

基于条纹调制的透明物体表面缺陷检测方法

许小波¹, 段明辉¹, 范鑫², 竺长安¹, 金一^{1*}¹中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230022;²中国科学技术大学国营芜湖机械厂创新实验室, 安徽 合肥 230022

摘要 针对透明物体后表面的寄生反射对单视角下表面缺陷光学检测的干扰问题,提出了基于条纹调制的透明物体表面缺陷检测方法,以消除后表面的寄生反射。为分析透明物体对入射光通量的影响,建立了基于条纹投影的透明物体光学成像模型。该模型揭示了透明物体双表面的形貌变化可以由双形貌参数来表征,且双参数共同构成余弦分布的平均强度和对比强度。提出了一种多频时域迭代策略以估计表面的双形貌参数,通过投影多频条纹序列到待测透明物体表面,并通过数值拟合投影条纹频率和调制强度之间的余弦分布,从振幅中提取表面的双形貌参数。实验结果证明所提出的检测方法能够在消除后表面寄生反射干扰的同时准确识别和定位出透明物体的表面缺陷。

关键词 测量; 缺陷检测; 透明物体; 条纹调制; 结构光

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221593

1 引言

透明物体以其独特的透光性被广泛用于光学透镜、液晶显示面板、挡风玻璃等^[1-2]。在生产、运输和使用过程中,透明物体的功能表面会不可避免地出现划痕、凹点等缺陷,这些几何缺陷改变了透明物体的表面形貌和光学性能,进而严重影响其结构稳定性和功能完整性,因此表面缺陷检测对以透明物体为基础组件的系统来说尤为重要。然而,透明物体的表面缺陷检测存在三方面限制:1)透明物体表面稀疏纹理等特征会被其周围的背景物体所掩盖,使得基于纹理图像的检测方法失效;2)透明物体的折射系数通常是未知的,从而限制了对折射光路的精确设计和分析;3)入射光和透明物体间有复杂的相互作用,如反射、折射、散射和吸收^[3],增加了面向透明物体的光路解析难度。

现有的针对透明物体的表面缺陷检测方法按其所属的依赖的光学特性可以分为两类:一类是以透射光路为引导的检测方法,另一类是以反射光路为引导的检测方法。以透射光路为引导的检测方法利用入射光穿过透明物体所形成的透射光场来实现表面缺陷检测。由于入射光需要经透明物体前后表面的两次至多次折射才能穿过待测物体,以透射光路为引导的检测方法需要额外的约束来解开前后表面的耦合。为简化光路分析,单平面假设^[4]或额外的成像/照明设备^[5-6]被引入到以透射光路为引导的检测系统中。然而,单平面假设

并不适用于复杂表面的检测,并且引入的额外设备会增加系统复杂度。考虑到透明物体的折射系数随入射光波长的不同而不同, Lee 等^[7]利用不同波长的入射光建立额外约束。此外,采用不同的光传递介质也能获取不同的折射系数^[8],这有助于透明物体前后表面的解耦。然而,改变传输介质的方法需要液体介质等直接接触待测物体,这会对待测表面形成二次污染。

不同于以透射光路为引导的检测方法,以反射光路为引导的检测方法仅利用入射光在待测前表面的反射而无需考虑其在待测物体内部的传播,因而这类方法避免了复合光路分析和设计过程。作为传统的以反射光路为引导的检测方法,暗场成像^[9-10]利用缺陷区域和无损区域反射的出射光方向性差异来识别缺陷。该方法依赖于表面缺陷带来的光路偏移,而微小缺陷所产生的偏移过小,易被背景噪声所淹没,因此暗场成像难适用于检测微小缺陷^[10]。此外,偏振成像^[11-12]和单边衍射策略^[13]也被用于表面缺陷的检测。然而,这些方法忽略了经待测物体后表面反射的出射光带来的寄生反射,进而引入了额外的检测误差。

为抑制后表面的寄生反射, Sprenger 等^[14]将透明物体的后表面涂黑,并采用紫外光源照射来消除干扰。Huang 等^[15]通过投影具有相近频率的两组条纹图案恢复待测物体前后双表面的相位信息,从而分离出后表面带来的寄生反射,但其相位测量范围受到前后表面相位差的限制。Wang 等^[16]基于线性调制变换函数,

收稿日期: 2022-08-10; 修回日期: 2022-09-19; 录用日期: 2022-10-14; 网络首发日期: 2022-10-24

基金项目: 安徽省科技重大专项(201903c08020002)

通信作者: *jinyi08@ustc.edu.cn

通过将傅里叶变换和条纹频移相结合解决前后表面间的干扰问题。Tao 等^[17]提出了包络曲线法来消除后表面带来的寄生反射。尽管此方法能够抑制寄生反射,但无法适用于透明度低或者厚度较薄的透明物体。Ye 等^[18]利用反射-折射混合模型解决前后表面间的干扰问题,并实现前后双表面的同时三维重建,但该过程需要假设待测表面是平滑且连续的,而表面缺陷的存在会破坏表面的平滑性和连续性,从而产生错误的收敛结果。

为消除后表面寄生反射的干扰,避免引入额外设备与假设的局限性,本文提出了基于反射光场的单视角透明物体表面缺陷检测方法。本文首先分析了条纹调制下入射光通量和相机捕获到的光通量之间的关系并建立了针对透明物体的条纹投影光学模型。模型表明待测物体前后表面的形貌信息可以由两个不同的形貌参数来表征,而这些形貌参数共同构成了余弦分布中的平均强度和对比强度。此外,本文提出了多频时域迭代策略来估计形貌参数,通过在待测表面投影不同频率的条纹图案,得到条纹频率和条纹调制值之间的余弦分布,并通过对此余弦分布进行精确的迭代估计,得到相应的形貌参数。在迭代求解过程中,本文还提出了利用条纹相位信息的迭代初值获取算法来提高迭代收敛的速度。最后,对所捕获图像中的每个像素重复同样的步骤,得到整体的检测结果,进而在消除寄生反射的同时实现对待测表面缺陷的识别与定位。

2 基本原理

2.1 条纹调制原理

图 1 所示为典型的以反射光路为引导的检测系统,包括一个投影条纹的液晶显示器(LCD)和一个捕获条纹图像的相机。

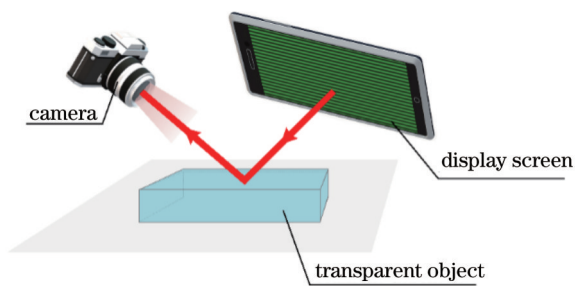


图 1 表面缺陷检测系统示意图

Fig. 1 Configuration of surface defect detection system

LCD 显示器所投影的正弦条纹可以表示为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right], \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 为条纹的平均强度; $B(x, y)$ 为条纹的对比强度; $\varphi(x, y)$ 为条纹的初始相位; N 为条纹序列的

长度。从LCD光源投射出的条纹被待测表面反射,经相机捕获后可表示为

$$I'_n(x, y) = \alpha \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi'(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: $\varphi'(x, y)$ 为经过待测表面调制后得到的相位分布; α 为整个光路传播过程中光强度的衰减系数。根据条纹调制函数^[19],对条纹序列中的多张条纹图像进行组合计算,条纹调制函数可表示为

$$M(x, y) = \left[\sum_{n=1}^N I'_n(x, y) \cos \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N I'_n(x, y) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]^2. \quad (3)$$

将代表相机所捕获条纹的式(2)代入条纹调制函数中,可计算得到条纹调制值:

$$M(x, y) = \frac{N^2 \alpha_0^2}{4} B^2(x, y). \quad (4)$$

如式(4)所示,在调制值中条纹的平均强度被去除,而环境光一般为恒定不变的光照,可视为条纹平均强度的一部分,因此条纹调制消除了环境光的影响。在调制过程中,对条纹序列中的多张条纹图像进行了平均操作,抑制了随机噪声的影响,且在条纹调制值中强度衰减系数 α_0 是被保留的,而 α_0 与待测表面的形貌密切相关,因此条纹调制值可以用于表征待测表面的形貌信息,而不易受到环境光和随机噪声的干扰。

2.2 混合光路数学模型

对透明材质的物体来说,其对入射光的吸收占比较小,一般可以忽略不计,所以在本文中,假设待测透明物体不吸收入射光,并且待测物体内部为均质,即无内部缺陷。在模型推导中,本文假设LCD光源是有着各向异性照明的朗伯辐射体,即其辐射强度随观察方向与面源法线之间夹角的变化遵守余弦规律,因此LCD平面光源所发出的入射光的照度^[20]可以表示为

$$E = \frac{LP_{ds} \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2}, \quad (5)$$

