

基于概率密度函数的彩色相位测量轮廓术校正

边宸舒, 刘元坤*, 于馨

四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610065

摘要 在彩色相位测量轮廓术中, 光电器件多个光通道之间的颜色串扰、强度响应不均等因素的影响, 使得所获取的相移条纹图像失真, 因此采用传统的相位技术求解相位会产生极大的相位误差。从彩色条纹图像的数学模型出发, 分析了彩色成像器件所获取的红绿蓝三通道条纹图像特性, 提出一种两步校正方法: 第一步是基于三通道均值及标准差实现对各颜色通道图像强度的归一化处理; 第二步是使用概率密度函数曲线搜索失真后的实际相移量, 抑制相移量不准确对测量结果的影响。所提方法不需要对系统的耦合系数和相移偏移量进行预校正, 可实现简便、快速的相位误差补偿。模拟及实验结果验证了该方法的有效性。

关键词 测量; 相位测量轮廓术; 彩色条纹投影; 概率密度函数; 相位偏移量校正

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0712002

Correction of Color-Encoded Phase Measurement Profilometry Based on Probability Density Function

Bian Chenshu, Liu Yuankun*, Yu Xin

Department of Optoelectronic Science and Technology, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract In color-encoded phase measurement profilometry, the obtained phase shifting fringe pattern is distorted caused by the color crosstalk and uneven intensity responses among multiple optical channels in the optoelectronic device and other factors. Consequently, large phase errors arise when phases are solved by the classical phase technique. A two-step correction method is proposed by analyzing the characteristics of the fringe patterns in the red, green, and blue channels obtained by the color imaging device with a mathematical model of color-encoded fringe patterns. The first step is to normalize the intensities of the images in the three channels with their mean value and standard deviation. In the second step, the actual phase shifts after distortion are searched with the probability density function curve, and the influence of inaccurate phase shift on the measurement result is reduced. The proposed method does not need to pre-correct the coupling coefficients and phase shift offsets of the system, and it can achieve simple and fast phase error compensation. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words measurement; phase measurement profilometry; color-encoded fringe projection; probability density function; phase offset correction

1 引言

随着科学技术的发展, 人脸识别、游戏动作捕捉、工业元件检测等对三维(3D)测量技术的需求也

在不断上升。条纹投影轮廓术具有速度快、精度高、非接触和全场检测等优点, 近年来多次被用于物体 3D 轮廓的测量, 在工业检测、身份识别、文物保护等方面得到应用^[1-2]。根据相位恢复方式, 基于相位调

收稿日期: 2021-08-18; 修回日期: 2021-10-06; 录用日期: 2021-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)、四川省重大科学仪器设备专项(2019ZDZX0038)

通信作者: *lyk@scu.edu.cn

制和解调测量物体 3D 轮廓的条纹投影轮廓术可分为傅里叶变换轮廓术^[3-4]、相位测量轮廓术(PMP)^[5-8]、小波变换轮廓术^[9-10]和彩色编码数字条纹投影轮廓术(CDFPP)^[11-12]等。其中,CDFPP 将三幅单色条纹图编码在一幅彩色图像的 RGB 三个颜色通道中,由彩色相机获取变形的彩色条纹图,通过将捕获到的 RGB 三颜色通道中的条纹分离,得到三幅单色条纹图,因此实现了只需要一幅彩色图像的快速面形测量,该技术理论上既具有相移技术的高精度特点,又具有速度快的特性,因而得到了广泛的研究。但彩色相机存在颜色串扰、颜色强度响应不均、颜色耦合等问题,若直接采用传统 PMP 解调相位,必然导致相位误差,从而影响物体的 3D 面型重建及其测量精度。为此,Huang 等^[13]提出了通过三通道调制度的比例计算去补偿耦合效应对相位误差的影响,但需要使用一系列相移条纹图案去计算耦合系数。Pan 等^[14]通过建立原色与测量色的查找表(LUT)补偿颜色强度不均对相位误差的影响,并探索了从硬件层面对颜色串扰效应抑制的可行性,但建立 LUT 的过程比较繁琐。Hu 等^[15]使用 BCI(blind color isolation)算法在一定程度上抑制颜色串扰及强度不均造成的相位误差,但采用的滤波变换使得测量精度有所下降。Zhang 等^[16-17]则将 RGB 三通道与三频法结合在一起,三通道各自使用三个不同频率的条纹,以弱化颜色

