

# 光学学报

## 基于标记点消隐与提取的三维形貌及形变测量

陈正东, 张启灿\*, 吴周杰\*\*, 李训仁, 王浩然, 陈照升

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 条纹投影轮廓术期望被测表面反射率足够均匀以保证形貌测量精度, 而数字图像相关技术则期望被测表面能够提供高对比度的纹理信息来确保图像匹配准确性和形变计算精度, 二者对表面的纹理需求存在矛盾。针对这一矛盾, 提出基于 RGB 模型的标记点纹理消隐与提取方法, 通过计算特定的消隐系数与提取系数, 同时提取高质量的条纹图案和纹理图案分别用于后续形貌和形变测量。实验结果表明, 相较于已有方法, 所提方法可以解决条纹投影轮廓术和数字图像相关技术对纹理要求的矛盾性问题, 同时实现高精度的三维形貌和形变测量。

**关键词** 测量; 条纹投影轮廓术; 三维形貌测量; 数字图像相关; 三维形变测量

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222129

### 1 引言

条纹投影轮廓术(FPP)因具有精度高、速度快、全场测量等优点, 在三维形貌测量中得到了广泛的研究与应用<sup>[1-2]</sup>。条纹投影方法中, 投影仪投影预先编码的正弦条纹图到物体表面, 条纹经过物体高度调制后被相机捕捉, 可通过分析调制后的条纹图还原物体表面的相位信息。傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[3]</sup>与相位测量轮廓术(PMP)<sup>[4]</sup>是最常见的相位分析三维重建手段。FTP利用单帧受调制的变形条纹图像, 在频域中分析并提取物体的截断相位。PMP通过投影一系列相移正弦编码图案到被测物体表面, 在时域上点对点获取对应截断相位, 之后通过相位展开<sup>[5-7]</sup>和系统标定<sup>[8-12]</sup>完成对静态物体的三维测量。

为进一步将条纹投影方法运用到动态场景的三维测量中, 研究人员从提升硬件投影速度和提高编码效率两个方面开展了一系列的工作。硬件提速上, 研究人员使用二值离焦投影<sup>[13]</sup>、旋转光栅投影<sup>[14]</sup>、阵列投影<sup>[15]</sup>等方式明显提高了投影速度; 算法加速上, 研究人员通过微频移傅里叶变换法<sup>[16]</sup>、双频相移法<sup>[17-18]</sup>等有效提高了编码效率。格雷码辅助相移法因具有良好的鲁棒性和抗噪性, 常被用于复杂工况的静态场景测量<sup>[19-20]</sup>, 但由于投影镜头需要主动离焦, 传统格雷码方法易产生级次跳变错误且编码效率低, 这就限制了其在高速场景中的应用。针对这一问题, Wu等<sup>[21]</sup>提出了通用分区间相位展开方法及时间复用编码策

略<sup>[22-23]</sup>, 避免了码字边缘的跳变误差, 提高了编码效率, 最终利用此类方法实现了复杂动态场景高速高鲁棒性的三维形貌测量。

重建效率和测量鲁棒性的不断提升, 使得现有技术已经可以实现复杂动态场景的高效高精度三维形貌测量。但由于投影的图案并非附着在物体表面, 无法准确建立不同时刻重建三维形貌信息点对点映射关系, 从而无法精确计算被测表面的位移与形变。因此, 只通过FPP难以实现对全场运动跟踪或形变追踪的精确测量, 需要与其他技术结合。

在实验力学领域, 数字图像相关(DIC)是一种分析物体变形与力学特性的公认方法<sup>[24-25]</sup>, DIC利用物体表面的自然纹理或人工制作的标记点, 通过计算分析区域变形前后的灰度相关程度来实现准确的点对点追踪, 散斑是其中一种典型的形变跟踪标记方法。由于DIC技术具有良好的形变分析特性, 学者们将其与FPP结合, 同时实现准确的三维形貌测量和形变分析。Tay等<sup>[26]</sup>率先将FPP方法和DIC方法结合, 使用二维DIC方法获得面内位移, 通过单帧FTP方法获得三维形貌和离面位移。Felipe-Sesé等<sup>[27]</sup>结合单帧FTP方法与二维DIC方法检测了复合材料的损伤, 但此类方法所使用的FTP方法中存在滤波操作, 导致无法重建被测表面的细节信息。因此, Shi等<sup>[28]</sup>先利用多帧PMP技术准确测出物体三维形貌, 再利用相移条纹图均值作为纹理图分析面内位移, 提升了测量结果的精度。随后, Nguyen等<sup>[29]</sup>完成了不连续表面形貌和位移

收稿日期: 2022-12-12; 修回日期: 2023-01-17; 录用日期: 2023-02-07; 网络首发日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(62205226, 62075143)、博士后创新人才支持计划(BX2021199)、中国博士后科学基金(2022M722290)、四川省重点研发计划(2021YFS0398)、中央高校基本科研业务费专项资金(2022SCU12010)

通信作者: \*zqc@scu.edu.cn; \*\*zhoujiwu@scu.edu.cn

的精确测量。这类技术都依靠二维 DIC 方法计算面内位移,再通过条纹投影恢复物体形貌和离面位移,若被测物体发生了较大的离面运动,透视成像模型的存在会导致不同深度的面内位移计算产生误差<sup>[30]</sup>。为修正离面运动对面内位移测量的影响,需要设计额外标定补偿方法<sup>[27]</sup>或使用远心透镜<sup>[28]</sup>。针对这一问题,Wu 等<sup>[31]</sup>提出了 DIC 辅助 FPP 方法,使用 FPP 重建精确的三维点坐标,利用 DIC 建立前后时刻的点与点对应关系,并将对应点的三维坐标直接相减获得准确的三维位移或变形。

目前,将条纹投影与 DIC 技术相结合时,FPP 方法要求被测表面反射率足够高且均匀,以保证条纹质量和形貌测量结果的精度,而 DIC 方法要求被测表面与纹理信息的反射率差异足够大来确保图像匹配的准确性和形变计算精度,可见二者对表面的纹理需求矛盾。针对此矛盾,Siegmann 等<sup>[32]</sup>使用彩色相机与彩色投影仪,投影蓝白条纹到制有红色散斑的物体表面,随后在彩色图案的红和蓝颜色通道将条纹图像与散斑图像分离,此方法有效利用了投影条纹与散斑的颜色特性,但受颜色串扰影响,提取的散斑纹理图中会残留条纹信息,影响了形变追踪的精度。Wu 等<sup>[33]</sup>通过制作椒盐状离散分布的散斑图案并在三维重建过程中使用滤波操作,降低了散斑对形貌测量的影响,但滤波操作会导致重建形貌细节损失,影响后续形变的结果,同时制作散斑类型的限制会降低此方法的适用性。

本文在 DIC 辅助 FPP 的单相机单投影仪测量系

统的基础上,提出一种基于颜色信息差异的标记点消隐与提取算法。首先,在被测物体表面制作具有高反射率的彩色标记点图案(如随机散斑颗粒),利用投影仪投影三维形貌测量所需的条纹图案至物体表面,此图案经物体表面高度调制后由彩色相机接收。相机接收的彩色图案中彩色纹理与待测物体表面在不同颜色通道中的成分有差异,利用此特性,可通过消隐和提取模型调整彩色图像转为灰度图像时红绿蓝(RGB)三通道的比例系数,使得转换后的待测物体表面与纹理信息的强度值相等或强度值差异明显,同时保证条纹信息和纹理信息的高质量分离提取,再利用提取出的条纹和纹理信息实现准确的三维形貌和形变测量。与将三步相移嵌入 RGB 三通道的传统条纹颜色耦合方法相比,本文方法使用灰度投影仪投影灰度条纹至物体表面,投影端不存在颜色串扰问题。然后,利用消隐与提取模型进行全场线性变换,最终在不影响相移条纹正弦性、不产生颜色串扰、无滤波操作的情况下解决条纹投影技术和 DIC 技术对纹理要求的矛盾性问题。

## 2 基本原理

### 2.1 DIC 辅助条纹投影测量系统

使用基于 DIC 辅助 FPP 的测量系统来完成三维形貌和形变测量,其原理如图 1 所示。首先,在物体表面制作散斑,通过相机拍摄投影仪投影的相移图案与格雷码图案,使用通用分区间相位展开方法获取解调出的正确连续相位<sup>[21]</sup>,经过系统标定准确获得物体在

