

彩色高反光表面自适应编码条纹投影轮廓术

王颖¹, 倪育博¹, 孟召宗¹, 高楠¹, 郭彤², 杨泽青¹, 张国锋³, 尹伟⁴, 赵洪伟^{3,4}, 张宗华^{1*}¹河北工业大学机械工程学院, 天津 300401;²天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;³西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;⁴中国飞机强度研究所强度与结构完整性全国重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 条纹投影轮廓术广泛应用于重建物体表面三维形貌。但当测量彩色高反光表面物体时,受环境光照及投影条纹反射的影响,存在相机所采集图像像素过饱和,进而无法测量高反光区域表面三维数据的难题。为解决此问题,本文利用物体表面对不同颜色光反射特性的差异,提出了一种根据被测彩色物体表面色彩分布的自适应编码高反光表面条纹投影轮廓术。该方法通过向高反光区域投射与表面颜色互为补色的颜色光,利用物体对互补色光的高吸收、低反射现象,抑制表面高光的形成,从而实现高反光彩色物体的三维形貌测量。实验结果表明,与多重曝光方法相比,利用单幅自适应颜色编码能够替代多次曝光时间设置下的条纹投影重建,有效降低了投影图像的数量,提高了测量效率。

关键词 三维测量; 条纹投影; 高反光物体表面; 颜色编码

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231894

1 引言

高反光表面通常具有不均匀的反射特性,入射光投射到物体表面上时易发生界面反射,于某一点处产生聚集效应,从而导致耀斑或光泽的出现。由于受相机动态响应范围限制,图像中高反光位置处出现的过饱和像素,会在利用条纹投影轮廓术测量高反光物体时,致使条纹的相位信息丢失,重建结果出现数据空洞,最终影响三维测量精度。因此,如何提高高反光表面的测量精度仍是一个亟待解决的问题。

为解决这一难题,国内外研究者所提出的方法总体分为两类^[1-2]。第一类是将不同曝光时间下采集的条纹图像融合成一幅图像来避免像素过饱和并且达到较高信噪比的多重曝光技术^[3]。Zhang等^[4]提出了一种使用多重曝光的“高动态范围”技术。拍摄多组不同曝光时间下的相移图像,分别解算相位后融合成一幅完整的展开相位图,恢复高反光表面的三维形貌。然而,该技术只能通过主观选择来控制曝光时间的长短,导致测量时缺乏定量的计算来确定合适的曝光时间,测量质量不稳定。Feng等^[5]将测量出的表面反射率基于直方图分布分组,自适应地预测每个组的最佳曝光时间,拍摄正弦条纹图像合成相位。但是使用序列图像直方图估计相机的响应函数预测曝光时间并

不智能,容易产生分块效应。为进一步优化,Rao等^[6]提出了一种全自动曝光技术。通过分析每个像素的条纹调制度以及条纹最大强度,自动计算出若干曝光时间。冯维等^[7]和 Suresh等^[8]提出基于数字显微镜器件的自适应高动态范围成像测量技术。但上述多重曝光技术均需要采集大量条纹图像,测量过程耗费过多时间。

另外一类是调整投影图案灰度级的高反光物体测量方法。Waddington等^[9-10]提出了修正最大输入灰度级(MIGL)投影正弦条纹图案,避免图像像素过饱和的测量方法。然而,与使用多重曝光技术类似,此方法测量过程速度较慢。Li等^[11]根据被测表面的局部反射率,通过在投影图案中修改局部MIGL,研究了一种自适应条纹投影技术。李乾等^[12]利用直接测量得到的点云数据,通过相机对待测物体上每一点的光强成像响应曲线计算出投影灰度范围和最低投影灰度。然而,采用调整投影图案强度法测量时,改变投影仪投射图案的光强值会引入高次谐波,最终影响测量精度。

上述方法和技术在一定程度上解决了高反光物体三维形貌测量的难题。但是,高反光物体表面不均匀变化的反射率,不仅受表面粗糙度的影响,还受表面颜色的影响。而如何在消除物体表面颜色干扰的同时完

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-01-02; 录用日期: 2024-01-05; 网络首发日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(U2341275, 52075147)

通信作者: *zhzhang@hebut.edu.cn

成对高反光物体的三维形貌测量,现阶段还未有相关研究。为解决彩色高反光物体表面三维形貌测量的难题,本文提出了一种基于彩色高反光表面反射率变化,自适应生成互补色编码条纹的测量方法。该方法利用反向投影技术选取高反光区域;通过被测物表面颜色对不同颜色光的吸收不同,在色相、饱和度、明度(HSV)颜色空间编码并向高反光区域投射与表面颜色互为补色的颜色光,达到降低该区域表面反射率、抑制曝光现象的目的。实验证明,仅需要投射一组自适应编码互补色条纹即可实现对彩色高反光物体表面的三维测量。

本文首先提出了基于光度互补理论的高反光区域彩色编码方法;然后验证了所提方法的有效性,并且与传统多重曝光时间法进行了对比实验;最后指出了未来的研究方向。

2 基本原理

2.1 条纹投影轮廓术

条纹投影测量系统一般由计算机、投影仪和相机组成。计算机生成的标准正弦条纹通过投影仪投射到被测物体表面,之后用相机拍摄经物体表面调制后的变形条纹图案,并传输至计算机解算相位信息,最后利用标定好的系统参数得到物体表面的三维数据。其中包含相位信息的正弦条纹的强度表示为

$$I(u, v) = A(u, v) + B(u, v) \cos[\phi(u, v) - 2\pi n/N], \quad (1)$$

式中: n 表示相移步数; N 表示相移总数; (u, v) 表示像素坐标; $A(u, v)$ 表示背景光强; $B(u, v)$ 表示条纹的调制强度; $\phi(u, v)$ 为所求解的相位。