强度不均对相位误差带来的影响,但该方法需要提前根据系统状况找出最适合系统的三个频率。Ma 等^[18]则通过频域滤波消除系统伽马非线性,通过希尔伯特变换降低颜色响应不均,再采用载频交叠重构干涉术消除相移量误差,但滤波处理会对测量精度有所影响。

为了提高彩色 PMP 的测量精度,本文提出一种新的颜色响应不均和颜色串扰校正方法。通过理论分析发现,若测量系统已进行伽马校正,受颜色响应不均和颜色串扰的影响,彩色相机所获取并分离的三帧相移条纹图的直流强度、调制度和相移量都不同于原投影条纹图。为此,应首先进行强度校正以调整直流强度和调制度,再通过评价基于截断相位的概率密度函数(PDF)来搜索最佳的相移量,从而实现系统校正。实验结果表明,所提方法切实可行,对于拓展彩色 PMP 的应用有明显的实际意义。

2 基本原理

2.1 彩色条纹投影轮廓术

图 1 所示的彩色 PMP 由投影仪投出一幅彩色条纹图,该图包含了三帧相移量为 $2\pi/3$ 的相移图像,三帧相移图像分别对应 RGB 三个通道,再由彩色相机采集受到待测物体高度调制后的变形条纹,进而分离出 RGB 三个通道。理想情况下三通道强度分别为^[19]

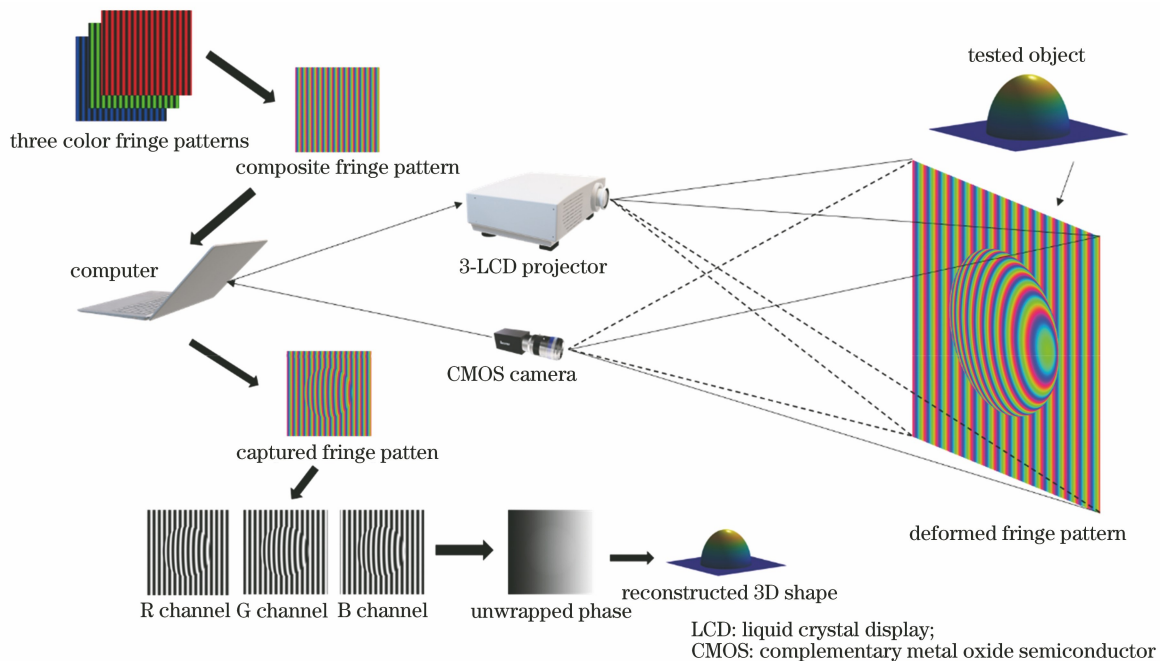


图 1 彩色 PMP 示意图

Fig. 1 Schematic of color-encoded PMP

$$I_r(x, y) = a + b \cos \varphi(x, y), \quad (1)$$

$$I_g(x, y) = a + b \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right], \quad (2)$$

$$I_b(x, y) = a + b \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{4\pi}{3} \right], \quad (3)$$

