结果分析表明: 在均匀照度条件下, 面对探测器的辐射通量空间分布呈现不均匀性, 因此采用特别的照度设计可以实现辐射通量分布的均匀化, 并将平整表面反射率的异常分布转化为反射率累积异常(或者总辐射通量异常)。实验上, 设计了相应的检测装置; 数值计算了均匀照度下平整表面面向探测器的辐射通量分布, 实现了辐射通量分布均匀化的照度设计, 并分别与实际结果进行比较, 两者吻合得很好。在满足辐射通量分布均匀化的照明条件下, 研究了 7 种不同类型合格瓷砖各自的总辐射通量和两种表面缺陷——裂痕和划痕引起的总辐射通量异常, 结果显示这两种表面缺陷会导致总辐射通量明显改变。初步验证了理论的有效性和技术的可行性。

关键词 测量; 平整表面反射率; 辐射通量; 单像素检测

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1212003

Single Pixel Detection Theory of Flat Surface Reflectivity Anomaly

Ouyang Haoyi, Chen Wanjun, Li Hai^{**}, Yang Chuping^{*}

College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract To detect the abnormal quality of smooth surfaces under standardized quality control, a single-pixel detection theory about the abnormal reflectivity of a flat surface is proposed. The proposed method uses a single-pixel detector and only needs to project a single frame of structured light (illumination design). First, the radiation flux distribution of a single-pixel detection about the abnormal reflectivity of a flat surface is derived. It is shown that under uniform illumination conditions, the spatial distribution of the radiation flux to the detector is nonuniform. Thus, a special illumination design can achieve the uniform radiation flux distribution and convert the abnormal reflectivity distribution of a flat surface into the cumulative reflectivity anomaly (or total radiation flux anomaly). In the experiment, the corresponding detection device is designed. The radiation flux distribution on the flat surface to the detector under uniform illumination and the illumination design for achieving uniform radiation flux distribution are numerically calculated. They are consistent with the actual results. Under the illumination condition of uniform radiation flux distribution, the total radiation flux of seven types of qualified ceramic tiles and the abnormal total radiation flux caused by two kinds of surface defect—cracks and scratches were investigated. The results showed that the two surface defects lead to significant changes in the total radiation flux. The effectiveness of the theory and feasibility of the technology are preliminarily verified.

Key words measurement; flat surface reflectivity; radiation flux; single pixel detection

OCIS codes 120.4630; 120.5700; 120.6660

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-09-29; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 华南农业大学质量工程项目(zlqc16032)

* E-mail: yangchp@scau.edu.cn; ** E-mail: leehai361@scau.edu.cn

1 引言

规范化质量控制下产品的平整表面品质检测一直受到关注,特别是瓷砖表面品质检测^[1-3]。平整表面品质异常与表面反射率异常相关,采用高分辨率表面探测器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。为了提高精确性,提出了图像与模板的差分算法^[4]、裂纹和孔洞检测的区域生长法^[5]、分离缺陷与花纹、背景的算法^[6-9]、多算子联合缺陷特征提取方法^[10-12]、边界搜索拟合和动态补偿方法^[13]、颜色空间 V 通道的二值分析算法^[14]等。

近年来,人们发现依据光强度涨落相关^[15-17]或者频谱重建原理,采用单一像素探测器也能够对物体表面反射率成像。为了获得良好的分辨率,这些方法需要按顺序投射多幅二维随机灰度条纹^[18-20]或投影不同空间频率的二维余弦灰度条纹^[21-22],成像时间长。因此,研究投射单幅结构光图像且采用单像素探测来实现平整表面反射率异常检测具有重要意义。基于这种想法,本文提出平整表面反射率异常的单像素检测理论,结合等灵敏度、均匀化辐射通量分布的照度设计,把反射率异常分布转化为反射率累积异常进行检测(表现为面向探测器的总辐射通量异常)。以瓷砖表面品质检测为例,开展了技术性探索,初步验证了理论的可靠性和技术的可行性。

