

文章编号: 1001-4888(2021)01-0017-12

光绘:自由开源的数字散斑图像生成和评价软件^{*}

苏勇¹, 高越², 郜泽仁¹, 张青川¹

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 生成数字散斑图像以及对应的变形图像是数字图像相关研究的基础, 然而至今仍然缺乏功能齐全、操作简单、界面友好的专业散斑生成和分析软件; 研究者需要自行实现相关算法, 不仅费时耗力, 也增加了出错的可能性。本文发布了一款自由开源的数字散斑图像生成和评价软件:《光绘》。该软件具有散斑图生成、变形图生成、散斑质量评价和散斑图案推荐等功能: 可以生成椭圆、多边形和高斯散斑; 可以渲染平移、拉伸/压缩、旋转、正弦、高斯和剪切带等变形模式的变形图; 可以计算散斑占空比、散斑尺寸、系统误差和随机误差等关键散斑质量评价参数; 可以根据工况生成矢量格式的推荐散斑图案。本文提出向后映射初值快速估计算法和散斑图预渲染技术实现了变形图的实时渲染显示, 并使用积分图像技术大幅提升了灰度梯度平方和的计算效率。该软件不仅可用于数字图像相关的学术研究和工程应用, 也可服务于实验力学的教学工作, 具有广阔的应用前景。

关键词: 数字图像相关; 软件; 数字散斑图像; 变形图生成; 散斑图质量评价; 散斑图案优化

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-20-161

0 引言

数字图像相关是一种非接触、非干涉的全场光学测量技术。自 20 世纪 80 年代^[1,2]提出以来, 由于具有设备简单、环境要求低、测量精度高等一系列优势, 在材料测试^[3,4]、航空航天^[5,6]、生物力学^[7]、土木工程^[8]等领域获得了广泛应用。近年来, 由于多线程算法^[9,10]、反向迭代策略^[11,12]、GPU 加速^[13]等技术的提出, 数字图像相关计算速度大为提升, 实现了测量结果的实时显示输出^[14], 进一步拓宽了其应用范围。

数字图像相关的基本原理是通过试件表面的纹理信息确定物理上同一个点在不同时刻、不同视角、不同传感器之间的对应关系。由此可见, 纹理信息深刻影响着数字图像相关的测量精度。在数字图像相关领域, 试件纹理有一个专有名称, 称为“散斑”^[15,16]。

生成散斑图像以及对应的变形图像是诸多数字图像相关研究工作的基础。学者们已提出多种类型的散斑, 包括数字散斑^[17]、布尔模型散斑^[18]、棋盘格散斑^[19]等, 其中数字散斑由于算法简单、随机度可控、制作简便等优势而被广泛采用。通过优化散斑图案提升测量精度是近些年的研究热点, 而散斑优化的基础是完备的散斑质量评价标准。当前, 散斑评价参数可以大致归结为两类: 全局性参数, 包括散

^{*} 收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(11702287, 11872354, 11627803); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB22040502); 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2480000002)资助

通信作者: 郜泽仁(1992—), 男, 博士, 博士后研究员。主要从事数字图像相关技术的研究。Email: gaozeren@ustc.edu.cn
张青川(1962—), 男, 博士, 教授。主要从事铝合金的 PLC 效应、光镊技术、微量生化传感检测、数字图像相关等方面的研究。Email: zhangqc@ustc.edu.cn

斑尺寸^[20]、散斑占空比^[21]、平均灰度梯度^[15]等;局域性参数,包括灰度梯度平方和^[22]、子区平均波动^[23]、香农熵^[24]等。此外,苏勇等^[25]提出综合考虑系统误差和随机误差,使用总误差评估散斑图案质量。在散斑质量评价标准的基础上,学者们对散斑图案优化进行了一系列研究;王志勇等^[26]证明存在一个散斑尺寸的最优区间;陈振宁等^[27]通过数值模拟对数字散斑场的特征参数进行了优化;苏勇等^[28,29]建立了数字散斑唯一性、空间分辨率、系统误差、随机误差以及总误差的理论框架,并给出了最优散斑生成参数的选取策略。

虽然学者已经对散斑图像生成、变形图像生成、散斑质量评价、最优化散斑图案生成等问题进行了深入的研究,但当前仍然缺乏功能齐全、操作简单、界面友好的专业散斑生成和分析软件;研究者需要自行实现论文中的相关算法,费时耗力,也增加了出错的可能性。

针对上述问题,本文作者开发了一款自由开源的数字散斑图像生成和评价软件:《光绘》。该软件具有可视化界面(见图 1),拥有散斑图像生成、变形图像生成、散斑图像质量评价、散斑图案推荐等功能,可以服务数字图像相关领域的学术研究、工程应用以及教学工作。软件的下载地址为 <http://staff.ustc.edu.cn/~suyong/software.html>,源代码参见 <https://gitee.com/yongsu1989/glare>,遵循 GPL3.0 开源协议。