式中: a 为背景或直流值; b 为条纹图案的调制度; $\varphi(x, y)$ 为携带物体面形信息的相位分布。于是根据三帧相移计算方法可得

$$\varphi_T(x, y) = \arctan \left[\sqrt{3} \frac{I_b(x, y) - I_g(x, y)}{2I_r(x, y) - I_g(x, y) - I_b(x, y)} \right], \quad (4)$$

式中: $\varphi_T(x, y)$ 为截断相位, 通过相位展开可得到连续相位, 再结合已知系统参数即可得到待测物体的 3D 形貌。

2.2 色彩响应不均与颜色串扰误差分析

彩色 PMP 的相位误差大致有两类。一类是强度非线性响应引起的非线性相位误差, 此误差可以通过 Gamma 校正减小; 另一类是由颜色复用引起的, 表现为颜色串扰和色彩响应不均, 即 RGB 三种颜色的响应函数不一致以及三种颜色之间的颜色串扰。因此从相机所记录的单帧彩色图像中只能得到失真的三通道图像, 相机所记录的 $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 和 $I_b(x, y)$ ^[20] 可表示为

$$\begin{bmatrix} I_r(x, y) \\ I_g(x, y) \\ I_b(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{0r}(x, y)]^{\gamma_R} \\ [I_{0g}(x, y)]^{\gamma_G} \\ [I_{0b}(x, y)]^{\gamma_B} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$, 为整个系统的颜色耦合矩阵; γ_R 、 γ_G 和 γ_B 为 RGB 三通道各自的 Gamma 值; $I_{0r}(x, y)$ 、 $I_{0g}(x, y)$ 和 $I_{0b}(x, y)$ 为理想状况下的三通道强度分布。假设系统已经预先进行 Gamma 校正^[21], 即此时的三通道 Gamma 值均为 1, 那么将(5)式展开, 并以红通道为例, 可得

$$I_r(x, y) = C_{11} I_{0r}(x, y) + C_{12} I_{0g}(x, y) + C_{13} I_{0b}(x, y). \quad (6)$$

将(1)~(3)式代入(6)式, 可得

$$\begin{aligned} I_r(x, y) &= C_{11} [a + b \cos \varphi(x, y)] + \\ &C_{12} \left\{ a + b \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right] \right\} + \\ &C_{13} \left\{ a + b \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{4\pi}{3} \right] \right\} = \\ &a(C_{11} + C_{12} + C_{13}) + b \left(C_{11} - \frac{1}{2}C_{12} - \frac{1}{2}C_{13} \right) \times \end{aligned}$$

$$\cos \varphi(x, y) + \frac{\sqrt{3}}{2} b (C_{13} - C_{12}) \sin \varphi(x, y), \quad (7)$$

$$\text{令 } A_1 = a(C_{11} + C_{12} + C_{13}), B_{11} = b \left(C_{11} - \frac{1}{2}C_{12} - \frac{1}{2}C_{13} \right), B_{12} = \frac{\sqrt{3}}{2} b (C_{13} - C_{12}),$$

(7)式可以进一步简化为

$$I_r(x, y) = A_1 + B_{11} \cos \varphi(x, y) + B_{12} \sin \varphi(x, y) = A_1 + K_1 \cos[\varphi(x, y) + \theta_1], \quad (8)$$

式中: $K_1 = \sqrt{B_{11}^2 + B_{12}^2}$; θ_1 满足 $\cos \theta_1 = \frac{B_{11}}{\sqrt{B_{11}^2 + B_{12}^2}}$, $\sin \theta_1 = \frac{B_{12}}{\sqrt{B_{11}^2 + B_{12}^2}}$, 以此类推, 可得绿通道和蓝通道的简化表达式为

$$I_g(x, y) = A_2 + K_2 \cos[\varphi(x, y) + \theta_2], \quad (9)$$

$$I_b(x, y) = A_3 + K_3 \cos[\varphi(x, y) + \theta_3], \quad (10)$$

式中: A_2, A_3 为直流分量; K_2, K_3 为调制度; θ_2, θ_3 为附加相位。由此可知, $A_1 \neq A_2 \neq A_3, K_1 \neq K_2 \neq K_3, \theta_1, \theta_2$ 和 θ_3 亦不为理想三步 PMP 中的 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 标称值。据此, 可得经过系统耦合矩阵调制得到的 $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 和 $I_b(x, y)$ 表现为强度不一致和相移量不准, 如图 2 所示, 若直接使用满周期三步相移法势必引入相位误差。