2 平整表面反射率异常的单像素检测原理

如图 1 所示,物体表面的光强反射率为 $R(x, y)$,受到光照后,这一物体相当于一个具有亮度分布的面光源。这个面光源可分解为很多面元。发光面元 ds 与探测面元 ds_0 的连线距离为 r ; 连线 r 与 ds 法向 n 的夹角为 $\theta = \theta(x, y)$, 与探测面元 ds_0 的法向 n' 的夹角为 $\theta' = \theta'(x, y)$; $d\Omega = \frac{ds_0 \cos \theta'}{r^2}$ 表示探测面元相对于发光面元的立体角。面积为 ds_0 的探测面元接收来自亮度为 B 的发光面元 ds

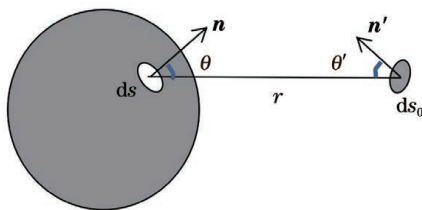


图 1 表面散射光直接探测
Fig. 1 Direct detection of surface scattering light

的辐射通量 $d\varphi(x, y)$, 该通量的表达式为

$$d\varphi(x, y) = B d\Omega ds \cos \theta = B \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta' \cos \theta ds. \quad (1)$$

物体表面可视为漫反射面,而理想漫反射体表面亮度 B 与照度 $E(x, y)$ 的关系为 $B = \frac{E(x, y)}{\pi}$ 。若该面元 ds 的光强反射率为 $R(x, y)$, 则 $B = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi}$ 。(1)式可以改写为

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

对于整个漫反射物体表面 $S = \int_S ds$, 探测面元 ds_0 接收的总辐射通量 Φ 可表示为

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

若探测器的线性输出信号可表示为

$$D = c_0 + c(\Phi + \varphi_0), \quad (4)$$

则将(3)式代入(4)式,可得探测器的输出信号为

$$D = c_0 + c\Phi + c\varphi_0 = c_0 + c\varphi_0 + c \int_S E(x, y) \cos \theta \cos \theta' \frac{R(x, y)}{\pi} \left(\frac{ds_0}{r^2}\right) ds, \quad (5)$$

其中 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。

2.1 均匀照明下辐射通量分布

建立如图 2 所示的测量坐标系。先研究均匀照明下,每个面元被探测的辐射通量特点。

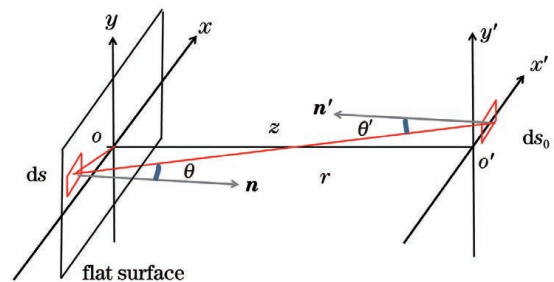


图 2 测量坐标系
Fig. 2 Measurement coordinate system

待测平整平面位于 xoy 平面并关于坐标原点 o 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) 。两个平面的距离为 z 。两

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 \mathbf{n} 和探测器面元 ds_0 法向 \mathbf{n}' 分别与两个面元连线 r 的夹角的余弦,为

$$\cos \theta = \cos \theta' = \frac{z}{r} =$$

$$\frac{z}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2}} \quad (6)$$

位于 xoy 平面上坐标为 (x, y) 的小面元 ds 的照度为 $E(x, y)$, 则探测器接收的漫反射光辐射通量为

$$d\varphi(x, y) = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' ds = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{z^2}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2} ds_0 ds \propto \frac{z^2}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2}, \quad (7)$$

式中,乘积项 $ds_0 ds$ 表示探测器面积与待测面元面积之积。在图 2 坐标系中,可以计算位置为 (x, y) 的待测面元被探测的辐射通量 $d\varphi(x, y)$ 。(7)式显示在照度 $E(x, y)$ 的均匀照明下,面向探测器的辐射通量与照度和反射率呈正比关系,但分布并不均匀,距离越大,辐射通量越小。