由于其逐像素相位恢复和高测量精度等优点, N 步相移算法在条纹投影轮廓术中得到了广泛的应用。式(1)中的 $\phi(u, v)$ 可由 N 步相移解算得到:

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \frac{\sum_{n=1}^N I_n(u, v) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(u, v) \cos(2\pi n/N)}, \quad (2)$$

由式(2)得到的 $\phi(u, v)$ 所在区间为 $[-\pi, +\pi]$ 。为了获得更精确的相位图,通常投射并采集具有多个正弦周期的高频条纹图,这导致折叠相位存在周期为 2π 的阶跃。因此选择最佳三条纹展开法^[13]解算折叠相位,以实现连续的相位分布。最后,对相机和测量系统分别进行标定,建立绝对相位与深度之间的关系,代入测量所得被测物表面的展开相位即可获得物体的三维形貌数据。

2.2 建立投影仪-相机匹配关系

在条纹投影系统中,投影仪-相机的匹配关系如图1(a)所示。在世界坐标系($O_w; X_w, Y_w, Z_w$)上,任意一点 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ 对应投影仪像平面坐标系上一点 $P_p(u_p, v_p)$ 和相机像素平面坐标系上一点 $P_c(u_c, v_c)$ 。计算机根据投影仪成像面像素尺寸以及被测物体积,生成横纵坐标间隔适中且相等的标识点阵图 P_{ij} ,如图1(b)所示。

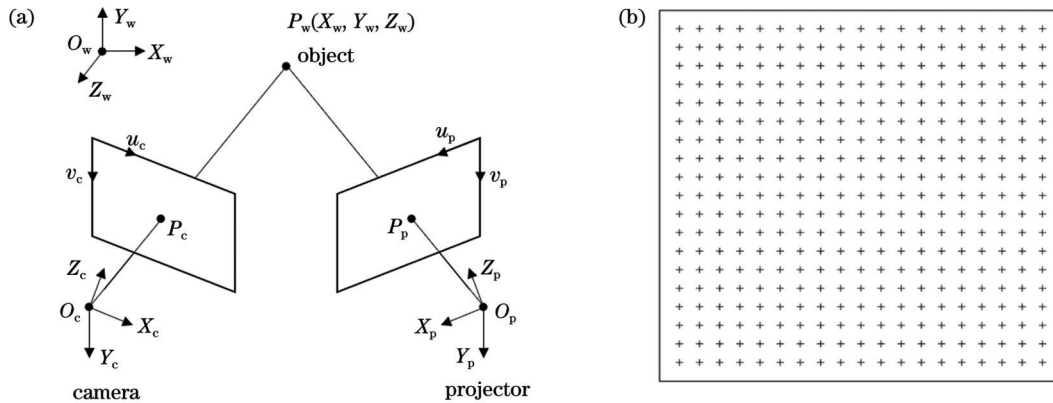


图1 建立投影仪-相机匹配关系。(a)坐标系转换关系;(b)标识点阵图

Fig. 1 Establish projector-camera matching relationship. (a) Coordinate system transformation relationship; (b) identification point bitmap

图1中各点在投影仪图像坐标系下位置已知,并与相机采集 P_{ij} 中各点在相机像素坐标系下的位置一一对应。则相机采集图像中任意一点 $P_c(u_c, v_c)$,其在投影仪图像坐标系下的位置 $P_p(u_p, v_p)$,可由距离该点最近,且围成矩形面积最小的四个标识点中任意相邻三点的相机像素坐标沿垂直方向和水平方向插值计算求得:

$$\begin{cases} u_p = \frac{(u_{p12} - u_{p11})(u_c - u_{c11})}{u_{c12} - u_{c11}} + u_{p11} \\ v_p = \frac{(v_{p21} - v_{p11})(v_c - v_{c11})}{v_{c12} - v_{c11}} + v_{p11} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: (u_{c11}, v_{c11}) 、 (u_{c12}, v_{c12}) 、 (u_{c21}, v_{c21}) 为相机像素坐标系下围成矩形的左上、右上、左下三个标识点的位置坐标; (u_{p11}, v_{p11}) 、 (u_{p12}, v_{p12}) 、 (u_{p21}, v_{p21}) 为投影仪图像坐标

系下围成矩形的左上、右上、左下三个标识点的位置坐标。

2.3 光度互补理论

条纹投影测量过程中,投影仪投射的条纹结构光由于高反光物体表面的反射特性影响,会在某一区域发生界面反射,从而导致相机采集的图像像素过饱和,条纹相位信息丢失,最终影响三维测量结果^[14]。

图 2(a)为理想正弦条纹图像,图 2(b)为上边缘相位信息丢失的饱和正弦条纹图像。

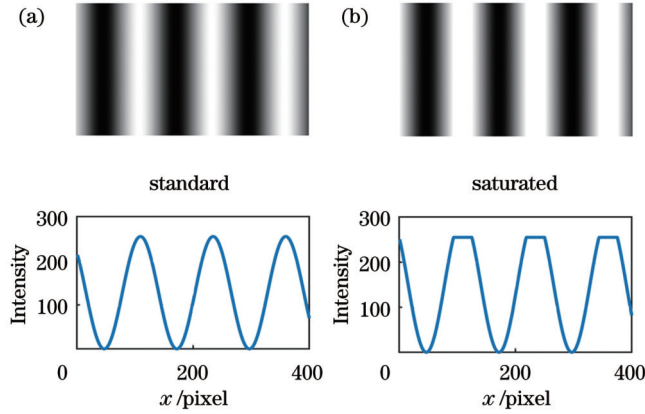


图 2 模拟正弦条纹图像及其横截面。(a)理想正弦条纹图;
(b)饱和正弦条纹图

Fig. 2 Simulated sinusoidal fringe image and its cross-section.
(a) Standard sinusoidal fringe pattern; (b) saturated sinusoidal fringe pattern

