

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法

刘硕, 张宗华, 高楠, 孟召宗, 高峰

#### 引用本文:

刘硕, 张宗华, 高楠, 等. 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(4): 220340.

Liu S, Zhang Z H, Gao N, et al. Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220340.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220340>

收稿日期: 2022-12-14; 修改日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-02-15

### 相关论文

#### 基于时域相移技术的结构光三维微纳形貌检测方法

范松如, 范朦, 陈冬晖, 赵青

*光电工程* 2021, 48(4): 200430 doi: 10.12086/oe.2021.200430

#### 双视角三维测量系统同时标定方法

赵涵卓, 高楠, 孟召宗, 张宗华

*光电工程* 2021, 48(3): 200127 doi: 10.12086/oe.2021.200127

#### 基于立体相位测量偏折术的预应力薄镜面形检测

陈贞屹, 赵文川, 张启灿, 汉语, 刘元坤

*光电工程* 2020, 47(8): 190435 doi: 10.12086/oe.2020.190435

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220340

# 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法

刘硕<sup>1</sup>, 张宗华<sup>1,2\*</sup>, 高楠<sup>1</sup>, 孟召宗<sup>1</sup>, 高峰<sup>2</sup><sup>1</sup>河北工业大学机械工程学院, 天津 300130;<sup>2</sup>哈德斯菲尔德大学精密技术中心, 西约克郡,

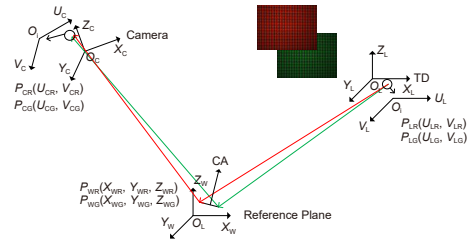
哈德斯菲尔德 HD1 3DH, 英国

**摘要:** 为实现漫反射表面和镜面复合表面的快速测量, 基于条纹投影和条纹反射的复合表面测量系统通过相机的多颜色通道快速获得绝对相位。针对复合表面形貌测量中相机、投影仪、显示屏所引入颜色通道间的串扰和色差, 研究了基于矩阵的串扰消除方法和绝对相位对应像素偏差的色差消除方法。基于串扰矩阵, 分别建立投影仪和显示屏的串扰矩阵, 完成颜色通道间的串扰消除。通过彩色正交条纹获得各颜色通道水平和竖直方向的绝对相位, 建立颜色通道间相位差和像素偏差之间的关系, 实现每一像素点的像素偏差校正, 消除色差的影响。实验结果证明, 所提色差和串扰消除方法使复合台阶的测量均方根误差从 0.479 mm 降至 0.030 mm, 提高了测量效率和测量精度。

**关键词:** 光学测量; 复合表面; 多颜色通道; 相位测量; 色差与串扰

中图分类号: TH741

文献标志码: A



刘硕, 张宗华, 高楠, 等. 复合表面形貌测量中通道串扰和色差消除方法 [J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220340

Liu S, Zhang Z H, Gao N, et al. Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220340

## Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement

Liu Shuo<sup>1</sup>, Zhang Zonghua<sup>1,2\*</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>, Meng Zhaozong<sup>1</sup>, Gao Feng<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;<sup>2</sup>Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield, HD1 3DH, UK

**Abstract:** In order to realize the rapid measurement of composite surfaces with diffuse and mirror reflection, the composite surface measurement system based on fringe projection and fringe reflection can obtain the absolute phase rapidly through the multi-color channel of the camera. Aiming at the crosstalk and chromatic aberration between the color channels introduced by the camera, projector, and display in the composite surface topography measurement, this paper studies the crosstalk elimination method based on the matrix and the chromatic aberration elimination method of the absolute phase corresponding pixel deviation. Based on the crosstalk matrix, the crosstalk matrix of the projector and display screen is established. The crosstalk intensity from other channels in the

收稿日期: 2022-12-14; 修回日期: 2023-02-08; 录用日期: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075147)

\*通信作者: 张宗华, zhzhang@hebut.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

desired color channel is eliminated to complete the crosstalk elimination between color channels. The absolute phase in the horizontal and vertical directions of each color channel is obtained by color orthogonal stripes. The relationship between phase difference and pixel deviation is established to realize the pixel deviation correction of each pixel point and eliminate the influence of color difference. The experimental results show that the proposed method reduces the average measurement error of the composite step from 0.479 mm to 0.030 mm, and improves the efficiency and accuracy of measurement.

**Keywords:** optical measurements; composite surface; multiple color channel; phase measurement; chromatic aberration and crosstalk

## 1 引言

由于动态范围大、精度高, 基于相位计算的光学三维测量技术广泛应用于航空航天、汽车制造、生物医学、文物保护等领域<sup>[1-3]</sup>。例如, 条纹投影轮廓术<sup>[4]</sup>对漫反射表面测量, 相位测量偏折术<sup>[5-6]</sup>对镜面形貌的测量。在汽车制造、工业生产和生物医学等领域, 存在很多漫反射表面和镜面同时存在的复合表面部件, 如 304 不锈钢标准件测量、人工骨骼的形貌恢复等。但已有的光学技术无法高效快速地测量此种类型的表面<sup>[7]</sup>。因此, 急需研究快速、准确测量复合表面物体三维形貌的新方法。