2.2 辐射通量分布均匀化的照度设计

在被测试表面反射率均匀的条件下,为了使

每个面元的等量反射率异常关联等量的辐射通量异常,必须确保每个面元面向探测器的辐射通量是相同的,也就是使辐射通量空间分布均匀化。因此需要对被测表面的照度分布进行设计。依据(7)式所显示的均匀照度下每个面元被探测的辐射通量分布函数,设计被测平面的照度分布为

$$E(x, y) = K \left\{ \frac{z^2}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2} \right\}^{-1} = K \frac{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^2}{z^2}, \quad (8)$$

式中 K 表示光源的照度系数。对于反射率均匀的被测表面,每个面元被探测的辐射通量为

$$d\varphi(x, y) = \frac{E(x, y)R(x, y)}{\pi} \frac{ds_0}{r^2} \cos \theta \cos \theta' ds = K \frac{R(x, y)}{\pi} ds_0 ds. \quad (9)$$

(9)式显示采用辐射通量分布均匀化的照度设计后,每个面元被探测的辐射通量是均匀的,则这种情况下,整个被测试平面面向探测器的总辐射通量可表示为

$$\Phi = \sum_{i=1}^N d\varphi_i(x, y) = \sum_{i=1}^N K \frac{R_i(x, y)}{\pi} ds_0 ds = K \frac{ds_0 ds}{\pi} \sum_{i=1}^N R_i(x, y), \quad (10)$$

式中 N 表示被测试表面的空间分辨率,即被均匀分区的数目。

2.3 反射率异常检测

假设反射率异常表示为 $dR(x, y)$, 平整表面各个区域反射率异常对总辐射通量的影响可以表示为

$$d\Phi = d \left[\sum_{i=1}^N d\varphi_i(x, y) \right] = d \left[\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N K ds_0 ds R_i(x, y) \right] = \frac{K}{\pi} ds_0 ds \sum_{i=1}^N dR_i(x, y). \quad (11)$$

(11)式表明总辐射通量的异常来自表面反射率累积异常 $\sum_{i=1}^N dR_i(x, y)$, 则产生的电信号异常为

$$dD = \frac{cK}{\pi} ds_0 ds \sum_{i=1}^N dR_i(x, y). \quad (12)$$

若平整表面均匀分区,有 $ds = S/N$, 则

$$dD = \frac{cK}{N\pi} ds_0 S \sum_{i=1}^N dR_i(x, y) \leq V_n. \quad (13)$$

对于规范化质量控制的平整表面,表面质量异常引起反射率异常,若反射率累积异常引起的信号异常超过一定的阈值 V_n , 可以判定表面质量不合格。因此,与采用像素阵列点成像的反射率异常检测技术比较,反射率异常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。在待测面积 S 、分辨率 N 一定的情况下,为了提高检测灵敏度,可以增大 c 和 K 。

2.4 检测灵敏度分析

阈值 V_n 来自表面质量正常、反射率不变时的

信号起伏。依据(5)式,在辐射通量均匀化照明条件下,阈值 V_n 可表示为

$$V_n = dc_0 + c(d\varphi_0) + c(d\Phi) = dc_0 + c(d\varphi_0) + c d \left\{ \left[KS ds_0 \sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right] / (N\pi) \right\} =$$

$$dc_0 + c(d\varphi_0) + c dK \left\{ \left[S ds_0 \sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right] / (N\pi) \right\} + c \sum_{i=1}^N dR_i(x, y) [KS ds_0 / (N\pi)], \quad (14)$$

式中:由于表面质量正常,反射率异常特别小,有 $c \sum_{i=1}^N dR_i(x, y) [KS ds_0 / (N\pi)] \rightarrow 0$ 。遮光良好的条件下,环境光通量起伏 $d\varphi_0 \approx 0$;电路本底信号起伏 dc_0 可忽略。因此反射率正常情况下的信号起伏主要是 $V_n = c dK \left\{ \left[S ds_0 \sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right] / (N\pi) \right\}$, 即由光源照度系数起伏 dK 引起。