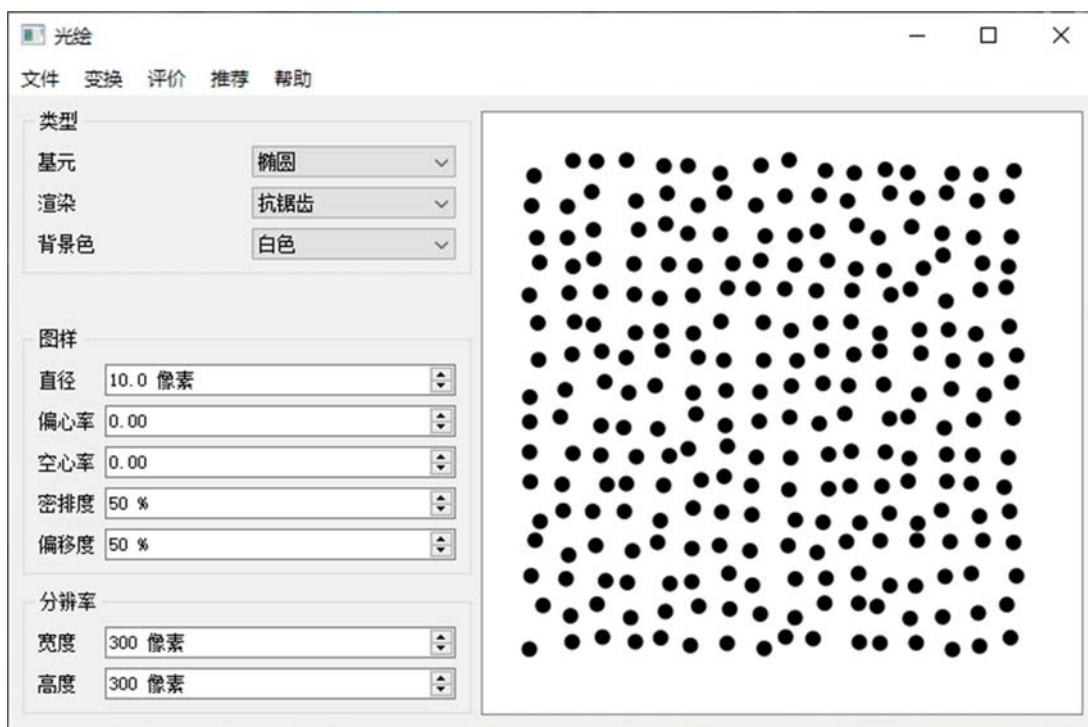


图 1 软件《光绘》的界面

Fig. 1 Software interface of Glare

1 散斑图像生成

1.1 数字散斑图案和数字散斑图像

数字散斑图案^[17,27,29]由位置随机的散斑基元构成,其生成参数包括散斑基元 $\varphi(x, y)$ 、密排度 ρ 、偏移度 δ 等,具体数学形式为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \varphi(x - x_{i,j}, y - y_{i,j}) \quad (1)$$

其中:函数 $\varphi(x, y)$ 表征散斑基元的形式;向量 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 表示第 i 行第 j 列散斑的中心位置,散斑总数为 N^2 。

数字散斑图案的生成流程如图 2 所示:首先,根据给定的散斑直径 D 和密排度 ρ ,按照间距 $L = D/\rho$

划分网格(密排度 100%对应网格上的散斑恰好紧密排布);随后,将散斑置于网格点,如图 2 中虚线所示;最后,对每个散斑添加随机位移 $\Delta=(\Delta_x, \Delta_y)$,其中随机变量 Δ_x 和 Δ_y 满足区间 $[-\delta L/2, \delta L/2]$ 上的均值分布,参量 δ 表示散斑偏移度。由于添加的位移量完全随机,所以即使散斑生成参数完全相同,每次生成的散斑图案也不同,这就是散斑固有的随机性。

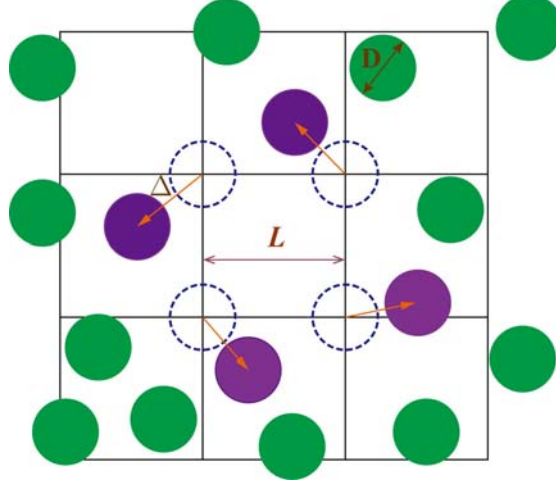


图 2 数字散斑图案生成过程

Fig. 2 The generation process of digital speckle pattern

将数字散斑图案采样和量化可得数字散斑图像。若数字散斑图案 $f(x, y)$ 的最大值和最小值为 $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$,量化的范围为 $[g_{\text{background}}, g_{\text{foreground}}]$,则数字散斑图像的灰度为

$$g[m, n] = \text{Round} \left[g_{\text{background}} + (g_{\text{foreground}} - g_{\text{background}}) \frac{f(m, n) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \right] \quad (2)$$

生成图像的位深为 8 比特。对于黑色背景白色散斑, $g_{\text{background}} = 0$ 且 $g_{\text{foreground}} = 255$;反之,对于白色背景黑色散斑, $g_{\text{background}} = 255$ 且 $g_{\text{foreground}} = 0$ 。

1.2 椭圆、多边形和高斯散斑

软件具有生成椭圆、多边形和高斯散斑的功能,如图 3 所示。

(1)对于椭圆散斑(见图 3(a1)~(a4)),可以设定散斑半径 r 和偏心率 e 。此时,椭圆的半长轴 a 和半短轴 b 分别为

$$a = \frac{r}{\sqrt[4]{1-e^2}}, \quad b = r \sqrt[4]{1-e^2} \quad (3)$$

于是椭圆的面积 $S = \pi ab = \pi r^2$,与对应的圆的面积相一致;同时,也可验证椭圆的偏心率

$$\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = e \quad (4)$$

为消除散斑图案的取向性,每个椭圆散斑都会被施加角度随机的旋转(见图 3(a2))。软件也可生成空心椭圆(见图 3(a3));若空心率设定为 α ,则每个椭圆散斑内部会产生椭圆形空洞,其半长轴和半短轴分别为 αa 和 αb 。此外,还可设置黑色背景白色散斑,且偏心率、空心率、黑底白斑等设定可同时施加(见图 3(a4))。

(2)对于多边形散斑(见图 3(b1)~(b4)),可以设定散斑半径 r 和多边形边数 n 。此时,散斑半径 r 为多边形外接圆的半径。当设定的边数 $n < 3$ 时,会生成边数随机的多边形(见图 3(b4))。对于多边形散斑,也可以设置空心率(见图 3(b3))和黑色背景(见图 3(b4))。

