

引用格式: YANG Cheng, WANG Zhao, HUANG Junhui, et al. Random Speckle Projection Image Acquisition Method for Coarse-grained Reflective Surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0310004

杨程,王昭,黄军辉,等. 随机散斑投影粗粒反光表面图像采集方法[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0310004

随机散斑投影粗粒反光表面图像采集方法

杨程,王昭,黄军辉,邢超

(西安交通大学 机械工程学院 新能源装备与质量工程研究所, 西安 710072)

摘要:针对粗粒反光表面在一般光源照明条件下产生的局部反光问题,提出一种基于随机散斑投影的图像采集方法。以主动投影照明的方式在工件表面形成系列随机散斑图案,利用组图冗余信息抑制反光,生成光强均匀且高信噪比的融合图像。给出了随机散斑图畸变矫正方法,实现高效的密度均匀散斑投影。实验结果表明,所提方法很好地抑制了工件表面局部反光问题,显著提升了图像对比度与清晰度,为后续图像检测算法设计打下良好基础。

关键词:散斑投影;图像采集;粗粒反光;透视畸变;图像融合

中图分类号: TP391

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20225103.0310004

0 引言

机器视觉技术在产业智能化、自动化转型过程中起到重要的作用。典型的机器视觉检测过程包含图像获取、数据传输、图像处理以及结果输出,其中优质的图像获取是检测的重要基础,直接影响到后续算法设计难度,因此工业应用中需根据检测对象特征制定特定的图像采集方案,以凸显目标特征或降低背景噪声干扰^[1]。

光源及照明方式是图像采集的关键组成部分之一^[2]。常见使用固定光源的照明方式有背光照明、垂直照明、同轴光照明等^[3],但不适用于细微目标、高光表面、复杂纹理以及浮雕印刷等特殊检测场景。针对印刷电路板表面纹理复杂的检测难点,ZENG Zhou等设计了一种分层彩色环形LED光源以突出印刷电路板的标记与通孔信息并将其去除,最终提取焊点信息^[4]。类似地,熊光洁等设计了一种由不同辐射角度的四种颜色高密度LED阵列融合的面光源来检测印刷电路板的焊接缺陷,使照明系统光照均匀^[5]。为实现汽车制动器高反光活塞表面缺陷检测,杨子琦等设计了立体组合光源照明系统,采用柔光和偏振光的组合减少了检测图像的噪声^[6]。针对钢板、药品包装表面浮雕印刷目标检测问题,KANG D基于光度立体视觉技术设计了一套多位姿光源的图像采集系统,通过解析光源每个位姿下钢板表面的反射系数等信息,重建钢板表面三维特征信息,达到立体特征检测的目的^[7];YANG Fusheng等采用相似原理的多光源图像采集系统检测弹性O形环表面划痕、压痕等^[8]。对于光学掩模板表面微米级细微划痕,LEE S等提出利用扩束与整形激光光束作为辅助光源,基于同轴反射光与散射光干涉的缺陷检测系统,实现了较高的检测分辨率^[9]。为满足光学红外截止(Infrared Cut-off)滤光片缺陷检测要求,LIU Yan等提出不同角度下两个环形红外LED光源设计策略,确保缺陷识别率^[10]。CHANG Ming等设计了一个自动光学检测系统对触控面板玻璃缺陷进行分类,为降低误判率,其照明设置由两个扇形透光的LED灯组成^[11]。针对金属冲压字符拍摄问题,向忠等提出利用多方向照明系统,通过依次点亮组合光源各方向灯组获取多方向的照明信息,最后通过融合增强的方式提升冲压文字与背景的对比^[12]。CHENG C K等为了提高自动光学检测能力,考虑到成像、照明均匀性,提出

基金项目: 西安市科技创新计划(重大科技创新平台建设)(No. 201809163CX4JC5)

第一作者: 杨程(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为光电智能检测。Email: janschan@stu.xjtu.edu.cn

导师: 王昭(1964—),女,教授,博士,主要研究方向为光电测量。Email: wangzhao@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者: 邢超(1988—),女,博士研究生,主要研究方向为光电测量。Email: shenning0801@163.com

收稿日期: 2021-07-20; 录用日期: 2021-10-09

<http://www.photon.ac.cn>

一种多光源系统,该系统由一个 60° 环形低角度光源、一个 30° 环形小角度光源,以及一个同轴光源组成^[13]。

在上述研究中,学者常引入多光源照明系统,以增添辅助参考光源,用多角度照射等方式采集丰富的图像信息,并取得了较好的成像效果。但对于工业中常见的铝粉喷砂、矿物结晶、氧化金属涂层等粗粒反光表面,由于其界面存在密集的多角度微镜面结构,在任意光场下总会随机地发生局部反光现象,造成信息的缺失并形成复杂的伪边缘纹理信息,因而通过简单的多光源组合方式无法消除反光影响。

对此本文基于随机散斑投影,在电阻片表面投影多组随机生成的均匀散斑图像,形成随机光场分布,通过融合多组散斑图像,使反光区域高低灰度值相互抑制,同时利用投影拍摄组图的冗余信息,消除随机电子噪声,生成光强均匀的高信噪比融合图像,降低对后续图像处理算法的要求。

1 基于随机散斑投影的图像采集方法

1.1 方法原理

粗粒表面微镜面结构发生的随机反光现象受具体照明光场分布的影响,部分区域在反光时会发生过曝现象,反射光强超过光学传感器记录上限从而丢失局部信息,当降低照明亮度,上述区域可能不再反光,但其在图像中所形成灰度记录值却极低,与匀质哑光表面灰度随光强线性变化的特性不同,不利于粗粒反光表面的特征检测。

对此提出基于随机散斑投影的粗粒反光表面图像采集方法,通过在待测表面依次投影一组随机变化的散斑图案形成随机光场,使得工件表面局部区域在反光与不反光两种状态间切换;记录散斑组图投影过程中工件表面灰度变化情况,利用均值融合的方式使得待测表面反光区域的高低灰度值相互抑制,从而实现对待测表面反光现象的抑制;同时在图像融合过程中,工件拍摄组图包含的冗余信息有利于消除随机电子噪声,从而实现提升融合图像对比度的效果。