为解决复合表面的新问题, 岳慧敏等<sup>[8]</sup>提出一种面结构光测量方法, 将条纹投影与条纹反射融合在一起, 实现了表面粗糙度不同物体的高精度测量。Sandner<sup>[9]</sup>提出了一种结合条纹反射和条纹投影的测量方法, 对不同反射特性的物体自适应恢复形貌, 但是漫反射部分具有较大相位噪声, 形貌恢复结果较差。这两种方法以条纹投影测得的高度为迭代初值计算条纹反射子系统的表面高度, 仅适用于测量表面梯度小且连续的复合表面。张宗华等<sup>[10]</sup>提出了一种基于条纹投影和条纹反射的方法, 快速测量复合表面物体。此方法虽然解决了非连续复合表面测量的难题, 但是采用半透半反镜和显示屏实现双屏显示, 系统结构复杂、标定困难且相机的测量视场较小。后来, 张宗华等<sup>[11]</sup>又提出了双屏透射的复合表面测量方法, 并利用多光通道实现复合表面的快速测量。该方法与传统的测量方法相比, 既降低了标定难度、增大了相机的测量视场, 又减少了所拍条纹图数量, 降低了外部环境对测量精度的影响。但多光通道测量系统引入了色差和串扰, 降低了所采集变形条纹的质量, 需要校正和消除它们所引进的误差。

串扰是彩色条纹投影轮廓术中误差的主要来源,

已有大量研究工作提高三维测量的精度。如 Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于多频外差的串扰校正方法, 通过傅里叶变换处理不同颜色通道中的频谱得到折叠相位, 基于多频外差原理得到展开相位, 该方法有效降低了串扰对相位计算的影响。Huang 等<sup>[13]</sup>提出一种串扰系数标定法, 通过条纹图的光强强度来计算调制度, 补偿三个颜色通道之间的耦合。该方法测量不同物体时需要重新进行串扰标定, 且受环境影响较大。Hu 等<sup>[14]</sup>提出一种基于盲信号分离算法的标定方法来消除串扰, 无需提前得知系统参数即可计算串扰系数, 但是该方法包含较多复杂迭代运算, 鲁棒性较差。

色差是彩色条纹投影轮廓术中误差的另外一个主要来源。Sun 等<sup>[15]</sup>提出一种系统 LCA 补偿方法, 建立相机和投影仪之间的数学模型对世界坐标系中的色差进行校正, 但是测量精度受到标定精度及系统误差的影响。张宗华等<sup>[16]</sup>提出一种线性补偿模型, 利用来自不同颜色通道的绝对相位校正色差, 但是该方法仅适用于最佳三条纹选择算法, 具有局限性。Liu 等<sup>[17]</sup>提出通过符合最佳条纹选择的闭合圆环条纹来得到相位, 并对颜色通道间的色差进行消除。上述串扰和色差消除方法仅适用于彩色条纹投影测量系统。

为解决多光通道条纹投影与反射复合表面形貌测量中的串扰和色差, 本文提出基于矩阵的串扰消除方法和绝对相位对应像素偏差的色差消除方法。

## 2 原理

### 2.1 多光通道间串扰的消除

大部分彩色相机为了避免颜色盲区而采用光谱重叠的设计, 导致相机采集彩色条纹时出现一种颜色条纹信息出现在其他颜色通道的串扰现象。为了避免硬件校正对系统造成的影响, 本文采用基于串扰系数的软件补偿方法, 对复合表面测量中的串扰进行补偿。彩色相机拍摄来自于投影仪投射和透明屏显示的两种

波长光线, 建立彩色相机和投影仪、透明屏之间的颜色光强关系, 彩色相机采集的光强为  $I_{DT}$ , 如式 (1) 所示。

$$\begin{aligned}
 I_{DT} &= K \cdot (I_D + I_T) \\
 &= K(V_D^R \cdot I_D^R + V_T^R \cdot I_T^R) \\
 &\quad + K(V_D^G \cdot I_D^G + V_T^G \cdot I_T^G) \\
 &\quad + K(V_D^B \cdot I_D^B + V_T^B \cdot I_T^B), \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中:  $K$  由物体的表面反射系数决定,  $I_D$  和  $I_T$  分别为投影仪投射和透明屏显示的光强,  $V_D$  和  $V_T$  分别为投影仪和透明屏预设像素值的三个颜色分量。

彩色相机采集的像素为  $(P_R, P_G, P_B)$ , 如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} P_R = \int_0^\infty f_R(\lambda) I_{DT}(\lambda) d\lambda + I_{er} \\ P_G = \int_0^\infty f_G(\lambda) I_{DT}(\lambda) d\lambda + I_{eg} \\ P_B = \int_0^\infty f_B(\lambda) I_{DT}(\lambda) d\lambda + I_{eb} \end{cases}, \quad (2)$$

其中:  $I_C(\lambda)$  为相机采集光强,  $f_R(\lambda)$ 、 $f_G(\lambda)$ 、 $f_B(\lambda)$  分别为相机在红、绿、蓝通道的光谱响应,  $I_{er}$ 、 $I_{eg}$ 、 $I_{eb}$  分别为相机三颜色通道中的外界光强。将公式简化后可表示为

$$\begin{cases} P_R = K(C_D + C_T)F_R(\lambda) + I_{er} \\ P_G = K(C_D + C_T)F_G(\lambda) + I_{eg} \\ P_B = K(C_D + C_T)F_B(\lambda) + I_{eb} \end{cases}, \quad (3)$$

其中:  $F_R(\lambda)$ 、 $F_G(\lambda)$ 、 $F_B(\lambda)$  分别为相机三颜色通道采集颜色信息与投影仪和透明屏投射颜色信息之间的关系, 可由式 (1) 和式 (2) 联立得到,  $C_D$  和  $C_T$  分别为投影仪和透明屏与相机之间的串扰矩阵,  $C_D$  如式 (4) 所示:

$$C_D = K \begin{bmatrix} 1 & (I_{mr}/I_{mg}) & (I_{mr}/I_{mb}) \\ (I_{mr}/I_{mg}) & 1 & (I_{mb}/I_{mg}) \\ (I_{mr}/I_{mb}) & (I_{mg}/I_{mb}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D^R \\ I_D^G \\ I_D^B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $I_{mr}$ 、 $I_{mg}$ 、 $I_{mb}$  分别为红色、绿色、蓝色条纹的调制强度。透明屏的串扰矩阵  $C_T$  同理。对串扰矩阵中来自其他颜色通道的条纹调制强度进行补偿, 补偿公式如式 (5) 所示:

$$R_D = \begin{bmatrix} 1 & -(I_{mr}/I_{mg}) & -(I_{mr}/I_{mb}) \\ -(I_{mg}/I_{mr}) & 1 & -(I_{mg}/I_{mb}) \\ -(I_{mb}/I_{mr}) & -(I_{mb}/I_{mg}) & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