(3)对于高斯散斑(见图 3(c1)~(c4)),其散斑基元满足^[30]

$$\varphi(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/r^2] \quad (5)$$

其中 r 称为高斯散斑的半径。

相对于椭圆和多边形散斑,高斯散斑具有相对平滑的灰度分布;同时,若成像系统的点扩散函数可

由高斯函数近似,则点光源在成像靶面的灰度分布可以近似认为是一个高斯散斑;因此,在数字图像相关的算法研究中,高斯散斑被广泛采用。此外,椭圆形散斑的特例,圆形散斑(见图 3(a1)),由于具有各向同性和良好的对比度,也在工程环境下被广泛应用。例如,东南大学的邵新星等^[8]使用圆形散斑高精度测量了球墨铸铁圆柱形容器跌落变形。相对而言,研究椭圆、多边形以及空心散斑的主要目的是探索散斑图案新的可能性。

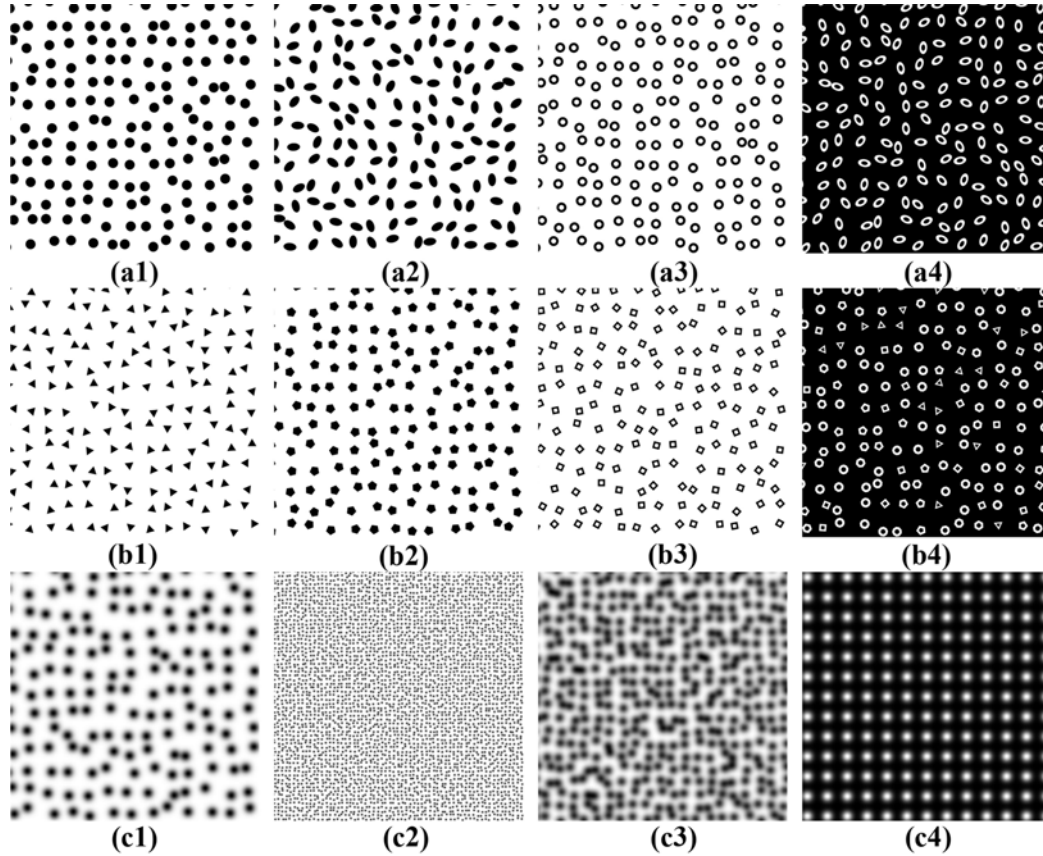


图 3 软件可生成的散斑类型:第一行至第三行分别为椭圆散斑、多边形散斑和高斯散斑

Fig. 3 Speckle patterns that *Glare* can generate: the first, second, and third rows are ellipse speckle patterns, polygon speckle patterns, and Gaussian speckle patterns, respectively

2 变形图像生成

2.1 变形模式

在数字图像相关领域,为研究算法的精度,通常需要生成变形场已知的散斑图。针对这一需求,软件提供了渲染平移、拉伸/压缩、旋转、正弦、高斯和剪切带^[31,32]等六种变形模式变形散斑图的功能。未来,根据使用者的反馈,会加入更多的变形模式。

生成变形图的基本思路是寻找变形图中整像素点在参考图中的位置,然后根据亮度不变假设计算其对应的灰度,其关键在于通过给定的位移场 (u, v) 计算变形图中 (x', y') 点在参考图中的对应位置 (x, y) 。给定的位移场 (u, v) 通常是参考图坐标 (x, y) 的函数,于是参考图与变形图之间点的对应关系可以表述为