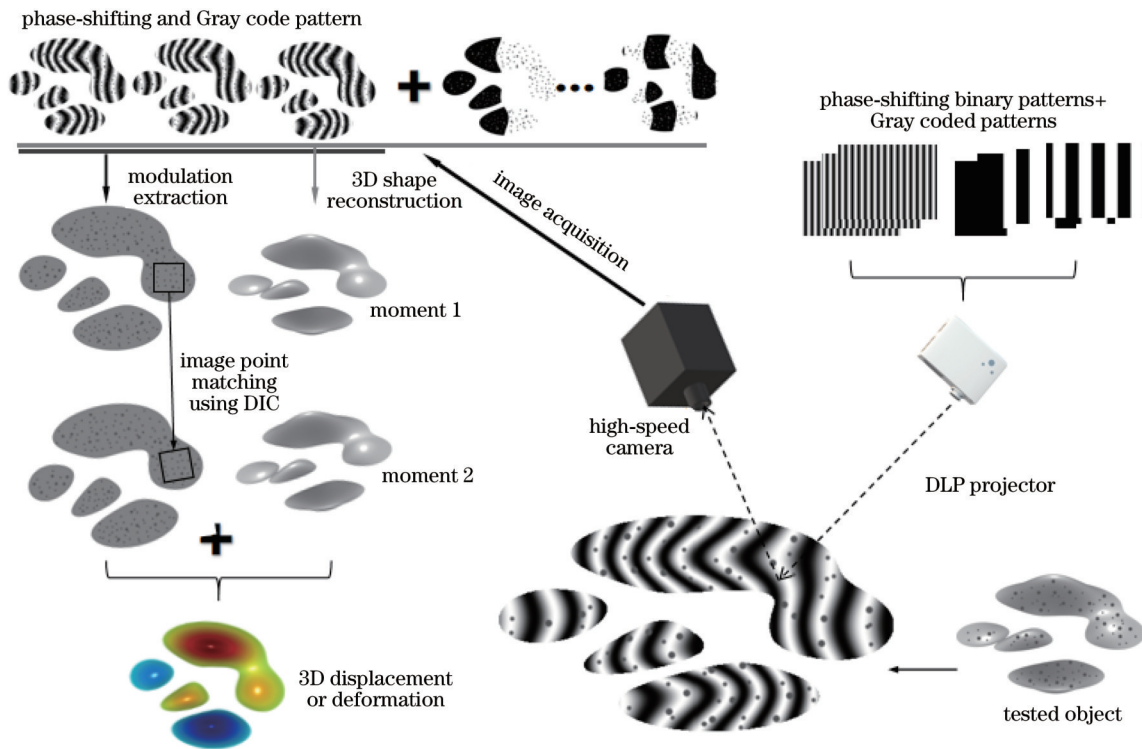


图 1 基于 DIC 辅助 FPP 的三维形貌、形变测量系统

Fig. 1 3D shape and deformation measurement system based on DIC-assisted-FPP

不同时刻的三维形貌。同时,利用调制度提取方法从相移条纹中提取不同时刻的散斑图案,使用二维 DIC 方法进行点匹配和跟踪。最后,利用三维位移计算策略,计算物体的三维位移或变形。

2.1.1 基于条纹投影的三维形貌重建

为保证条纹投影三维重建的效率,使用三步相移法提取截断相位,每次的相移量为  $2\pi/3$ , 编码的条纹图  $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$  可表示为

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi(x, y) \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right] \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ \varphi(x, y) + \frac{4\pi}{3} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A(x, y)$  为背景光强;  $B(x, y)$  为条纹图案调制度;  $\varphi(x, y)$  表示携带物体面形信息的相位。三步相移条纹对应的截断相位为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} [I_2(x, y) - I_3(x, y)]}{2I_1(x, y) - [I_2(x, y) + I_3(x, y)]} \right\} \quad (2)$$

因为反正切函数具有截断特性,相位会被截断在  $(-\pi, \pi]$  中,需通过相位展开方法将截断相位展开为

连续相位。格雷码编码方式中相邻的两个码字只有一位不同,此单步特性消除了出现重大误差的可能,提高了测量的鲁棒性。如图 2(a) 所示,以具有 8 个周期的正弦条纹为例,共需要 3 组格雷码对图像的每一个像素点进行编码,辅助截断相位展开,再通过式 (3) 进行解码、计算相位级次,即

$$k(x, y) = \text{LUT} \left[ V(x, y) \right] = \text{LUT} \left[ \sum_{i=1}^3 f_{GC,i}(x, y) \times 2^{(3-i)} \right] \quad (3)$$

式中:  $k(x, y)$  表示  $(x, y)$  像素点处的条纹级次;  $f_{GC,i}$  表示第  $i$  幅格雷码图案在  $(x, y)$  像素点处的强度值; LUT 表示将转换得到的十进制码字通过查找表映射为解码级次,利用图 2(b) 所示的通用分区间相位展开方法<sup>[21]</sup>将截断相位展开为连续相位  $\phi(x, y)$ 。

$$\phi(x, y) = \begin{cases} \phi_1(x, y) + 2\pi k_l(x, y) - 2\pi/3 \\ \phi_2(x, y) + 2\pi k_m(x, y) \\ \phi_3(x, y) + 2\pi k_r(x, y) + 2\pi/3 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\phi_2(x, y)$  为截断相位;  $\phi_1(x, y)$ 、 $\phi_3(x, y)$  为截断相位  $\phi_2(x, y)$  分别向左、右平移  $2\pi/3$  后的辅助截断相位。通用分区间相位展开的方法通过构造额外的两组相位,将截断相位边缘与格雷码码字边缘错开,从而获得正确的连续相位,并通过系统标定可还原物体真实三维信息。

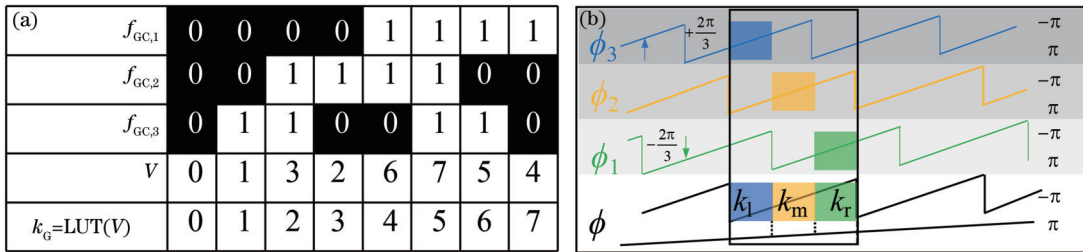


图 2 通用分区间相位展开方法。(a)8 周期格雷码编码及解码;(b)分区间相位展开方法原理图<sup>[21]</sup>

Fig. 2 Generalized tripartite phase unwrapping method. (a) Encoding and decoding process for 8-period fringes; (b) schematic of tripartite phase unwrapping method<sup>[21]</sup>

2.1.2 DIC 辅助的形变追踪

DIC 辅助 FPP 系统使用调制度获得相移图案中物体表面高质量纹理图案,纹理图案中无相位条纹,不

影响消隐与提取结果,从根本上避免了环境光干扰<sup>[31]</sup>。

$(x, y)$  像素点处的调制度  $M(x, y)$  计算公式为

$$M(x, y) = \frac{2}{3} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^3 I_i(x, y) \sin(2\pi i/3) \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^3 I_i(x, y) \cos(2\pi i/3) \right]^2} \quad (5)$$

DIC 技术是一种利用物体表面的自然纹理或人工制作的散斑,通过追踪纹理或散斑图像,实现变形物体位移及应变的测量技术。本实验使用的是二维 DIC 方法<sup>[34]</sup>。

二维 DIC 算法首先从参考图像中选取一个以  $P(x_0, y_0)$  为中心的  $(2M+1) \text{ pixel} \times (2M+1) \text{ pixel}$  的

正方形参考子区,然后利用变形参数描述子区变形,通过迭代算法实现对应点的准确追踪。零均值归一化最小距离平方标准(ZNSSD)被广泛应用到数字图像相关子区变形追踪中描述子区变形前后的相似程度,通过最小化各自子区的差值来确定变形图像的子区位置<sup>[35]</sup>,表达式为



$$C_{ZNSSD}(P) = \sum \left\{ \frac{F(x, y) - \bar{F}}{\sqrt{\sum_{\Omega} [F(x, y) - \bar{F}]^2}} - \frac{G(x, y) - \bar{G}}{\sqrt{\sum_{\Omega} [G(x^*, y^*) - \bar{G}]^2}} \right\}^2, \quad (6)$$

式中： $\Omega$ 表示参考图像中选定的子区； $F(x, y)$ 和 $G(x^*, y^*)$ 为参考图像和变形图像的强度； $\bar{F}$ 与 $\bar{G}$ 表示选定子区的平均强度； $p=(u, v, u_x, u_y, v_x, v_y)$ 表示变形参数，确定两幅子区图像中对应点坐标变化情况。在条纹投影测量系统中，所有变形图案都是从同一视角在不同时刻获得的，而具有一阶变形参数的IC-GN算法能够满足工程应用中大多数变形测量的时间匹配要求，因此本实验采用一阶IC-GN算法追踪物体时间

轴上的变化<sup>[36]</sup>：

$$\begin{cases} x^* = x + u + u_x(x - x_0) + u_y(y - y_0) \\ y^* = y + v + v_x(x - x_0) + v_y(y - y_0) \end{cases} \quad (7)$$

建立图3所示的前后时刻对应点位置关系后，结合条纹投影系统已重建的每个时刻的三维形貌信息，时域上通过式(8)中对应点三维坐标直接相减获得准确的三维位移或变形<sup>[31]</sup>：

$$\begin{cases} U(x, y) = X(x^*, y^*) - X(x, y) \\ V(x, y) = Y(x^*, y^*) - Y(x, y) \\ W(x, y) = Z(x^*, y^*) - Z(x, y) \end{cases} \quad (8)$$