氧化锌电阻片表面分布着密集的氧化锌颗粒,如图1所示,颗粒在固定光场下的随机局部反光对工件表面缺陷视觉检测、产品信息读取等工作造成干扰,属于粗粒反光表面特性。以此实例对随机散斑投影粗粒反光表面图像采集方法的具体实现做详细介绍。

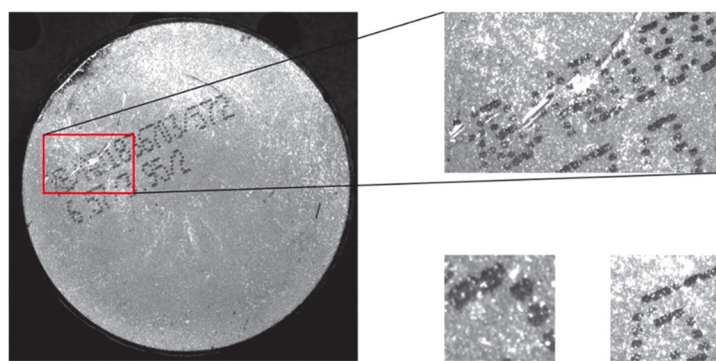


图1 氧化锌粗粒表面反光现象
Fig. 1 Reflections of zinc oxide nanoparticles

1.2 图像采集系统及随机散斑生成

传统固定工业光源或多光源组合策略难以形成随机变化的复杂光场,为了实现基于随机散斑投影的图像采集方法,设计了图像采集系统,如图2所示,该系统包含投影光源、工业相机及配套光学镜头、机器视觉支架、云台支架、计算机等核心设备,能实现图像投影与工业相机图像采集的快速循环。其中,光源基于可编程结构光光源,能实现随机散斑图像高速投影。

生成随机散斑的目的是使工件表面光场不具备固定的方向性特征,并且随着随机散斑投影次数 K 的增加,拍摄工件表面每个像素在 K 次投影所接受平均光照强度应该大致趋同,即工件表面各处接收到的光强期望值一致,如此能保证在随机投影过程中,整体光照达到统计层面的均匀。然而实际操作过程中,考虑到检测效率,无法通过无限地增加投影次数 K 来实现统计均匀光照,因此限定在 K 次投影二值散斑图像过程中各部分像素出现0与1的次数相等。根据上述要求,随机散斑图像生成方法为:

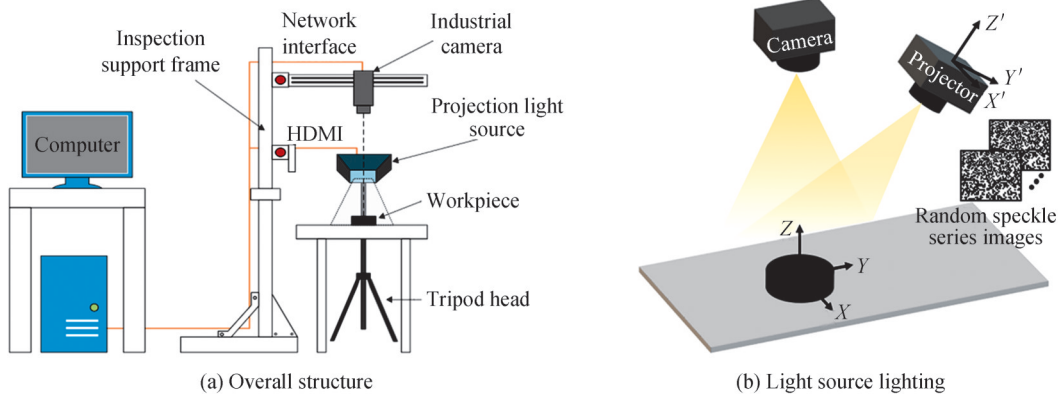


图2 图像采集系统
Fig. 2 Image acquisition system

首先,生成 K 组尺寸为 $M \times N$ 的灰度均匀二值图像作为初始图像(K 为偶数),如图3(a)所示。假设每个像素处的灰度构成一个列表,可表示为

$$L_i = \{a_1, \dots, a_{k/2}, a_{k/2+1}, \dots, a_k\} \quad i = 1, 2, \dots, M \times N \quad (1)$$

式中, a_k 代表单个像素在第 k 次投影图像中的初始灰度值,其中 $a_1 \sim a_{k/2}$ 的初始灰度值设为0, $a_{k/2+1} \sim a_k$ 的初始灰度值设为1。

其次,将每个像素处初始灰度列表 L_i 中的灰度值随机排序后,形成 K 组尺寸为 $M \times N$ 的随机散斑投影图像,如图3(b)所示。但此时生成的单个散斑仅占一个像素,在后续散斑组图透视畸变矫正过程可能因为插值导致部分散斑图案消失,为避免上述现象,将原始图像等比例放大,图3(c)为等比放大两倍后的图像。将此系列散斑图像通过图像融合后形成图3(d)。通过本文方法生成的随机散斑投影组图既保证了单张图像散斑的随机性,又保证了组图整体的均匀性。

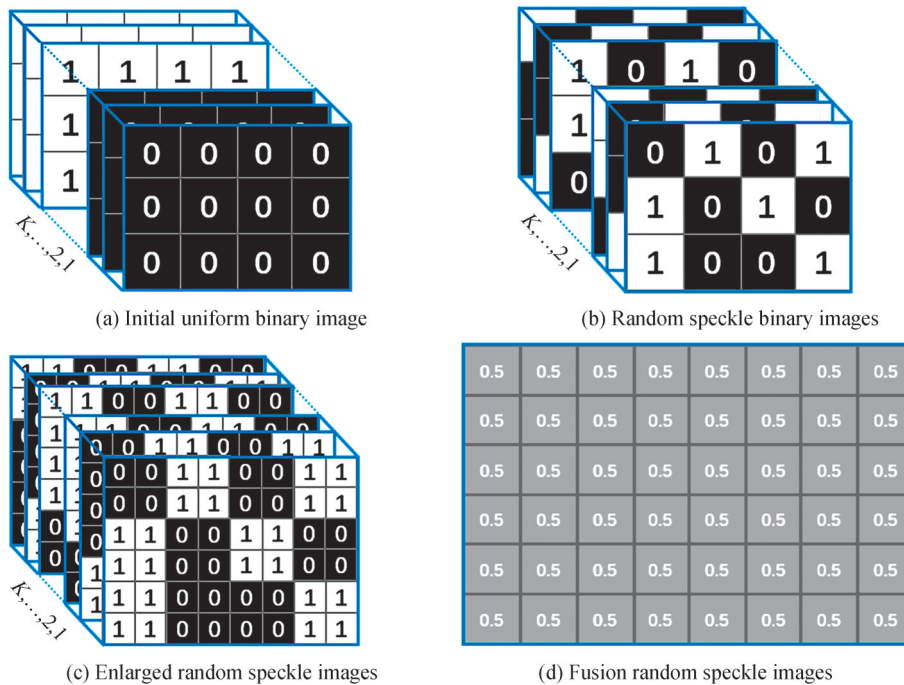


图3 随机散斑投影组图生成过程
Fig. 3 Generation process of random speckle projection group images