$$x' = x + u(x, y), \quad y' = y + v(x, y) \quad (6)$$

简单起见,软件的当前版本使用高斯散斑,并且除旋转变形外,认为仅存在 x 方向的变形(即认为 $v=0$)。

(1)对于平移变形(见图 4 右第 1 行第 1 列),其位移量 u 满足

$$u = u_0 \quad (7)$$

其中 u_0 是平移量。

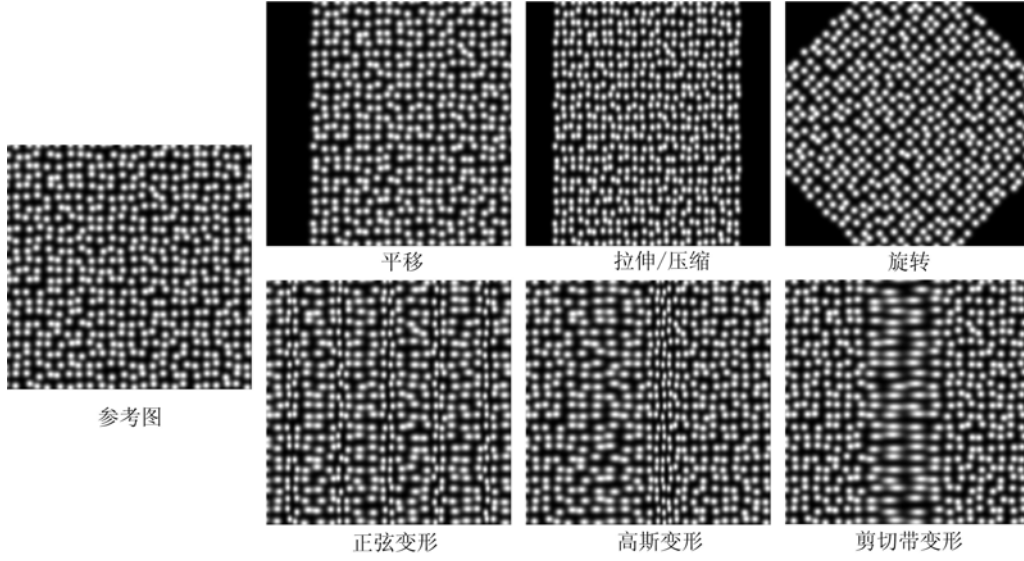


图 4 参考图和不同变形模式(平移、拉伸/压缩、旋转、正弦变形、高斯变形和剪切带变形)下的变形图
Fig. 4 Reference image and deformed images corresponding to different displacement fields (including translation, elongation/compression, rotation, sinusoidal deformation, Gaussian deformation, and Portevin-Le Chatelier (PLC) band deformation)

(2)对于拉伸/压缩变形(见图 4 右第 1 行第 2 列),其位移量 u 满足

$$u = a(x - x_0) \quad (8)$$

其中: a 表征了拉伸/压缩的程度, $a > 0$ 对应拉伸变形, $a < 0$ 对应压缩变形; x_0 表示拉伸和压缩的中心位置。

(3)对于旋转变形(见图 4 右第 1 行第 3 列),变形后的位置 (x', y') 与变形前的位置 (x, y) 之间满足

$$\begin{bmatrix} x' - x_0 \\ y' - y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: θ 表示旋转角; (x_0, y_0) 表示旋转中心的位置。

(4)对于正弦变形(见图 4 右第 2 行第 1 列),其位移量 u 满足

$$u = a \sin\left(\frac{2\pi x}{T} + b\right) \quad (10)$$

其中: a 表示正弦变形的幅值; T 表示周期; b 表示相位。

(5)对于高斯变形(见图 4 右第 2 行第 2 列),其位移量 u 满足

$$u = a \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{c_g^2}\right] \quad (11)$$

其中: a 表示高斯变形的幅值; x_0 表示高斯变形的中心位置; c_g 表示高斯变形带的宽度。

(6)对于剪切带变形(见图 4 右第 2 行第 3 列),其应变 e_{xx} 满足

$$e_{xx} = a \exp\left[-\frac{(x - x_0)^2}{c_{plc}^2}\right] \quad (12)$$

其中 c_{plc} 表征剪切带的宽度。

剪切带变形与高斯变形的不同之处在于,剪切带的应变满足高斯分布,而高斯变形的位移满足高斯分布。对公式(12)积分,并引入边界条件 $x=0$ 处位移 $u=0$,可得位移量

$$u = \frac{1}{2} a c \sqrt{\pi} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{c_{plc}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x - x_0}{c_{plc}}\right) \right] \quad (13)$$

其中 erf 为误差函数。

2.2 向后映射

向后映射意为寻找变形图像素点在参考图中的位置。对于平移、拉伸/压缩和旋转等线性变形,可以通过求解线性方程加以解决。但是,对于正弦、高斯和剪切带等复杂变形,参考图位置的求解是非线性问题。例如,对于剪切带变形(见公式(13)),确定变形图 x' 在参考图中的位置 x 等价于求解非线性方程

$$\Phi(x) = x + \frac{1}{2}ac\sqrt{\pi}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{c_{plc}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_0}{c_{plc}}\right)\right] - x' = 0 \quad (14)$$

非线性方程的求解被分解为两步:初值估计和非线性迭代。

初值估计的原理如图 5 所示,其目标是估计变形图中 E 点在参考图中的位置 E' 。首先,根据给定的位移场,计算参考图整像素点在变形图中的坐标,例如参考图中 c 点和 d 点变形后到达变形图中的 c' 点和 d' 点。随后,搜寻 E 所在的区间;如图 5 所示, E 在 c' 和 d' 之间;由于变形是连续的, E 在参考图中的位置 E' 应该在区间 (c, d) 内。最后,假设变形在区间 (c, d) 内是线性的,那么 E' 的位置可以估计为

$$x(E') = x(c) + [x(d) - x(c)] \frac{x'(E) - x'(c')}{x'(d') - x'(c')} \quad (15)$$

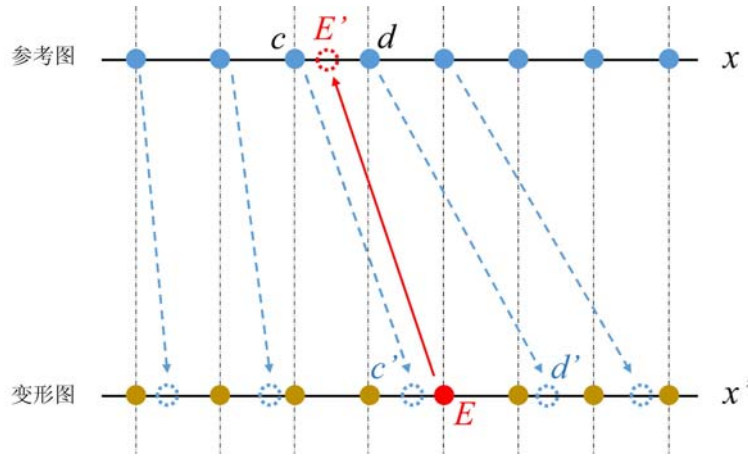


图 5 初值估计的原理

Fig. 5 Principle of initial value estimation

在获得初值后,使用牛顿迭代法求解非线性方程。对于非线性方程 $\Phi(x)=0$,牛顿迭代公式为

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\Phi(x_k)}{\Phi'(x_k)} \quad (16)$$