式中: L 为光源的亮度; P_{ds} 为LCD上单个发光单元的面积; θ_1 为光源平面的法线与发光单元所发出光线的方向向量之间的夹角; θ_2 为光线的方向向量与接收此光的平面在接收点的法线之间的夹角; r 为发出光线的LCD平面上发光单元与接收光线的物体平面的接收点之间的空间距离。

如图 2 所示,由于高阶反射光路的光强远小于初级和次级反射光路^[21],故本工作仅考虑初级和次级反射光路。从反射光场出发,被相机所捕获的出射光主要来自两个不同的子光路:在第一个子光路中入射光仅经过待测前表面的反射作用后被相机所捕获,文中

称之为初级反射光路;在第二个子光路中入射光首先经过待测前表面的折射作用进入待测物体内部,然后在后表面发生反射,再传播到待测前表面发生第二次折射,之后被相机所捕获,文中称之为次级反射光路。对初级反射光路来说,入射光只被待测前表面反射,仅与待测前表面有关。而对于次级反射光路来说,入射光经过了待测前表面的折射和后表面的反射,与前后表面均有关,并且初级和次级反射光路的光强相近。因此,从反射光场来说,寄生反射的本质是强度相近的子光路的叠加,通过分离不同的子光路,即可实现寄生反射的去除。

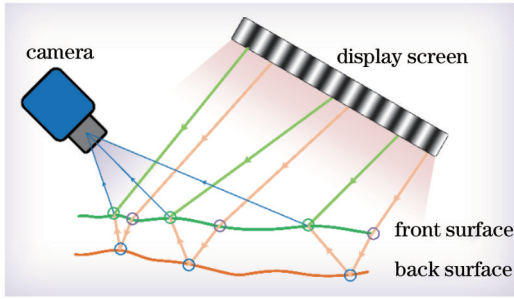


图 2 入射光在前后表面影响下的光路图

Fig. 2 Optical paths of incident light under influence of double surfaces

2.2.1 初级反射光路

本节主要对初级反射光路进行分析和建模。利用小孔模型表征相机成像过程,对于相机成像平面上的每个成像单元,其所能接收到的光的方向由相机的光心和此单元位于成像平面的位置所限定。如图 3 所示,在初级反射光路中相机成像的全过程为:从 LCD 光源平面上一发光单元 s_1 发出的光首先投射到待测表面上一点 M_1 ,之后在 M_1 处被反射至相机平面,经过相机光心 C_0 后被相机成像平面上的成像单元 C 捕获。

假设 LCD 光源平面的光源坐标系为 $O_s-x_s y_s z_s$, 发光单元 s_1 在光源坐标系下的坐标为 $(x_{s_1}, y_{s_1}, 0)$ 。此外,假设条纹所位于的二维像素坐标系为 $O'_s-\varphi_s \gamma_s$, s_1 在光源坐标系下的空间位置可以转化为条纹二维坐标系下的坐标:

$$(x_{s_1}, y_{s_1}, 0) = (\varphi_{s_1}, \gamma_{s_1}, 0) T_1, \quad (6)$$

式中: φ_{s_1} 和 γ_{s_1} 为条纹二维坐标系下的一组正交标准基, φ_{s_1} 为沿条纹传播方向的相位, γ_{s_1} 为垂直于条纹传

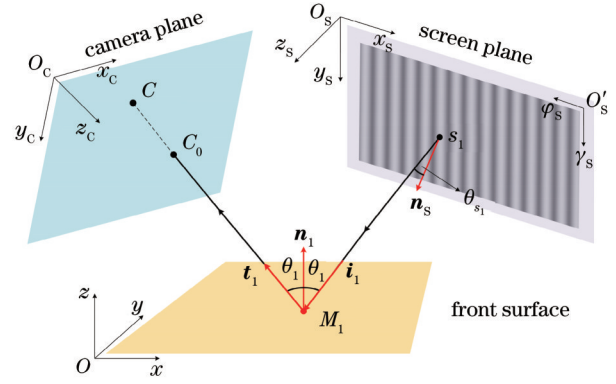


图 3 初级反射光路

Fig. 3 Primary reflection light path

播方向的位置; T_1 为条纹二维坐标系到光源坐标系的转换矩阵。

为简化推导过程,本文采用向量运算来表示整个推导过程。假设发光单元 s_1 处的单位法线向量即光源平面的单位法线向量为 \mathbf{n}_s , 待测表面上一点 M_1 处的单位表面法线向量为 \mathbf{n}_1 。记 $\frac{\overrightarrow{M_1 C}}{|\overrightarrow{M_1 C}|} = \mathbf{t}_1$, $\frac{\overrightarrow{s_1 M_1}}{|\overrightarrow{s_1 M_1}|} = \mathbf{i}_1$, $|\overrightarrow{M_1 s_1}| = r$ 。根据光的反射定律,反射光路中入射角等于反射角,因此 M_1 处的出射光 $(\overrightarrow{M_1 C})$ 与 \mathbf{n}_1 的夹角即入射角 θ_1 可表示为

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arccos(-\mathbf{i}_1 \cdot \mathbf{t}_1). \quad (7)$$

LCD 光源所投射出的条纹图案在发光单元 s_1 处的亮度 L_n 可以表示为

$$L_n = A(x_{s_1}, y_{s_1}) + B(x_{s_1}, y_{s_1}) \cos \left[\varphi_{s_1} + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]. \quad (8)$$

根据光源模型,从 s_1 发射并照射到 M_1 的入射光的照度 E_n 可以表示为

$$E_n = \frac{L_n P_{ds} \cos \theta_1 \cos \theta_{s_1}}{r^2}, \quad (9)$$

式中: θ_{s_1} 为入射光与光源平面法线之间的夹角。由于本文所提方法不依赖于光的偏振特性,假设光源所发出的光为非偏振的自然光,即光源发出的光可以视为由具有同等强度的平行偏振光和垂直偏振光组成,则光源所发出的光在待测物体表面的反射率 α 和透过率 $\beta^{[21]}$ 分别为

$$\begin{cases} \alpha(\theta_i) = \frac{1}{2} \left[\frac{\left| n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_i \right|^2}{\left| n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_i \right|^2} + \frac{\left| n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} \right|^2}{\left| n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} \right|^2} \right], \\ \beta(\theta_i) = 1 - \alpha(\theta_i), \end{cases} \quad (10)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为空气和待测物体的折射系数。由上述公式得到最终被相机平面上的成像单元 C 所捕获的光通量 L_c 可表示为

$$L_c = E_n \alpha(\theta_1). \quad (11)$$

在实际情况下, 相机成像单元具有一定面积且并非理想的空间点, 因而单个成像单元所捕获的应该是多个方向的光线, 并且由于缺陷等对入射角的改变, 光线来自 LCD 光源和环境光。因此, 将单个成像单元分成 ν 个均等的小块, 并假设单个小块仅能捕获单一方向的光线, 而在 ν 个小块中, 有 ν_1 个小块捕获的光线来源于 LCD 光源, $\nu - \nu_1$ 个小块捕获的光线来源于环境光。经过上述分割操作后, 相机平面上单个成像单元在初级反射光路中捕获到的光通量可以表示为

$$\Phi_1^{(p)} = s \left[\frac{\nu_1}{\nu} \sum_{\varphi_{\nu_1}=\varphi_0}^{\varphi_{\nu_1}} \sum_{\gamma_{\nu_1}=\gamma_0}^{\gamma_{\nu_1}} \frac{L_n P_{ds} \alpha(\theta_1) \cos \theta_1 \cos \theta_{s_1}}{r^2} + \frac{\nu - \nu_1}{\nu} C_e \right], \quad (12)$$

式中: s 为成像单元的面积; C_e 为环境光的照度, 一般视为常量。 φ 、 γ 为条纹二维坐标系的标准基, 文中假设有 ν_1 个小块捕获的光线源自 LCD 光源, 对于这 ν_1 个小块, 第一个小块在条纹二维坐标系下的坐标为 $(\varphi_{\nu_0}, \gamma_{\nu_0})$, 第 ν_1 个小块的坐标为 $(\varphi_{\nu_1}, \gamma_{\nu_1})$ 。

2.2.2 次级反射光路

图 4 表示了次级反射光路中相机成像的全过程: 由光源平面上一发光单元 s_2 所发出的光线, 在待测物体前表面上一点 M_3 处发生第一次折射并进入待测物体内部, 之后此光线在物体内部传播到待测物体后表面上一点 M_2 并被反射回前表面, 然后在前表面上的 M_1 点发生第二次折射后离开待测物体, 最后被相机平面上的成像单元 C 所捕获。设 s_2 在光源坐标系下的坐标为 $(x_{s_2}, y_{s_2}, 0)$, 在条纹二维坐标系下的坐标为 $(\varphi_{s_2}, \gamma_{s_2}, 0)$ 。记 $\frac{\overrightarrow{s_2 M_3}}{|\overrightarrow{s_2 M_3}|} = i'_1$, $\frac{\overrightarrow{M_3 M_2}}{|\overrightarrow{M_3 M_2}|} = i'_2$, $|\overrightarrow{M_3 s_2}| = r'$ 。