若信号起伏小于反射率异常引起的信号变化,即 $V_n < dD$, 或者 $dK/K < \left[\sum_{i=1}^N dR_i(x, y) \right] / \left[\sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right]$, 只要光源照度系数的相对变化量 dK/K 小于表面反射率累积的相对变化量 $\left[\sum_{i=1}^N dR_i(x, y) \right] / \left[\sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right]$, 就可以检测到更小的反射率累积异常。

3 实验

实验系统构成:计算机、PLUS 数字投影仪、滨松 Hamamatsu 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 NI USB-6002。

计算机负责照度空间分布设计、数据采集和处理,照度分布设计由数字投影仪照射到被测试平面,被测试平面的漫反射光由光电二极管收集,产生的光电流由电流电压转换器放大,经数据采集器 AD 转换(16 位 AD 转换)后由计算机采集处理。探测系统结构如图 3 所示。以规格为 30 cm×30 cm 的瓷砖表面为实验对象。

3.1 照度-信号的关系

为了获取照度-光电信号关系曲线的线性区,光源的均匀照度从 0 逐渐增加到 255,依次照射被测平整表面,所得照度-光电信号的关系曲线如图 4 所示,其中线性响应区域灰度范围约 160~210。因此,在测量过程中依照辐射通量分布均匀化要求,调整光源照度,使信号输出位于照度-信号关系的线性

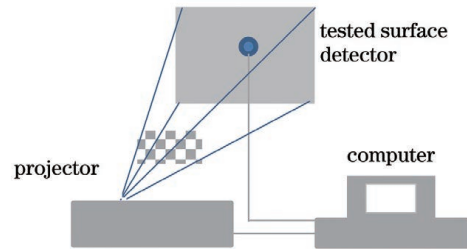


图 3 系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system

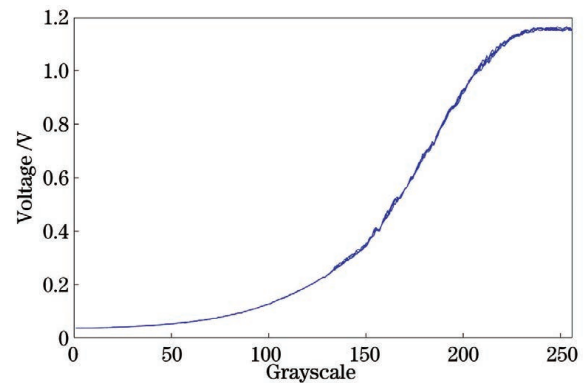


图 4 均匀照度下的照度-信号曲线

Fig. 4 Illuminance-signal curve under uniform illumination

输出区。

3.2 均匀照度下实际和理论辐射通量分布

在均匀照度下,将被测平面平均分割为不同空间分辨率,分别为 8×8 、 16×16 和 32×32 ,测量获得对应的辐射通量空间分布图,将其与理论计算结果进行比较,如图 5(a)~(c)所示。

图 5 的结果显示实际辐射通量分布与理论结果接近。但实际的辐射通量分布随着分辨率的提高,噪声影响明显。依据(13)式,若平整表面分辨率大,则反射率异常引起的信号异常小,检测灵敏度低,但有利于辐射通量均匀化照度设计;若平整表面分辨率小,则反射率异常引起的信号异常大,检测灵敏度高,但不利于辐射通量均匀化照度设计。权衡后,实验中采用分辨率 8×8 。