1.3 透视畸变矫正简化模型建立

为尽量减少因相机拍摄角度引起的图像畸变,相机轴线需垂直于待测工件表面,由于空间位置布置限制,投影光源需倾斜布置,投影轴线与电阻片表面法向呈一定夹角。然而这种空间布置关系会使投影图像在工件平面发生透视变换,使得相机采集的图像散斑密度不再均匀,导致融合后的图像灰度分布不均。为矫正由投影光源的倾斜布置导致投影图像在工件平面的透视畸变,需对密度均匀散斑投影矫正方法进行研究。

如图4所示,在本文投影方案中,投影坐标系 Z' 轴与工件平面坐标系 Z 轴存在夹角,而投影坐标系 X' 轴与工件平面坐标系 X 轴平行,因此投影图像在工件平面形成梯形畸变,呈倒梯形状,短边靠近投影光源。投影畸变主要包含光学系统产生的镜头畸变与空间位置布置关系产生的透视畸变,由于随机散斑投影主要用于形成均匀随机光场而非精密测量,镜头畸变影响不大,因此将投影模型简化为小孔成像模型,而投影过程为典型的透视变换^[14],其过程的通用表达式为

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\begin{bmatrix} x' & y' \end{bmatrix}$ 为工件平面坐标; $\begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix}$ 为投影平面坐标; $\begin{bmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{33} \end{bmatrix}$ 为透视变换矩阵系数。

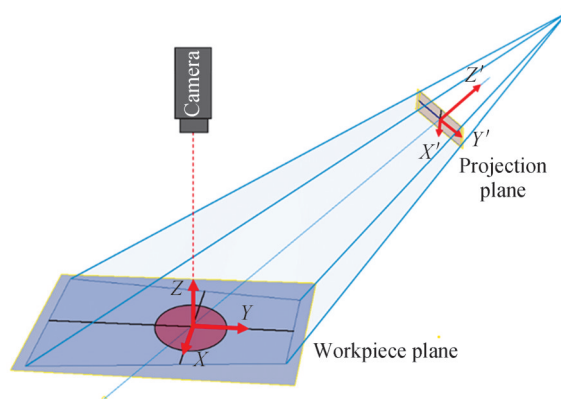


图4 投影光源与工件布置关系

Fig. 4 The positional relationship between the projection light source and the workpiece

为了得到透视变换矩阵,需将至少4组投影平面与工件平面对应特征点坐标代入式(2)中,求解8组方程获取透视变换矩阵系数,该方法依赖增加标定点来提升透视变换矩阵求解精度,导致目标点关联过程繁琐,一旦投影光源角度变化,需重复标定过程获取透视变换矩阵,使系统的易用性能降低。

考虑到本投影方案限定条件 X' 轴与 X 轴平行,可使投影模型进一步简化为“水平倾斜投影畸变模型”,基于此简化模型,将梯形畸变分解为 X 轴方向线性放大与 Y 轴方向非线性畸变,并提出一种操作简单高效且无需标定的梯形畸变矫正方法。

如图5所示,点 O 为投影光源, l_p 为投影光轴, π_0 为投影仪DMD芯片所在平面, π_1 为工件所在平面,即包含透视畸变的实际投影平面, π_2 为平行于 π_0 的虚拟投影平面,点 A 为 l_p 与 π_2 的交点, l_p 与 X 轴形成平面 OEF , l_p 与 Y 轴形成平面 OBJ 。点 P 为平面 π_1 上任意一点,那么该点与 l_p 构成的平面 AOP ,沿 X 轴和 Y 轴方向的投影平面分别与平面 OEF 和平面 OBJ 共面,分别作图如图6所示。

X 轴方向投影关系可由图6(a)投影平面 OEF 表示, $E'F'$ 为芯片平面沿投影仪坐标系 X' 方向的投影,点 P 沿 X 轴方向的投影点为 P_x ,连接 OP_x ,交成像面于 P_u ,由三角形相似关系,易知 $\frac{E'P_u}{E'F'} = \frac{EP_x}{EF}$, X 轴方向上投影成像两点相对比例位置不变,因此可将实际投影图像 X 轴方向的变形视为线性放大,且比例系数为投影仪的放大率。

Y 轴方向的非线性畸变关系可由图6(b)投影平面 OBJ 表示, HI 为芯片平面沿 Y' 方向的投影,由于投影轴线与工件所在平面存在夹角 θ , HI 与 BJ 成非线性关系,该透视畸变系数是非线性畸变修正的关键。首先,