因为高速相机采集的是数字图像离散信息，在动态测量过程中，被测物体变形后的匹配点坐标可能落在亚像素位置，因此采用三次样条插值的方法计算亚像素点的三维形貌坐标。

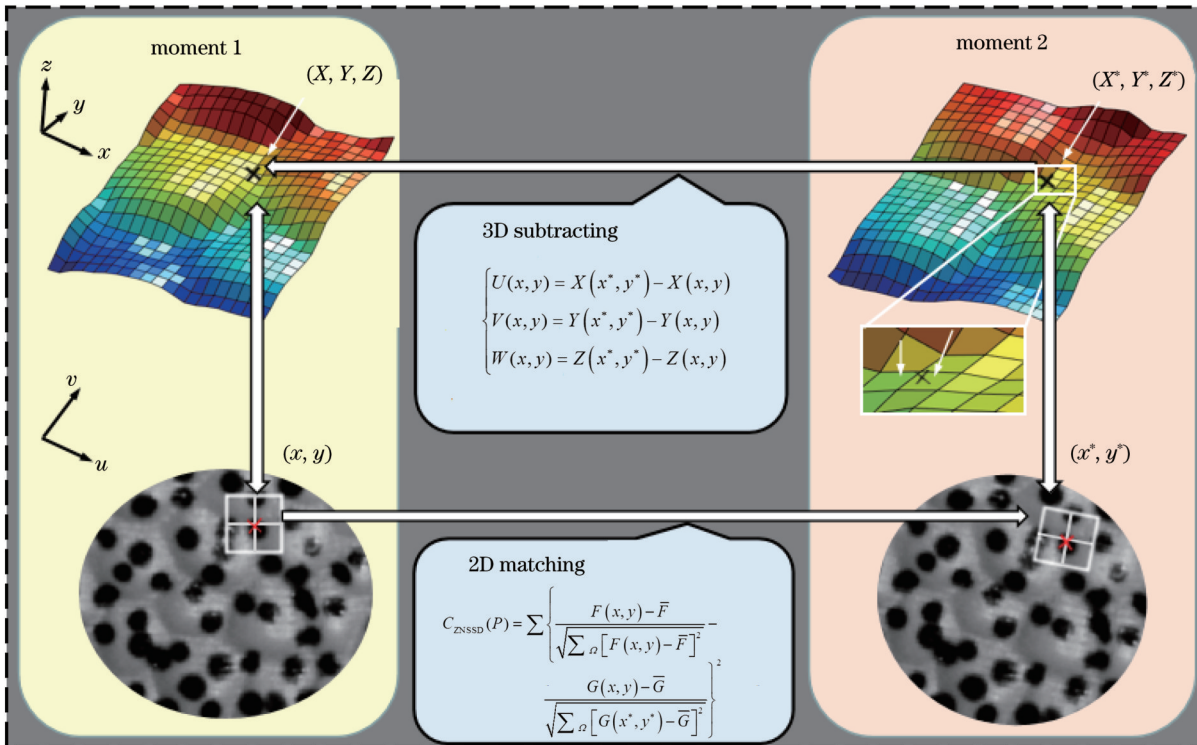


图3 三维位移计算方法原理图

Fig. 3 Schematic of three-dimensional displacement calculation method

## 2.2 基于RGB模型系数转换的信息分离提取方法

FPP与DIC对测量表面反射率的要求存在矛盾，在传统强度空间中无法同时满足。因此，提出一种基于色彩空间的条纹-纹理信息分离提取方法。RGB模型是通过将RGB三原色使用加法来组成不同颜色，在24 bit的RGB模式下，红、绿、蓝成分都可用0(黑色)到255(白色)的值表示，用一个三维矩阵表示图像的色彩。此模型中，彩色散斑纹理与物体表面在RGB三通道成分上存在信息差异，通过建立颜色转换模型，合理调整转换系数，可实现RGB彩色空间转换为灰度

空间后散斑与背景强度相近或对比度增强的效果。整体的转换过程如图4所示。其中：步骤1，根据背景颜色选择合适的散斑颜色；步骤2，根据调制度提取的纹理图案分别提取背景与散斑的三通道信息；步骤3，根据所提取的背景与散斑三通道信息优化最佳转换系数，实现24 bit彩色空间转换为8 bit灰度空间时，散斑与背景强度相等和强度对比度增强的效果。

### 2.2.1 散斑颜色选择

在图4的步骤1中，当背景颜色信息确定时，散斑颜色的选择会影响转换系数的确定并影响形貌与形变



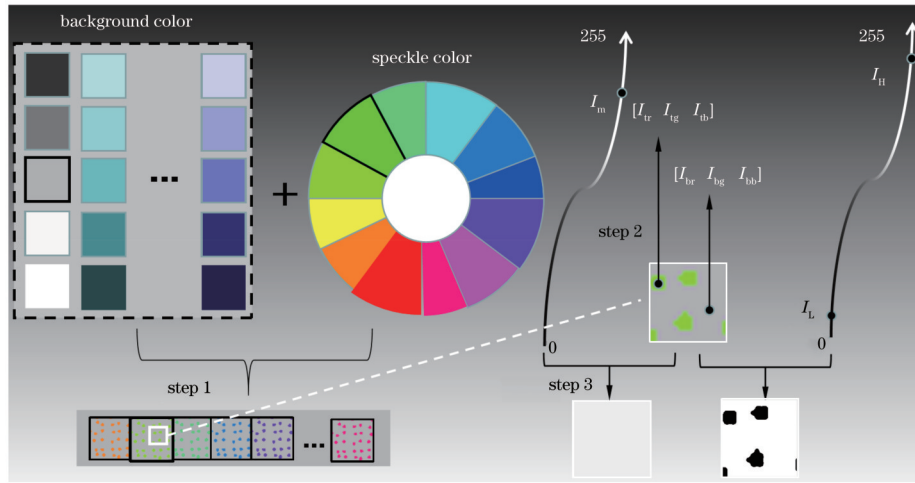


图 4 转换系数的计算过程

Fig. 4 Calculation process of conversion coefficients

分析的精度。因此,针对背景颜色已确定的待测试件,需要选择最优的颜色来制作散斑图案。以几种有代表性的典型背景颜色为例,展示本实验中的散斑颜色确定过程,但被测物体表面可以不局限于这些颜色,本文方法对任意颜色背景均能获得其最优散斑颜色。引入散斑的强度调制( $M_1$ )来表征表面的反射率,利用图 5 (b)所示的 RGB 颜色空间下的欧氏距离表示物体和散斑的颜色差异( $D_c$ )。FPP 方法需要  $M_1$  尽可能大来提高条纹信息的信噪比,从而保证形貌测量的精度;DIC 方法需要  $D_c$  尽可能大,以提升纹理图案对比度,从而提高形变分析精度。同时,3 种颜色分量的取值均在  $[0, 255]$  区间,如式(9)所示。

$$\begin{cases} M_1 = 0.299I_{tr} + 0.587I_{tg} + 0.114I_{tb} \\ D_c = \sqrt{(I_{br} - I_{tr})^2 + (I_{bg} - I_{tg})^2 + (I_{bb} - I_{tb})^2}, \quad (9) \\ I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}, I_{br}, I_{bg}, I_{bb} \in [0, 255] \end{cases}$$

式中: $I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}$ 表示散斑的红、绿、蓝三通道强度值; $I_{br}, I_{bg}, I_{bb}$ 表示背景的红、绿、蓝三通道强度值。将具有相同权重的色差  $D_c$  以及强度调制  $M_1$  相加作为目标函数,求其最大值处的  $I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}$  作为当前背景下的最优散斑制作颜色,具体的目标函数及其边界约束条件分别为

$$f_{obj} = \max [D_c(I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}) + M_1(I_{tr}, I_{tg}, I_{tb})], \quad (10)$$

$$\begin{cases} D_c(I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}) \leq 255\sqrt{2} \\ M_1(I_{tr}, I_{tg}, I_{tb}) \leq 255 \\ I_{tr}, I_{tg}, I_{tb} \in [0, 255] \end{cases} \quad (11)$$

利用文献[37]的边界约束多参数优化方法可以获得满足  $M_1 + D_c$  最大的最优散斑颜色,结果如图 5(c)所示,根据几种典型的背景颜色信息(颜色分量  $[I_{br} I_{bg} I_{bb}]$  分别为  $[51 \ 115 \ 230]$ 、 $[230 \ 230 \ 230]$ 、 $[77 \ 204 \ 102]$ 、 $[179 \ 204 \ 102]$ 、 $[214 \ 217 \ 245]$ )可对应求得其最优散斑颜色分量为  $[255 \ 0 \ 0]$ 、 $[255 \ 255 \ 0]$ 、 $[255 \ 255 \ 255]$  与  $[0 \ 255 \ 0]$  等,这类颜色为单通道或多通道全反射的荧光色,因此在实际实验中,使用反射率较高的荧光颜料