根据光源模型, 从 s_2 发射并照射到 M_3 的入射光的照度 E'_n 可表示为

$$E'_n = \frac{L'_n P_{ds} \cos \theta_3 \cos \theta_{s_2}}{(r')^2}, \quad (13)$$

式中: L'_n 为 LCD 光源所投射出的条纹图案在发光单元 s_2 处的亮度; θ_{s_2} 为入射光与光源平面法线之间的夹角; θ_3 为入射光方向向量与待测物体前表面点 M_3 处的表面法线向量之间的夹角, 即入射角。 L'_n 可以表示为

$$L'_n = A(x_{s_2}, y_{s_2}) + B(x_{s_2}, y_{s_2}) \cos \left[\varphi_{s_2} + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]. \quad (14)$$

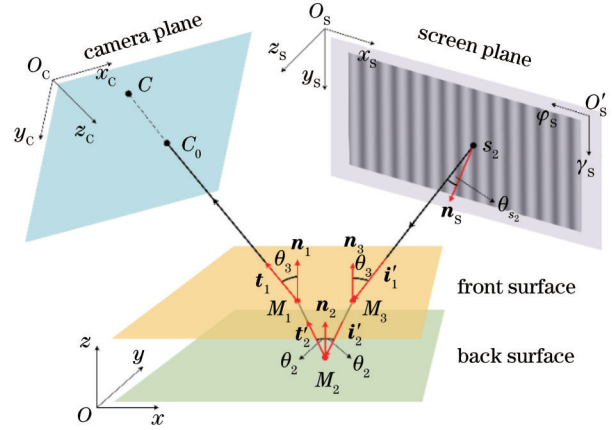


图 4 次级反射光路

Fig. 4 Secondary reflection light path

根据光的折射定律, θ_3 可表示为

$$\theta_3 = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_3 \right) = \arccos(i'_1 \cdot i'_2). \quad (15)$$

与第 2.2.1 节中所求的 θ_1 同理, 在后表面点 M_2 处的反射角 θ_2 可根据光的反射定律求出, 而在前表面点 M_1 的折射角 θ'_1 与第 2.2.1 节中的 θ_1 相等。根据上述公式可以得到成像单元 C 所捕获到的光通量 L'_c 为

$$L'_c = E'_n \beta(\theta'_1) \alpha(\theta_2) \beta(\theta_3), \quad (16)$$

式中: $\beta(\theta'_1)$ 为入射光在前表面点 M_1 处的透射率; $\alpha(\theta_2)$ 为入射光在后表面点 M_2 处的反射率; $\beta(\theta_3)$ 为入射光在前表面点 M_3 处的透射率。根据第 2.2.1 节中所提到的微分处理方式, 在次级反射光路中相机平面上单个成像单元所捕获到的光通量可以表示为

$$\Phi_2^{(p)} = s \left[\frac{\nu_2}{\nu} \sum_{\varphi_{\nu_2}=\varphi_0}^{\varphi_{\nu_2}} \sum_{\gamma_{\nu_2}=\gamma_0}^{\gamma_{\nu_2}} \frac{L'_n P_{ds} \cos \theta_3 \cos \theta_{s_2} \beta(\theta_3) \alpha(\theta_2) \beta(\theta'_1)}{(r')^2} + \frac{\nu - \nu_2}{\nu} C_e \right], \quad (17)$$

式中: ν_2 表示在 ν 个小块中入射光来源于 LCD 光源的小块个数; $(\varphi_{\nu_2}, \gamma_{\nu_2})$ 为第 ν_2 个小块的坐标。

2.2.3 混合光路模型分析

将初级反射光路和次级反射光路合并, 单个成像单元所捕获的整体光通量可以表示为

$$\Phi^{(p)} = \Phi_1^{(p)} + \Phi_2^{(p)}. \quad (18)$$

将上述光通量公式代入第 2.1 节中给出的调制值计算公式[式(3)]中, 得到与单个成像单元相对应的条纹调制值:

$$M = \left[\sum_{n=1}^N \Phi^{(p)} \cos \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^N \Phi^{(p)} \sin \frac{2\pi(n-1)}{N} \right]^2 \quad (19)$$

设

$$\begin{cases} E_{\text{re}}^{(\varphi_1, \gamma_1)} = \frac{B(x_{s_1}, y_{s_1}) \cos \theta_1 \cos \theta_{s_1} \alpha(\theta_1)}{r^2} \\ E_{\text{tr}}^{(\varphi_2, \gamma_2)} = \frac{B(x_{s_2}, y_{s_2}) \cos \theta_3 \cos \theta_{s_2} \beta(\theta_3) \alpha(\theta_2) \beta(\theta'_1)}{(r')^2} \end{cases} \quad (20)$$

上述条纹调制值公式可展开为

$$M = \frac{N^2 s^2 P_{\text{ds}}^2}{4\nu^2} \left[\left(\nu_1 \sum_{\varphi_1} \sum_{\gamma_1} E_{\text{re}}^{(\varphi_1, \gamma_1)} \cos \varphi_{s_1} + \nu_2 \sum_{\varphi_2} \sum_{\gamma_2} E_{\text{tr}}^{(\varphi_2, \gamma_2)} \cos \varphi_{s_2} \right)^2 + \left(\nu_1 \sum_{\varphi_1} \sum_{\gamma_1} E_{\text{re}}^{(\varphi_1, \gamma_1)} \sin \varphi_{s_1} + \nu_2 \sum_{\varphi_2} \sum_{\gamma_2} E_{\text{tr}}^{(\varphi_2, \gamma_2)} \sin \varphi_{s_2} \right)^2 \right] \quad (21)$$

如式(21)所示,经过调制操作后环境光常量被去除,但此调制公式包含多个子项的乘方,难以用于之后的分离计算。考虑到对于每个成像单元,都将其分为同等数量捕获单条光线的小块,而单个成像单元所捕获的光通量是这些小块所捕获光线的光通量之和,对

这些小块所捕获光线的光通量进行排序,很自然地可以找到一条光线,其光通量等于这些小块光通量的平均值,从而可以用此光线代替单个成像单元捕获到的所有光线,进而简化调制计算公式, M 可表示为

$$M = (\lambda_1 \cos \varphi_{s_1} + \lambda_2 \cos \varphi_{s_2})^2 + (\lambda_1 \sin \varphi_{s_1} + \lambda_2 \sin \varphi_{s_2})^2 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 2\lambda_1 \lambda_2 \cos(2\pi f \Omega), \quad (22)$$

式(22)中 λ_1 、 λ_2 和 $2\pi f \Omega$ 可以展开为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{NsP_{\text{ds}}\nu_1}{2\nu} \cdot \frac{B(\varphi_{s_1}, \gamma_{s_1}) \cos \theta_1 \cos \theta_2 \alpha(\theta_1)}{r^2} \\ \lambda_2 = \frac{NsP_{\text{ds}}\nu_2}{2\nu} \cdot \frac{B(\varphi_{s_2}, \gamma_{s_2}) \cos \theta_3 \cos \theta_{s_2} \beta(\theta_3) \alpha(\theta_2) \beta(\theta'_1)}{(r')^2} \\ 2\pi f \Omega = \varphi_{s_2} - \varphi_{s_1} \end{cases} \quad (23)$$

式中: λ_1 、 λ_2 分别为待测物体前、后表面的形貌参数,当以投影条纹的强度代替入射光通量时,有 $0 < \lambda_1 < 1$, $0 < \lambda_2 < 1$; f 为光源所投射的正弦条纹图案的频率; $2\pi f \Omega$ 为前后表面之间的相位差,厚度系数 Ω 为此相位差反映到条纹坐标系中的坐标差值,其取值大小与待测物体的厚度呈正相关。

2.3 表面缺陷的影响分析

本文针对透明材质物体表面出现的缺陷进行检测,表面缺陷主要表现为待测物体表面由于碰撞、刮擦等产生的凹痕,凹痕区域的镜面反射特性被破坏,并演变为漫反射表面。因此,对于表面缺陷来说,其对入射光的影响可归结为对入射角的改变,这会造成原光路的偏移。由于缺陷区域会改变入射角,与缺陷区域相对应的相机成像单元所捕获的光可能部分来源于环境光,而环境光分量在调制过程中被去除,因而缺陷区域与无损区域的条纹调制值是不同的。在第 2.2 节中提及的待测透明物体对入射光的反射率、透射率以及光源模型均为入射角的函数,故反射率、透射率以及光源模型也会因为缺陷而发生改变。第 2.2.3 节中推导