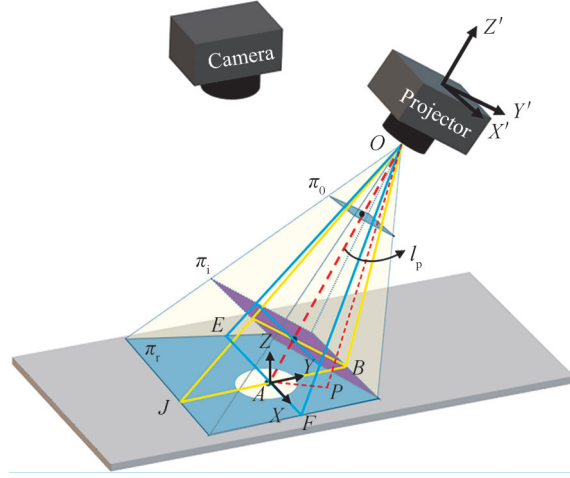
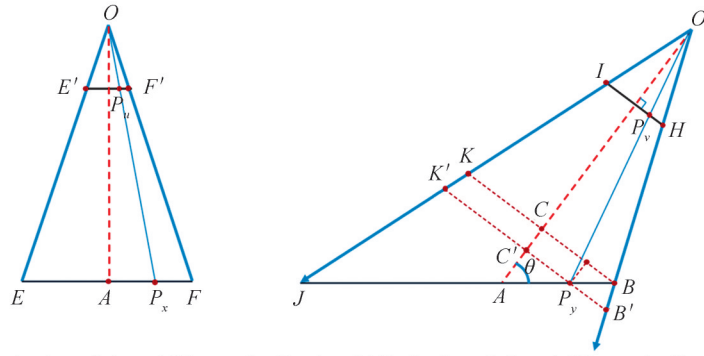


图5 透视畸变立体模型

Fig. 5 Perspective distortion stereoscopic model



(a) Projection of plane AOP onto the X-axis (b) Projection of plane AOP onto the Y-axis

图6 水平倾斜投影畸变模型投影视图

Fig. 6 Horizontal tilt projection distortion model

投影仪光轴 OA 与投影平面 π 的夹角 θ 、投影光源投射比 φ (投影距离与画面宽度之比) 易通过测量或查阅投影光源手册获得, 等同于图 6(b) 中的 $\varphi = \frac{OC}{KB}$, 那么由几何知识易得

$$CB = AB \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$OC = 2 \times CB \times \varphi \quad (4)$$

$$AC = AB \times \cos \theta \quad (5)$$

$$CC' = P_y B \times \cos \theta \quad (6)$$

假设不存在透视畸变, 任意一点的投影平面都平行于芯片平面 π_0 。因此, 过 P_y 点作垂直于直线 AO 交 OB 、 OJ 、 OA 于 B' 、 C' 、 K' , 可知 B' 、 K' 关于直线 AO 对称。那么, 任意点在芯片平面的相对位置可由投影图像比例系数 β 表达, 即

$$\beta = \frac{C'P_y}{C'B'} \quad (7)$$

假设 C' 为中心, 那么 β 的取值范围为 $[-1, 1]$, 当投影点移动到 K' 时 β 为 -1 , 移动到 B' 时 β 为 1 。且根据图 6(b) 几何关系, 可得到

$$\beta = \frac{(AC - CC') \tan \theta}{(OC + CC') / (2 \times \varphi)} \quad (8)$$

将式(3)~(6)代入式(8)得

$$\beta = \frac{2 \times (AB - P_y B) \times \sin \theta \times \varphi}{2 \times AB \times \sin \theta \times \varphi + P_y B \times \cos \theta} \quad (9)$$

当 $C'B'$ 变为 AB , 投影平面不再相对投影光轴对称, 发生透视畸变。因此, 以 A 为中心, 将投影平面畸变系数定义为

$$\gamma = \frac{AP_y}{AB} \quad (10)$$

将式(8)中 AB 与 $P_y B$ 项单独整理至等式左侧, 得到投影平面畸变系数 γ 与投影图像比例系数 β 的函数关系

$$\gamma = \frac{AP_y}{AB} = 1 - \frac{P_y B}{AB} = 1 - \frac{2 \times (1 - \beta) \times \sin \theta \times \varphi}{\beta \times \cos \theta + 2 \times \sin \theta \times \varphi} \quad (11)$$

式(11)表明 Y 方向上生成的投影图像与实际投影图像之间透视畸变关系, 只与投影光源轴线和投影平面夹角 θ 以及投影光源投射比 φ 有关, 而投影光源投射比 φ 是投影光源的基本特性参数, 投影平面夹角 θ 易测量得到, 该式相较于求解式(2)中的透视变换矩阵系数更具备操作意义。

由于投影图像比例系数 β 取值范围为 $[-1, 1]$, 因此对应投影平面畸变系数 γ 取值范围为 $\left[-\frac{2 \times \sin \theta \times \varphi + \cos \theta}{2 \times \sin \theta \times \varphi - \cos \theta}, 1 \right]$ 。将上述系数均归一化至 $[0, 1]$ 区间, 并带入实际物理参数 θ 与 φ , 可得任意角度下生成的投影平面与实际投影平面在 Y 轴方向上的畸变关系, 如图 7 所示。

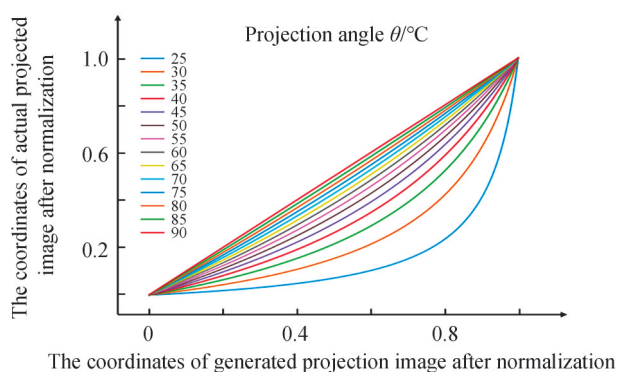


图 7 Y 轴方向上生成投影图像与实际投影图像畸变关系

Fig. 7 The distortion relation between the generated projected image and the actual projected image in Y axis direction

1.4 散斑组图投影梯形畸变矫正与融合

通过基于简化投影模型的 X 轴与 Y 轴畸变关系探究, 可分别完成投影图像两轴方向的畸变矫正。投影矫正过程为投影的逆变换, 首先假设实际投影平面成像为无畸变图像, 再通过畸变系数关系分别完成 X 轴、 Y 轴方向图像的逆向复原, 得到芯片上的矫正图像, 流程如图 8 所示。