2.3 相位误差校正

2.3.1 强度校正

由(8)~(10)式可知, 最终获取的 RGB 三通道条纹图像 $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 和 $I_b(x, y)$ 的直流项和调制度均不一致。因此本文采用了文献[22]的校正方法, 即分别计算出 $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 和 $I_b(x, y)$ 的灰度平均值 m_1, m_2, m_3 和均方差 d_1, d_2, d_3 , 对 R、G 通道的灰度值进行校正:

$$I'_r(x, y) = [I_r(x, y) - m_1] \frac{d_3}{d_1} + m_3, \quad (11)$$

$$I'_g(x, y) = [I_g(x, y) - m_2] \frac{d_3}{d_2} + m_3, \quad (12)$$

式中: $I'_r(x, y)$ 与 $I'_g(x, y)$ 分别为调整后的红、绿通道的强度表达式。

2.3.2 相移量校正

由(8)~(10)式可知, 存在三个相移量 θ_1, θ_2 和 θ_3 , 若令 $\phi(x, y) = \varphi(x, y) + \theta_1$, 则只存在两个相对相移量 $\theta_2 - \theta_1$ 和 $\theta_3 - \theta_1$, 但由于三帧条纹图之间的相移量已不再是标准的 $0, 2\pi/3$ 和 $4\pi/3$, 因此不能继续使用满周期三步相移法计算相位。为了方便叙述, 将校正后的条纹图 $I'_r(x, y)$ 与 $I'_g(x, y)$ 和强度校正基准条纹图 $I_b(x, y)$ 整理为

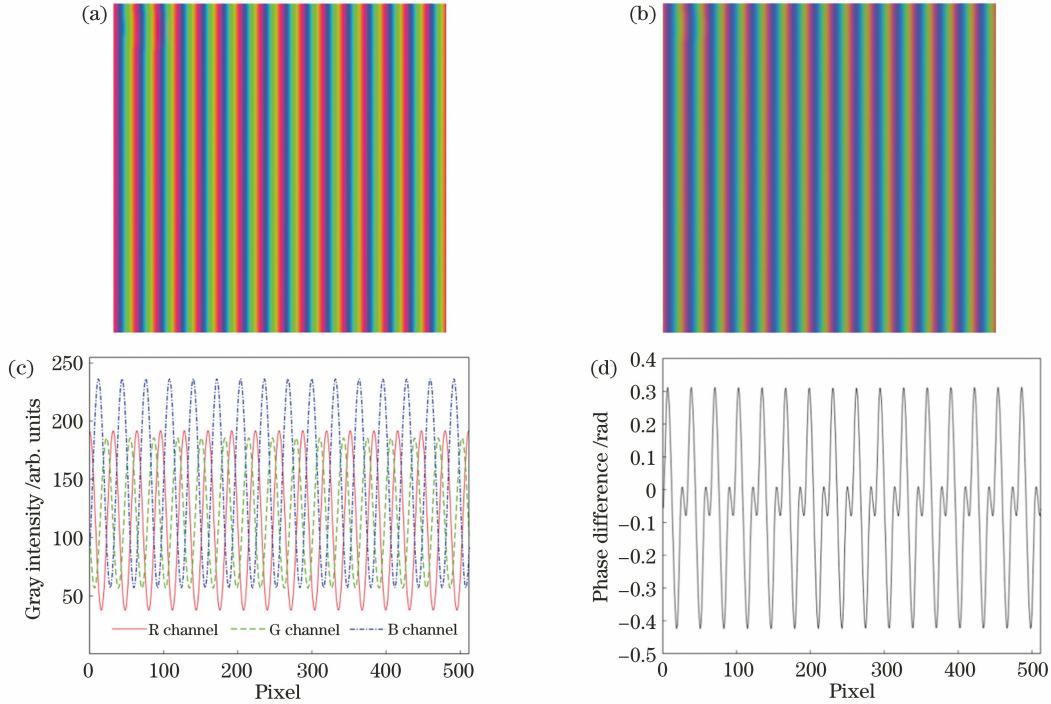


图 2 标准彩色图像与失真后图像的各项参数。(a)标准彩色图像;(b)失真彩色图像;(c)失真彩色图像某一横截面强度;(d)失真后与标准彩色图像的相位差

Fig. 2 Standard color image and the parameters of distorted image. (a) Standard color image; (b) distorted color image; (c) intensity of a cross-section of distorted image; (d) phase difference between standard color image and distorted image

$$I_m(x, y) = A + K \cos[\phi(x, y) + \vartheta_m], \quad (13)$$

式中: $m=1, 2, 3$, 分别代表 R, G, B 三个通道的强度值; $\vartheta_m = \theta_m - \theta_1$ 。将(13)式展开得

$$I_m(x, y) = A + K \cos \phi(x, y) \cos \vartheta_m - K \sin \phi(x, y) \sin \vartheta_m = A + C_1 \cos \vartheta_m - C_2 \sin \vartheta_m. \quad (14)$$