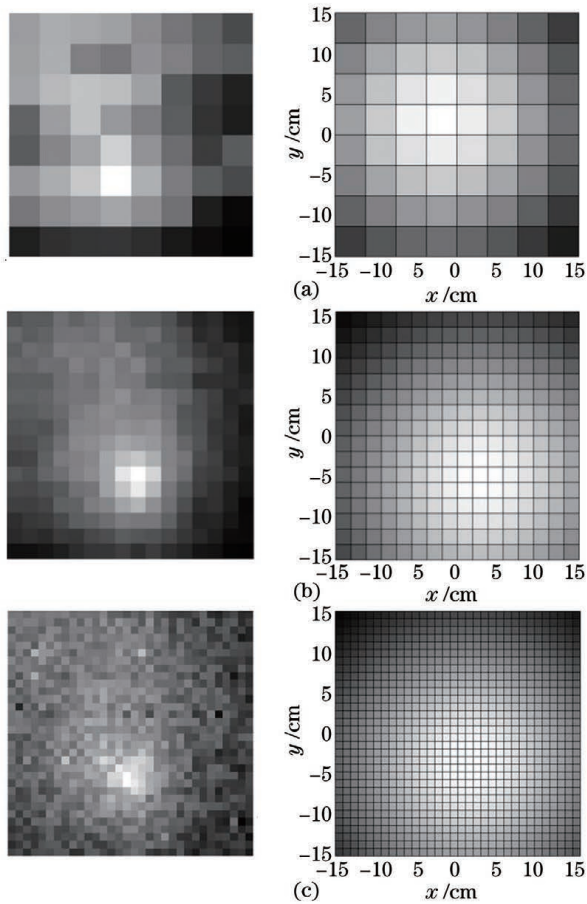


图 5 均匀照度下以不同空间分辨率平均分割被测平面时测量获得的辐射通量空间分布(左)及其理论计算结果(右)。(a) 8×8 ; (b) 16×16 ; (c) 32×32

Fig. 5 Spatial distribution of radiation flux measured when the measured plane is evenly divided with different spatial resolutions under uniform illumination (left) and its theoretical calculation results (right). (a) 8×8 ; (b) 16×16 ; (c) 32×32

3.3 辐射通量均匀化的实际和理论照度分布

在表面分辨率为 8×8 的条件下,均匀照度从 0 逐渐增加到 255,并对小区逐个扫描,得到表面每个小区的照度-辐射通量曲线,然后按照辐射通量空间分布均匀化的照度设计要求,选择每个小区所需的照度,获得实际照度设计分布图。将其与理论的照度设计分布图进行比较,如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,两种照度的分布基本相似。因为周围环境有一定杂散光干扰,故部分区域实际照度的设计值偏离理论设计值。

3.4 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,如图 7 所示,由点探测

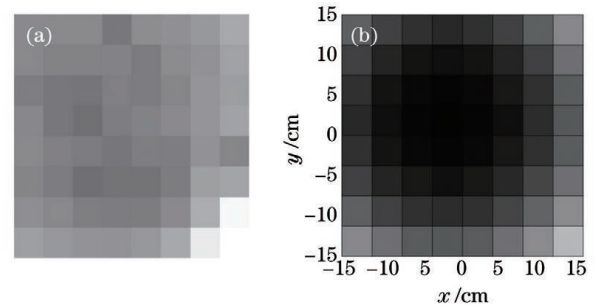


图 6 实现辐射通量分布均匀化的实际照度分布与理论照度分布(分辨率 8×8)。(a) 实际分布; (b) 理论分布

Fig. 6 Actual illuminance distribution and theoretical illuminance distribution to achieve uniform radiation flux distribution (resolution: 8×8). (a) Actual illuminance distribution; (b) theoretical illuminance distribution

器(图中黑色圆区域)采集总辐射通量。

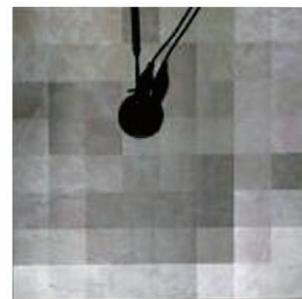


图 7 瓷砖总辐射通量检测(样品表面的照度设计图)

Fig. 7 Detection of total radiant flux of ceramic tile (illuminance design distribution on sample)

3.4.1 合格瓷砖的辐射通量

从顺德厂家购置的 7 种合格瓷砖样品(见图 8),每种取 8 个样品(编号分别为 #1~#8)分别测量它们的总辐射通量,并计算每种瓷砖辐射通量的标准偏差,结果如表 1 所示。数据显示:7 种合格瓷砖样品的总辐射通量标准偏差均不超过 0.03 V。