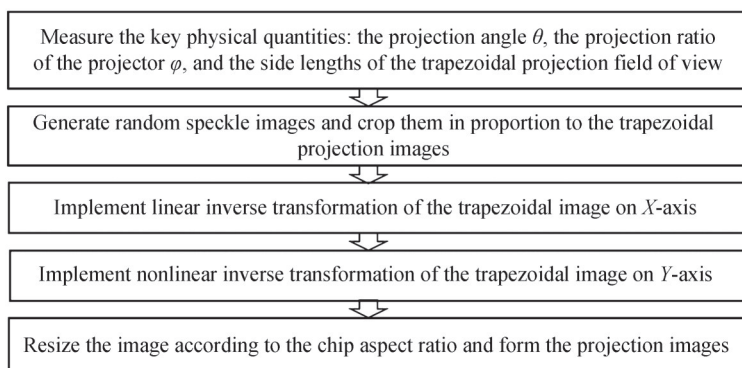


图 8 畸变矫正算法流程

Fig. 8 Distortion correction algorithm flow

如图9(a)所示,首先测量关键物理量投影倾角 θ 以及投影光源投射比 φ ,生成均匀的随机散斑图像;接着根据实际梯形投影视场几何比例关系裁切随机散斑图像;然后如图9(b),通过最近邻插值算法将梯形图像每行像素缩放至等宽矫正X轴方向线性畸变;最后根据式(9)计算Y轴畸变关系完成随机散斑组图的非线性逆变换。



图9 梯形畸变矫正算法中间过程

Fig. 9 Intermediate process of trapezoidal distortion correction algorithm

经过本文算法矫正后的投影图可在工件平面均匀成像,以等距点阵投影为例,首先直接投影等距点阵图至工件平面,接着,基于本文算法矫正等距点阵投影图并再次投影,分别拍摄两次投影图像并观测平面格点相对位置关系,实验结果如图10所示。

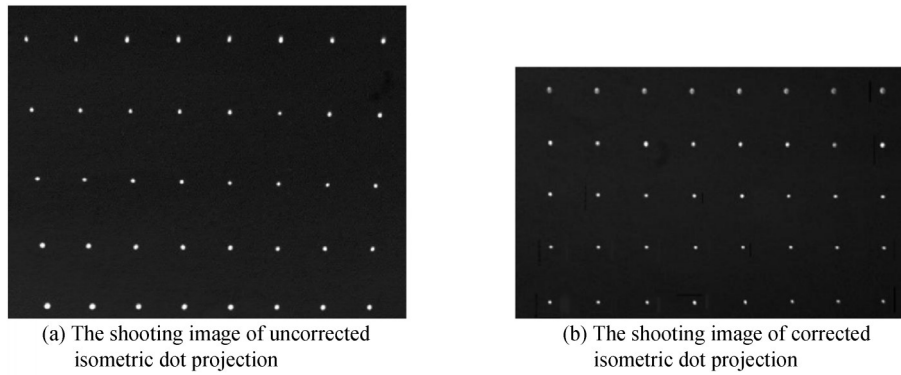


图10 等距点阵图投影矫正结果

Fig. 10 Isometric dot map projection correction

选取等距点阵列中相对位置相同的点阵进行观测,可见经过本文畸变矫正算法矫正后的图像中畸变现象得到明显改善,无论是纵向还是横向都保证了投影图案的均匀性。由于投影图像矫正的目的是使工件表面生成统计照度均匀的光场,因此在畸变模型建立过程,忽略了来自工业相机与投影仪的镜头畸变,精度受限,导致矫正等距点阵投影拍摄图像点距测量与理论值存在一定误差,但是对拍摄图像影响不大,可以不予考虑。

在随机散斑的调制下,待测工件表面仅存在明暗两种状态,采用均值融合方法融合投影组图。为了降低相机光学传感器非线性响应区域的影响,利用相机响应函数(Camera Response Function, CRF)^[15]将图像灰度值映射至相对场景亮度后,再对投影组图做均值融合,其过程表示为

$$G_{\text{fusion}}(u_i, v_j) = \frac{\sum_{k=1}^K f(G_k(u_i, v_j))}{K} \quad (12)$$

式中, G_{fusion} 为融合图像在像素 (u_i, v_j) 的有效灰度值; G_k 为第 k 组投影对应像素灰度值。 $f(\cdot)$ 为灰度值与相对场景亮度转换函数; K 为散斑图组数。