相机采集到的条纹图像光强 $I_c(u_c, v_c)$ 主要由三个分量组成:1)经由被测物表面反射投影仪投射的条纹结构光 $\alpha(u_c, v_c)I_p$;2)物体表面反射的环境光 $\alpha(u_c, v_c)I_e$;3)直接进入相机的环境光 I_a 。因此图像某一点的光强值可以表示为

$$I_c(u_c, v_c) = st[\alpha(u_c, v_c)I_p + \alpha(u_c, v_c)I_e + I_a], \quad (4)$$

式中: s 是相机灵敏度; t 是相机曝光时间; $\alpha(u_c, v_c)$ 为被测物体表面的反射率。根据式(3),利用多频外差法求解相位,可以在解算过程中消除环境光干扰。故式(4)可以化简为

$$I_c(u_c, v_c) = st\alpha(u_c, v_c)I_p. \quad (5)$$

设 $R(u_c, v_c, s, t)$ 为相机灵敏度以及相机曝光时间固定下物体表面某一点的反射率,则该点的光强值可以表示为

$$I_c(u_c, v_c) = R(u_c, v_c, s, t)I_p. \quad (6)$$

由光的选择性吸收理论可知,反射率 $R(u_c, v_c, s, t)$ 既受被测物体表面粗糙度的影响,又受表面颜色的影响。自然环境下不发光的物体会选择性吸收和反射,入射其表面的环境光从而呈现出颜色。所以具有颜色的表面对不同颜色光的吸收程度不同,反射率也不同。物体总是对与其表面颜色相同的颜色光的反射率最大,对除此颜色外其他颜色混合而成的颜色光的反射率最小。这两种颜色在 HSV 颜色模型描述中,饱

和度 S 和明度 V 不变,色相 H 相差 180° ,也称二者“互为补色”^[15]。

因此,可以采用针对物体表面高反光区域投射自适应编码互补色条纹,增大表面对投射光的吸收、降低该区域反射率 $R(u_c, v_c, s, t)$ 的方法,抑制相机采集图像在高反光区域内的曝光现象,最终获得被测物体表面完整的三维形貌。

3 自适应编码互补色条纹

3.1 高反光区域投影颜色计算

本文提出了基于彩色高反光表面反射率变化,自适应生成颜色编码条纹的测量方法。在计算被测物体高反光区域投影颜色之前,需要解决两个问题:1)判断相机采集图像中过饱和像素点的坐标,定位物体表面高反光区域的位置;2)准确提取高反光区域的颜色信息并计算其互补颜色。

对于问题 1),在确定唯一的曝光时间后,相机采集投影仪投射最高强度白光时被测物表面的图像 $I_{\text{high}}(u_c, v_c)$;然后利用反向投影技术提取光强值大于 250 的像素点坐标,生成相机像素坐标系下高反光区域掩模 $M_c(u_c, v_c)$:

$$M_c(u_c, v_c) = \begin{cases} 1, & I_{\text{high}}(u_c, v_c) \geq 250 \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (7)$$

对于问题 2),利用相机拍摄自然环境光下被测物表面无高光反射的彩色图像 I_{nat} ,通过掩模 $M_c(u_c, v_c)$ 提取被测物体原高反光区域的颜色,并通过 HSV 颜色模型表示该区域的颜色信息:

$$I_{\text{nat}} \times M_c(u_c, v_c) = \begin{cases} H_0 \\ S_0 \\ V_0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中, H_0 、 S_0 、 V_0 分别为被测物表面颜色的色相值、饱和度值、明度值。

对于被测物体表面的高反光区域,相机采集光强曲线如图 3(a)所示。当超出相机响应范围时,解算相位会出现数据空洞,如图 3(d)所示。然而,为增大物体表面对投射光的吸收、抑制高反光现象的形成,依据光度互补原理在生成物体表面颜色的互补色并投射时,仅改变投影颜色的色相值而饱和度值保持不变,会导致被测物体表面反射光强在相机采集图像的颜色编码分界处发生阶跃,如图 3(b)所示。最终导致在进行相位解算时,编码位置的展开相位出现异常,如图 3(e)所示。

为保证针对高反光区域的投影颜色在抑制高反光现象的同时,使反射光强分布连续无阶跃,相机采集被测物表面高反光图像 I_{high} ,根据图像中非高反光区域至高反光区域的颜色饱和度渐变趋势,计算投影颜色 β_1 ,达到编码界限两端平滑过渡的目的,如图 3(c)所示。图 3(f)为编码位置的展开相位。