并得到了反映待测物体前后表面形貌信息的两形貌参数,其反映了条纹调制值的变化,同时是初级反射光路和次级反射光路的表征,可视为入射角的函数,因此两形貌参数也会因缺陷的存在而改变,可以通过形貌参数来表征表面缺陷存在与否。

2.4 多反射光路模型参数解算

在式(22)中,调制公式包含了三个未知数,分别为前表面形貌参数 λ_1 、后表面形貌参数 λ_2 和厚度系数 Ω ,因此需要至少三个等式才能解开上述三个未知数。利用投影不同频率的条纹图案所得到的调制结果作为所需的等式,将(22)式改写为

$$M(f) = \lambda_1^2 [1 + k^2 + k \cos(2\pi \Omega f)], \quad f \in (f_0, f_1, \dots, f_{m-1}), \quad (24)$$

式中: $k = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; f_0 为最低的条纹频率; f_{m-1} 为最高的条纹频率。对每个相机成像像素来说,其在不同条纹频率下的调制值可视为条纹频率的函数。而根据所选的条纹频率范围,此函数参数的解法可以分为两类:第一类

是最高条纹频率和最低条纹频率之间的相位差,即 $2\pi\Omega f_0$ 和 $2\pi\Omega f_{m-1}$ 的差值大于 π , 此时在条纹频率范围内包含多个调制值的最值和零点,通过对最值和零点的组合计算可得到形貌参数;第二类是相位差小于 π , 此类情况较为复杂,无法通过最值和零点等特殊值进行计算,所以一般采用曲线拟合的方法求解未知的函数参数。

在实际情况下,条纹频率的选择是受限的。频率范围过小或者频率过于稀疏会造成等式的缺失而无法提供足够的信息以正确地求解待测参数。此外,过高或过低的条纹频率会造成条纹强度不稳定,影响检测的准确性。因此选择合适的条纹频率范围对表面缺陷的准确检测来说至关重要。通常,在上述条纹频率范围的限制下,最高条纹频率和最低条纹频率之间的相位差小于 π 的情况在实际实验中最为常见,因此接下来将对此情况下的参数解算过程进行详细的分析和讨论。对于此类情况,通常采用曲线拟合的方法求解未知的函数参数,本文通过 Levenberg-Marquardt (LM) 算法^[22] 对余弦曲线进行拟合。LM 算法作为迭代算法的一种,其迭代初值的选取对算法的计算精度和速度有较大的影响。本文从所提出的模型出发,提出了针对混合光路模型的迭代初值求取算法。对于无缺陷的正常待测表面,常利用其表面的平滑性和连续性,以插值等方式,基于邻域信息得到迭代初值^[18]。但对于有缺陷的待测表面,缺陷的存在破坏了表面的连续性和完整性,采用上述迭代初值计算方法无法获得准确的初值。而调制公式[式(22)]中不仅包含了两个形貌参数,还有前后表面之间的相位差,利用其中包含的相位信息也可获得精确的迭代初值。此外,本文只利用表面形貌参数来表征检测结果,前后表面相位差并不作为检测的结果,因此在计算过程中无需进行解包裹等操作来得到精确的相位解,并且利用余弦函数的周期性,可以将相位值 $2\pi f\Omega$ 约束在 $[0, \pi]$ 的范围内,以简化计算过程。

根据式(3)、(22),调制公式的子项可被改写为

$$\begin{cases} M_{D,1} = \lambda_1 \sin \varphi_{s_1} + \lambda_2 \sin \varphi_{s_2} \\ M_{D,2} = \lambda_1 \cos \varphi_{s_1} + \lambda_2 \cos \varphi_{s_2} \end{cases} \quad (25)$$

相位可表示为

$$\theta(f) = \arctan \frac{M_{D,1}}{M_{D,2}} = \varphi_{s_1} + \arctan \frac{k \sin(2\pi\Omega f)}{1 + k \cos(2\pi\Omega f)}, \quad (26)$$

式中: $0 < \Omega < \frac{1}{2f_{m-1}}$ 。利用 $\theta(f)$ 的二阶导数 $Y(f)$, 可得到常值函数 $O(f)$, 其表达式如下所示:

$$O(f) = \frac{2\sin(2\pi\Omega f)}{\frac{Y'(f)}{2\pi\Omega Y(f)} - \frac{1}{\tan(2\pi\Omega f)}} - \cos(2\pi\Omega f) = b, \quad (27)$$

式中: $Y'(f)$ 为 $Y(f)$ 的导数; $b = \frac{k^2 + 1}{2k}$ 。对不同条纹频率下的 $O(f)$ 进行组合计算以移除其中的未知常量 b , 得到与条纹频率无关的函数 $S(\Omega)$, 其表达式如下所示:

$$S(\Omega) = \sum_{n=0}^N [O(f_{2n+1}) - O(f_{2n})] = 0, \quad (28)$$

式中: $N < \frac{m-2}{2}$ 。在式(28)中,厚度系数 Ω 的求解问题转化为函数 $S(\Omega)$ 零点的求解问题,由于函数关系式和 Ω 的范围已知, $S(\Omega)$ 的零点易求得,从而可得到 Ω 的初值。之后通过反向代换可得到其他未知参数的初始值。

在实际情况中,待测物体相对于 LCD 光源的距离要远大于待测物体本身的厚度,因而前表面的相位 φ_{s_1} 会远大于前后表面的相位差 $2\pi f\Omega$, 此时计算出的 $\theta(f)$ 由 φ_{s_1} 所主导,而与 Ω 相关的分量为小量,由于测量误差的存在,利用 $\theta(f)$ 的二阶导数获得的迭代初值不够准确。 φ_{s_1} 足够大,使得 $\theta(f)$ 包含了多个 2π 区间,从而可利用 $\theta(f)$ 中的最值点、零点等特殊点来估计初值。此时 φ_{s_1} 可估计为

$$\varphi_{s_1} = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{2\pi(f_{m_1} - f_{m_2})}, \quad (29)$$

式中: θ_{\max} 为最大 θ 值; θ_{\min} 为最小 θ 值,且 $\theta(f_{m_1}) = \theta_{\max}$, $\theta(f_{m_2}) = \theta_{\min}$ 。将估计的 φ_{s_1} 代入式(26),得到如下表达式:

$$\frac{k \sin(2\pi\Omega f)}{1 + k \cos(2\pi\Omega f)} = \begin{cases} \left[\tan(2\pi f \varphi_{s_1}) \right]^{-1}, & f \in F_1 \\ -\tan(2\pi f \varphi_{s_1}), & f \in F_2 \end{cases} \quad (30)$$

式中: F_1 和 F_2 为条纹频率 f 的子集。当 $f \in F_1$ 时,有 $\theta(f) = n\pi + \frac{\pi}{2}$; 当 $f \in F_2$ 时,有 $\theta(f) = n\pi$, $n \in \mathbf{Z}$ 。令

$$Y_g(f) = \frac{k \sin(2\pi\Omega f)}{1 + k \cos(2\pi\Omega f)}, \text{ 从而可得到与 } f \text{ 有关的常}$$

量函数:

$$\frac{1}{k} = \frac{\sin(2\pi\Omega f)}{Y_g(f)} - \cos(2\pi\Omega f), \quad f \in F_1 \cup F_2. \quad (31)$$

利用式(27)所采用的处理步骤,可得到相对应的迭代初值。得到迭代初值后,通过 LM 算法估计出与单个相机成像单元相对应的形貌参数,之后对每个成像单元重复相同的计算步骤,得到待测物体表面的形貌参数图,实现待测表面的检测。

3 实验结果与分析

表面缺陷检测装置如图 5 所示,本文所采用的光学检测系统包括了单个光源、待测透明物体、单个相机以及背景板。其中光源为 iPad A1822,其显示分辨率

为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$; 相机为 PointGrey Grasshopper3, 其最高分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$, 相机的镜头为 Computar M3514-MP 2/3 type, 镜头的焦距为 35 mm。在待测物体的表面, 通过物理刻划和化学腐蚀的方式, 刻蚀出多个划痕, 这些划痕的宽度在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内, 长度为 5 mm, 刻蚀深度约为 $10 \mu\text{m}$ 。在实验中, 为保证参数估计的精确性, 所选取的正弦条纹图案的频率范围为 $0.013 \sim 0.017$, 并每隔 0.0001 进行一次取样。

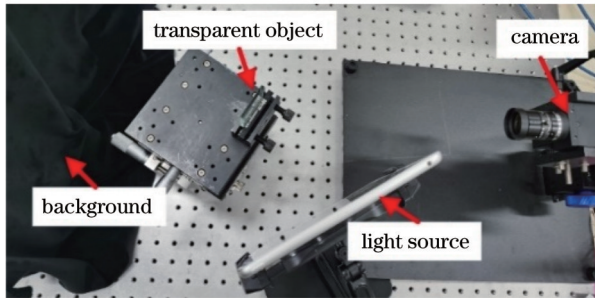


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental setup

利用白光干涉仪测得的表面形貌作为参考真值, 本文所使用的白光干涉仪型号为 Bruker ContourGT-K, 其在 z 轴方向的最低分辨率为 0.1 nm , 而在 x 轴与 y 轴方向的最低分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。在实验中选用 2 倍物镜, 使其达到最大的测量视野范围为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ 。