2 实验结果与分析

为了验证基于随机散斑投影图像采集方法有效性,根据所设计的图像采集系统搭建实验平台,如图11所示。

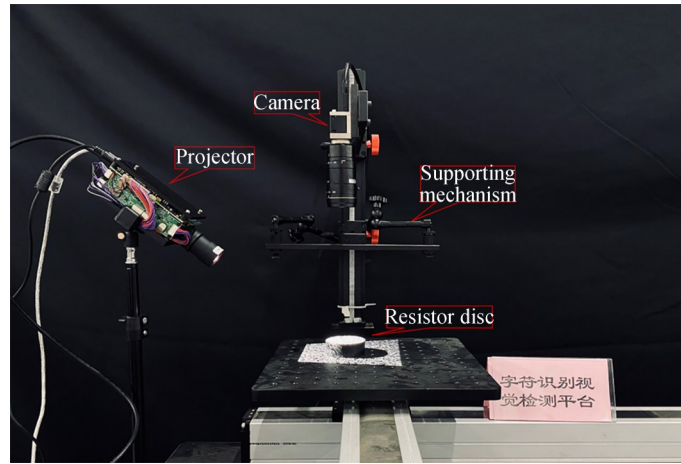


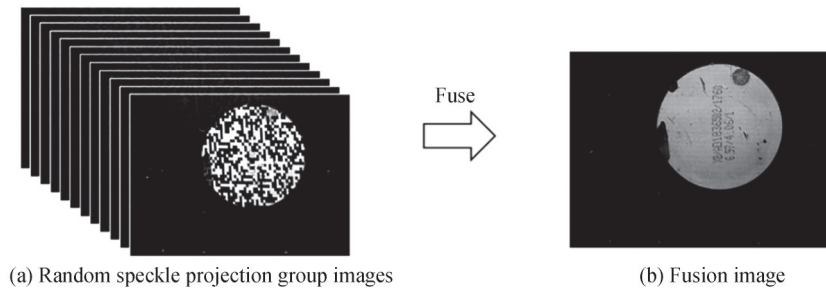
图 11 图像采集实验平台

Fig. 11 The image acquisition experimental platform

2.1 氧化锌电阻片粗粒表面拍摄对比实验

基于图像采集实验平台,对氧化锌粗粒反光表面的电阻片进行测试,并与传统方法进行对比。

当投影组图数达到 12 张时,均值融合后的图像消除了工件表面散斑图案,并且反光表面现象得到有效抑制,图像对比度也有明显提升,如图 12(b)所示。



(a) Random speckle projection group images

(b) Fusion image

图 12 随机散斑投影组图融合

Fig. 12 Random speckle projection group image fusion

将工件在环形光源与随机散斑投影光源下的拍摄效果进行对比,共拍摄 60 组对比图像,其中部分样本如图 13 所示。

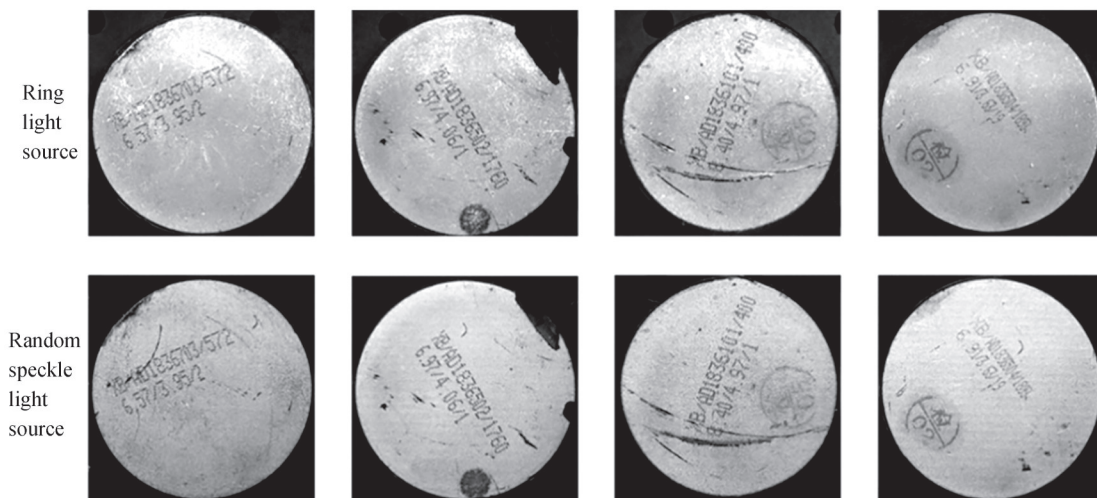


图 13 不同光源下采集的工件样本图像

Fig. 13 Workpiece samples images acquired in different light sources

为了尽量展示工件表面成像情况,对展示样例进行人工裁切,实际拍摄时工件被随机摆放于视场内的任意位置,且同组对比样例中工件位置相同。由图 13 可见本文提出的基于随机散斑投影的拍摄方法对于工件表面反光现象抑制效果明显,且融合图像表面光照均匀。通过多张均值融合的方式提高了组图之间的信息利用率,从而增强了融合图像的清晰度,细节对比如图 14 所示。

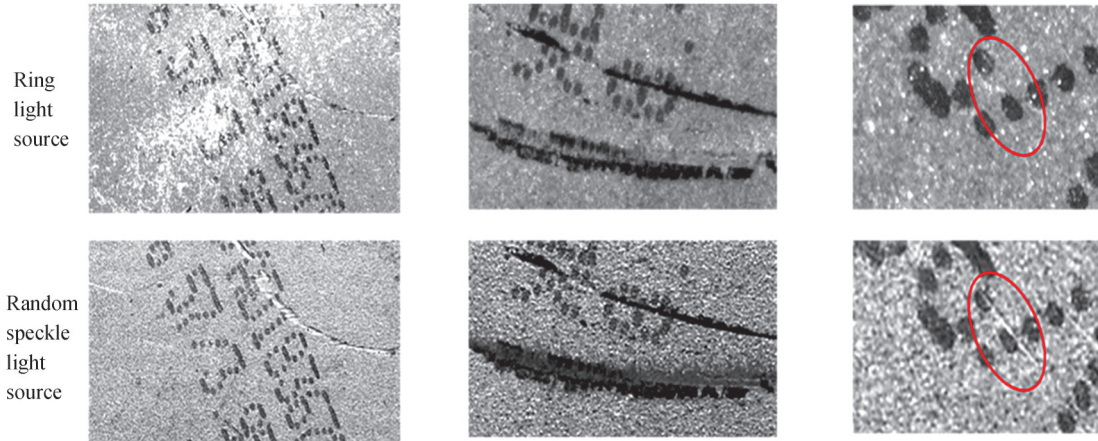


图 14 不同光源下工件样本图像的细节对比

Fig. 14 Detailed comparison of workpiece samples images acquired in different light sources

清晰度的提升主要体现在字符点阵边缘特征更加明显,图像呈现更为丰富的细节特征,因此即便是细微的划痕,在融合图像中也清晰可见。融合图像成像质量相对稳定,即使工件处于视场内的不同位置,其表面易反光位置也不会随着位置的改变而有明显的灰度特征变化。

2.2 图像质量量化评估

为了客观评估图像质量,选择灰度直方图与对比度作为评价标准。灰度直方图描述图像中灰度分布的统计规律,能衡量图像光照均匀程度,也可通过灰度分布特征直观体现图像各灰度区域记录信息情况,选取融合图像与对比图像并计算其灰度直方图,如图 15 所示。