将 $I_2(x, y)$ 减去 $I_1(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 减去 $I_1(x, y)$, 即可得到

$$\begin{bmatrix} I_2(x, y) - I_1(x, y) \\ I_3(x, y) - I_1(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta_2 - 1 & -\sin \vartheta_2 \\ \cos \vartheta_3 - 1 & -\sin \vartheta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1(x, y) \\ C_2(x, y) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

求解 $C_1(x, y)$ 和 $C_2(x, y)$, 可得

$$C_1(x, y) = \frac{\begin{vmatrix} I_2(x, y) - I_1(x, y) & -\sin \vartheta_2 \\ I_3(x, y) - I_1(x, y) & -\sin \vartheta_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos \vartheta_2 - 1 & -\sin \vartheta_2 \\ \cos \vartheta_3 - 1 & -\sin \vartheta_3 \end{vmatrix}}, \quad (16)$$

$$C_2(x, y) = \frac{\begin{vmatrix} \cos \vartheta_2 - 1 & I_2(x, y) - I_1(x, y) \\ \cos \vartheta_3 - 1 & I_3(x, y) - I_1(x, y) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \cos \vartheta_2 - 1 & -\sin \vartheta_2 \\ \cos \vartheta_3 - 1 & -\sin \vartheta_3 \end{vmatrix}}. \quad (17)$$

由此, 可求得截断相位 $\phi_T(x, y)$ 为

$$\phi_T(x, y) = \arctan \frac{C_2(x, y)}{C_1(x, y)}. \quad (18)$$

由此可见, 若能得到两个相对相移量 ϑ_2 和 ϑ_3 , 则可得到校正后的高精度相位分布, 而该相移量也不再是原始的 $2\pi/3$ 和 $4\pi/3$, 若按照三步相移公式进行计算, 则必然引入相位误差。前期研究表明, 相移不准引入的相位误差主要表现为二倍频误差, 而基于截断相位的 PDF 则能准确地反映该截断相位是否存在非线性误差^[23], 因此本文引入 PDF, 尝试不同相移量组合, 计算其对应截断相位的 PDF 曲线, 再找到使得 PDF 的均方根 (RMS) 值最小时的相移量组合, 此时相移量组合即为系统相移量。不同相移量组合对应的 PDF 的 RMS 值如图 3 所示。整个相位偏移量的搜索校正过程如图 4 所示, 图中的取值范围和搜索步长可根据实际情况调整。最后根据(16)~(18)式计算连续相位。

3 计算机模拟

假设每个通道均已进行 Gamma 校正, 即 Gamma 值均为 1, 同时假设待投影的三幅条纹的背景或直流值 $a=0.5$, 条纹调制度 $b=0.5$, 条纹周期 $f=16$ 。两个系统的颜色耦合矩阵分别为

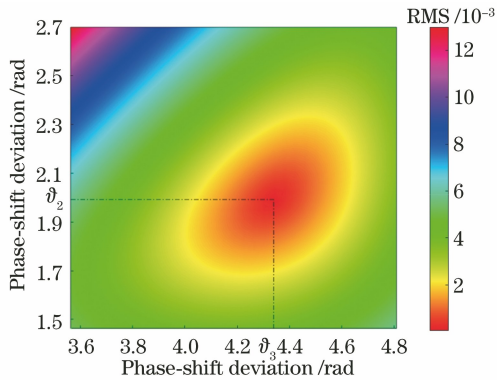


图 3 PDF 的 RMS 值与相移量值 ϑ_2 和 ϑ_3 的关系

Fig. 3 RMS of PDF varying with phase-shift deviations ϑ_2 and ϑ_3

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0.50 & 0.10 & 0.20 \\ 0.20 & 0.60 & 0.15 \\ 0.30 & 0.20 & 0.70 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0.70 & 0.15 & 0.05 \\ 0.20 & 0.65 & 0.10 \\ 0.10 & 0.20 & 0.85 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