例如,对于剪切带变形(见公式(13)):

$$x_{k+1} = x_k - \frac{x_k + \frac{1}{2}ac\sqrt{\pi}\left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{c_{plc}}\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{x_k-x_0}{c_{plc}}\right)\right] - x'}{1 + a\exp\left[-\frac{(x_k-x_0)^2}{c_{plc}^2}\right]} \quad (17)$$

当迭代增量小于 1×10^{-4} 时,停止迭代,即可得到变形图点在参考图中的对应位置。随后带入高斯散斑的表达式(公式(1)和公式(5)),即可求出该点的亮度。

2.3 散斑图预渲染

变形图像素点往往在参考图的亚像素位置,若使用插值方法确定灰度,必然会引入误差。为避免此误差,软件使用具有已知数学形式的高斯散斑,但是其副作用是巨大的计算量。由于软件界面需要实时显示变形图,若每一帧均精确渲染,不可避免地会导致界面卡顿。为提升界面的响应效率,本文提出了散斑图预渲染技术。

散斑图预渲染的原理如图 6 所示。通常而言,散斑的存在区域会大于参考图的范围,为此,可以寻找到一个能把所有散斑包含在内的区域,然后生成一张预渲染图。若需要估计预渲染图内某点的灰度,则使用线性插值;若需要预渲染图之外的灰度,则直接设为背景色。由于避免了高斯散斑灰度的计算,

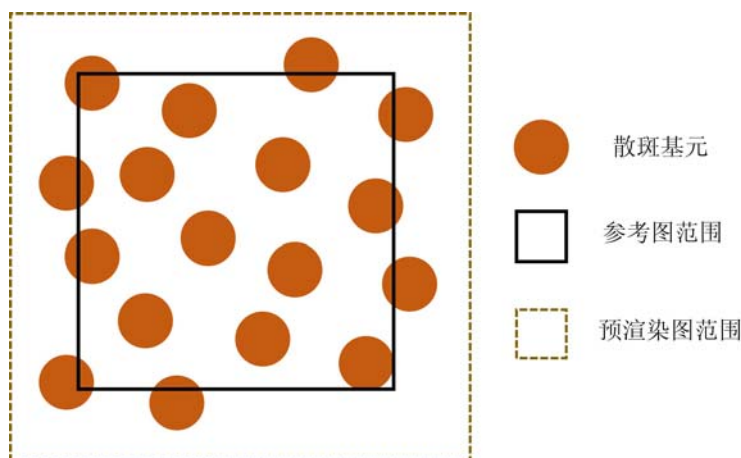


图 6 散斑图预渲染技术的原理

Fig. 6 Principle of speckle image pre-rendering technique

大大提升了界面响应速度。不过值得指出的是,预渲染加速技术仅用于界面显示;在图像导出的功能中,为确保生成高质量散斑图,并未采用该近似。总体而言,变形图渲染的流程如图 7 所示。

3 散斑图像质量评价

对于数字图像相关方法而言,散斑图像质量至关重要。散斑图像质量可以使用散斑质量评价参数表征。散斑占空比、散斑尺寸、系统误差和随机误差是四种重要且被广泛采用的散斑质量评价参数。

3.1 散斑占空比

散斑占空比表征散斑在图像中所占面积的比例。文献[27]指出占空比的最优值为 50%。因此,散斑占空比越接近 50%,可以认为散斑质量越好。

在导入图像后,软件首先会通过 Ostu 算法确定二值化阈值,然后将散斑图二值化(见图 8);通过计算二值化图像中黑色像素数与总像素数之比,输出散斑占空比。例如,对于图 8 所示的散斑图,使用 Ostu 算法得到的二值化阈值为 148,相应的占空比为 30.72%。此外,阈值也可自行设定,软件会自动计算相应的散斑占空比。

3.2 散斑尺寸

散斑尺寸表征散斑颗粒的大小。若散斑尺寸过小,会导致图像欠采样,引起很大的系统误差;若散斑尺寸过大,会导致图像细节不够丰富,对比度差,引起很大的随机误差。通常认为最优的散斑尺寸为 3~5 像素。

散斑尺寸可以使用自相关曲线的半峰全宽^[33]表征(见图 9)。图像自相关函数的计算方式如下:首先,选取图像中心为子区中心,根据给定的子区尺寸选取参考子区;然后,将参考子区平移 $[t, s]$ 个像素,得到平移子区;计算平移子区与参考子区的相关系数,其中相关系数的定义为