利用上述同样步骤, 同理可获得  $R_T$ 。通过投影仪和透明屏的两个串扰补偿矩阵, 完成相机颜色通道中串扰的补偿。

### 2.2 多光通道间串扰的消除

复合表面测量系统由条纹投影子系统和条纹反射子系统组成, 条纹投影子系统中投影仪仅投射蓝色条纹, 故无色差现象。若条纹反射子系统中透明屏和显示屏显示同种颜色条纹, 则不存在色差。但是实际测量中透明屏和显示屏分别显示绿色、红色条纹, 对系统中透明屏和显示屏分别显示的绿色、红色条纹中的横向色差进行校正, 原理如图 1 所示。点  $P_{LR}(U_{LR}, V_{LR})$  和点  $P_{LG}(U_{LG}, V_{LG})$  分别为红、绿色正弦条纹图在透明屏像素坐标系中一点, 两点分别对应世界坐标系中  $P_{WR}(X_{WR}, Y_{WR}, Z_{WR})$  和  $P_{WG}(X_{WG}, Y_{WG}, Z_{WG})$ , 经相机拍摄后成像在相机像素坐标系  $P_{CR}(U_{CR}, V_{CR})$  和  $P_{CG}(U_{CG}, V_{CG})$ 。其中, 世界坐标系中点  $P_{WR}$  和  $P_{WG}$  之间的差值  $D_{RG}$  为像素偏差, 即色差, 如式 (6) 所示:

$$D_{RG} = P_{WR}(X_{WR}, Y_{WR}, Z_{WR}) - P_{WG}(X_{WG}, Y_{WG}, Z_{WG}). \quad (6)$$

以颜色通道间水平和垂直方向的绝对相位为索引,

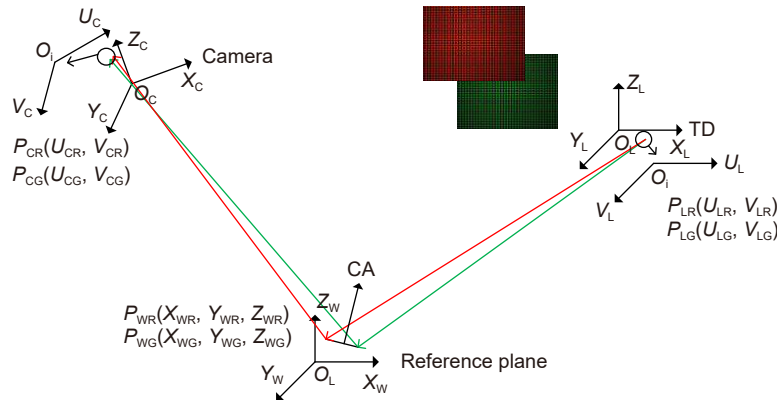


图 1 复合测量系统色差原理图

Fig. 1 Color difference schematic of the composite measurement system

建立颜色通道间相位差和像素偏差之间的关系, 完成不同颜色通道的像素点匹配。相机拍摄透明屏显示的红、绿色正交条纹图, 通过二维快速傅里叶变换得到折叠相位, 利用多频外差展开的方法对两种条纹频率的折叠相位展开, 最终得到不同颜色通道水平和垂直方向的展开相位。以校正红绿通道的色差为例,  $P_{CR}$  和  $P_{CG}$  在相机坐标系下的像素偏差为  $\Delta v$  和  $\Delta u$ , 如图 2 所示。 $\Delta v$  和  $\Delta u$  可以通过竖直和水平方向的绝对相位差计算得到, 如式 (7) 所示:

$$\begin{cases} \Delta v = V_{CG} - V_{CR} \\ \Delta u = U_{CG} - U_{CR} \end{cases} \quad (7)$$

若不存在色差, 点  $P_{CR}$  和  $P_{CG}$  两方向的相位值相等, 记  $P_{CR}$  和  $P_{CG}$  为一对像素匹配点。但是, 点  $P_{CR}$  和  $P_{CG}$  存在相位偏差和像素偏差。记  $P_{CR}$  的水平方向相位为  $\varphi_{U1}$ , 竖直方向相位为  $\varphi_{V1}$ 。取点  $P_{CR}$  所在行和列的绝对相位, 分别减去  $\varphi_{U1}$  和  $\varphi_{V1}$  后寻找相位差值最小点  $P_{CG}$ , 相位为  $\varphi_{U2}$  和  $\varphi_{V2}$ 。所求点  $P_{CG}$  即为  $P_{CR}$  的像素匹配点。为了提高精度, 在水平或竖直方向寻找相位差值最小点时, 可在  $(U_{CG}-1, U_{CG}+1)$  或  $(V_{CG}-1, V_{CG}+1)$  的像素范围内对相位差作一维线性插值, 使得所求匹配点更准确。

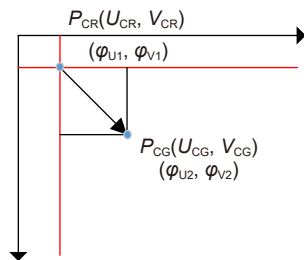


图 2 相机坐标系下像素偏差图  
Fig. 2 Pixel deviation map in the camera coordinate system

对相机坐标系下所有待求点进行像素点匹配后, 需要通过二维插值建立新的矩阵, 并将像素匹配点转换到新矩阵中。匹配点的像素坐标为  $(U_{CR}+\Delta u, V_{CR}+\Delta v)$ , 点  $P_{CR}$  的初始点像素坐标为  $(U, V)$ , 插值系数为  $n$ , 则插值之后的匹配点像素坐标  $(U'_{CG}, V'_{CG})$  可表示为

$$\begin{cases} U'_{CG} = \text{round}\{1/n[U_{CR} + \Delta u - U] + 1\} \\ V'_{CG} = \text{round}\{1/n[V_{CR} + \Delta v - V] + 1\} \end{cases} \quad (8)$$