假定待测物体是一个高度为 30 mm 的半球,如图 5(a)所示。生成的一幅大小为 512 pixel \times 512 pixel 的 RGB 彩色正弦光栅图样如图 5(b)所示,当颜色耦合矩阵为 \mathbf{C}_1 时,经过该系统调制后的图像如图 5(c)所示。

用本文方法校正图 5(c)中三通道的振幅,分别

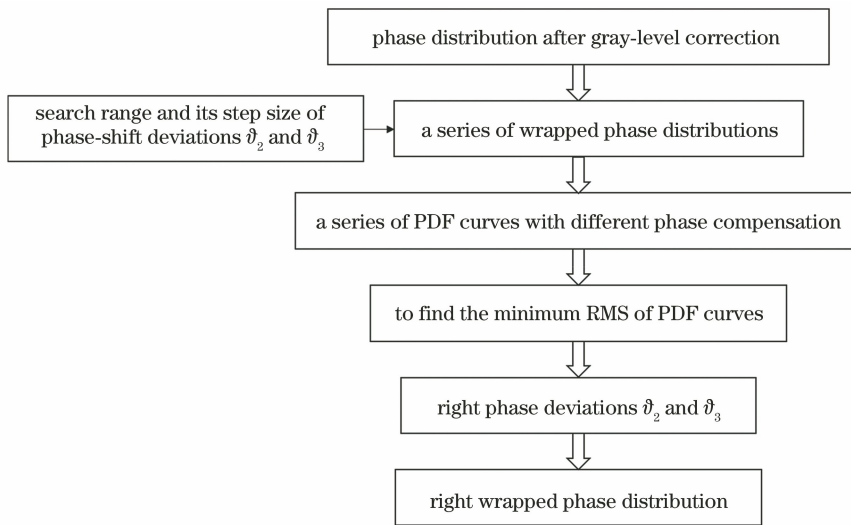


图 4 相移量校正流程示意图

Fig. 4 Correction process of phase-shift deviation

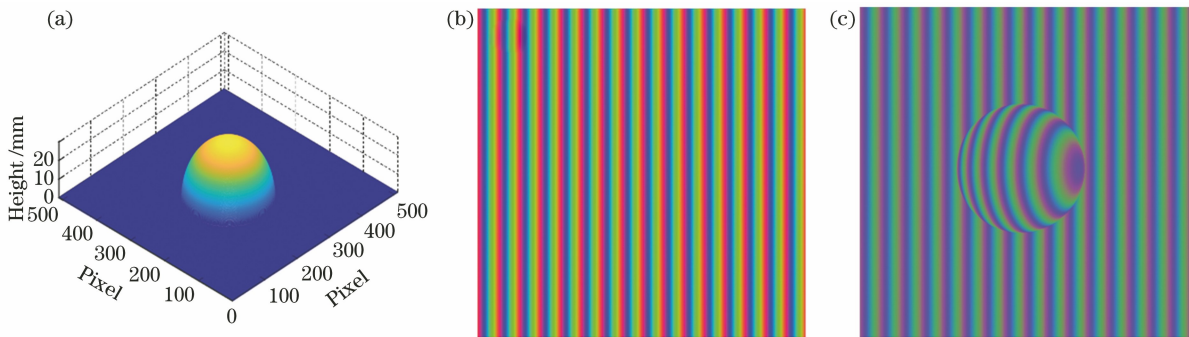


图 5 测量系统模拟。(a)待测物体;(b)标准彩色正弦光栅;(c)调制后的光栅

Fig. 5 Measurement system simulation. (a) Object to be measured; (b) standard color sinusoidal grating; (c) modulated grating

绘制校正前后第 250 行横截面的强度图像,如图 6(a)、(b)所示。

由图 6(a)可知,三通道的振幅出现了明显的变化,使用文献[22]中方法校正了三通道的振幅后,其

强度变化如图 6(b)所示。然后使用本文方法对其相移偏移量进行校正,算出 $\theta_2 - \theta_1$ 和 $\theta_3 - \theta_1$ 的偏移量分别为 2.2405 rad、4.6262 rad,校正前后相位误差如图 7 所示。