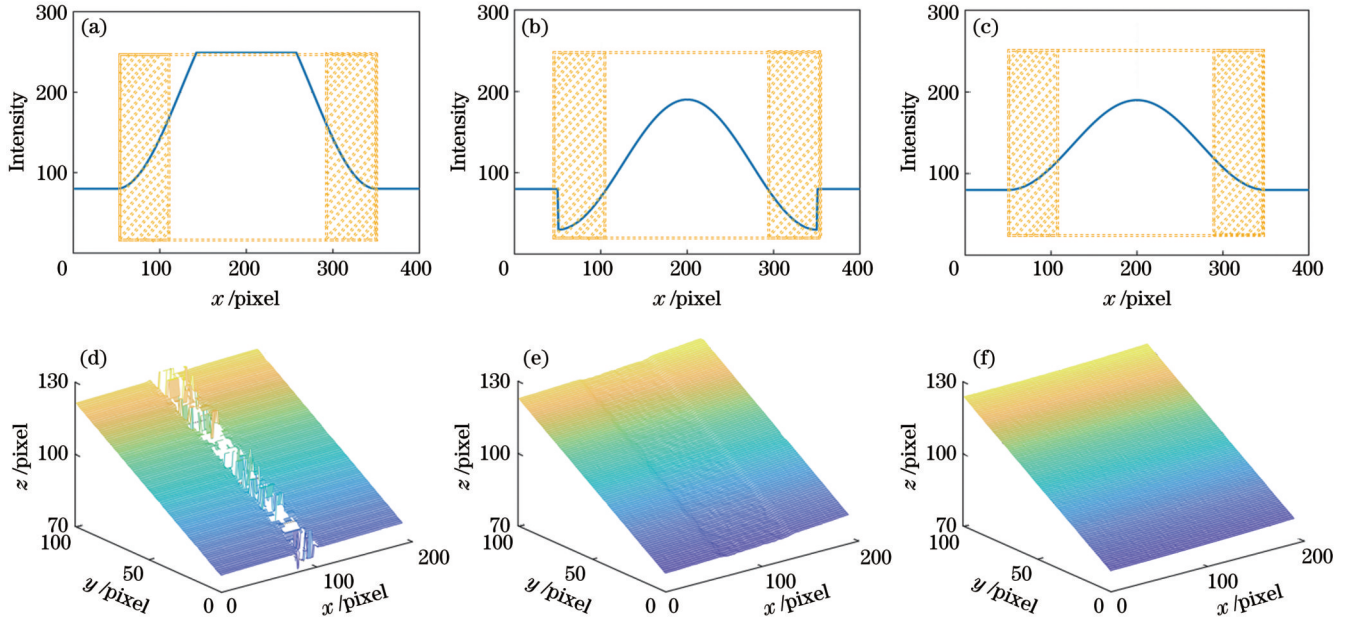


图 3 高反光区域表面光强剖面曲线图及该区域的展开相位图。(a)、(d)原高反光表面；(b)、(e)投影互补色相；(c)、(f)改变投影颜色饱和度

Fig. 3 Intensity profile of highly reflective region and unwrapped phase of the region. (a), (d) Highly reflective surface; (b), (e) projected complementary hue; (c), (f) changed saturation of projected color

$$\beta_1 = \begin{cases} H_c = H_0 + 180^\circ \\ S_c = S_0 - S_h \end{cases}, \quad (9)$$