由于绝对相位信息具有唯一性, 与像素点一一对应, 对绝对相位进行修正能实现所有像素点的匹配, 具有较高的精确度。

### 3 实验及结果

复合表面测量系统如图 3 所示, 主要由计算机、显示屏 (LCD)、透明屏 (TD)、投影仪 (DLP)、相机 (CCD)、水平移动导轨组成, 直接建立了相位和深度之间关系, 能够实现非连续表面复合物体的测量。投影仪的型号为 LightCrafter™4500, 分辨率为  $912 \times 1140$  pixels。彩色相机的型号为 SVCam-ECO445, 分辨率为  $1296 \text{ pixels} \times 964 \text{ pixels}$ , 像素物理尺寸为  $3.75 \mu\text{m}$ 。水平导轨的型号为 GCD203300M, 分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。显示屏是维辰思公司生产, 分辨率为  $1366 \text{ pixels} \times 768 \text{ pixels}$ , 透明屏的型号为 NVS133, 分辨率为  $1366 \text{ pixels} \times 768 \text{ pixels}$ , 二者的尺寸均为 17.45 英寸 (Inch, 1 Inch=2.54 cm)。透明屏的工作原理是通过电压控制两块平行平板之间液晶的排列顺序, 来达到透明的功能。调节透明屏的通电状态实现双屏透射显示, 相机采集透明屏显示的条纹图时, 显示屏显示高亮背景提供光源; 相机采集显示屏显示的条纹图时, 将透明屏关闭, 使显示屏发出的光线透过透明屏成像在相机的靶平面上。利用已有方法对所搭建的系统进行标定。

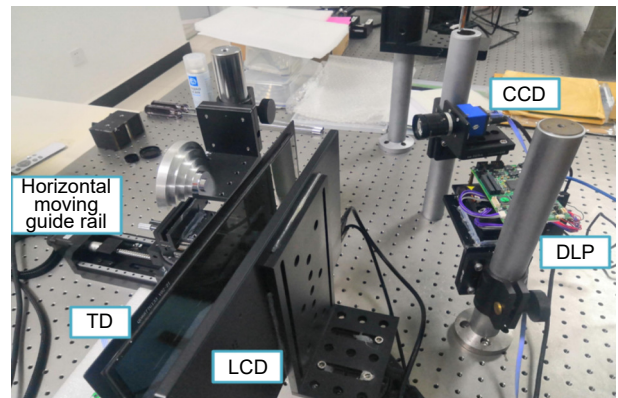


图 3 实验系统实物图  
Fig. 3 Photo of the experimental system

#### 3.1 精度验证

为了验证复合表面测量系统的可行性以及误差处理的有效性, 对设计加工的非连续复合表面台阶进行测量, 定量评价该方法的性能。如图 4 为复合表面台阶的实物图, 台阶 1~3 级为镜面表面, 4~6 级为漫反射表面, 相邻台阶面之间为平行平面, 平行度在  $600 \text{ nm}$  以内 (由 Fizeau 激光干涉仪测得), 台阶面间距离由 Zeiss Calypso 三坐标测量仪 (单点测量不确定度为  $0.5 \mu\text{m}$ ) 测得。测量时, 投影仪投射蓝色条纹至复合

台阶的漫反射部分, 显示屏和透明屏分别显示红色和绿色条纹至复合台阶的镜面部分。图 5 为彩色相机采集透明屏和投影仪同时显示和投射的绿色、蓝色条纹图, 其中蓝色条纹部分为漫反射部分, 绿色条纹部分为镜面部分。

根据 2.1 节的串扰消除方法对蓝绿通道间的能量

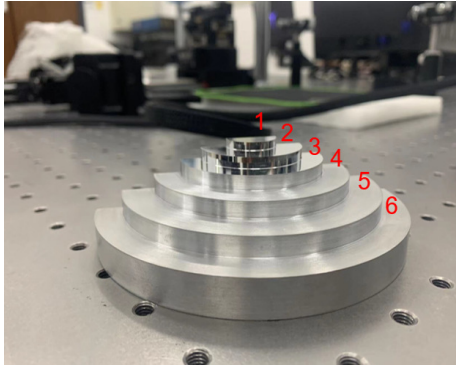


图 4 复合表面台阶图

Fig. 4 Photo of the artificial composite step

泄露进行消除。对投影仪和透明屏的串扰矩阵进行标定, 标定后的串扰矩阵结果如式 (9) 和式 (10) 所示。图 5(d) 和 5(e) 为处理后的蓝、绿通道的绝对相位图, 明显消除了来自其他颜色通道的串扰影响。

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.2840 & 0.0411 \\ 0.1273 & 1 & 0.1753 \\ 0.0310 & 0.4187 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.2369 & 0.0340 \\ 0.1276 & 1 & 0.1356 \\ 0.0438 & 0.3409 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

通过传统的色差校正方法对显示屏和透明屏分别显示的红、绿条纹间的色差进行校正。首先, 彩色相机分别拍摄透明屏显示的符合最佳三条纹和四步相移的红、绿色条纹图, 水平和垂直方向共 48 幅。其次, 得到两方向的绝对相位差后, 建立像素偏差和相位偏差之间的关系。最后, 通过二维插值的方法得到校正