3.1 系统标定

本文采用张正友标定法^[23]对检测系统的内部和外部参数进行标定。采用了 LCD 显示器作为光源, 其存在非线性畸变, 因此需在实验前对 LCD 光源进行强度校正, 以保证投影条纹的准确性。本文在光源端进行校正处理, 相机正对 LCD 进行拍摄, 光源投影一组强度线性变化的全局统一光强的图案, 由相机端捕获, 得到标准强度与变形强度之间的函数曲线, 由于此二者服从伽马变换关系, 函数参数易确定。之后通过此函数参数对标准的正弦图案进行预变换, 得到伪变形图案, 伪变形图案经过显示器的伽马强度变换后投射到相机端, 被相机捕获变为标准的正弦图案, 从而实现了光源强度的标定。

结合具体的标定实验, 本文采用的光源强度标定过程如下:

1) 相机正对并聚焦于 LCD 显示器, 用 LCD 显示器投射一组全局一致的强度序列图, 以归一化的强度表示, 强度序列图的值在 $0 \sim 1$ 范围内, 相邻两张图片的强度相差 0.01, 共计 101 张图片。

2) 用相机采集图片, 获取变形的强度序列, 选取多个像素点, 对每个像素点, 通过曲线拟合的方式用伽马函数拟合变形曲线得到相应的伽马参数, 再对多个点

的伽马参数求平均。(由于在标定过程中相机和 LCD 显示器的位置固定, 对于不同位置的相机像素, 在不同强度序列图下, 其捕获到的光强度间的比值是固定的。此外, 强度的线性变化不影响正弦条纹的波形, 只需关注伽马参数的求取, 而不同像素位置的强度曲线的伽马参数一致, 可通过求平均的方式减小误差)。

3) 利用步骤 2) 中得到的伽马参数对标准的正弦曲线进行强度反变换, 得到伪变形图案, 伪变形图案经过 LCD 显示器的伽马变换后又会变为标准的正弦曲线, 进而作为后续缺陷检测实验的输入图像。

3.2 表面缺陷检测实验

本文对仅在待测前表面有缺陷的待测物体进行检测, 以验证本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法在单表面检测方面的可行性和有效性。待测物体为 4 mm 厚透明玻璃平板, 在待测前表面刻蚀了平行等间距排列的 5 条划痕, 其后表面无刻蚀缺陷。本文对比了多种检测方法, 包括统一平面光场照明检测技术 (UIT)、结构光照明检测技术 (SIT)^[4]、包络曲线检测方法 (ECA)^[17]、双表面同时重建方法 (SMM)^[18], 以及本文所提出的基于条纹调制的混合光路检测方法。各方法的表面缺陷检测结果展示在图 6 中。本文以频率范围内的最高频率对应的调制结果作为 SIT 的检测结果。由 UIT、SIT 以及本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法得到的检测结果被归一化到 $[0, 1]$ 范围内, 并分别显示在图 6(a)、(b)、(e) 中。以条纹坐标值分布表征 ECA 和 SMM 检测的待测表面相位分布, 分别展示在图 6(c)、(d) 中。为更准确地对比各方法之间的优劣, 图 6(f) 中给出了截面区域的对比图, 而截面区域的位置以虚线方式标记在图 6(a)~(e) 中。此外, 本文提供了白光干涉仪的检测结果作为参考真值, 干涉仪所检测的区域以方框的形式被标记在图 6(e) 中, 而白光干涉仪的三维重建结果和其他方法检测结果的局部对比显示在图 7 中。在图 7 中, 不同位置缺陷的检测结果显示以行的方式排列, 而不同方法的检测结果以列的方式排列。在截面对比图 [图 6(f)] 和不同方法的局部对比图 (图 7) 中, ECA 和 SMM 所求得的条纹坐标值分布被归一化到 $[0, 1]$ 范围内, 以便于对比。

对比图 6(a)、(b) 中 UIT 和 SIT 得到的强度对比图可以看出: 在 UIT 的检测结果显示中, 缺陷区域与无损区域之间的强度对比度低, 导致缺陷边缘模糊不清, 并且全局平均强度很低, 难以分辨出缺陷的存在; 在 SIT 的检测结果显示中, 缺陷区域与无损区域之间的强度对比有了明显的提升, 缺陷的边缘可以较为清晰地分辨出来, 这主要是因为 SIT 利用了条纹调制算法消除了环境光和随机噪声的影响, 提升了检测准确性。此外, 由图 6(f) 中的截面对比可以看到, SIT 检测结果的全局平均强度约为 UIT 的检测结果的 2 倍, 使其拥有更好的检测效果。但 SIT 仍存在着一些不足, 主要表现为

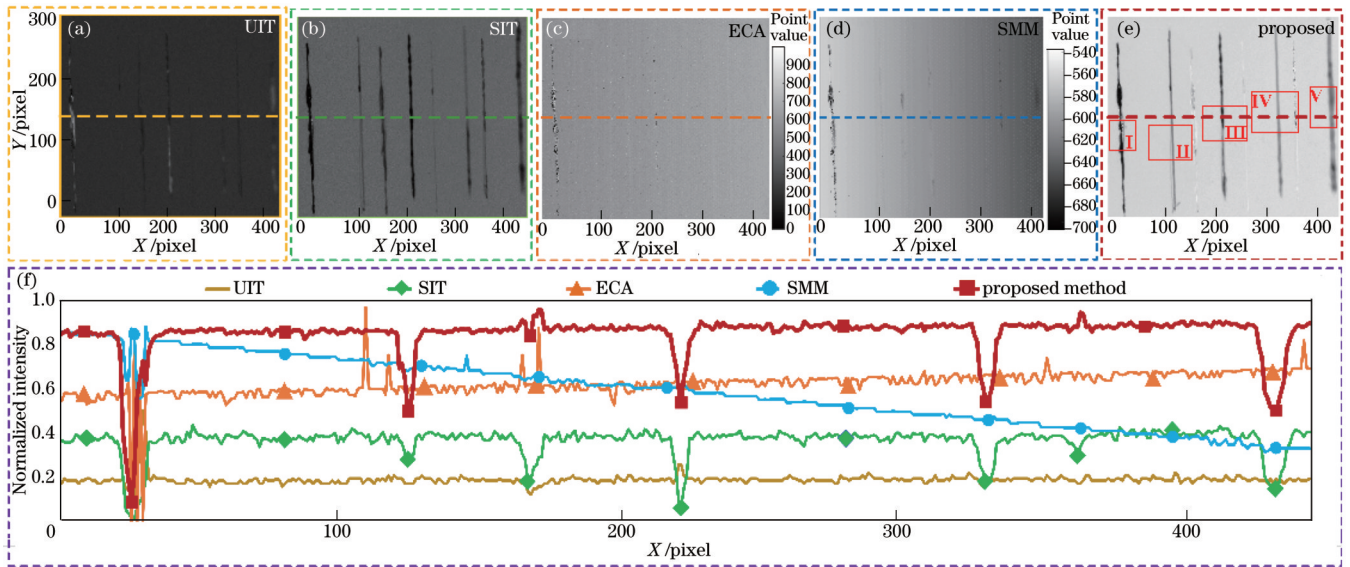


图 6 表面缺陷检测结果。(a)统一平面光场照明检测技术的检测结果；(b)结构光照明检测技术的检测结果；(c)包络曲线检测方法计算的前表面相位分布；(d)双表面同时重建方法计算的前表面相位分布；(e)本文所提出方法的检测结果；(f)不同方法的截面区域对比图

Fig. 6 Defect detection results for front surface. (a) Detection result of UIT; (b) detection result of SIT; (c) phase distribution of front surface obtained by ECA; (d) phase distribution of front surface obtained by SMM; (e) detection result of proposed method; (f) comparison of cross-sections among different methods