if $H_c \geq 360^\circ$, $H_c = H_c - 360^\circ$

式中： S_0 为相机采集图像 I_{nat} 原高反光区域表面颜色的饱和度值； S_h 为相机采集图像 I_{high} 高反光区域表面颜色

的饱和度值。

3.2 自适应编码条纹生成

本文提出基于自适应编码互补色条纹的彩色高反光物体三维形貌测量方法。其流程图如图 4 所示。在固定整个测量过程唯一的曝光时间后,其具体方法步

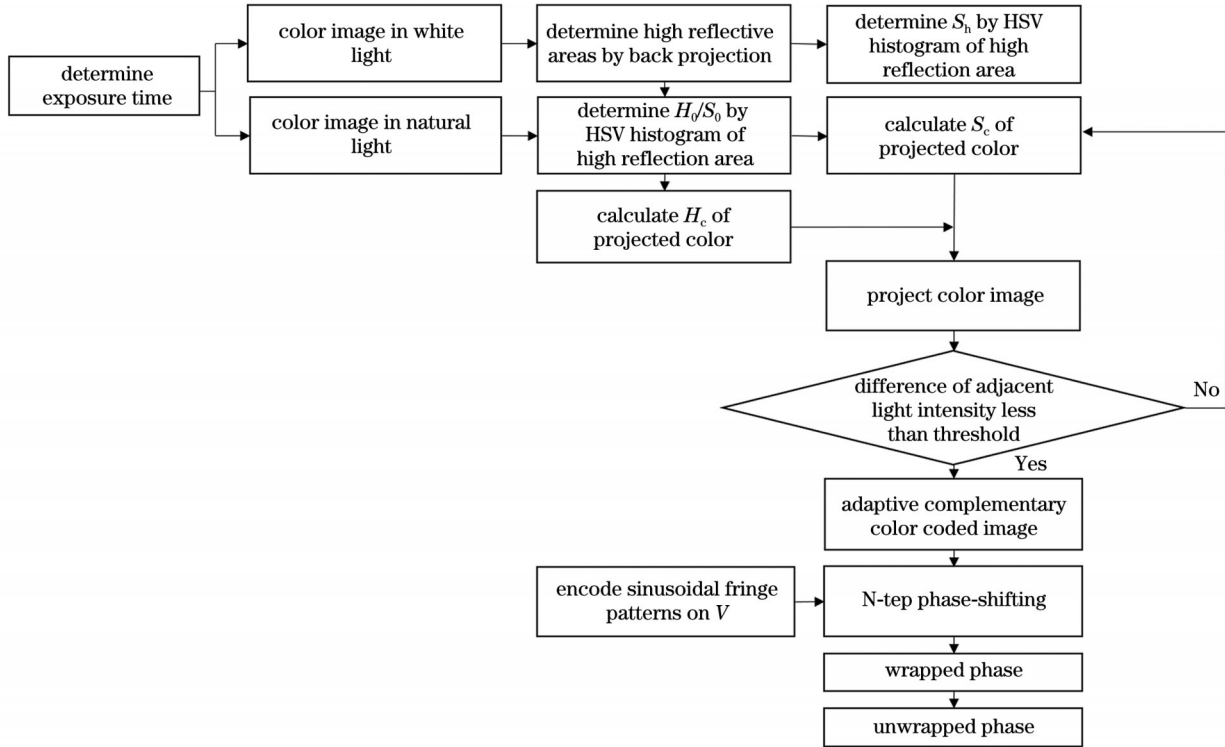


图 4 实验方法流程图

Fig. 4 Flow chart of experimental method

骤如下:

步骤 1: 确定被测物体高反光区域。相机采集投影仪投射最高强度白光时被测物表面的图像 $I_{\text{high}}(u_c, v_c)$, 利用反向投影技术提取过饱和像素点坐标, 生成相机像素坐标系下高反光区域掩模 $M_c(u_c, v_c)$ 。通过投影仪-相机的匹配关系, 依据式 (3) 得到投影图像坐标系下高反光区域掩模 $M_p(u_p, v_p)$ 。

步骤 2: 计算高反光区域最佳投影颜色。利用第一步中相机采集图像 I_{high} 获取高反光区域的 S_h ; 相机采集自然环境光下图像 I_{nat} , 获取原高反光区域颜色的 H_0, S_0 , 由式 (9) 计算得到投影颜色。

步骤 3: 颜色编码边界饱和度调整。向被测物体表面投射颜色编码图像, 如式 (10) 所示。实际测量中根据颜色编码边界两端相邻光强值调整投影颜色的饱和度, 直至相邻光强差值小于 20, 得到高反光区域投影颜色的最佳编码 β_2 。

$$I_{\text{color}}(u_p, v_p) = \begin{cases} \beta_1, & M_p(u_p, v_p) = 1 \\ 1, & M_p(u_p, v_p) = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} H_c = H_0 + 180^\circ \\ S_c = S_0 - S_h + \Delta S \end{cases}, \quad (11)$$

if $H_c \geq 360^\circ$, $H_c = H_c - 360^\circ$

式中, ΔS 为实际测量中对饱和度值的调整。

步骤 4: 编码互补色正弦条纹图案并投影。依据第三步得到的投影颜色编码 β_2 , 利用明度 V 编码正弦

条纹 $I(u, v)$, 生成自适应编码互补色条纹图案 I_{code} 并投射至被测物体表面。求解展开相位, 恢复被测物体表面完整的三维形貌。

$$I_{\text{code}}(u_p, v_p) = \begin{cases} \beta_2 \times I(u, v), & M_p(u_p, v_p) = 1 \\ 1 \times I(u, v), & M_p(u_p, v_p) = 0 \end{cases}. \quad (12)$$

4 彩色高反光表面测量实验

为验证所提方法的有效性, 搭建条纹投影硬件系统。选用 Wintech 的数字光处理器 (DLP) ProTM 4500 投影仪, 灯泡亮度为 150 lm, 投射彩色编码条纹。通过德国 XIEMA 公司的 XIQ MQ042CG-CM 型号彩色相机采集条纹图像。镜头为标准定焦镜头, 型号为 AZURE-1620ML5M, 焦距为 16 mm。实验在室内灯光照明约 300 lx 的环境光下进行测量。

4.1 测量彩色高反光物体

利用所提方法对黄色陶瓷杯进行测量, 如图 5(a) 所示。实验过程中, 固定相机曝光时间为 60 ms。采用最佳三条纹选择法, 投影仪分别投射条纹个数为 36、35 和 30 的三组条纹。每组条纹包含四步相移条纹图, 共 12 幅自适应编码互补色条纹图像解算相位。

图 5(b) 是本文所提方法对黄色陶瓷杯的测量结果。利用自适应编码互补色条纹, 通过降低杯子表面高反光区域的反射率, 有效解决了相机采集条纹后展开相位缺失的问题, 最终获得完整的三维形貌。

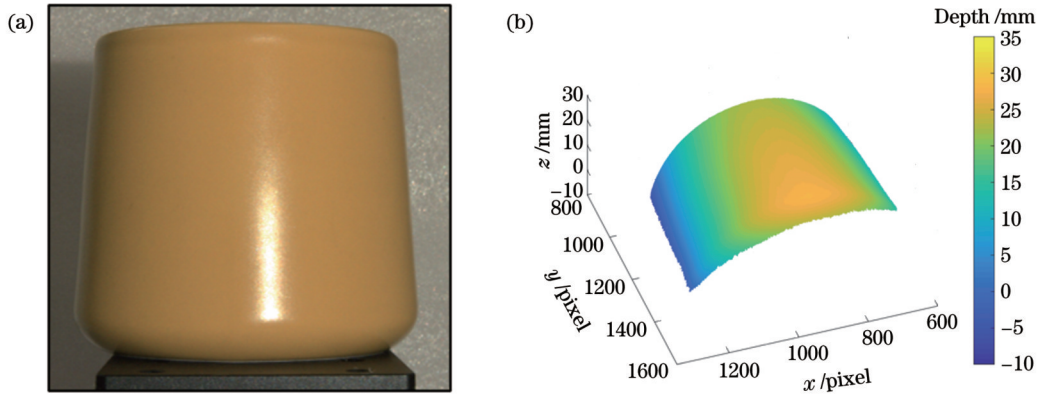


图 5 测量黄色陶瓷杯表面。(a) 黄色陶瓷杯实物图; (b) 三维测量形貌图

Fig. 5 Measure yellow ceramic cup surface. (a) Photo of yellow ceramic cup; (b) measured 3D shape