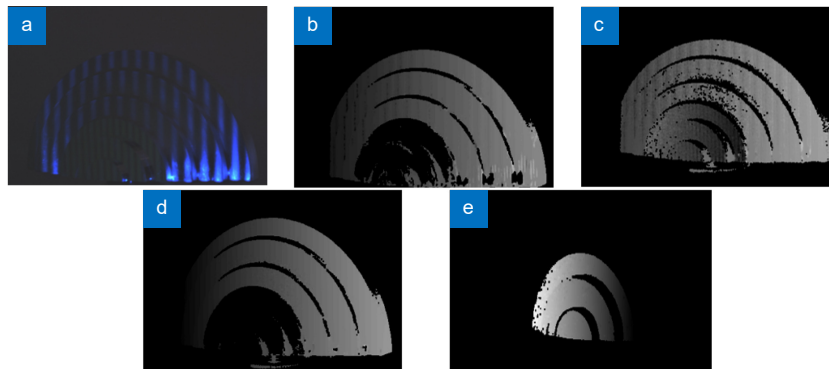


图 5 串扰消除前后的绝对相位图。(a) 同时拍摄的条纹图; (b) 处理前的蓝色通道绝对相位图; (c) 处理前的绿色通道绝对相位图; (d) 处理后的蓝色通道绝对相位图; (e) 处理后的绿色通道绝对相位图

Fig. 5 Absolute phase diagram before and after crosstalk elimination. (a) A fringe map taken at the same time; (b) Absolute phase map of the blue channel before processing; (c) Absolute phase diagram of the green channel before processing; (d) Absolute phase diagram of the processed blue channel; (e) Absolute phase diagram of the processed green channel

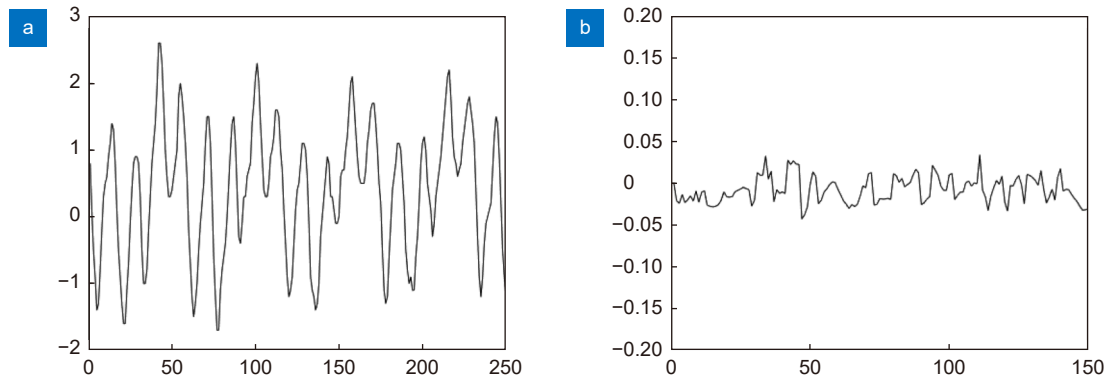


图 6 传统方法色差校正前后的像素偏差图。(a) 色差校正前的像素偏差; (b) 色差校正后的像素偏差

Fig. 6 Image of pixel deviation before and after color correction by the traditional method. (a) Image of pixel deviation before chromatic correction; (b) Image of pixel deviation after chromatic aberration correction

后的绝对相位。校正前后的像素偏差如图 6 所示，色差校正将像素偏差从 2.85 pixel 降低至 0.05 pixel 以内。

根据 2.2 节的方法对显示屏和透明屏分别显示的红、绿条纹之间的色差进行校正。彩色相机分别拍摄透明屏显示的条纹数为 50、49 的红色和绿色正交条纹图，共四幅。对水平方向和垂直方向的相位进行解算，如图 7 所示。

为了减少计算时间，将待校正矩阵分为若干矩阵进行修正，如图 8 所示为色差校正前后像素偏差图。数据表明，色差校正将像素偏差从 2.08 pixel 降低至 0.05 pixel 以内，该方法与传统方法相比，二者精度大致相同，但是该方法基于傅里叶变换原理，能够减

小高频随机噪声对相位计算的影响。

将 Zeiss Calypso 三坐标测量仪测量的台阶面与相邻面之间的距离作为真值，与本系统经过误差处理前后测得的台阶面间的深度对比，处理前后的重建深度如图 9 所示。

选取不同深度范围处的点对台阶平面进行拟合，根据平面之间的距离公式得到相邻台阶面之间的距离，与真值相比计算误差，如表 1 所示。实验结果表明，误差处理前测量结果的均方根误差为 0.479 mm，色差和串扰校正后测量结果的均方根误差为 0.030 mm，证明了色差和串扰处理的有效性。

对 iPad 背面标识图案进行定性测量。其中，商标为镜面表面，平板的背面为漫反射表面，如图 10

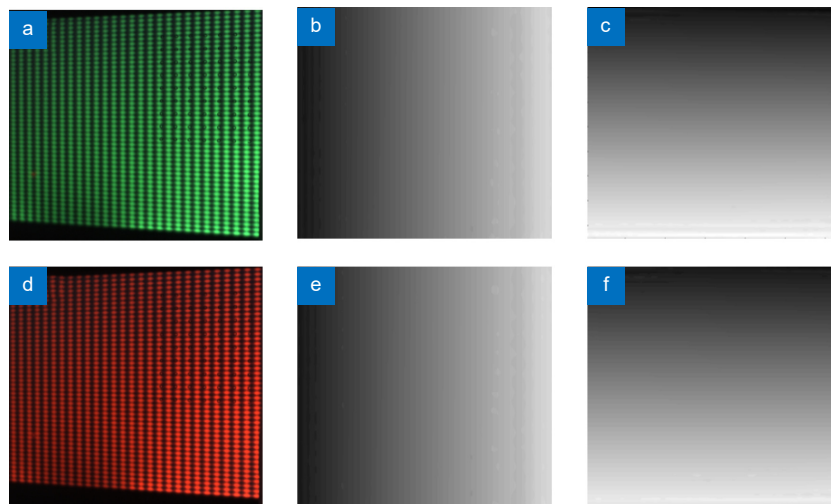


图 7 正交条纹及展开相位图。(a) 绿色正交条纹图; (b) 垂直条纹展开相位; (c) 水平条纹展开相位; (d) 红色正交条纹图; (e) 垂直条纹展开相位; (f) 水平条纹展开相位