进行散斑制作,将荧光散斑制作到物体表面后,相机采集的图案中散斑处的信噪比更大,使得基于调制度提取的纹理图案能计算得到更优的消隐系数与提取系数,获得更好的消隐与提取结果。

### 2.2.2 基于色彩空间的条纹-纹理信息分离提取方法

确定好最佳散斑颜色并进行制作后,需要对彩色相机拍回的信息进行分离。信息分离方法如图 6 所示,对所拍得的彩色条纹图案进行调制度提取处理,分离得到不含条纹的彩色纹理图案,用此图案分别提取物体背景 RGB 三通道强度  $I_{br}, I_{bg}$  和  $I_{bb}$  以及物体表面散斑 RGB 三通道强度  $I_{tr}, I_{tg}$  和  $I_{tb}$ 。为保证条纹分析时相位提取的精度,期望背景和散斑处反射率足够均匀且尽可能高,在彩色图像转为灰度图像过程中,转换目标是找到一组消隐系数  $K_1, K_2, K_3$ ,使得转换后的灰度图中散斑与背景的灰度强度都为  $I_m$ ,且尽可能大。

$$\begin{aligned} K_1 \times I_{br} + K_2 \times I_{bg} + K_3 \times I_{bb} &= K_1 \times I_{tr} + K_2 \times I_{tg} + \\ K_3 \times I_{tb} &= I_m \end{aligned} \quad (12)$$

此外,  $K_1, K_2, K_3$  符合实际情况的取值范围均为  $[0, 1]$ ,同时需满足式(13),以实现 24 bit 彩色空间到 8 bit 灰度空间强度的完整映射。

$$K_1 + K_2 + K_3 = 1. \quad (13)$$

对于另一组提取系数  $T_1, T_2, T_3$ ,需最大化背景与散斑的强度差异,令转换后的背景强度值为  $I_H$ ,转换后的散斑强度值为  $I_L$ ,转换目标是背景和散斑的强度差异  $\Delta I = I_H - I_L$  增大,即

$$\begin{cases} T_1 \times I_{br} + T_2 \times I_{bg} + T_3 \times I_{bb} = I_H \\ T_1 \times I_{tr} + T_2 \times I_{tg} + T_3 \times I_{tb} = I_L \end{cases} \quad (14)$$

提取系数  $T_1, T_2, T_3$  的取值范围也为  $[0, 1]$ ,且需要满足 24 bit 彩色空间到 8 bit 灰度空间的完整映射。

### 2.2.3 消隐与提取系数优化

分离得到物体背景与散斑的 RGB 三通道强度后,此时根据式(12)~(14)可得到关于  $K$  与  $T$  的不定方程,进一步通过强度与噪声的约束优化可求得最优的

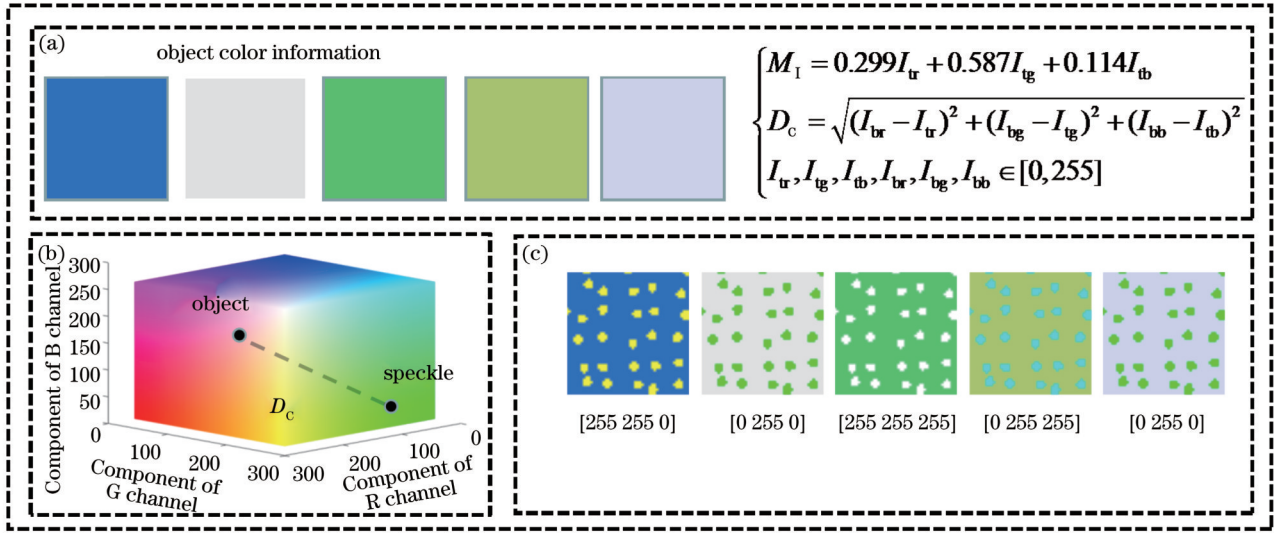


图 5 基于强度模型与色差模型的转换系数计算方法。(a)物体颜色信息及约束条件;(b)RGB 色彩模型;(c)5种典型颜色背景及其最佳对应散斑颜色

Fig. 5 Calculation method of conversion coefficient based on intensity model and chromatic difference model. (a) Object's color information and constraints; (b) RGB color model; (c) five typical color backgrounds and their best corresponding speckle colors

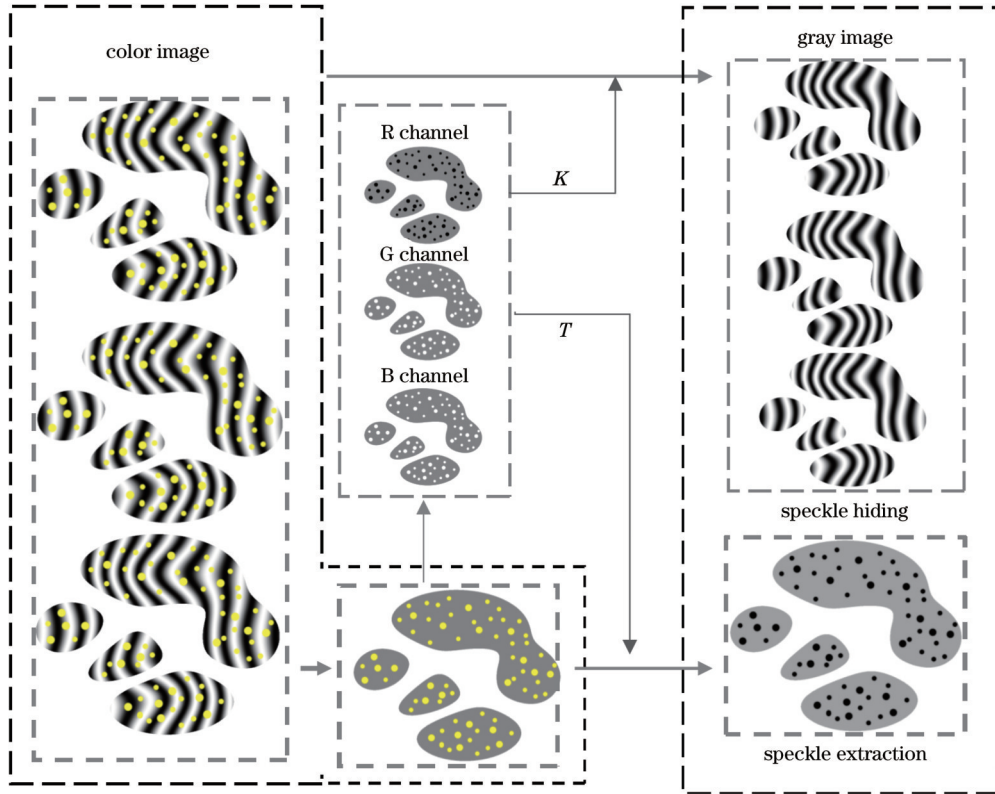


图 6 RGB 色彩模型下系数转换的信息分离方法原理图

Fig. 6 Schematic of information separation method for coefficient conversion in RGB color model

消隐系数  $K$  和提取系数  $T$ 。如图 7(a) 所示, 由于彩色相机常使用 Bayer 阵列作为色彩滤波阵列<sup>[38]</sup>, Bayer 阵

列的分布特性使得绿通道中的噪声约为红、蓝通道的  $1/2$ , 由此建立散斑转换后的强度模型与噪声模型。

$$\begin{cases} I_m = K_1 \times I_r + K_2 \times I_g + K_3 \times I_b \\ \sigma_K = |K_1 \times \sigma_r| + |K_2 \times \sigma_g| + |K_3 \times \sigma_b| = (2K_1 + K_2 + 2K_3) \times \sigma_g \\ f(K_1, K_2, K_3) = (I_m / \sigma)_{\max} \\ K_1, K_2, K_3 \in (0, 1) \end{cases}, \quad (15)$$