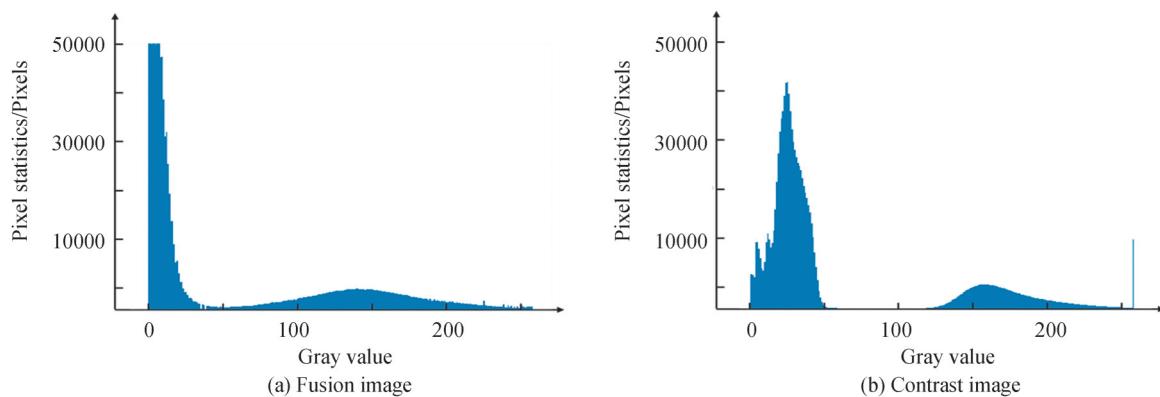


图 15 灰度直方图对比

Fig. 15 Comparison of grayscale histogram

通过对比灰度直方图可以发现,在灰度值 255 附近,融合图像像素统计个数远少于对比图像,表明融合图像过曝现象较低;而融合图像在低灰度值区域像素统计个数较多且集中在 0 值附近,表明融合图像暗部信息记录较少,而中间灰度区域分布较广,表明该灰度区间信息具备较高的对比度。结合图像本身理解,由于喷码字符与背景灰度值较低,属于低灰度值区域,因此融合图像的背景与字符点阵看上去更加“纯净”,而电阻片表面区域属于“中间灰度区域”,融合图像中的该区域像素值分布范围广泛,对比度较高,因此相较于对比图像,其表面纹理、浅划痕等特征更加明显。

对比度反映像素邻域灰度值变化程度,是图像清晰度和目标纹理深度的体现^[16],对比度值越大,则图像

目标与纹理越清晰,对比度值越小,则图像越模糊,其计算过程为

$$C = \sum_i \sum_j (i - j)^2 p(i, j)^2 \quad (13)$$

式中, C 为对比度; i, j 为有限灰度级内任意两个灰度级对; $p(i, j)$ 为图像内相邻像素灰度级对为 (i, j) 的概率。

计算 60 组图像的对比度,并观测同组对比图像指标变化情况,结果如图 16 所示,本文提出的基于随机散斑投影的拍摄方法对拍摄图像对比度均有提升效果,具体提升幅度受到工件表面本身质量影响,整体样本在同工位检测的情况下对比度平均提升 1.95 倍,最高提升 2.57 倍,最低提升 1.33 倍,与观测事实相符。

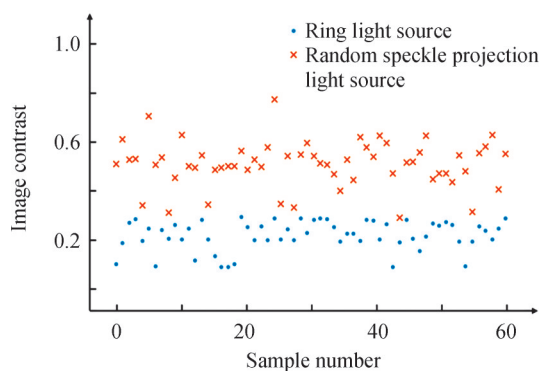


图 16 不同光源下采集的图像对比度比较

Fig. 16 Image contrast comparison in different light sources

2.3 检测结果对比

将上述环形光源照明方式与提出的随机散斑投影照明方法对字符检测结果进行对比,如图 17 所示。可以看出随机散斑投影图像采集方法能够有效抑制氧化锌粗粒与划痕微镜面结构的反光,降低检测字符时的噪声干扰。

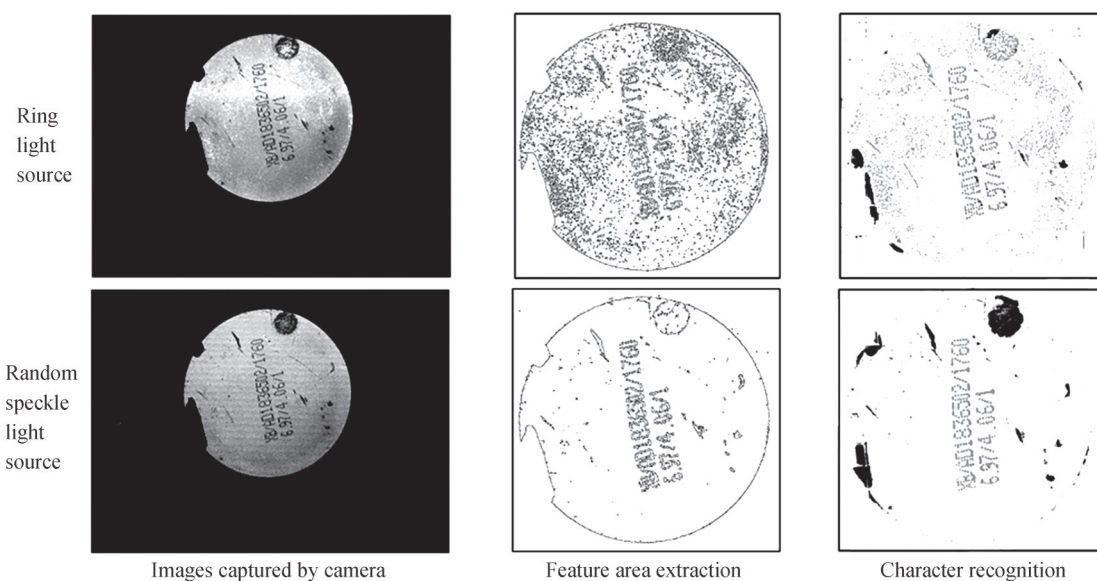


图 17 字符识别检测结果对比

Fig. 17 Comparison of character recognition detection results

3 结论

针对粗粒反光表面微镜面结构与划痕反光现象,在对比传统工业拍摄方案效果以及分析反光区域灰度变化规律的基础上,提出基于随机散斑投影的粗粒反光表面图像采集方法。首先设计了随机散斑投影组图生成算法,并针对倾斜投影模型提出简化水平倾斜投影畸变矫正方法,实现了工件平面密度均匀散斑的投