4.2 测量效率及精度分析

为证明本文所提方法能仅通过一组自适应编码互补色条纹图即可获得被测物体表面的完整相位信息, 进行整体测量完整性分析实验。分别投射传统灰度正弦条纹和本文所提自适应编码互补色条纹至黄色陶瓷杯表面, 拍摄 10~100 ms 共十组相机曝光时间不同的两种条纹图像。每组每种条纹图像均采用四步相移和条纹频数相同的最佳三条纹选择法, 对图 6(a) 所示的杯子表面所选区域进行相位解算。由于高光干扰导

致相机采集像素点过饱和, 从而使条纹信息丢失而无法保证相位精度。因此舍弃该像素点的展开相位, 最终在展开相位图中留下数据空洞。图 6(b) 为两种条纹在不同曝光时对杯子表面所选区域的相位恢复情况。

对陶瓷杯表面的所选区域进一步划分, A 至 D 表示采集图像光强由过暗逐渐过曝的四个区域, 如图 6(c) 所示。提取两种不同条纹在不同曝光时间下四个区域的展开相位, 统计区域内保留有相位信

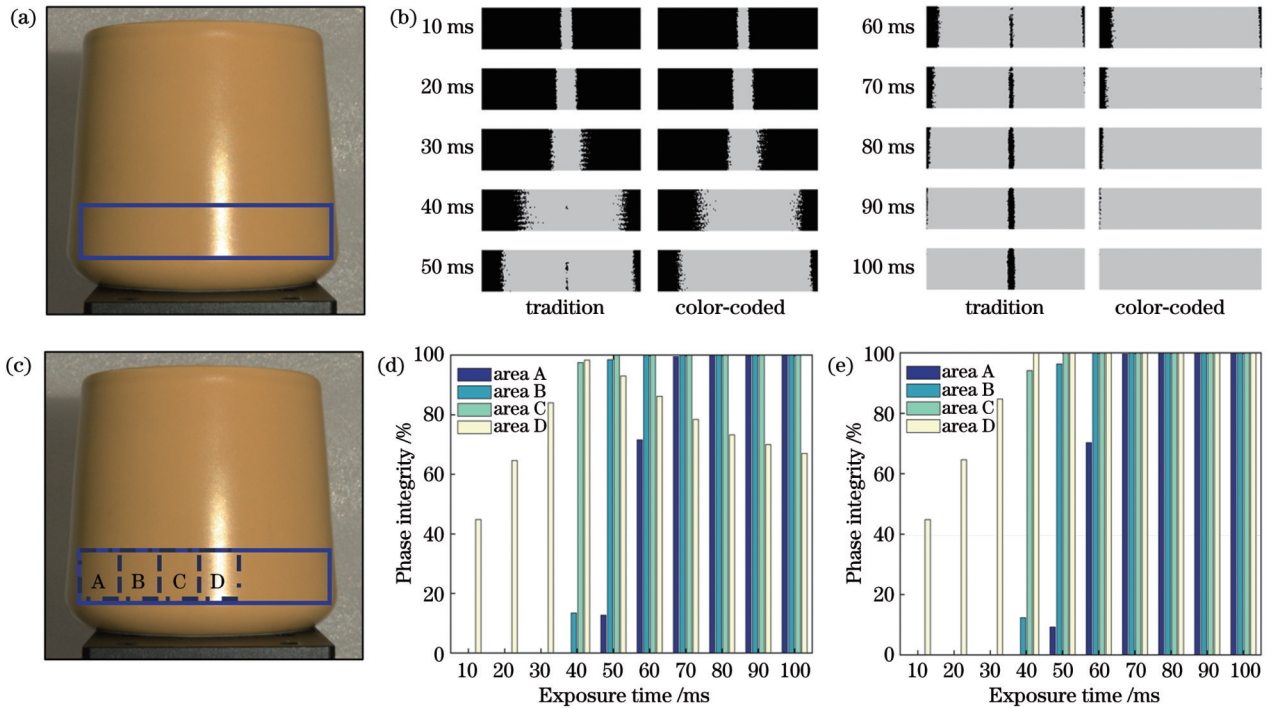


图 6 测量效率分析。(a)选取的区域;(b)所选区域在不同曝光时间的传统条纹和编码条纹的相位恢复;(c)划分的四个区域;(d)传统条纹不同曝光时间下各区域相位恢复完整度;(e)编码条纹不同曝光时间下各区域相位恢复完整度
 Fig. 6 Analysis of measurement efficiency. (a) Selected area; (b) phase recovery of traditional fringe and coded fringe in selected region at different exposure time; (c) four regions; (d) integrity of unwrapped phase using traditional fringe at different exposure time in each region; (e) integrity of unwrapped phase using coded fringe at different exposure time in each region

息的像素点数量占所划定区域像素点总数的百分比,得到相位恢复完整度直方图如图 6(d)和 6(e)所示。

从图 6(d)中可以看出,采用传统条纹测量时,存在过曝光现象的区域 D 在 10~100 ms 曝光时间下,相位恢复完整度从 44% 上升至 98% 再下降到 64%,均未达到 100%。还需要在 30~40 ms 区间和 40~50 ms 区间做进一步曝光时间的选取计算,才能获得高反光区域的相位信息。说明实验中 10 ms 的曝光时间间隔无法通过多组相位融合达到恢复彩色高反光表面完整相位的结果。