式中:  $I_m$  表示转换后灰度图的灰度强度值;  $f$  表示不同消隐系数下的信噪比;  $\sigma_r$ 、 $\sigma_g$ 、 $\sigma_b$  表示散斑红、绿、蓝三通道的统计噪声值;  $\sigma_K$  表示转换后总噪声大小。在实际测量中, 期望在获取同等调制强度  $I_m$  的同时, 尽可能降低转换后图像的总噪声。以此为约束条件对  $K_1$  进行 0 到 1 的遍历计算, 根据式(12)与式(13)可计算出  $K_2$  和  $K_3$ , 去除其中存在的负值后根据  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  算

出转换后的强度  $I_m$  与总噪声大小  $\sigma$ , 最后, 通过计算转换后的最大信噪比选择最终合适的消隐系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。

对  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  的求解同理, 通过式(16)的强度模型与噪声模型结合式(13)和式(14), 并根据最终转换后背景强度与散斑强度的差异值  $\Delta I$  和总噪声大小  $\sigma_T$  来选择提取系数  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 。

$$\begin{cases} \Delta I = T_1 \times \Delta I_r + T_2 \times \Delta I_g + T_3 \times \Delta I_b \\ \sigma_T = |T_1 \times \sigma_r| + |T_2 \times \sigma_g| + |T_3 \times \sigma_b| = (2T_1 + T_2 + 2T_3) \times \sigma_g \\ f(T_1, T_2, T_3) = \left( \frac{\Delta I}{\sigma} \right)_{\max} \\ T_1, T_2, T_3 \in (0, 1) \end{cases} \quad (16)$$

如图 7(b) 所示, 通过模拟一组背景与散斑 RGB 分量分别为 [200 230 150] 与 [30 240 130] 的结果进行消

隐系数与提取系数优化计算, 在曲线拐点处取得最佳消隐系数与提取系数。

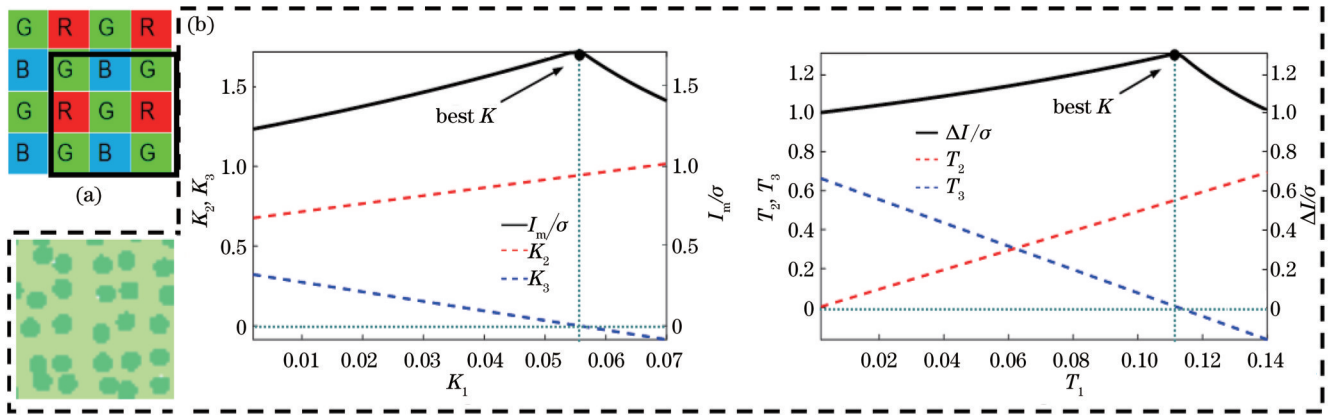


图 7 转换系数优化。(a) Bayer 滤波矩阵; (b) 一组消隐系数与提取系数的优化结果

Fig. 7 Conversion factor optimization. (a) Bayer filter matrix; (b) a set of hiding coefficient and extracting coefficient optimization results

在实际实验中, 算得最佳消隐系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  与最佳提取系数  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  后, 对所有彩色图案 (包括相移图案与格雷码图案) 每个像素点乘上相同的消隐系数, 这个过程为相同系数的线性变换, 因此不会影响受调制相移条纹的正弦性, 不会对相移法计算截断相位产生影响。同时, 对所有基于调制度提取的彩色纹理图像都乘上相同的提取系数, 获得同等线性变换的高对比度纹理图像。

## 3 实验

### 3.1 三种 DIC 结合条纹投影系统的对比实验

为验证本文方法在实际情况中的有效性和实用性, 建立了一个测量系统。整个系统包括一台分辨率为 912 pixel × 1140 pixel 的投影仪 (DLP Lightcrafter 4500)、一台分辨率为 2048 pixel × 2448 pixel 的 COMS 彩色相机 (Baumer VCXU-51C), 以及待测物体。计算机生成的待投影条纹周期为 64, 相移量为  $0$ 、 $2\pi/3$ 、

$4\pi/3$ 。

首先对滤波方法<sup>[33]</sup>、颜色通道分离方法<sup>[32]</sup>及散斑消隐方法 (本文方法) 这三种 FPP 结合 DIC 的方法进行对比实验。滤波方法中, Wu 等<sup>[33]</sup>在强度空间域中进行分析, 将保障形变追踪精度的常用黑色散斑喷涂在物体表面, 以滤波的方式降低散斑在相位恢复过程中的影响, 同时用调制度提取相移图的散斑纹理, 但滤波操作使得物体的细节信息丢失, 影响重建的结果, 从而影响后续的三维形变测量。颜色通道分离方法中, Siegmann 等<sup>[32]</sup>投影蓝白条纹到制作有红色散斑的物体表面, 用红通道提取条纹图进行形貌恢复, 同时用蓝通道提取散斑图进行形变追踪。该方法利用了散斑和条纹的颜色特性, 但红色散斑在蓝白条纹处不均匀反射, 从而影响条纹图的质量, 蓝通道提取的散斑图则伴有周期性干扰。利用提取滤波方法、颜色通道分离方法及本文方法的条纹图对光滑白色亚克力平板进行相位恢复, 以各自中值滤波后的平滑平面为真值, 通过比



较错误点占比数分析 3 种方法的相位精度。

图 8 所示的实验结果表明:滤波方法的错误点与滤波窗大小有关,使用  $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$  的滤波窗口仍有 4.11% 的错误率,同时滤波会对相位重建细节产生影响;颜色通道分离方法的条纹图存在颜色串扰问题,重建相位错误率为 0.02%;本文方法的误差率为 0.01%。

此外,引入子区强度梯度平方和(SSSIG)来评价

3 种方法的形变追踪精度,此值越高,表示散斑图的质量越好<sup>[39]</sup>。计算 3 种方法参与 DIC 计算的散斑图的 SSSIG,选择的子区大小均为  $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ ,结果如表 1 所示。可以看到,利用本文方法获得的散斑图的 SSSIG 在数值上高于滤波方法和颜色通道分离方法。3 种 FPP 结合 DIC 方法的对比实验初步证明,本文方法在相位重建与纹理提取上都更好的表现。