Fig. 7 Orthogonal fringe and unwrapping phase diagram. (a) Green orthogonal fringe pattern; (b) Vertical stripe unwrapping phase; (c) Horizontal fringe unwrapping phase; (d) Red orthogonal stripe pattern; (e) Vertical stripe unwrapping phase; (f) Horizontal fringe unwrapping phase

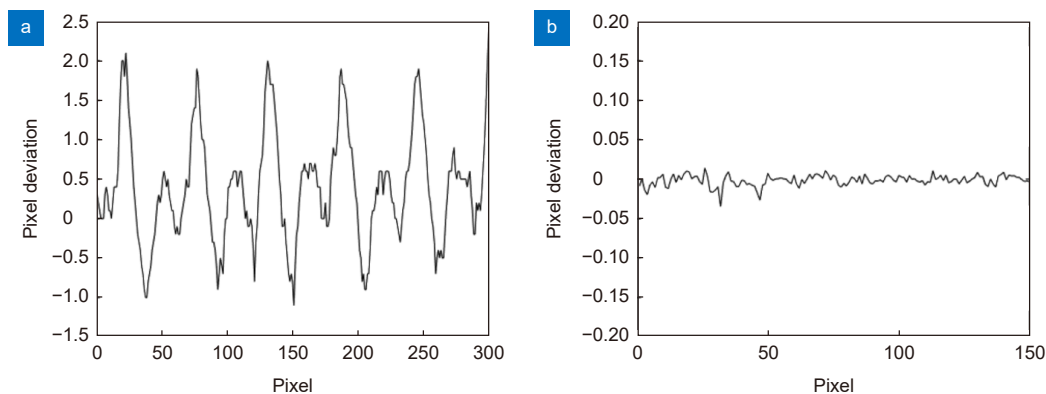


图 8 色差校正前后的像素偏差图。(a) 色差校正前的像素偏差图; (b) 色差校正后的像素偏差图

Fig. 8 Image of pixel deviation before and after chromatic aberration correction. (a) Image of pixel deviation before chromatic correction; (b) Image of pixel deviation after chromatic aberration correction

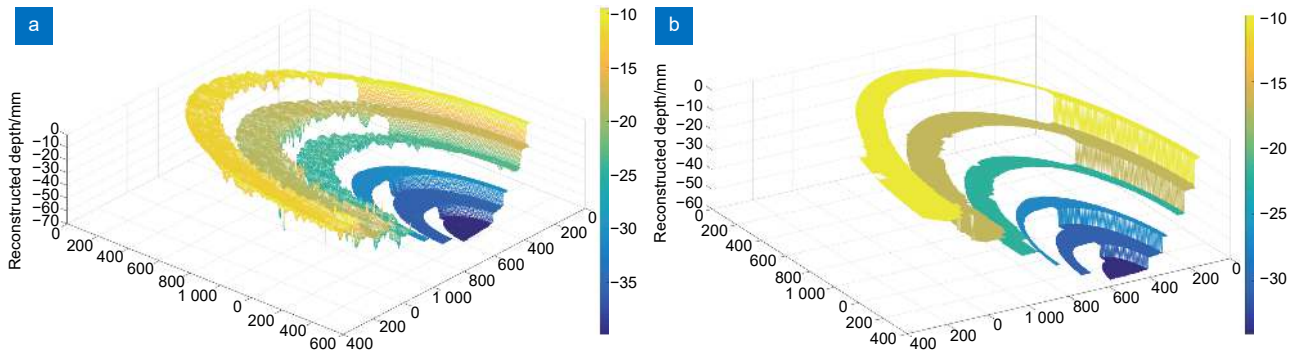


图 9 重建深度图。(a) 误差校正前深度图; (b) 误差校正后深度图

Fig. 9 Reconstructed depth map. (a) Depth map before error correction; (b) Error corrected depth map

表 1 复合台阶相邻台阶面的测量

Table 1 Measurement results of adjacent step surfaces of composite reflection steps (unit: mm)

Step surface	CMM measurement results	Measurement results before correction	Corrected measurement results	Absolute error before correction	Corrected absolute error
1-2	3.000	2.646	2.975	0.354	0.025
2-3	4.000	4.381	4.021	0.381	0.021
3-4	5.000	4.409	4.961	0.592	0.039
4-5	5.500	5.979	5.523	0.479	0.023
5-6	6.500	5.957	6.463	0.543	0.037



图 10 iPad 标识图

Fig. 10 Logo figure of iPad

所示。将 iPad 摆放至标定完成的测量位置处，经上述相同的处理过程，得到色差处理前后的镜面部分深度图。

其中，色差处理前后的镜面部分深度如图 11(a) 和 11(b) 所示，镜面和漫反射部分深度如图 11(c)