而应用本文提出的自适应编码互补色条纹进行测

量,当曝光时间大于 40 ms 时,区域 D 的相位恢复完整度均保持在 100%;当曝光时间大于 70 ms 时,所有区域相位全部恢复完整,如图 6(e)所示。实现了只需投射一组自适应编码互补色正弦条纹图即可测量彩色高反光物体表面完整三维形貌的目的。

为了定量评估测量结果,选用传统的多重曝光法和本文方法分别对黄色陶瓷杯表面进行测量,对图 6(a)中杯子表面所选区域内共 120 行数据中的第 20、40、60、80、100 行进行曲线拟合,并计算测量结果与拟合曲线之间的距离以评估精度,如表 1 所示。根据表 1 中的测量数据可知,本文所提方法的鲁棒性更强,且使用该方法测量的均值误差小于传统多重曝光

表 1 精度验证结果分析

Table 1 Analysis of accuracy verification results

Location	Mean error /mm		Standard deviation /mm	
	Multiple exposures	Proposed method	Multiple exposures	Proposed method
20	0.4475	0.1865	0.1691	0.0774
40	0.4471	0.1859	0.1706	0.0783
60	0.4483	0.1820	0.1687	0.0776
80	0.4469	0.1856	0.1695	0.0744
100	0.4471	0.1848	0.1693	0.0768

法。以所选区域的第 20 行为例,图 7(a)为多重曝光法得到的杯子表面测量曲线与拟合曲线,图 7(b)为本文方法得到的杯子表面测量曲线与拟合曲线。实

验结果表明,本文所提方法相较于传统的多重曝光时间法不仅在测量过程中效率更高,而且在测量精度方面也得到了提升。

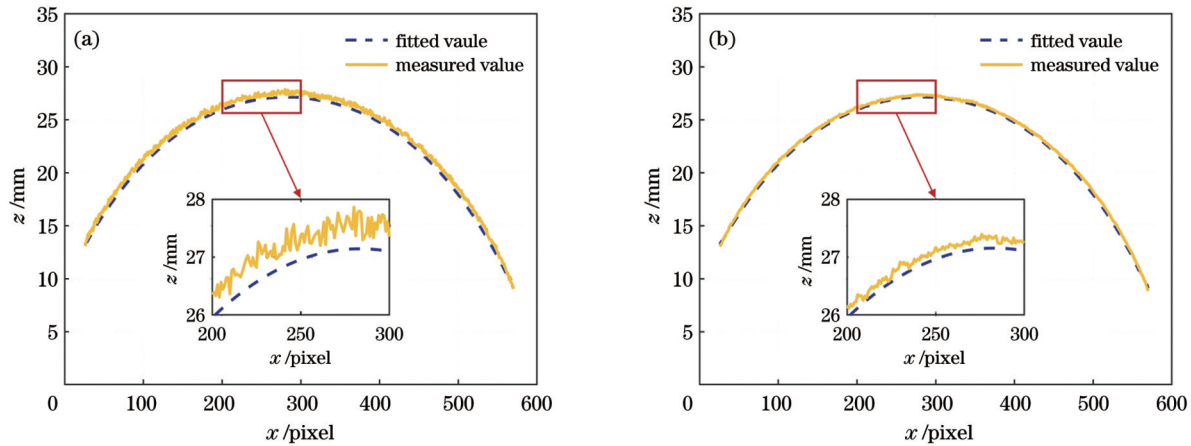


图 7 杯子表面测量曲线与拟合曲线对比。(a)多重曝光法;(b)提出方法

Fig. 7 Comparison of measured curve and fitted curve of cup surface. (a) Multiple exposures; (b) proposed method

5 结 论

针对彩色高反光表面物体三维形貌测量的难题,本文提出了一种基于彩色高反光表面反射率变化,自适应生成颜色编码条纹的方法。该方法根据光度互补理论,在 HSV 颜色空间编码并向高反光区域投射与表面颜色互为补色的条纹结构光,以达到降低高反光区域表面反射率,实现彩色高反光物体表面三维形貌测量的目的。实验结果表明,本文所提方法与传统的多重曝光时间法相比,减少了投射图像的数量,仅需要投射一组自适应编码互补色正弦条纹图即可获得彩色高反光物体表面完整的三维形貌,在测量效率和精度方面均展现出一定的优势。但本文方法只实验测量了单色高反光物体,后期将深入研究复杂多颜色编码,以实现多彩色高反光物体的三维形貌测量。