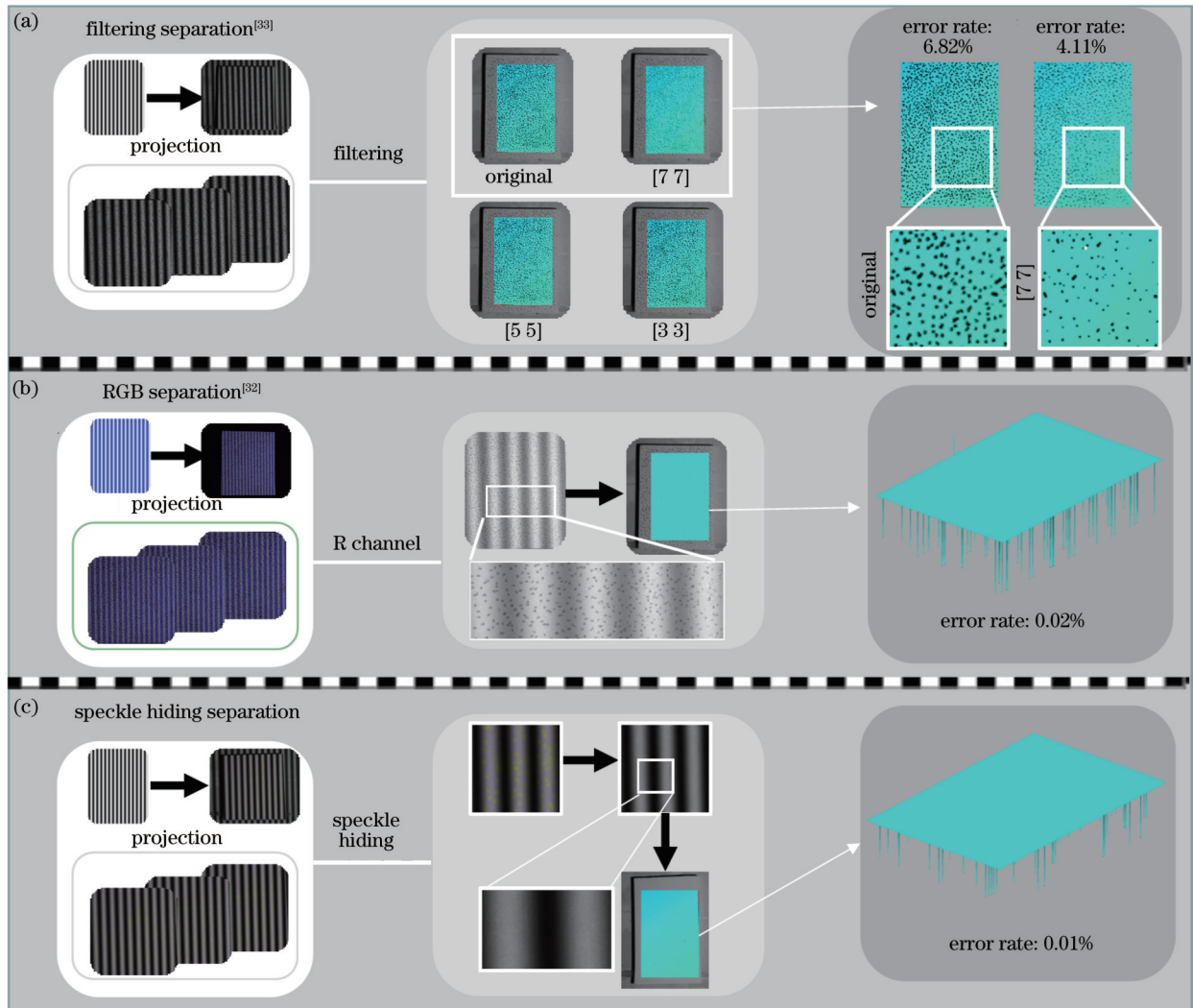


图 8 三种 FPP 结合 DIC 方法的对比。(a)滤波方法<sup>[33]</sup>; (b)颜色通道分离方法<sup>[32]</sup>; (c)散斑消隐方法

Fig. 8 Comparison of three FPP combined DIC methods. (a) Filtering method<sup>[33]</sup>; (b) color channel separation method<sup>[32]</sup>; (c) speckle hiding method

表 1 三组对比实验的 SSSIG 值

Table 1 SSSIG in three groups of comparative experiments

Method	Speckle style	SSSIG
Filtering separation <sup>[33]</sup>		$1.3600 \times 10^6$
Channel channel separation <sup>[32]</sup>		$5.2534 \times 10^6$
Speckle hiding separation		$1.5876 \times 10^8$

### 3.2 精度评价实验

对比实验初步证实了本文方法能减弱散斑在相位重建中的影响且能得到高对比度的散斑图案。为准确评价所提方法重建形貌的精度,将本文方法获得的散斑与传统强度空间域中为了获得高对比度的纹理图案,保障形变追踪的精度的常用黑色散斑进行比较,设计了两个精度实验来分别评价利用散斑消隐系数消隐后的条纹图案的形貌精度,与利用散斑提取系数提取后的散斑图案的形变精度。

#### 3.2.1 形貌精度评价实验

为对比评价用黑白相机拍摄黑色散斑的传统方法、用彩色相机拍摄选定绿色散斑的本文方法的形貌

精度,设计了两个乒乓球对应两种方法进行直径测量的实验,比较它们在制作散斑前后测量直径结果的偏差大小。首先,使用64周期的三步相移条纹投影方法测量B、C两球均未点涂散斑时的相位,利用Zhang<sup>[12]</sup>的标定方法标定投影仪相机系统恢复两球的三维数据,如图9(a)所示;然后,通过拟合三维数据获得B、C两球的直径,此时测得B球直径为40.28 mm, C球直径为40.29 mm,随后在B、C两球上分别制作黑色、绿色散斑,分别对应使用彩色相机的灰度模式与彩色模式获得B、C两球的实验结果,并直接对灰度模式实验结果进行三维重建,使用散斑消隐系数对彩色模式实验结果进行修正,如图9(b)所示。

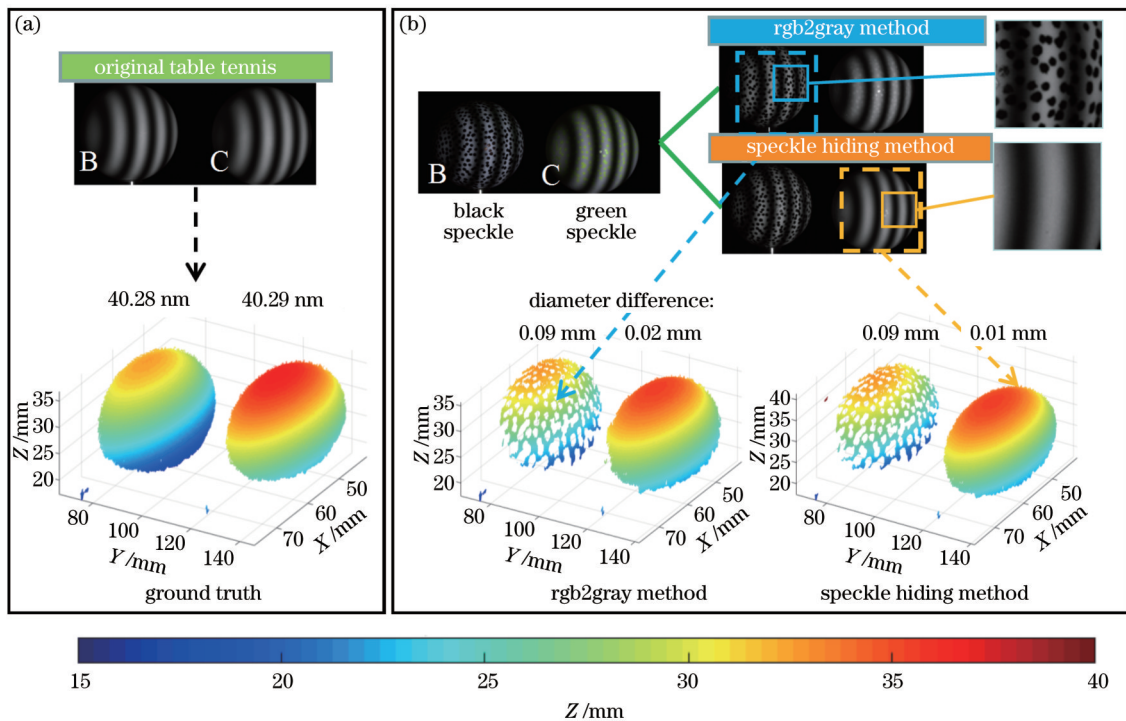


图9 消隐系数下乒乓球形貌精度测量。(a)原始直径;(b)三维重建结果与直径误差

Fig. 9 Measurement of the shape accuracy of table tennis using hiding coefficient. (a) Primordial diameter; (b) reconstructed 3D results and diameter difference

实验结果如图9所示,测得带有黑色散斑的乒乓球拟合直径为40.37 mm,相较于直径真值的偏差值为0.09 mm,直径误差率为0.22%,而对于带有绿色散斑的乒乓球,直接使用相机灰度模式拍摄和使用相机彩色模式并运用散斑消隐系数修正之后测得的直径分别为40.27 mm、40.30 mm,相较于直径真值的偏差值分别为0.02 mm、0.01 mm,误差率分别为0.05%与0.02%。B球的黑色散斑对比度高,在形变追踪中有优势,但在三维重建过程被视为噪点,黑色散斑处相位产生错误,影响重建结果;C球的绿色散斑反射率更高、抗噪性更强,经消隐系数转换后对重建结果的影响较小。因此,散斑消隐方法在条纹投影的三维重建过程中可有效抑制散斑造成的误差。

#### 3.2.2 形变精度评价实验

为定量评价散斑提取方法在所建立形貌形变测量系统中的精度,将本文方法提取的散斑图案与传统方法中高对比度黑色散斑图案的形变精度进行比较。

首先设计一个制作有对比散斑图案的标准平板,通过平移台(Zolix PA 400)实现精准位移。由于平移台只能在单方向运动,为获得X、Y、Z 3个方向的位移,需要人工调节平移台的移动方向,此时真实位移方向与测量系统标定后的三维方向产生误差。为减少此误差的影响,在标准平板的4个区域点上散斑,其中左上角a区域与右下角d区域为传统DIC方法中高对比度的黑色散斑,右上角b区域与左下角c区域为本文方法中的绿色散斑。使平移台单独在X、Y、Z 3个方向