所示。

## 4 结 论

针对多光通道中色差和串扰等误差，提出了基于矩阵的串扰消除方法和绝对相位对应像素偏差的色差



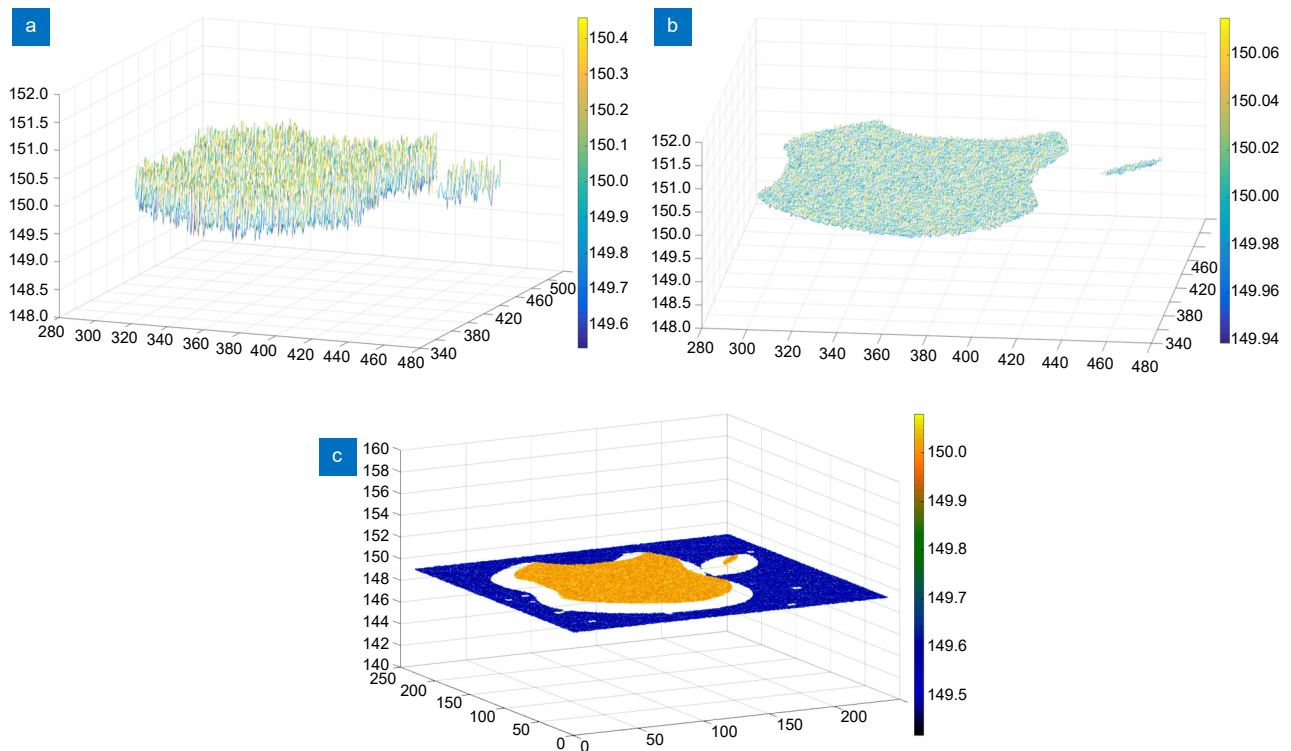


图 11 重建深度图。(a) 误差处理前镜面深度图; (b) 误差处理后镜面深度图; (c) iPad 标识重建深度图

Fig. 11 Reconstructed depth map. (a) Mirror depth map before error processing; (b) Mirror depth map after error processing; (c) iPad logo rebuild depth map

消除方法, 有效提高了复合表面三维测量系统的数据精度。实验结果表明, 色差和串扰校正使复合台阶相邻台阶面间距离的均方根误差从 0.479 mm 降低至 0.030 mm, 证明了所提色差和串扰消除方法的有效性。

## 参考文献

- [1] Van Der Jeught S, Dirckx J J J. Real-time structured light profilometry: a review[J]. *Opt Lasers Eng*, 2016, **87**: 18–31.
- [2] Fan S R, Fan M, Chen D H, et al. Micro/Nano profile measurement by structured illumination microscopy utilizing time-domain phase-shift technique[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(4): 200430.  
范松如, 范朦, 陈冬晖, 等. 基于时域相移技术的结构光三维微纳形貌检测方法[J]. *光电工程*, 2021, **48**(4): 200430.
- [3] Huang L, Idir M, Zuo C, et al. Review of phase measuring deflectometry[J]. *Opt Lasers Eng*, 2018, **107**: 247–257.
- [4] Zhao H Z, Gao N, Meng Z Z, et al. Method of simultaneous calibration of dual view 3D measurement system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, **48**(3): 200127.  
赵涵卓, 高楠, 孟召宗, 等. 双视角三维测量系统同时标定方法[J]. *光电工程*, 2021, **48**(3): 200127.
- [5] Chen Z Y, Zhao W C, Zhang Q C, et al. Shape measurement of stressed mirror based on stereoscopic phase measuring deflectometry[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(8): 190435.  
陈贞屹, 赵文川, 张启灿, 等. 基于立体相位测量偏折术的预应力薄镜面形检测[J]. *光电工程*, 2020, **47**(8): 190435.
- [6] Wang Y M, Zhang Z H, Gao N. Review on three-dimensional surface measurements of specular objects based on full-field fringe reflection[J]. *Opt Precis Eng*, 2018, **26**(5): 1014–1027.  
王月敏, 张宗华, 高楠. 基于全场条纹反射的镜面物体三维形貌测量综述[J]. *光学精密工程*, 2018, **26**(5): 1014–1027.
- [7] Guo Z N, Liu X H, Zhang Z H. Simulation and verification of three-dimensional shape measurement method for composite surface[J]. *Laser Optoelectron Progr*, 2020, **57**(19): 191202.  
郭志南, 刘小红, 张宗华. 复合表面三维形貌测量方法的仿真与验证[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(19): 191202.
- [8] Yue H M, Li R, Pan Z P, et al. Face structure light three-dimensional measuring system: 106197322B[P]. 2019-04-02.  
岳慧敏, 李绒, 潘志鹏, 等. 一种面结构光三维测量系统及其测量方法: 106197322B[P]. 2019-04-02.
- [9] Sandner M. Hybrid Reflectometry-3D shape measurement on scattering and reflective surfaces[C]//115th Annual Meeting of the DGO, 2014.
- [10] Zhang Z H, Liu X H, Guo Z N, et al. Shape measurement of specular/diffuse complex surface based on structured light[J]. *Infrared Laser Eng*, 2020, **49**(3): 0303015.  
张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(3): 0303015.
- [11] Zhang Z H, Li Y, Gao N, et al. Mirror surface object three-dimensional shape measurement method and device based on double-screen transmission display: 111765851B[P]. 2021-09-28.  
张宗华, 李月, 高楠, 等. 基于双屏透射显示的镜面物体三维形貌测量方法及装置: 111765851B[P]. 2021-09-28.
- [12] Zhang Z H, Xu Y J, Liu Y. Crosstalk reduction of a color fringe