3.4.2 裂纹瑕疵

裂纹瑕疵测量主要是检验裂纹引起的信号异常程度,实验只对一种瓷砖两种不同裂纹状况(见图 9)的总辐射通量进行测量,然后与零裂纹样品进行比较,数据如表 2 所示,其中 S 表示辐射通量信号, $|\Delta_1|$ 表示同种瓷砖有裂纹但摆放位置不同时的辐射通量信号与零裂纹时的辐射通量信号之差的绝对值。数据显示,零裂纹和有裂纹的总辐射通量差异远大于 0.03 V。方形瓷砖有四边,标号分别为 1→2、2→3、3→4、4→1,当瓷砖平面竖直摆放时,不同朝向是指位于底边的边的标号不同。

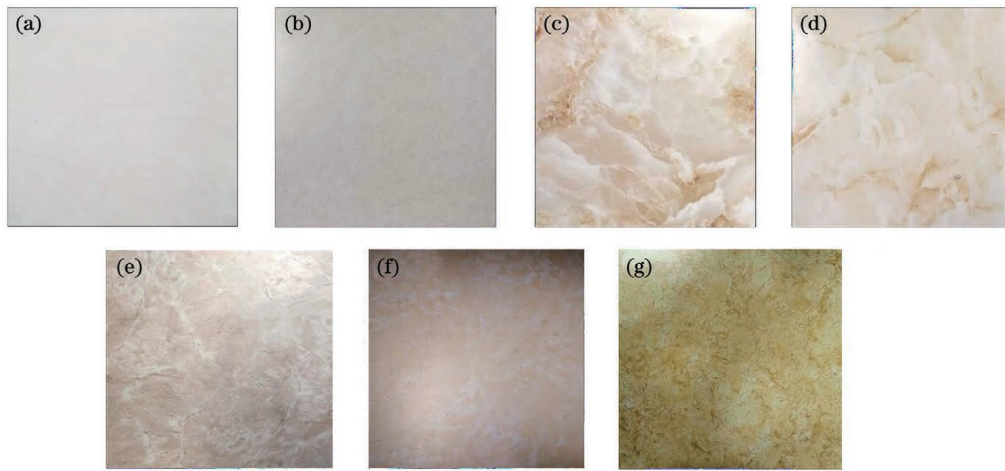


图 8 七种样品。(a)样品 a;(b)样品 b;(c)样品 c;(d)样品 d;(e)样品 e;(f)样品 f;(g)样品 g

Fig. 8 Seven samples. (a) Sample a; (b) sample b; (c) sample c; (d) sample d; (e) sample e; (f) sample f; (g) sample g

表 1 7 种瓷砖样品的总辐射通量统计

Table 1 Statistics of total radiation fluxes of seven ceramic tile samples

unit: V

Type of ceramic tile	Total radiation flux for seven samples								Standard deviation
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	
a	2.32330	2.35508	2.32056	2.35134	2.31523	2.32954	2.30082	2.32227	0.01808
b	2.01055	2.02178	2.01476	2.01109	2.01677	2.03002	2.04237	2.02506	0.01080
c	2.01683	2.01332	2.01062	2.02268	2.01200	2.00849	2.01609	2.04563	0.01191
d	1.94863	1.92889	1.96962	1.96664	1.97025	1.97392	1.97292	1.97676	0.01641
e	2.07891	2.05232	2.04613	2.05681	2.11497	2.07559	2.08232	2.12180	0.02786
f	1.86095	1.86811	1.87432	1.86579	1.90591	1.91889	1.93557	1.92143	0.02973
g	1.65188	1.65991	1.66125	1.67660	1.65373	1.64322	1.63327	1.64359	0.01335