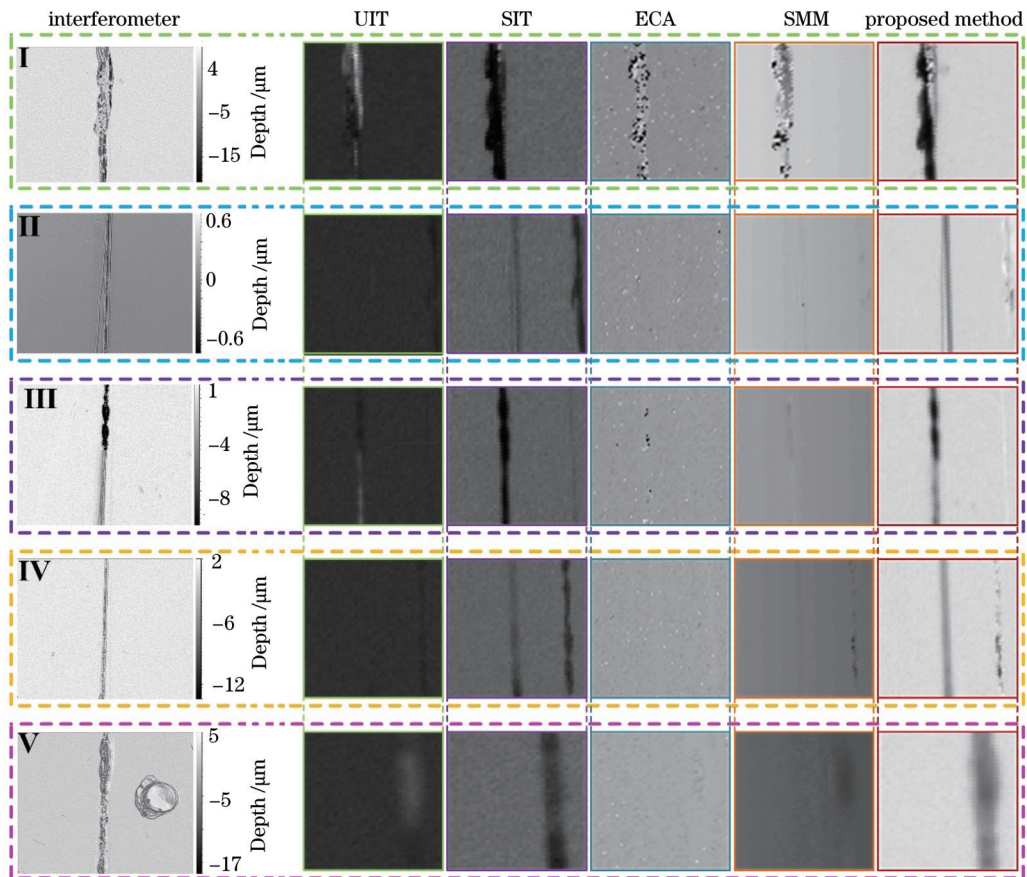


图 7 不同方法的检测结果局部对比图

Fig. 7 Local comparison of detection results among different methods

缺陷的重影和相对较低的全局平均强度,其中重影是由于后表面的寄生反射产生的,寄生反射会对待测前

表面进行二次成像,而二次成像与待测前表面的反射成像相混合,造成重影,从而干扰检测结果,造成错误

检测。如图 6(b) 所示,待测表面仅有 5 条划痕,而 SIT 的检测结果中出现的划痕不只 5 条,其余划痕即为寄生反射造成的重影,并且重影的强度与真实缺陷的强度相近,难以区分;虽然 SIT 的全局平均强度相对于 UIT 有了很大提升,但由图 6(b)、(f) 可以看出其强度仍相对较低,而较低的全局平均强度限制了缺陷区域与无损区域之间强度对比的上限,易造成弱缺陷被测量中的误差和噪声等掩盖,影响检测的正确性。

对比图 6(a)、(b)、(e) 可以看出:与 UIT 和 SIT 相比,本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法的检测结果中,缺陷区域与无损区域之间的强度对比度高,边缘可以被清晰地分辨出来,并且本文方法能将缺陷的重影与真实的缺陷相分离,避免错误检测。一方面,本文所提方法通过对检测过程中的反射光场进行准确的建模和参数解算,分离了不同表面的形貌信息,有效地消除了后表面的干扰,仅保留待测前表面的形貌信息,从而能不受重影的干扰,准确地检测出待测表面真实存在的 5 条划痕。另一方面,如图 6(f) 所示,本文所提方法有着更高的全局平均强度,平均强度约为 SIT 检测结果的 2.5 倍,因而有更好的检测表现。

对比 ECA 和 SMM 所得到的相位分布结果可以看出:这两种方法都能得到待测前表面的相位信息,但

与 SIT 的结果相比,其求得的相位分布对缺陷的表征效果并不理想,这也说明了条纹调制方法在缺陷检测方面的优势。此外,ECA 的检测结果稳定性较差,降低了其检测结果的准确度以及缺陷区域与无损区域之间的对比度。ECA 需要拍摄 500 张不同频率的条纹图案,获取图像所需的时间较长。与之相比,SMM 的检测结果更加准确,但其结果中存在着缺陷边缘被模糊的问题,导致缺陷的边缘难以分辨甚至是无法观测到缺陷的存在。

此外,本文以 SIT 和本文所提方法的检测结果作为原始图片的阈值分割结果。由于缺陷相对于整个待测表面为稀疏的,全图片的灰度符合高斯分布,图 8(a) 给出了两种方法检测结果的灰度分布,由此也可看出本文所提方法检测结果的全局平均强度约为 SIT 检测结果的 2.5 倍。之后以高斯分布拟合两种灰度分布,并以高斯分布中的 $\mu - 3\sigma$ (μ 为高斯分布的数学期望, σ 为高斯分布的标准差) 点作为阈值。两种方法的阈值分割结果分别显示在图 8(b)、(c) 中,根据以本文所提方法的检测结果作为原始图片的阈值分割结果能够准确地分辨出前表面平行等间距排列的 5 条划痕,而 SIT 的阈值分割结果中出现了多条划痕,因此难以区分出真实划痕和条纹重影。

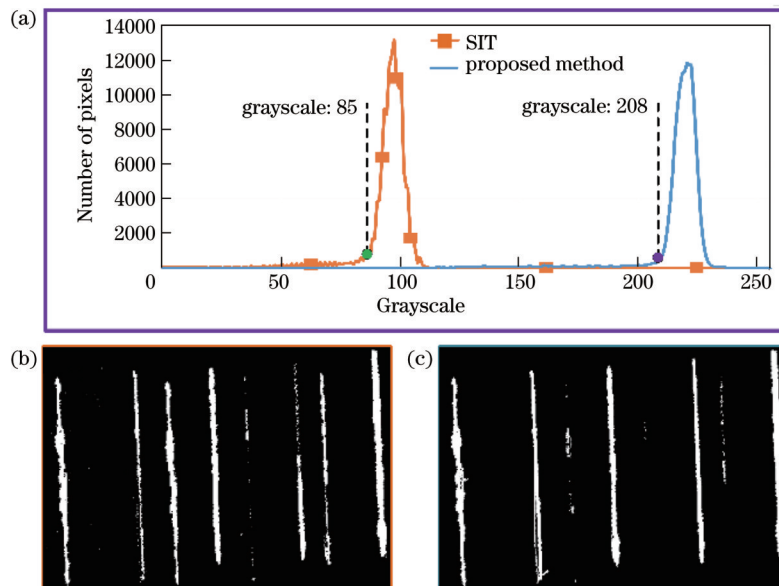


图 8 结构光照明检测技术和本文所提出方法的结果对比。(a)图 6(b)、(e)的灰度分布;(b)图 6(b)的二值化结果;(c)图 6(e)的二值化结果

Fig. 8 Result comparison between SIT and proposed method. (a) Grayscale distributions corresponding to Figs. 6(b) and 6(e); (b) binarization result corresponding to Fig. 6(b); (c) binarization result corresponding to Fig. 6(e)

对比白光干涉仪所得到的参考真值与其他各方法的检测结果,可以看到:在缺陷检测问题上,条纹调制值相对于表面的相位分布有更好的表征作用。本文所提方法在条纹调制基础上,通过建立并分析混合光路模型得到待测表面的检测结果,其检测结果与其他方法的结果相比更接近于参考真值,因而验证了本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法在单表面

检测问题上的可行性和有效性。

3.3 寄生反射分离实验

本文对仅在后表面有缺陷的待测物体进行检测,以验证本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法对寄生反射分离的有效性。待测物体为第 3.2 节中所用的透明玻璃平板,在此实验中将其翻转,使得后表面为有缺陷表面而待测前表面无刻蚀缺陷。本文也

对比了第 3.2 节中所提及的多种检测方法,各方法的检测结果显示在图 9 和图 10 中。由于 UIT 和 SIT 仅能实现单表面的检测,而 ECA 和 SMM 能实现双表面的检测,因此对其进行了分开对比,以便于分析。在图 9 中,UIT、SIT 以及本文所提出的基于结构光调制的混合光路检测方法的检测结果被归一化到 $[0, 1]$ 范围内。以条纹坐标值分布表征 ECA 和 SMM 检测的待

测表面相位分布分别展示在图 10(a)、(b)中。图 9(e)和图 10(d)中给出了不同方法的截面区域的对比图,而截面区域的位置以虚线方式标记在图 9(a)~(d)和图 10(a)~(c)中。与第 3.1 节相同,在截面对比图[图 10(d)]中,ECA 和 SMM 所求得的条纹坐标值分布被归一化到 $[0, 1]$ 范围内,以方便对比。