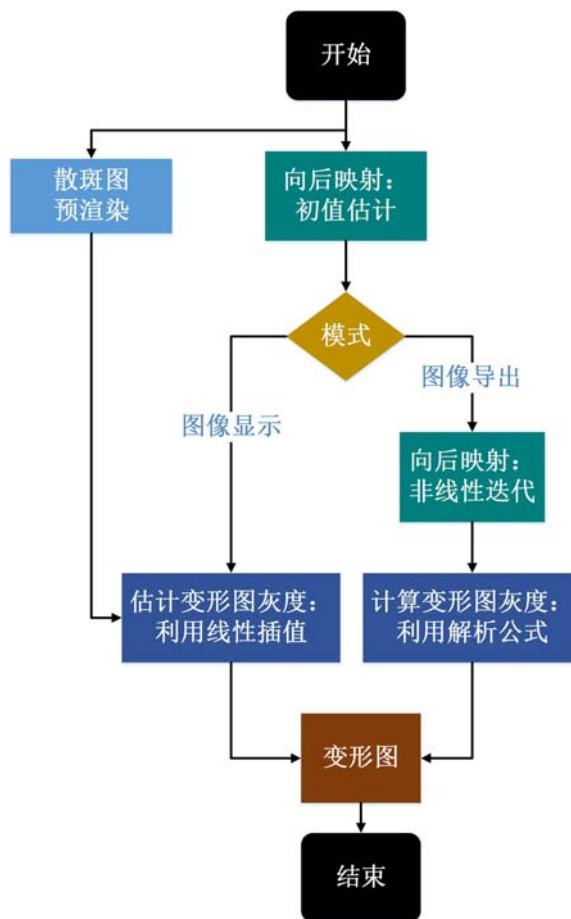


图 7 变形图渲染流程图

Fig. 7 Flowchart of deformed image rendering

$$A_{ff}[t, s] = \frac{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M (f[m, n] - \bar{f})(f[m+t, n+s] - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M (f[m, n] - \bar{f})^2} \sqrt{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M (f[m+t, n+s] - \bar{f})^2}} \quad (18)$$

其中: $\bar{f}$ 是子区的平均灰度; t 和 s 分别是沿 x 和 y 方向的移动量; $2M+1$ 是子区大小; 计算不同平移量下的相关系数, 即可获得图像的自相关函数。为简单起见, 软件仅计算图像沿 x 轴和 y 轴方向的自相关曲线。在获得自相关曲线后, 使用线性插值确定相关系数为 0.5 的位置, 从而获得散斑尺寸。若 x 方向的散斑尺寸为 D_x , y 方向的散斑尺寸为 D_y , 则最后软件输出的散斑尺寸为

$$D = \sqrt{D_x D_y} \quad (19)$$

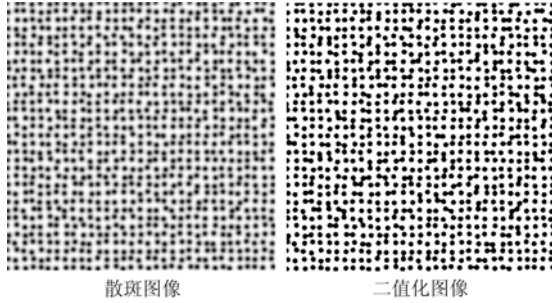


图 8 散斑图像和二值化图像

Fig. 8 Speckle image and corresponding binary image

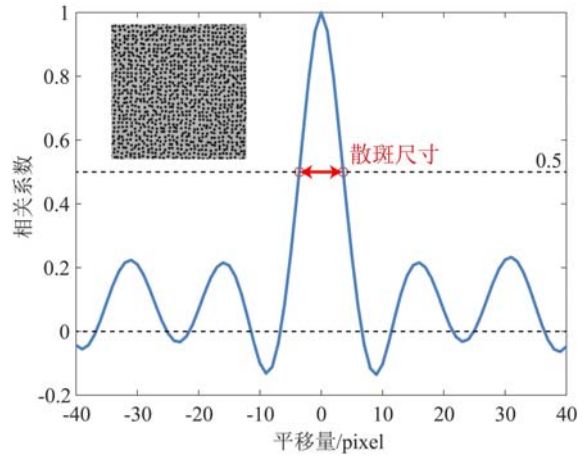


图 9 自相关曲线和散斑尺寸

Fig. 9 Auto-correlation function and speckle size

3.3 系统误差

不完美的插值会导致一个周期性的系统误差, 称为“插值偏差”。插值偏差主要由图像的高频成分产生。散斑尺寸越小, 图像高频成分越多, 对应的插值偏差也越大。使用高阶的 B 样条插值可以有效降低插值偏差, 但是相应的计算量也会增大; 使用图像预滤波也可以减小插值偏差, 但会降低测量的空间分辨率。

苏勇等^[34]给出了“插值偏差”的理论公式

$$u_e \approx C_b \sin 2\pi u_0 \quad (20)$$

其中: u_e 表示插值偏差; u_0 表示亚像素平移量; C_b 是插值偏差的幅值, 满足

$$C_b = \frac{1}{2\pi} \frac{\int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} E_b(\nu_x, \nu_y) |\hat{f}(\nu_x, \nu_y)|^2 d\nu_x d\nu_y}{\int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \hat{\varphi}(\nu_x, \nu_y) |\hat{f}(\nu_x, \nu_y)|^2 d\nu_x d\nu_y} \quad (21)$$

其中: $|\hat{f}(\nu_x, \nu_y)|^2$ 表示图像功率谱; $E_b(\nu_x, \nu_y)$ 被称为插值偏差核, 其具体形式为

$$E_b(\nu_x, \nu_y) = (\nu_x - 1)\hat{\varphi}(\nu_x - 1, \nu_y) - (\nu_x + 1)\hat{\varphi}(\nu_x + 1, \nu_y) + \hat{\varphi}(\nu_x, \nu_y)\hat{\varphi}(\nu_x + 1, \nu_y) + \hat{\varphi}(\nu_x, \nu_y)\hat{\varphi}(\nu_x - 1, \nu_y) \quad (22)$$

其中 $\hat{\varphi}(\nu_x, \nu_y)$ 是插值算法的传递函数。

软件采用离散傅里叶变换计算图像的功率谱, 然后根据公式(21)、公式(22)估计插值偏差的幅值 C_b 并在界面中输出。若插值偏差大于用户的精度需求, 则必须减小插值偏差。在算法层面, 可以使用高阶 B 样条插值或图像预滤波技术; 在实验层面, 可以减小物距、增大散斑物理尺寸或提高相机分辨率。

3.4 随机误差

图像噪声会导致测量结果的波动, 引入随机误差。图像噪声越大, 随机误差越大; 此外, 随机误差还

与图像对比度有关,增大图像的对比度可以减小随机误差。

潘兵等^[22]指出对于零阶和一阶形函数随机误差为

$$\text{Std}(u) = \frac{\sigma}{\sqrt{\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M f_x^2[m, n]}} \quad (23)$$