- projection system based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Proc SPIE*, 2013, **9046**: 904607.
- [13] Huang P S, Hu Q, Jin F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3-D surface contouring[J]. *Opt Eng*, 1999, **38**(6): 1065–1071.
- [14] Hu Y S, Xi J T, Li E B, et al. A calibration approach for decoupling colour cross-talk using nonlinear blind signal separation network[C]//*Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 2004*, Brisbane, 2005: 265–268. <https://doi.org/10.1109/COMMAD.2004.1577541>.
- [15] Sun P P, Xue Q, Ji W Z, et al. Analysis and compensation of lateral chromatic aberration of structured light 3D measurement system[J]. *Opt Commun*, 2021, **488**: 126871.
- [16] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Compensating lateral chromatic aberration of a colour fringe projection system for shape metrology[J]. *Opt Lasers Eng*, 2010, **48**(2): 159–165.
- [17] Liu X H, Huang S J, Zhang Z H, et al. Full-field calibration and compensation of lateral chromatic aberration based on unwrapped phase[J]. *Proc SPIE*, 2016, **10021**: 1002119.

## 作者简介



刘硕 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学检测和三维成像等方面的研究。

E-mail: 604520226@qq.com



【通信作者】张宗华 (1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学三维测量、条纹投影轮廓术、相位测量偏折术等方面的研究。

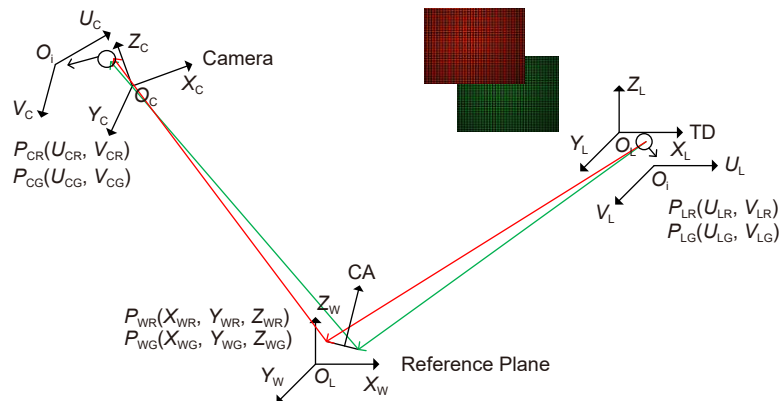
E-mail: zhzhang@hebut.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement

Liu Shuo<sup>1</sup>, Zhang Zonghua<sup>1,2\*</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>, Meng Zhaozong<sup>1</sup>, Gao Feng<sup>2</sup>



Color difference schematic of composite measurement system.

**Overview:** Due to the large dynamic range and high precision, the optical 3D measurement technology based on phase calculation is widely used in aerospace, automobile manufacturing, biomedicine, cultural relics protection, and other fields to measure a type of surface. For example, fringe projection profilometry and phase measurement deflectometry are used to measure diffuse and specular surfaces, respectively. With the development of advanced manufacturing technology, the measurement of one type of surface cannot meet the current situation. In the existing research on diffuse and specular composite surfaces, 3D topography restoration of large gradient and discontinuous composite surfaces has been achieved. The composite surface measurement system based on fringe projection and fringe reflection can obtain absolute phase rapidly through the multi-color channel of the camera. However, the multi-color channel of the camera not only realizes the rapid measurement but also introduces the errors such as crosstalk and chromatic aberration into the system, which limits the accuracy of 3D topography restoration of composite surface objects. Crosstalk mainly comes from the process of simultaneously shooting different color stripes projected by the projector to the diffuse part of the object and displayed by the transparent display screen on the mirror part of the object. The color difference mainly comes from the different color stripes displayed by the double screen transmission of the mirror part, and there is a phase difference between the absolute phase of the two colors. Therefore, this paper studies the crosstalk elimination method based on the matrix and the color difference elimination method of absolute phase corresponding pixel deviation. Based on the crosstalk matrix, the crosstalk matrix of the projector and the transparent screen is calculated respectively according to the color light intensity relationship between the color camera, projector, and transparent screen. The stripes of different colors projected on the diffuse surface and mirror of the composite object are separated, and the absolute phase of the two parts is obtained. The absolute phase in the horizontal and vertical directions of each color channel was obtained by color orthogonal stripes, and the relationship between phase difference and pixel deviation between color channels was established to complete the pixel matching of different color channels. Finally, the pixel matching points are converted into the matrix obtained by two-dimensional interpolation to realize the pixel deviation correction of each pixel point and eliminate the influence of color difference. The experimental results show that the proposed method reduces the root mean square error of the composite step from 0.479 mm to 0.030 mm, and improves the measurement efficiency and accuracy.

Liu S, Zhang Z H, Gao N, et al. Elimination method of crosstalk and chromatic aberration between color channels for composite surface measurement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220340; DOI: [10.12086/oe.2023.220340](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220340)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075147)

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; <sup>2</sup>Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield, HD1 3DH, UK

\* E-mail: zh Zhang@hebut.edu.cn