影,相较于传统的透视变换矩阵求解矫正法,本文方法无需依赖特征点标定,操作简便更具实用性,并通过均值融合方法实现了投影组图的融合。以氧化锌电阻片表面检测为实例,搭建实验平台,通过对比传统工业固定光源拍摄结果,验证了所提图像采集方法的优越性,获取工件图像对比度得到1.33~2.75倍的提升,工件表面纹理与划痕等细节信息记录更为丰富,也显著地抑制了工件表面反光现象,为后续图像处理与目标检测算法打下良好的基础。

参考文献

- [1] EBAYYEH A, MOUSAVI A. A review and analysis of automatic optical inspection and quality monitoring methods in electronics industry[J]. IEEE Access, 2020, 8:183192-183271.
- [2] REN Zhonghe, FANG Fengzhou, YAN Ning, et al. State of the art in defect detection based on machine vision [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 9: 661-691.
- [3] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. Cengage Learning, 2014.
- [4] ZENG Zhou, MA Lizhuang, ZHENG Zuoyong. Automated extraction of PCB components based on specularly using layered illumination[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011,22:919-932.
- [5] XIONG Guangjie, ZHANG Zhixian, LU Jingjing, et al. AOI multi-color illuminator control system based on Freescale MCU[J]. Computer Engineering and Design, 2014,35(5): 1823-1826.
熊光洁,张智贤,卢晶晶,等.基于Freescale微控制器的AOI多彩照明控制系统[J].计算机工程与设计,2014,35(5):1823-1826.
- [6] YANG Ziqi, XU Liming, XIE Bin, et al. Light source optimization of surface defect detection of brake master cylinder pistons[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014,48(1):64-68.
杨子琦,许黎明,解斌,等.柱塞式汽车制动器总泵活塞表面缺陷视觉检测的光源优化[J].上海交通大学学报,2014,48(1):64-68.
- [7] KANG D, JANG Y J, WON S. Development of an inspection system for planar steel surface using multispectral photometric stereo[J]. Optical Engineering, 2013, 52(3):9701.
- [8] YANG Fusheng, HO Chaoching, CHEN Liangchia. Automated optical inspection system for O-ring based on photometric stereo and machine vision[J]. Applied Sciences. 2021, 11(6):2601.
- [9] LEE S, JO J H, KIM J S, et al. Detection system for sub-micrometer defects of a photo-mask using on-axis interference between reflected and scattered lights[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(1): 73-80.
- [10] LIU Yan, YU Feihong. Automatic inspection system of surface defects on optical IR-CUT filter based on machine vision [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 55: 243-257.
- [11] CHANG Ming, CHEN Bocheng, GABAYNO J L, et al. Development of an optical inspection platform for surface defect detection in touch panel glass[J]. International Journal of Optomechatronics, 2016, 10(2):63-72.
- [12] XIANG Z, ZHANG J, QIAN M, et al. Metal stamping character image fusion algorithm based on multi-directional illumination[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2018, 30(9):1637-1642.
- [13] CHENG C K, TSAI H Y. Enhanced detection of diverse defects by developing lighting strategies using multiple light sources based on reinforcement learning [J/OL]. Journal of Intelligent Manufacturing, (2021-06-23) [2021-07-20]. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01800-4>.
- [14] WANG Tan, WANG Leilei, ZHANG Weiguo, et al. Design of infrared target system with Zhang Zhengyou calibration method[J]. Optics and Precision Engineering, 2019,27(8):1828-1835.
王谭,王磊磊,张卫国,等.基于张正友标定法的红外靶标系统[J].光学精密工程,2019,27(8):1828-1835.
- [15] RIZA N A, ASHRAF N. Calibration-based minimalistic multi-exposure digital sensor camera robust linear high dynamic range enhancement technique demonstration[J]. Optics Communications, 2021, 486: 126789.
- [16] WANG Hao, ZHANG Ye, SHEN Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4):438-448.
王浩,张叶,沈宏海,等.图像增强算法综述[J].中国光学,2017,10(4):438-448.

Random Speckle Projection Image Acquisition Method for Coarse-grained Reflective Surface

YANG Cheng, WANG Zhao, HUANG Junhui, XING Chao

(*Institute of New Energy Equipment and Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710072, China*)

Abstract: As a fundamental procedure of machine vision inspection, whether high-quality images can be acquired directly affects the difficulty of subsequent detection algorithm design and the object recognition ability. The light source and illumination mode are critical components of image acquisition. Common illumination modes with fixed light sources include backlighting, vertical lighting, coaxial lighting, etc., which are not suitable for surfaces with subtle targets, highlights, complex textures and embossed printing in special inspection scenes. For coarse-grained reflective surfaces, there is a local reflection phenomenon directly utilizing a general light source. To solve this problem, this paper proposes a novel image acquisition method based on random speckle projection to avoid fixing the light field direction. A series of random speckle patterns are designed to project on the coarse-grained reflective surface through active projection illumination, and a set of images with random light field distribution are obtained by a camera. The abundant information of the acquired images is used to suppress the reflection, and a fused image with uniform light intensity and a high signal-to-noise ratio is generated according to the mean fusion method. Aiming at the problem of perspective distortion during speckle projection, a perspective distortion correction method of the random speckle image is proposed to achieve efficient speckle projection with uniform density. Specifically, an oblique projection geometric model along the perspective distortion direction is established by introducing a projection distortion factor and projection image scale ratio and analyzing the relationship of two parameters and the projector inclined angle and its throw ratio. Compared with the traditional perspective distortion correction method of the projection transformation matrix, the proposed method does not need to rely on feature point calibration, and it is simpler and more practical. This paper takes the surface of zinc oxide resistors as an example to verify the effectiveness of the proposed method. We design and build an image acquisition system that involves a programmable structured light projector, a camera matched lens, detection supports and a computer, which can realize the rapid cycling of image projection and image acquisition. The experimental results show that our method suppresses the local reflection on the surface of the workpiece to a large extent, and the details of the surface texture and scratches of the workpiece are recorded more abundantly in the fusion image. Compared with the general ring light source, the image gray histogram and contrast show an advantage of our method during image quality evaluation, which significantly improves the image contrast by 1.33~2.75 times and lays a good foundation for the subsequent image detection algorithm design.

Key words: Speckle projection; Image acquisition; Coarse-grained reflection; Perspective distortion; Image fusion

OCIS Codes: 100.2980; 110.2945; 150.2945