上移动,每次移动距离均为 10 mm,测试平板位置如图 10(a)所示。拍摄所得彩色图案使用提取系数处理后的结果,如图 10(b)所示,两种散斑的对比度相当。

最后,使用本文 FPP 结合 DIC 测量形变的策略计算 X、Y、Z 3 个方向的位移。

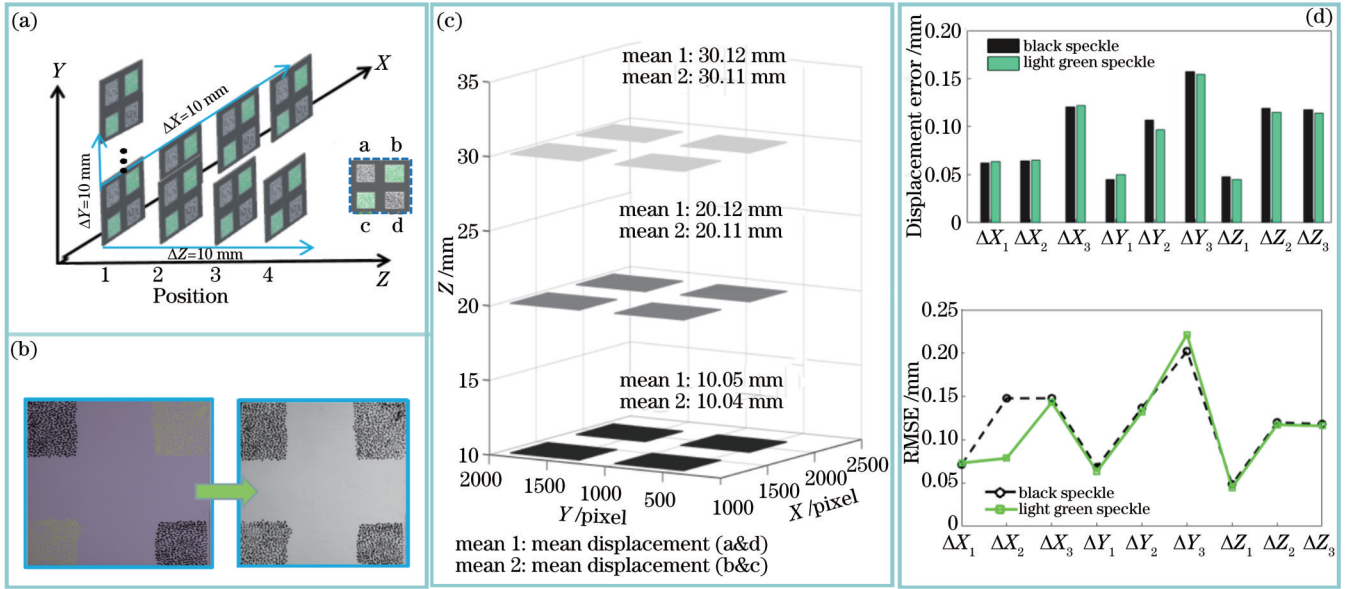


图 10 提取系数下系统的形变精度评估。(a)测试平板位置;(b)散斑提取结果;(c) Z 方向位移精度;(d) X、Y、Z 位移误差及均方根误差

Fig. 10 Evaluation of deformation accuracy of proposed measuring system using the extraction coefficient. (a) Measuring positions of standard flat; (b) speckle extraction results; (c) Z-direction displacement accuracy; (d) displacement error and RMSE along X, Y, and Z directions

以 Z 方向的位移为例,选择去除边缘相同大小的中心区域计算平均位移量,测得传统高对比度黑色散斑的位移量分别为 10.05、20.12、30.12 mm,测得所提散斑提取方法的位移量为 10.04、20.11、30.11 mm,二者的差异小于 0.01 mm。由于形变测量采用所提的 FPP 结合 DIC 测量形变的策略,黑色散斑的存在会对三维重建结果产生影响,降低后续形变测量精度。为保证对比的公平性,只对比 DIC 匹配追踪部分两种不同散斑带来的形变计算精度差异,并统一选择平面中未存在散斑点的区域进行平面拟合,获得相同的三维信息。

X、Y、Z 3 个方向的位移误差与均方根误差如图 10(d)所示,3 个移动方向中散斑提取方法获得的散斑图案与传统高对比度散斑图案位移误差的差异小于 0.01 mm,均方根误差的差异小于 0.07 mm,证明本文方法提取的散斑可达到和传统高对比度散斑同样的形变分析精度。

### 3.3 复杂场景的形貌和位移测量

为验证本文方法对复杂结构三维形貌和形变的分析能力,用本文方法对复杂颗粒表面泡沫鞋垫进行不同重物压力下 4 个时刻的三维形貌和形变测量,彩色图案消隐与提取结果如图 11(a)所示,散斑消隐保留了鞋垫本身颗粒状纹理,其三维形貌结果如图 11(b)~(e)所示,表面复杂颗粒细节得到准确恢复。同时,散

斑提取方法将散斑与背景的对比度增强,帮助更好地进行二维 DIC 追踪,其三维位移如图 11(f)~(h)所示,可以看到,本文方法准确地测量了各个时刻的三维位移。实验结果表明,所提方法能够同时提取高质量条纹和不受制作散斑影响的物体本身纹理信息,结合 DIC 辅助 FPP 的测量方法,可完成复杂结构的高精度三维形貌和形变测量。

## 4 结 论

提出一种基于标记点消隐与提取的高精度三维形貌形变测量方法。首先,利用所提的颜色消隐和提取模型同时提取准确的条纹和纹理信息,通过点对点、高鲁棒性的条纹投影测量方法实现复杂结构的全场三维形貌重建。然后,利用 DIC 算法建立不同时刻的对应点三维空间位置关系,通过差分运算求出三维位移。

实验结果表明,与传统方法相比,本文方法没有滤波操作且不存在颜色串扰,能从根本上解决条纹投影技术和 DIC 技术对纹理要求的矛盾性问题,可同时完成对复杂结构的高精度三维形貌和形变测量。本文方法有望应用于叠层、蜂窝、模壳等复杂结构的应变应力分析,满足碰撞测试、断裂测试等应用中的复杂检测需求。



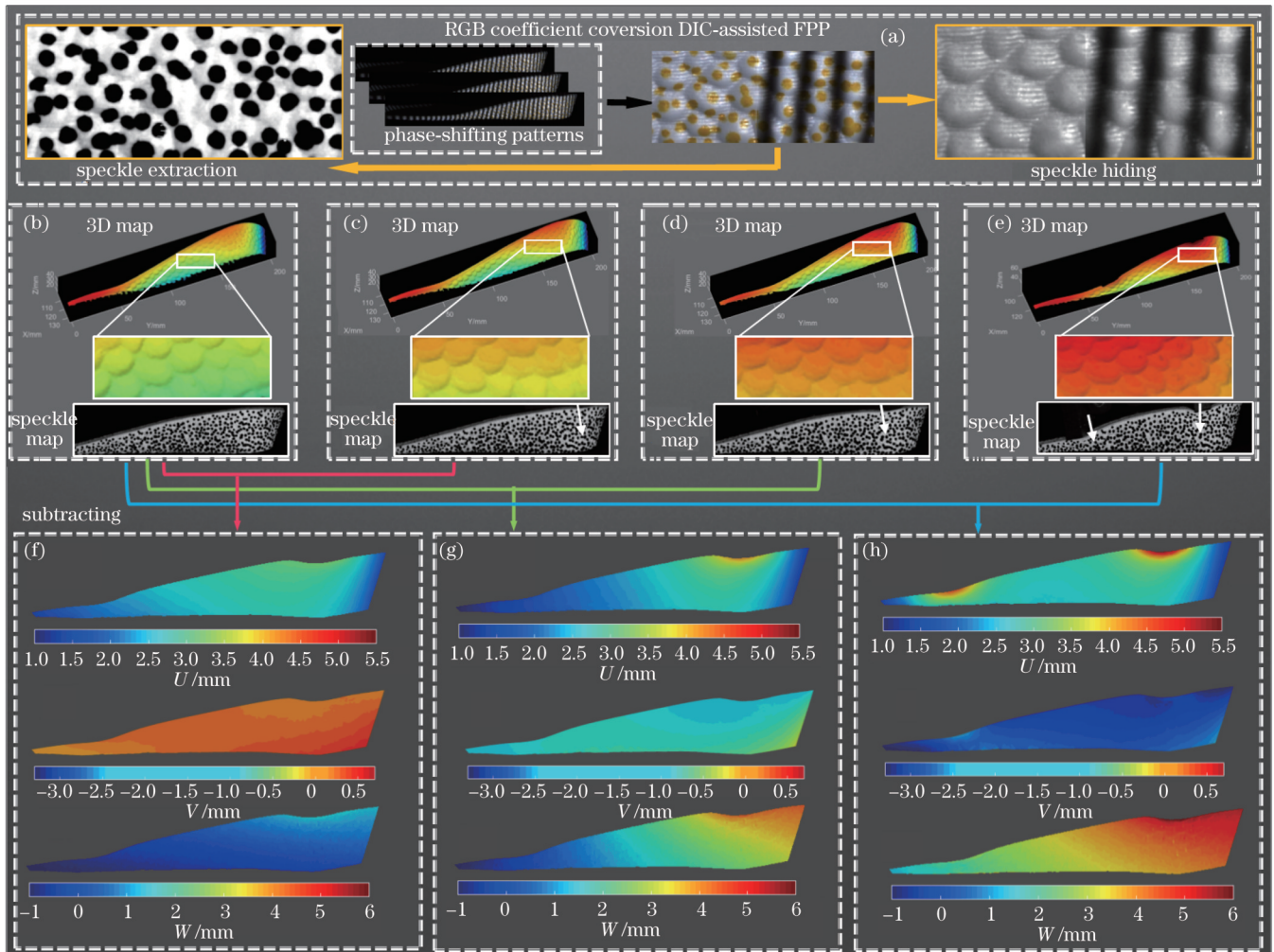


图 11 鞋垫形貌和形变测量结果。(a)散斑的消隐与提取;(b)~(e)4个时刻的三维形貌;(f)~(h)3个过程的三维位移

Fig. 11 Insole shape and deformation measurement results. (a) Hidden and extracted speckles; (b)~(e) 3D shape at four moments; (f)~(h) 3D displacement of three processes