参 考 文 献

- [1] 张宗华, 于瑾, 高楠, 等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303006.
Zhang Z H, Yu J, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303006.
- [2] 都琳, 孙华燕, 王帅, 等. 针对动态目标的高动态范围图像融合算法研究[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0410001.
Du L, Sun H Y, Wang S, et al. High dynamic range image fusion algorithm for moving targets[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0410001.
- [3] 马泽龙, 高慧斌, 余毅, 等. 采用图像直方图特征函数的高速相机自动曝光方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 1026-1035.
Ma Z L, Gao H B, Yu Y, et al. Auto exposure control for high frame rate camera using image histogram feature function[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(4): 1026-1035.
- [4] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. Optical Engineering, 2009, 48(3): 033604.
- [5] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 59: 56-71.
- [6] Rao L, Da F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018, 50: 217-226.
- [7] 冯维, 张福民, 王惟婧, 等. 基于数字微镜器件的自适应高动态范围成像方法及应用[J]. 物理学报, 2017, 66(23): 234201.
Feng W, Zhang F M, Wang W J, et al. Adaptive high-dynamic-range imaging method and its application based on digital micromirror device[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(23): 234201.
- [8] Suresh V, Wang Y J, Li B W. High-dynamic-range 3D shape measurement utilizing the transitioning state of digital micromirror device[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 176-181.
- [9] Waddington C, Kofman J. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 251-256.
- [10] Waddington C J, Kofman J D. Modified sinusoidal fringe-pattern projection for variable illuminance in phase-shifting three-dimensional surface-shape metrology[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 084109.
- [11] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement[J]. Optics Express, 2014, 22(8): 9887-9901.
- [12] 李乾, 薛俊鹏, 张启灿, 等. 利用相机响应曲线实现高反光元件三维面形测量[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712001.
Li Q, Xue J P, Zhang Q C, et al. Three dimensional shape measurement of high reflective elements using camera response curve[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0712001.
- [13] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. Optics Express, 2006, 14(14): 6444-6455.
- [14] 赵慧洁, 李宇曦, 姜宏志, 等. 复杂光照条件下的高精度三维成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 0811018.

Zhao H J, Li Y X, Jiang H Z, et al. High-precision 3D-imaging technology under complex illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811018.

[15] Pridmore R W. Complementary colors theory of color vision: physiology, color mixture, color constancy and color perception [J]. *Color Research & Application*, 2011, 36(6): 394-412.

Adaptive Coding Fringe Projection Profilometry on Color Reflective Surfaces

Wang Ying¹, Ni Yubo¹, Meng Zhaozong¹, Gao Nan¹, Guo Tong², Yang Zeqing¹, Zhang Guofeng³, Yin Wei⁴, Zhao Hongwei^{3,4}, Zhang Zonghua^{1*}

¹*School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

²*School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

³*School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;*

⁴*National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, Shaanxi, China*

Abstract

Objective Fringe projection profilometry is widely employed to reconstruct the three-dimensional (3D) shape of an object surface. However, when this method is utilized to measure objects with color reflective surfaces, the image captured by the camera is oversaturated with pixels due to ambient lighting and reflections from the projected fringes, which results in the inability to measure the surface of the reflective area. This problem is mainly due to the unevenly varying reflective of surfaces, which is affected by both the roughness and the surface color. To solve the problem of eliminating the interference of the object surface color and complete the 3D shape measurement method based on the reflectivity change of colored highly reflective surfaces, we propose an adaptive generation of complementary color sinusoidal fringes method. By different absorption of colors by the object surface color to be measured, a complementary color of lighting is projected onto the highly reflective area to reduce the surface reflectivity of the region and suppress the exposure phenomenon.

Methods We put forward a method to measure the 3D shape of colored objects with high reflectivity, which is based on adaptively encoded complementary color fringes. Firstly, the highly reflective region of the object to be measured should be located. The image of the object surface is captured by the camera when the projector projects the strongest white light, and the coordinates of the oversaturated pixel points are extracted by an inverse projection technique. The location of the highly reflective region in the coordinate system of the projected image is obtained via the matching relationship between the projector and the camera. Then, the optimal color adopted for projecting the highly reflective region of the object is calculated by the color image of the object surface and then captured by the camera. The projecting color obtained in the previous step is employed to generate an image that is projected to the highly reflective region on the measured surface. The saturation value of the adopted projecting color is adjusted according to the magnitude of the adjacent light intensity values at either end of the boundary encoded color until the adjacent light intensity values are less than 20. Finally, after sinusoidal fringes on the V component of the HSV color space are encoded, and meanwhile adaptive complementary color sinusoidal fringe patterns are generated and projected onto the object surface to be measured. The complete 3D shape of the object surface to be measured is recovered by solving the unwrapped phase.

Results and Discussions The proposed method employs adaptively encoded complementary color fringes. It reduces the reflectivity of the highly reflective region on the surface, solves the unwrapped phase loss after utilizing traditional fringe projection profilometry, and finally obtains the complete 3D shape of the yellow ceramic cup (Fig. 5). Additionally, the phase resolution results of the yellow ceramic cup are compared and analyzed by traditional gray fringes and the proposed complementary color-coded fringes under different exposure time. The results show that when the exposure time is greater than 40 ms, the phase recovery completeness of the region D is maintained at 100% (Fig. 6) by applying the proposed method. The purpose of measuring the complete 3D shape of the surface of a color highly reflective object by projecting only a set of adaptively encoded complementary color sinusoidal fringe patterns is achieved. Meanwhile, the mean error of the proposed method is 0.5281 mm, smaller than that of the traditional multiple exposure method. In conclusion, this

method is not only more efficient than the traditional multiple exposure method in the measurement process but also improves the measurement accuracy.

Conclusions To address the challenges in measuring the 3D shape of colored highly reflective objects, we propose a novel fringe projection profilometry method based on adaptive color encoding. The proposed method encodes and projects fringe structured light complementary to the measured surface color into the highly reflective region in the HSV color space based on the theory of photometric complementarity. As a result, it reduces the surface reflectivity of the highly reflective region and achieves 3D shape measurement of colored highly reflective objects. The experimental results show that this method reduces the number of projected images during the measurement compared with the traditional multiple exposure methods. Only a set of adaptively encoded complementary color sinusoidal fringe maps should be projected to obtain a complete 3D shape of the surface of a colored highly reflective object. The proposed method shows certain advantages in measurement efficiency and accuracy.

Key words 3D measurement; fringe projection; highly reflective surfaces; color encoding