表 2 零裂纹样品和有裂纹样品的总辐射通量

Table 2 Total radiation fluxes of uncracked and cracked samples

unit: V

Crack type	Signal	Total radiation flux of cracked samples with different orientations				Total radiation flux of uncracked samples
		1→2	2→3	3→4	4→1	
1	S	2.23165	2.22667	2.21948	2.19788	2.31696
	$ \Delta_1 $	0.08531	0.09029	0.09748	0.11908	
2	S	2.18868	2.19548	2.22779	2.21027	2.31696
	$ \Delta_1 $	0.12828	0.12148	0.08917	0.10669	

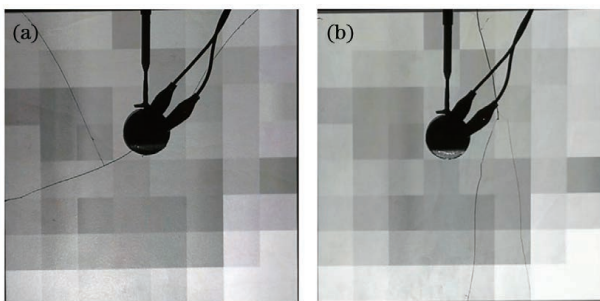


图 9 两个裂纹样品。(a)样品 1;(b)样品 2

Fig. 9 Two cracked samples. (a) Sample 1; (b) sample 2

3.4.3 划痕瑕疵

机器划痕样品如图 10 所示,区域 1 是深划痕,可以肉眼可见,区域 2 是浅划痕(在反光情况下拍摄可见),在非反光情况下肉眼难以观察,采用机器视觉可能无法检测。选定编号为 a、d、e、f 四种瓷砖,在相同的环境下给予瓷砖不同的机器划痕次数 $L = 5, 10, 15$ 次,划痕长度为 6 cm,最终在瓷砖表面获得不同深度的划痕。然后测试样品的辐射通量,并与零划痕样品作比较。实验数据如表 3 所示,其中

表 3 不同深度划痕样品和无划痕样品的总辐射通量

Table 3 Total radiation fluxes of scratched samples with different depths and unscratched samples unit: V

Type of ceramic tile	Signal	Total radiation flux of scratched samples with different depths			Total radiation flux of unscratched samples
		L=5	L=10	L=15	
a	S	2.00277	1.99003	1.97957	2.01705
	$ \Delta_2 $	0.01428	0.02702	0.03748	
d	S	2.06193	2.04058	2.02247	2.08423
	$ \Delta_2 $	0.0223	0.04365	0.06176	
e	S	2.06235	2.04852	2.03255	2.07279
	$ \Delta_2 $	0.01044	0.02427	0.04024	
f	S	1.66174	1.65206	1.64455	1.67433
	$ \Delta_2 $	0.01259	0.02227	0.02978	

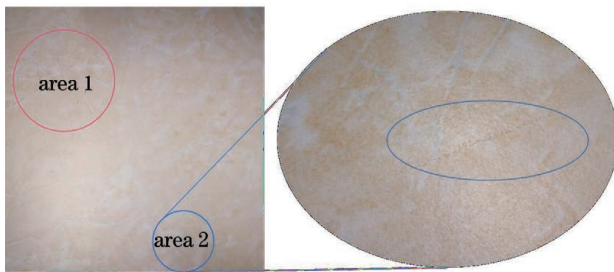


图 10 划痕样品

Fig. 10 Scratch sample

$|\Delta_2|$ 表示同种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,表面反射率变化明显,导致辐射通量信号强度降低。

4 结 论

提出一种新的平整表面反射率异常检测的单像素检测理论和技术,该方法只需投射一幅满足辐射通量分布均匀化的照明结构光图像。与像素阵列成像技术的逐点分析方法不同,单像素技术把反射率分布异常转化为反射率累积异常,无需逐点检测便可以对表面品质做出判断,提高了检测速度,适合规范化质量控制的平整表面质量检测。