### 参 考 文 献

- [1] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106193.
- [2] 浦婷婷, 吴周杰, 张启灿. 基于格雷码和相移算法的动态三维测量技术[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0512001.  
Pu T T, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional measurement technology based on Gray code and phase-shifting algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0512001.
- [3] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [4] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 109: 23-59.
- [5] Ghiglia D, Pritt M D. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software[M]. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 1998.
- [6] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [7] 李杰, 陈彬, 曾欣怡, 等. 基于条纹级次编码与调制的结构光相位展开算法[J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0912005.
- [8] 芦颖, 王泽民, 杨博瑞. 基于畸变偏移矢量的结构光区域标定[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0214002.  
Lu Y, Wang Z M, Yang B R. Calibration of structured light area based on distortion shift vector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0214002.
- [9] 张翰, 包国琦, 刘凯. 一种结构光三维成像系统的简易标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141102.  
Zhang H, Bao G Q, Liu K. Simple calibration method for three-dimensional imaging system with structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141102.
- [10] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304008.  
Lu X D, Xue J P, Zhang Q C. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304008.
- [11] 周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115001.  
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115001.
- [12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine

- Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [13] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [14] Wissmann P, Forster F, Schmitt R. Fast and low-cost structured light pattern sequence projection[J]. Optics Express, 2011, 19(24): 24657-24671.
- [15] Heist S, Mann A, Kühmstedt P, et al. Array projection of aperiodic sinusoidal fringes for high-speed three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112208.
- [16] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, et al. Micro Fourier Transform Profilometry ( $\mu$ FTP): 3D shape measurement at 10000 frames per second[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 102: 70-91.
- [17] Wang Y J, Laughner J I, Efimov I R, et al. 3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5822-5832.
- [18] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [19] 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): 0303004.  
Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
- [20] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. Two-frequency phase-shifting method vs. Gray-coded-based method in dynamic fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106995.
- [21] Wu Z J, Guo W B, Lu L L, et al. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [22] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [23] 王浩然, 吴周杰, 张启灿, 等. 基于时间复用编码的高速三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0112003.  
Wang H R, Wu Z J, Zhang Q C, et al. High-speed three-dimensional morphology measurement based on time multiplexing coding[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0112003.
- [24] Pan B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(8): 082001.
- [25] Palanca M, Tozzi G, Cristofolini L. The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review[J]. International Biomechanics, 2016, 3(1): 1-21.
- [26] Tay C J, Quan C G, Wu T, et al. Integrated method for 3-D rigid-body displacement measurement using fringe projection[J]. Optical Engineering, 2004, 43(5): 1152-1159.
- [27] Felipe-Sesé L, Díaz F A. Damage methodology approach on a composite panel based on a combination of Fringe Projection and 2D Digital Image Correlation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 101: 467-479.
- [28] Shi H J, Ji H W, Yang G B, et al. Shape and deformation measurement system by combining fringe projection and digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(1): 47-53.
- [29] Nguyen T N, Huntley J M, Burguete R L, et al. Shape and displacement measurement of discontinuous surfaces by combining fringe projection and digital image correlation[J]. Optical Engineering, 2011, 50(10): 101505.
- [30] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2008, 46(10): 746-757.
- [31] Wu Z J, Guo W B, Pan B, et al. A DIC-assisted fringe projection profilometry for high-speed 3D shape, displacement and deformation measurement of textured surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 142: 106614.
- [32] Siegmann P, Álvarez-Fernández V, Díaz-Garrido F, et al. A simultaneous in- and out-of-plane displacement measurement method[J]. Optics Letters, 2011, 36(1): 10-12.
- [33] Wu Z J, Guo W B, Chen Z D, et al. Three-dimensional shape and deformation measurement on complex structure parts[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-14.
- [34] Pan B, Qian K M, Xie H M, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(6): 062001.
- [35] Pan B, Xie H M, Wang Z Y. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching[J]. Applied Optics, 2010, 49(28): 5501-5509.
- [36] Bruck H A, McNeill S R, Sutton M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
- [37] El-Farra N H, Christofides P D. Bounded robust control of constrained multivariable nonlinear processes[J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(13): 3025-3047.
- [38] Bayer B E. Color imaging array: US3971065 A[P]. 1976-07-20.
- [39] Pan B, Xie H M, Wang Z Y, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 7037-7048.

# Three-Dimensional Shape and Deformation Measurement Using Marker Point Hiding and Extraction

Chen Zhengdong, Zhang Qican\*, Wu Zhoujie\*\*, Li Xunren, Wang Haoran, Chen Zhaosheng  
*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China*

## Abstract

**Objective** In recent years, fringe projection profilometry (FPP) which can obtain dense three-dimensional (3D) shape information of measured scenes and digital image correlation (DIC) technique that can realize accurate deformation tracking have been combined to form a new method for simultaneously measuring 3D shape and deformation. However, in this method, FPP expects the measured surface's reflectivity to be uniform enough to ensure high accuracy of shape measurement, while DIC requires the measured surface to provide high-contrast texture information to ensure the accuracy of image matching and deformation calculation. These two techniques have different requirements for surface texture, and the contradiction is difficult to be solved in the traditional intensity space. Therefore, we propose a marker point texture hiding and extraction method in RGB color space, and the color difference of objects and marker points in the color space is used to perform a full-field linear transformation of color patterns. Finally, the contradiction in the texture requirements of FPP and DIC techniques is solved without the influence of color crosstalk and phase-shifting sinusoidal patterns, and accurate 3D shape and deformation measurement is achieved.

**Methods** The basic idea of the method for achieving 3D shape and deformation measurement based on marker point hiding and extraction is to obtain hidden and extracted patterns of the marker points by using the color difference between the man-made color marker points and the object background, so that they can meet the requirements of the two techniques for the surface texture of the object. First, color marker points are made on the surface of the object according to the color of the measured object, and then gray-level structured light patterns are projected to the surface of the object. The deformed structured light patterns are collected by the color camera to obtain the texture pattern of the measured object. After that, according to the different intensity values of color marker points and backgrounds in three channels, the hiding coefficient and extraction coefficient are calculated, respectively. The high signal-to-noise ratio fringe pattern with uniform reflectivity is extracted by optimizing the hiding coefficient of the intensity values in the three channels. Meanwhile, the high contrast and robust marker point pattern is extracted by calculating the extraction coefficient of the intensity values in the three channels to get the high-contrast speckle pattern. The speckle pattern is used to complete the point matching of the reconstructed 3D shape, and the corresponding coordinate points are subtracted by using the point-to-point 3D coordinates to obtain the 3D deformation information. As a result, the marker point hiding and extraction method is suitable for complex dynamic scenes due to its point-to-point computing characteristics.

**Results and Discussions** The measurement results of the flat plate show that compared with two traditional measuring systems combining FPP with DIC, the marker point hiding and extraction method has a better performance in phase-unwrapping successful rate of the flat plate and in the sum of the square of subset intensity gradient of the texture map (Fig. 8 and Table 1). At the same time, compared with the traditional high-contrast black marker point in the intensity domain, the proposed method has higher shape measurement accuracy and equal deformation measuring accuracy (Fig. 9 and Fig. 10). Finally, the ideal fringe and texture patterns are obtained for the foam insole with complex particle surface under different pressures, and the complex 3D shape and deformation information of the foam insole is obtained, which verifies the superiority of this method in shape and deformation measurement in complex scenes (Fig. 11).

**Conclusions** A high-precision 3D shape and deformation measurement method based on marker point hiding and extraction is proposed, which can overcome the contradiction between FPP and DIC techniques on texture requirements. It demonstrates that the difference of color information between objects and markers in color space can solve problems difficult to be dealt with in traditional intensity space. At the same time, compared with traditional methods, the color marker points made by the proposed method have better noise resistance. In the whole process, there is no filtering operation or color crosstalk, and the linear transformation has no influence on the phase fringe, which can fundamentally solve the contradiction in texture requirements of FPP and DIC technologies and simultaneously complete the high-precision 3D shape and deformation measurement of complex structures. The proposed method is expected to be applied to strain stress analysis of complex structures such as laminates, honeycombs, and mold shells, and meet the requirements of complex detection in applications such as collision testing and fracture testing.

**Key words** measurement; fringe projection profilometry; three-dimensional shape measurement; digital image correlation; three-dimensional deformation measurement