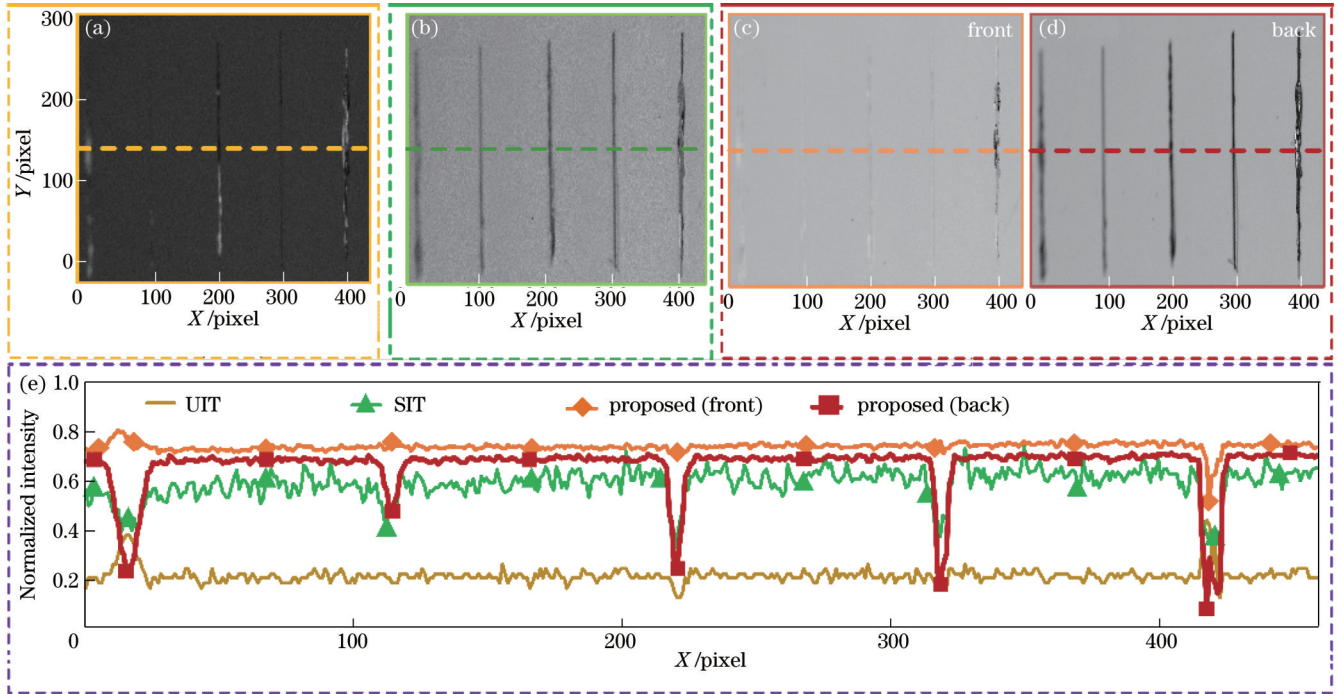


图 9 本文所提方法与单表面检测方法的对比。(a)统一平面光场照明检测技术的检测结果;(b)结构光照明检测技术的检测结果;(c)本文所提出方法对待测前表面的检测结果;(d)本文所提出方法对后表面的检测结果;(e)不同方法的截面区域对比图

Fig. 9 Comparison between single surface detection methods and proposed method. (a) Detection result of UIT; (b) detection result of SIT; (c) detection result of front surface obtained by proposed method; (d) detection result of back surface obtained by proposed method; (e) comparison of cross-sections among different methods

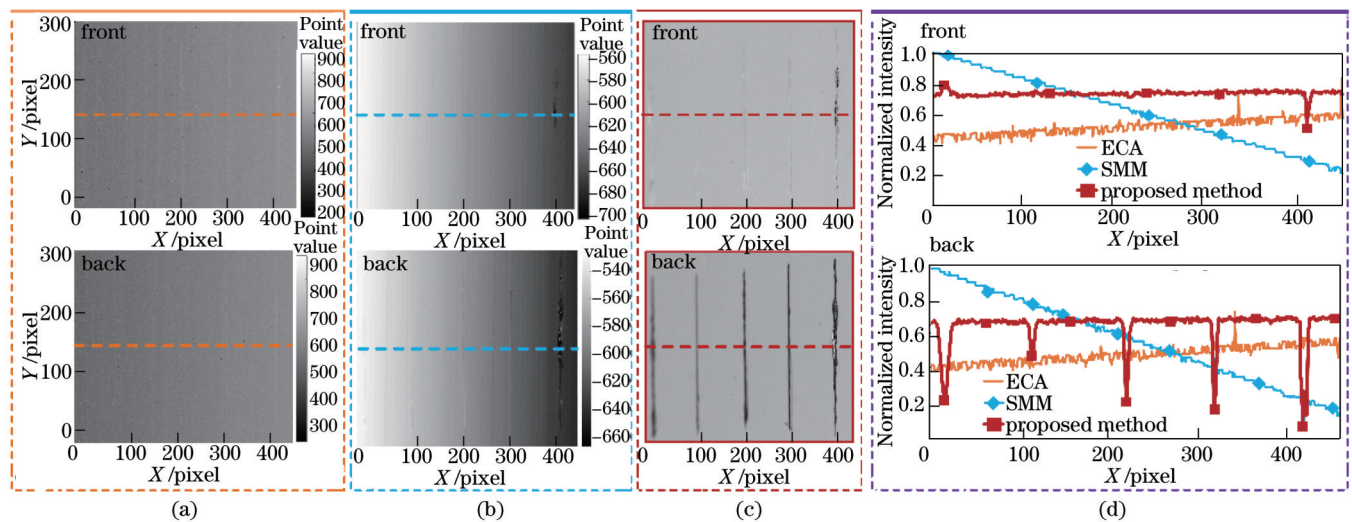


图 10 本文所提方法与双表面检测方法的对比。(a)包络曲线检测方法计算的前后表面的相位分布;(b)双表面同时重建方法计算的前后表面的相位分布;(c)本文所提出方法对前后表面的检测结果;(d)不同方法的截面区域对比图

Fig. 10 Comparison between double surface detection methods and proposed method. (a) Phase distributions of front and back surfaces obtained by ECA; (b) phase distributions of front and back surfaces obtained by SMM; (c) detection results of front and back surfaces obtained by proposed method; (d) comparison of cross-sections among different methods

对比图 9(a)~(d)中 UIT、SIT 以及本文所提方法的检测结果,可以看到:对 UIT 和 SIT 来说,两者虽然能检测到缺陷的存在,但对待测物体来说,其仅在后表面有缺陷,而前表面并不存在缺陷,两种方法检测到的是由后表面的寄生反射产生的缺陷重影而非真实存在的缺陷,因此根据 UIT、SIT 的检测结果不能分辨出真实存在的缺陷和寄生反射造成的缺陷重影,两种方法的检测结果是不可靠的。与之相比,在本文所提方法的检测结果中,在前表面并未检测到划痕的存在,在后表面检测到平行排列的 5 条划痕与待测物体的实际情况相符。这说明本文所提方法准确地将待测前表面和后表面的信息分离,因而能够很明显地看出缺陷并非位于待测前表面,而是位于后表面,本文方法实现了对后表面寄生反射的有效分离。由图 9(e)还可以看到,相比于 UIT 和 SIT 方法,本文所提方法的检测结果有着更高的全局平均强度,缺陷区域与无损区域之间的强度对比度更高。

对比 ECA 和 SMM 得到的表面相位分布和本文所提方法的检测结果可以发现,这三种方法都能得到前后双表面的检测结果,但 ECA 和 SMM 得到的表面相位分布无法清晰地表征缺陷的存在,而本文所提出的方法能清晰地分离出待测表面和寄生反射,并且缺陷区域与无损区域之间有着较高对比度,且有着更高的检测准确度。

4 结 论

为消除单视角下透明物体表面缺陷光学检测中后表面寄生反射干扰,提出了一种基于条纹调制的透明物体表面缺陷检测方法。建立基于条纹投影的透明物体光学成像模型,模型揭示了一组双形貌参数可以表征透明物体双表面的形貌变化,且该双参数构成余弦分布的平均强度和对比强度。为求解表征形貌变化的双形貌参数,提出一种多频时域迭代策略。该策略通过将多频条纹序列投影到待测透明物体表面,并通过数值拟合投影条纹频率和调制强度之间的余弦分布,最终从振幅中提取表面的形貌参数。为验证所提出的检测方法的有效性,构建了结构光表面检测系统,进行了多组不同缺陷情况下的实验,并与其他先进的透明材质物体表面缺陷检测方法进行对比。实验结果证明,在后表面寄生反射干扰下,所提出的基于条纹调制的表面缺陷检测方法能够识别并定位待测透明物体的表面缺陷。