该技术应用的关键是提高测量灵敏度。信号起伏 V_n 的主要来源是光源照度系数 K 的起伏,若待测平面分辨率为 N ,在实现辐射通量分布均匀化的照明下,只有信号异常满足 $dD = \frac{cK}{N\pi} ds_0 S \sum_{i=1}^N dR_i(x, y) \leq V_n$ 才能被判别出来。分析结果表明:降低 V_n 需要提高光源的稳定度,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,即 $dK/K < \left[\sum_{i=1}^N dR_i(x, y) \right] / \left[\sum_{i=1}^N R_i(x, y) \right]$ 。

此外,理论模型是建立在平整表面理想漫反射假设的基础之上,因此,表面性质越接近理想状态,理论公式的描述就越有效。

参 考 文 献

- [1] Luo W H, Chen H, Yu S, et al. Non-destructive testing techniques of ceramic materials[J]. *Advanced Ceramics*, 2003, 24(1): 35-38.
罗文辉, 陈虹, 于水, 等. 陶瓷材料的无损检测技术[J]. *现代技术陶瓷*, 2003, 24(1): 35-38.
- [2] Yu B. Research on ceramic-bottle-crack inspecting system based on digital image processing [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
于彬. 基于数字图像处理的陶瓷瓶裂纹检测研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [3] Krupinski E A, Williams M B, Andriole K, et al. Digital radiography image quality: image processing and display[J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2007, 4(6): 389-400.
- [4] Wang M C. Research on detecting method of surface defects in tiles[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.
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.
- [5] Li G Y, Zou G F, Fu G X, et al. Research on visual detection method of tile surface defects based on Gabor transformation and region growing[J]. *Modern Computer*, 2019(24): 37-42.
李光亚, 邹国锋, 傅桂霞, 等. 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.
- [6] Duan C M, Zhang T C. High-precision surface defect

- detection of random texture ceramic tiles using Fourier transform [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(10): 27-30, 35.
- 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.
- [7] Zhang J, Zhang H Y, Zhao Y G, et al. Crack detection of ceramic tiles based on machine vision[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(9): 146-150.
- 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.
- [8] Zhang J. Research on detection of tile surface defects based on digital image processing [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.
- 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.
- [9] Wu B, Cheng W J, Ma H M, et al. Defect inspection of ceramic tile surface based on BP neural network and region growing [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2006, 35(12): 79-81, 105.
- 吴冰, 成文俊, 马贺敏, 等. 基于神经区域生长瓷砖表面缺陷检测[J]. *机电工程技术*, 2006, 35(12): 79-81, 105.
- [10] Duan C M, Zhang T C. Nondestructive detection algorithm research of the surface defects of ceramic tile billet based on machine vision [J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2017, 7(3): 37-40.
- 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.
- [11] Li J H, Quan X X, Wang Y L, et al. Research on defect detection algorithm of ceramic tile surface with multi-feature fusion [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(15): 191-198.
- 李军华, 权小霞, 汪宇玲, 等. 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.
- [12] Guo M, Hu L L, Zhao J T, et al. Surface defect detection method of ceramic bowl based on Kirsch and Canny operator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0904001.
- 郭萌, 胡辽林, 赵江涛, 等. 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): 0904001.
- [13] Lu Q H, Xu C C, Wang H, et al. Research on dimension measurement of large size ceramic floor tiles based on machine vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312004.
- 卢清华, 许重川, 王华, 等. 基于机器视觉的大幅面陶瓷地砖尺寸测量研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312004.
- [14] Liu L, Yu Z L. Study on algorithm for defeat detection of colored ceramic tile with patterns [J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(19): 32-36.
- 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.
- [15] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [16] Meyers R, Deacon K S, Shih Y, et al. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 041801.
- [17] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [18] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y, et al. Ghost imaging with a single detector [J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [19] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340: 844-847.
- [20] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Report*, 2015, 5: 10669.
- [21] Zhang Z, Ma X, Zhong J, et al. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [22] Yao W Q, Huang W H, Yang C P, et al. Theoretical analysis of spectrum reconstruction imaging using single-pixel detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(3): 034201.
- 姚伟强, 黄文浩, 杨初平, 等. 单像素探测频谱重构成像理论分析[J]. *物理学报*, 2017, 66(3): 034201.