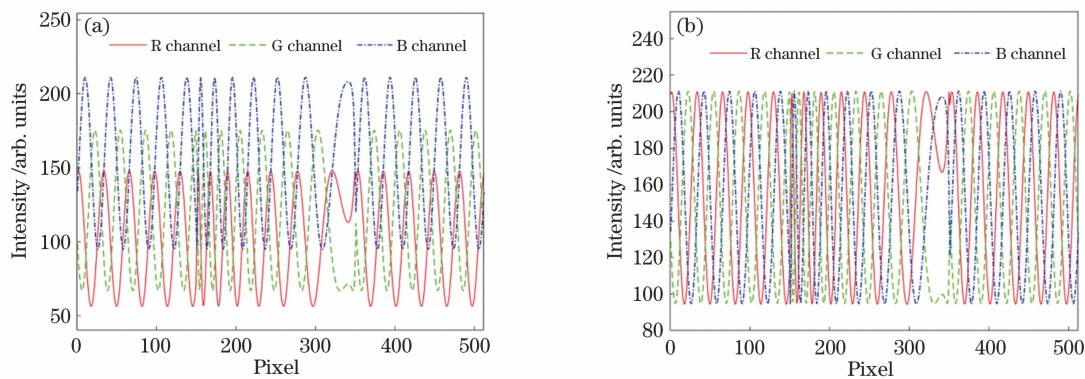


图 6 第 250 行横截面强度。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 6 Intensity of 250th cross-section. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

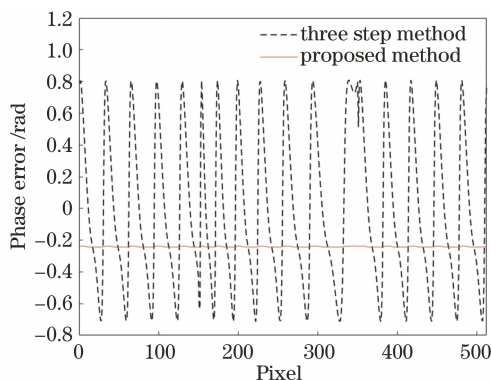


图 7 第 250 行相位误差结果比较

Fig. 7 Phase error comparison of 250th row

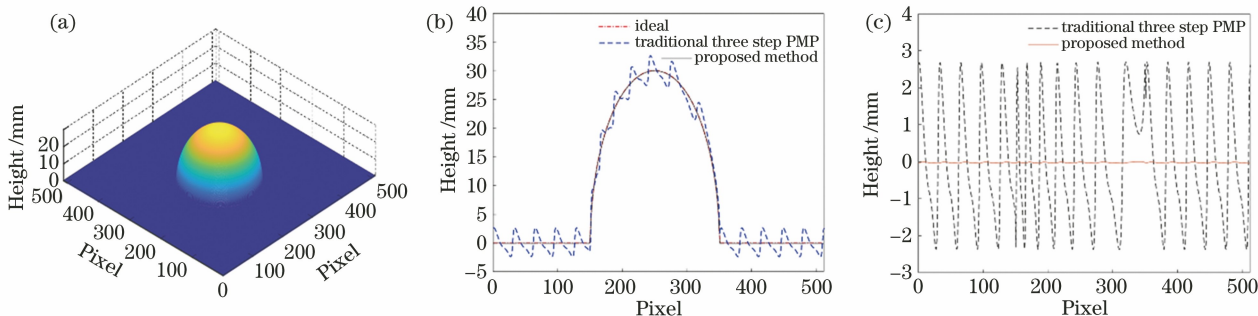


图 8 测量结果。(a)半球表面还原结果;(b)第 250 行横截面还原结果比较;(c)第 250 行横截面复原高度差比较

Fig. 8 Measurement results. (a) Reconstructed result of hemisphere surface; (b) comparison of reconstructed results of 250th cross-section; (c) comparison of reconstructed height difference of 250th cross-section

4 实 验

整个测量系统如图 1 所示,包括一台分辨率为 1024 pixel × 768 pixel 的 3-LCD 投影仪 (EPSON CB-X05),一台分辨率为 2048 pixel × 2448 pixel 的 CMOS 相机 (Baumer VCXU-51C),以及待测物体。计算机生成的待投影彩色条纹图像中三通道相移值分别为 0 、 $2\pi/3$ 和 $4\pi/3$ 。

首先根据文献[21]所提方法对每个颜色通道进行 Gamma 预校正,所得三通道的 Gamma 值分别为

由此可见,相位误差得到了有效抑制,由(16)式可知,校正是以 $I_1(x, y)$ 为基准,校正后的相位误差有一个整体的偏移,此偏移来自 $I_1(x, y)$ 与理想相位的偏移。根据校正后相位还原的结果如图 8 所示,图 8(a)为校正后的 3D 面型,图 8(b)、(c)为校正前、后第 250 行的结果对比。