参 考 文 献

- [1] 武雄骁,王红军,魏晨,等.基于散射场分布拟合逼近的表面缺陷检测[J].激光与光电子学进展,2021,58(11):1112003.
Wu X X, Wang H J, Wei C, et al. Surface defect detection based on scattering field distribution fitting approximation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1112003.
- [2] 尤科伟,张艳丽,张雪洁,等.光学元件表面缺陷相对位置分

- 布对近场光束质量的影响[J].中国激光,2015,42(3):0308004.
You K W, Zhang Y L, Zhang X J, et al. Influence of relative position of optical component surface defects on near field beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0308004.
- [3] Qian Y M, Gong M L, Yang Y H. 3D reconstruction of transparent objects with position-normal consistency[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 4369-4377.
- [4] Huang Y Y, Yue H M, Fang Y Y, et al. Structured-light modulation analysis technique for contamination and defect detection of specular surfaces and transparent objects[J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37721-37735.
- [5] Yeung S K, Wu T P, Tang C K, et al. Normal estimation of a transparent object using a video[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(4): 890-897.
- [6] Wu B J, Zhou Y, Qian Y M, et al. Full 3D reconstruction of transparent objects[EB/OL]. (2018-05-09)[2022-03-05]. <https://arxiv.org/abs/1805.03482>.
- [7] Lee H S, Shin S, Lee H, et al. Determining the micro-optical element surfaces profiles using transmission deflectometry with liquids[J]. Current Applied Physics, 2015, 15(3): 302-306.
- [8] Han K, Wong K Y K, Liu M M. Dense reconstruction of transparent objects by altering incident light paths through refraction[J]. International Journal of Computer Vision, 2018, 126(5): 460-475.
- [9] Liu D, Wang S T, Cao P, et al. Dark-field microscopic image stitching method for surface defects evaluation of large fine optics [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5974-5987.
- [10] Zhang H Y, Wang Z H, Fu H Y. Automatic scratch detector for optical surface[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20910-20927.
- [11] 张景华,张焱,石志广,等.基于法向量估计的透明物体表面反射光分离[J].光学学报,2021,41(15):1526001.
Zhang J H, Zhang Y, Shi Z G, et al. Reflected light separation on transparent object surface based on normal vector estimation [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1526001.
- [12] 王维,王杰,黄易杨,等.基于偏振透射结构光的透明物体表面缺陷检测方法[J].光学学报,2021,41(18):1812002.
Wang W, Wang J, Huang Y Y, et al. Surface defect detection in transparent objects using polarized transmission structured light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812002.
- [13] Schneider V M, Mlejnek M, Gahagan K T. Fast detection of single-sided diffracted defects in display glass[J]. Measurement, 2009, 42(4): 638-644.
- [14] Sprenger D, Faber C, Seraphim M, et al. UV-deflectometry: no parasitic reflections[EB/OL]. [2022-08-10]. https://www.dgao-proceedings.de/abstract/abstract_only.php?id=1152.
- [15] Huang L, Asundi A K. Phase retrieval from reflective fringe patterns of double-sided transparent objects[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(8): 085201.
- [16] Wang R Y, Li D H, Xu K Y, et al. Study on eliminating the effect of parasitic reflection on deflectometry measurement of planar optical element surface figure[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10841: 1084119.
- [17] Tao S W, Yue H M, Chen H L, et al. Elimination of parasitic reflections for objects with high transparency in phase measuring deflectometry[J]. Results in Physics, 2019, 15: 102734.
- [18] Ye J Q, Niu Z Q, Zhang X C, et al. Simultaneous measurement of double surfaces of transparent lenses with phase measuring deflectometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 137: 106356.
- [19] Su L K, Su X Y, Li W S, et al. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes[J]. Applied Optics, 1999, 38(7): 1153-1158.
- [20] Greivenkamp J E. Field guide to geometrical optics[M]. Bellingham: SPIE, 2004.

- [21] Shih Y C, Krishnan D, Durand F, et al. Reflection removal using ghosting cues[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 7-12, 2015, Boston, MA, USA. New York: IEEE Press, 2015: 3193-3201.
- [22] Ranganathan A. The Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Tutorial on LM algorithm, 2004, 11(1): 101-110.
- [23] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

Surface Defect Detection of Transparent Objects Based on Fringe Modulation

Xu Xiaobo¹, Duan Minghui¹, Fan Xin², Zhu Chang'an¹, Jin Yi^{1*}

¹Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, Anhui, China;

²Innovation Laboratory of Wuhu State-Owned Factory of Machining, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, Anhui, China

Abstract

Objective Transparent objects have been broadly applied in optical lenses, liquid crystal displays, airplane windshields, etc. During production and transportation, various defects may appear on the surfaces of transparent components, such as pits, scratches, and scuffs. In general, surface defects change the surface topography and transform the optical characteristics, thereby seriously degrading the structural stability and functional optimality of transparent components. Consequently, surface defect detection is essential for the quality evaluation of transparent-component-based systems. However, in principle, the parasitic reflection caused by the refracted light reflected by the back surface will inevitably induce extra detection errors or even false detection. To eliminate the parasitic reflection, we propose a single-view surface defect detection method with digital fringe projection, and an optical detection system is built to prove the feasibility of the proposed method. Comparative experimental results verify that the proposed method can accurately classify and locate surface defects of transparent components under the interference of parasitic reflection.

Methods In our work, we propose a single-view surface imaging method based on reflection to eliminate parasitic reflection with digital fringe projection. A fringe-projection-based optical model is first built under the effect of fringe modulation by analyzing the difference between incident luminous flux and captured luminous flux. The model indicates that the topography variation of double surfaces can be reflected by two topography parameters, which constitute the average and contrast amplitudes of a cosine distribution. Subsequently, a multi-frequency temporal iterative technique is presented to precisely fit the cosine distribution during practical single-view surface imaging. In the practical iterative process, multiple fringe patterns with different frequencies are projected onto a transparent object. Then, the cosine distribution composed of intensity and frequency values is precisely fitted. Moreover, an iterative initial value acquisition algorithm is developed to achieve convergence in a short time. Finally, the average and contrast amplitudes can be applied to extract the topography parameters, thereby further identifying whole-field surface defects of transparent components and eliminating parasitic reflection.

Results and Discussions The comparative experimental results of surface defect detection for the front surface (Figs. 6-8) verify that the proposed method avoids the ghost image and the low average intensity, thereby performing better. Since our method separates the topography information of different surfaces, it can effectively eliminate interference from the back surface. Only the topography information of the front surface remains, and thereby the ghost image is removed. Moreover, the contrast between defect regions and entire areas is increased under the proposed method, which improves detection performance. The comparative experimental results of parasitic reflection separation (Figs. 9 and 10) verify that the proposed method can reliably separate the topography information of front and back surfaces and avoid false detection. Besides, the detection results of the proposed method can show the defects clearly, and the contrast between defect regions and entire areas is increased under the proposed method, improving detection performance. Overall, the advantages of the proposed method are summarized as follows. 1) Simple detection system setup. The detection system is established based on the traditional reflection-guided detection method: only a camera, a light source, and a black background are needed. In addition, the proposed method is independent of assumptions on the surface shape or positional relations between equipment. 2) High-precision defect detection. In light of geometrical optics, photometry theory, and the optical

characteristics of defects, a hybrid reflective-refractive model is built to analyze the incident luminous flux affected by double-sided transparent objects. Moreover, a multi-frequency iterative separation algorithm is designed to separate the topography information of different surfaces. A specific initial value acquisition algorithm is developed to acquire precise convergence results speedily. 3) *In-situ* detection of double surfaces. In our method, the equipment is fixed during detection, and only a single viewpoint is needed, making the proposed method suitable for *in-situ* defect detection. Experimentally, our method successfully utilizes the extra topography information contained in the mutual interference of double surfaces and eliminates parasitic reflection.

Conclusions In this paper, a novel single-view surface defect detection method for transparent objects is proposed that can eliminate parasitic reflection with digital fringe projection. A mathematical model of hybrid light paths for transparent objects is built in light of geometrical optics, photometry theory, and the optical characteristics of defects. This model reveals that the topography parameters of double surfaces together constitute the average and contrast amplitudes of a cosine distribution. Moreover, a temporal iterative technique is presented to fit the cosine distribution. In the practical iterative process, multi-frequency fringe patterns are projected onto a transparent object. Then, the cosine distribution composed of intensity and frequency values can be precisely fitted. Finally, the topography parameters can be extracted from the average and contrast amplitudes, thereby further identifying whole-field surface defects of transparent components and eliminating parasitic reflection. To prove the feasibility of the proposed method, we build an optical detection system and conduct comparative experiments between the proposed method and other advanced methods. Experimental results verify that the proposed method can accurately classify and locate surface defects of transparent components under the interference of parasitic reflection.

Key words measurement; defect detection; transparent object; fringe modulation; structured light