其中: $2M+1$ 为子区大小; σ 是图像噪声的标准差; $f_x[m, n]$ 为 $[m, n]$ 处的图像梯度。

有趣的是,对于二阶形函数,其随机误差近似为零阶或一阶的两倍,最近苏勇等^[35]从理论上证明该比例系数为 $(7/2)^{1/2}$,并指出该现象产生的根本原因在于散斑的均匀性和各向同性。

软件会计算 $\sigma=1$ 时的随机误差,并以云图的形式显示。若随机误差大于用户的精度需求,则必须减小随机误差。根据公式(23),有两种减小随机误差的策略:(1)减小图像噪声,例如使用高信噪比相机或通过“多帧平均技术”进行图像降噪(多帧降噪的缺陷在于无法用于动态变形测量);(2)提升子区灰度梯度平方和,例如使用更高对比度的散斑图或增大子区尺寸(增大子区的副作用是降低测量的空间分辨率)。在实际实验中,选取计算参数需综合考量测量的系统误差、随机误差和空间分辨率^[29]。

公式(23)中最耗时的部分是计算灰度梯度平方和

$$\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-M}^M f_x^2[m, n] \quad (24)$$

传统算法是遍历全图,对每个点单独计算灰度梯度平方和,但是这种算法由于重复计算而效率低下。为解决该问题,软件使用了积分图像技术。对于导入的散斑图,首先使用 Sobel 算子计算图像梯度,然后生成积分图像

$$s(i, j) = \sum_{k=0}^i \sum_{l=0}^j f_x^2[k, l] \quad (25)$$

积分图像的生成可以使用递推公式

$$s[i, j] = s[i-1, j] + s[i, j-1] - s[i-1, j-1] + f_x^2[i, j] \quad (26)$$

这样,灰度梯度平方和可以计算为

$$\sum_{i=i_0}^{i_1} \sum_{j=j_0}^{j_1} f_x^2(i, j) = s[i_1, j_1] - s[i_1, j_0-1] - s[i_0-1, j_1] + s[i_0-1, j_0-1] \quad (27)$$

积分图像技术的使用大幅提升了灰度梯度平方和的计算效率。

4 散斑图案推荐

随着水转印、热转印、UV 打印等技术的应用^[36],将设计好的散斑图案高质量转印到试件表面成为可能。因此,可以预先设计高质量的散斑图案,然后转印到试件表面,以提高数字图像相关的测量精度。

软件提供了散斑图案推荐的功能:为提升散斑的对比度,使用圆形散斑;根据文献^[25]的推荐,散斑直径设定为 4 像素,密排度为 60%;考虑到散斑最好不要相互接触^[29],偏移度设定为 40%。

最终成像形成的散斑大小与物距、像距、像元尺寸均相关。为保证成像的散斑直径为 4 像素,需要物距、像距和像元尺寸等信息。在输入相关信息后,软件可以生成推荐的散斑图案并输出给定视场大小的矢量图格式文件。通过各种散斑转印技术^[36],可以将设计好的散斑附着在试件的表面。

5 结论

本文发布了一款自由开源的数字散斑图像生成和评价软件:《光绘》。该软件具有散斑图生成、变形图生成、散斑质量评价和散斑图案推荐等功能。在散斑图生成方面,可以生成椭圆、多边形和高斯散斑;在变形图生成方面,可以渲染平移、拉伸/压缩、旋转、正弦、高斯和剪切带等变形模式的变形图;在散斑质量评价方面,可以计算散斑占空比、散斑尺寸、系统误差和随机误差等关键散斑质量评价参数;在散斑图案推荐方面,可以根据工况生成矢量格式的推荐散斑图案。该软件不仅可用于数字图像相关的学术研究,也可助力相关的工程应用,还能服务于实验力学的教学工作,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):213427.
- [2] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, 14:1270.
- [3] 王浩, 孙翠茹, 张晓川, 等. 基于数字图像相关方法的 TiO_2/PI 纳米杂化薄膜低温力学性能研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 343—351 (WANG Hao, SUN Cuiru, ZHANG Xiaochuan, et al. Study of low temperature mechanical properties of TiO_2/PI nano-hybrid thin film based on digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(3):343—351 (in Chinese))
- [4] 李阳, 孙晨, 陈巨兵. 基于数字图像相关方法的矿用扁平接链环模型接触变形实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(6):926—934 (LI Yang, SUN Chen, CHEN Jubing. Experimental investigation on contact deformation of mining flat type chain connector model based on digital image correlation[J], Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(6):926—934 (in Chinese))
- [5] 高越, 杜文略, 李红薇, 等. 基于三维摄影测量的大型整流罩分离试验角点运动测量及分析[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(4):55—59 (GAO Yue, DU Wenlue, LI Hongwei, et al. Measurement and analysis of the corner motion of large scale fairing separation based on three-dimensional photogrammetry[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(4):55—59 (in Chinese))
- [6] 吴立夫, 石文雄, 谢惠民. 热障涂层高温失效行为的正射投影—单相机三维数字图像相关实验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(5):609—619 (WU Lifu, SHI Wenxiong, XIE Huimin. Experimental study of high temperature failure behavior of thermal barrier coating based on 3D digital image correlation of single camera[J], Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):609—619 (in Chinese))
- [7] 刘永嫚, 徐小海, 吴尚犬, 等. 基于单层荧光颗粒的三维细胞牵引力的研究[J]. 实验力学, 2018, 33(6):831—840 (LIU Yongman, XU Xiaohai, WU Shangquan, et al. Study on three dimensional cell traction force based on monolayer fluorescent beads[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(6):831—840 (in Chinese))
- [8] 邵新星, 戴云彤, 代祥俊, 等. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(3):305—325 (SHAO Xinxing, DAI Yuntong, DAI Xiangjun, et al. Research progress of several key problems in digital image correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(3):305—325 (in Chinese))
- [9] 高越. 三维数字图像相关法的关键技术及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014 (GAO Yue. Research on key technologies and applications of three-dimensional digital image correlation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014 (in Chinese))
- [10] Shao X, Dai X, He X. Noise robustness and parallel computation of the inverse compositional Gauss-Newton algorithm in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 71:9—19.
- [11] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:73—80.
- [12] Pan B, Li K, Tong W. Fast, robust and accurate digital image correlation calculation without redundant computations[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(7):1277—1289.
- [13] Huang J, Zhang L, Jiang Z, et al. Heterogeneous parallel computing accelerated iterative subpixel digital image correlation[J]. Science China Technological Science, 2018, 61(1):74—85.
- [14] Shao X, Dai X, Chen Z, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring[J]. Applied Optics, 2016, 55(4):696—704.
- [15] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2):120—129 (PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J], Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2):120—129 (in Chinese))
- [16] 崔宗会, 缪泓, 熊宸, 等. 基于拟合求解数字图像相关亚像素位移算法[J]. 实验力学, 2016, 31(6):769—778 (CUI Zonghui, MIAO Hong, XIONG Chen, et al. A new sub-pixel displacement algorithm in digital image correlation based on fitting method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(6):769—778 (in Chinese))
- [17] Mazzoleni P, Matta F, Zappa E, et al. Gaussian pre-filtering for uncertainty minimization in digital image correlation using numerically-designed speckle patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66:19—33.

- [18] Sur F, Blaysat B, Grediac M. Rendering deformed speckle images with a Boolean model[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2018, 60:634—650.
- [19] Grediac M, Blaysat B, Sur F. Extracting displacement and strain fields from checkerboard images with the localized spectrum analysis[J]. *Experimental Mechanics*, 2019, 59:207—218.
- [20] Lecompte D, Smits A, Bossuyt S, et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(11):1132—1145.
- [21] Sutton M A, Orteu J J, Schreier H. Image correlation for shape, motion, and deformation measurements: basic concepts, theory and applications[M]. Springer Science & Business Media, 2009.
- [22] Pan B, Xie H, Wang Z, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, 16(10):7037—7048.
- [23] Hua T, Xie H, Wang S, et al. Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(1):9—13.
- [24] Crammond G, Boyd S W, Dulieu-Barton J M. Speckle pattern quality assessment for digital image correlation[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2013, 51(12):1368—1378.
- [25] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. *实验力学*, 2017, 32(5):699—717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(5):699—717 (in Chinese))
- [26] 王志勇, 王磊, 郭伟, 等. 数字图像相关方法最优散斑尺寸[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(8):674—678 (WANG Zhiyong, WANG Lei, GUO Wei, et al. Optimal size of speckle spot in digital image correlation method[J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(8): 674—678 (in Chinese))
- [27] Chen Z, Shao X, Xu X, et al. Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4):884.
- [28] Su Y, Zhang Q, Gao Z. Statistical model for speckle pattern optimization[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30259.
- [29] Su Y, Gao Z, Fang Z, et al. Theoretical analysis on performance of digital speckle pattern: uniqueness, accuracy, precision, and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16):22439—22474.
- [30] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8):1613—1620.
- [31] Liu Y, Cai Y, Tian C, et al. Experimental investigation of a Portevin-Le Chatelier band in NiCo-based superalloys in relation to γ' precipitates at 500°C[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 49:35—41.
- [32] Xu X, Su Y, Cai Y, et al. Effects of various shape functions and subset size in local deformation measurements using DIC[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(8):1575—1590.
- [33] Bornert M, Bremand F, Doumalin P, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors: methodology and results[J]. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(3):353—370.
- [34] 苏勇, 张青川, 徐小海, 等. 数字图像相关技术中插值偏差的理论估计[J]. *力学学报*, 2016, 48(2):495—510 (SU Yong, ZHANG Qingchuan, XU Xiaohai, et al. Theoretical estimation of interpolation bias error in digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 495—510 (in Chinese))
- [35] Su Y, Gao Z, Tu H, et al. Uniformity and isotropy of speckle pattern cause the doubled random error phenomenon in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 131:106097.
- [36] 陈振宁. 数字散斑场优化及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018 (CHEN Zhenning. Optimizations and applications of digital speckle patterns[D]. Nanjing: Southeast University, 2018 (in Chinese))

***Glare*: a free and open source software for generation and assessment of digital speckle pattern**

SU Yong¹, GAO Yue², GAO Zeren¹, ZHANG Qingchuan¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 2. Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Generating digital speckle image and its corresponding deformed image is the basis of digital image correlation research. At present, however, it still lacks a powerful, easy-to-use, and user-friendly professional software concerning generation and assessment of digital speckle pattern. Researchers have to reimplement the generation algorithms in literatures by themselves, which is time-consuming and error-prone. This paper reports a free and open source software for generation and assessment of digital speckle pattern: *Glare*. The software has functions including generating speckle patterns, rendering deformed images, assessing pattern quality, and presenting pattern recommendations. *Glare* can generate ellipse, polygon, and Gaussian speckle pattern; can render deformed images with underlying deformation fields of translation, elongation/compression, rotation, sinusoidal deformation, Gaussian deformation, and Portevin-Le Chatelier (PLC) band; can calculate key pattern quality assessment parameters such as speckle coverage, speckle size, systematic error, and random error; and can produce optimized speckle pattern in form of vector image. The software realizes real-time deformed image rendering with the aid of fast initial value estimation algorithm for inverse map and pattern pre-rendering technique, and improves the computational efficiency of sum of square of subset intensity gradients by integral image method. In general, the software can be used not only for scientific research and engineering applications in digital image correlation community but also for education of experimental mechanic, and therefore has broad prospects.

Keywords: digital image correlation; software; digital speckle image; deformed image generation; speckle pattern assessment; speckle pattern optimization