采用调制颜色矩阵 C_2 再次进行模拟,可得此时 $\theta_2 - \theta_1$ 和 $\theta_3 - \theta_1$ 的偏移量分别为 1.7787 rad 和 3.9204 rad,失真条纹图、重建结果及校正对比如图 9 所示。

$\gamma_R = 2.4516$ 、 $\gamma_G = 2.5806$ 、 $\gamma_B = 2.4595$ 。相机拍摄的参考平面如图 10(a)所示,其 RGB 三通道分离后的图像如图 10(b)~(d)所示。图 11 的数据来自图 10(a)中线段,图 11(a)为校正前灰度强度,可见 RGB 三通道的强度明显不均匀。按照本文校正方法:第一步校正三通道强度,校正结果如图 11(b)所示,可见校正后三通道强度基本相当;第二步计算得到 $\theta_2 - \theta_1$ 和 $\theta_3 - \theta_1$ 的偏移量分别为 1.7917 rad 和 3.7422 rad。此外,投影并采集 18 步灰度相移条纹图像,将其相位结果作为真值,用于评价所提方法的

相位误差,结果如图 12 所示,校正后相位误差的 RMS 值为 0.0692,而校正前相位误差的 RMS 值为

0.2370,这表明本文所提出的方法能很好地抑制颜色引起的相位误差。

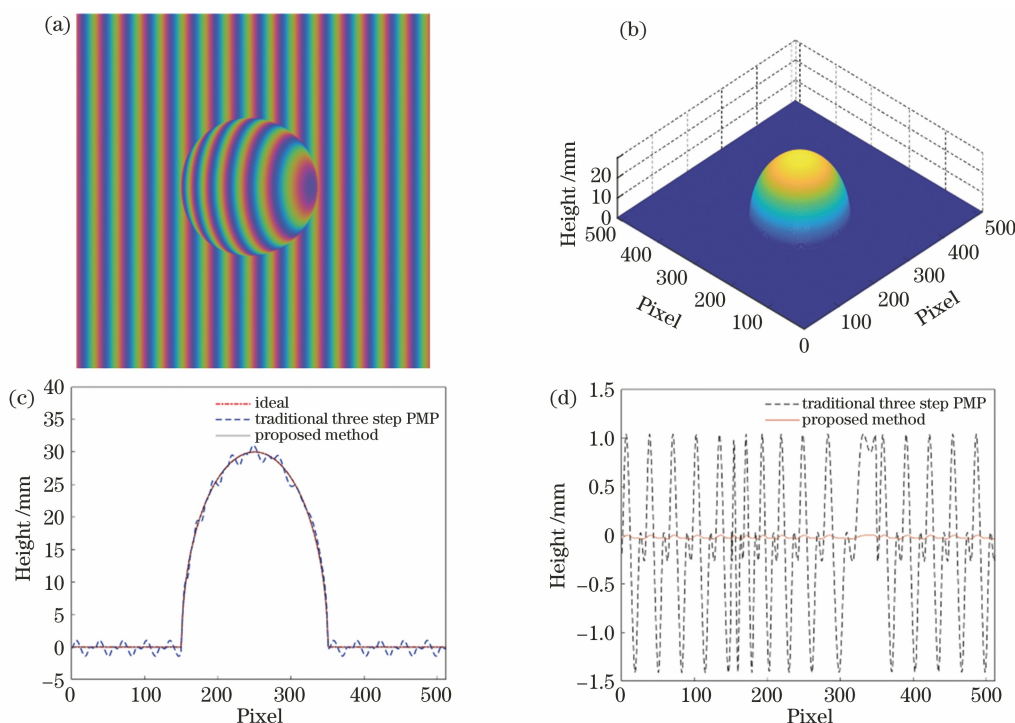


图 9 颜色矩阵为 C_2 的还原结果。(a)调制后图像;(b)半球还原结果;(c)第 250 行横截面复原结果比较;(d)第 250 行横截面复原高度差比较

Fig. 9 Reconstructed results for color matrix C_2 . (a) Modulated image; (b) reconstructed result of hemisphere; (c) comparison of reconstructed results of 250th cross-section; (d) comparison of reconstructed height difference of 250th cross-section

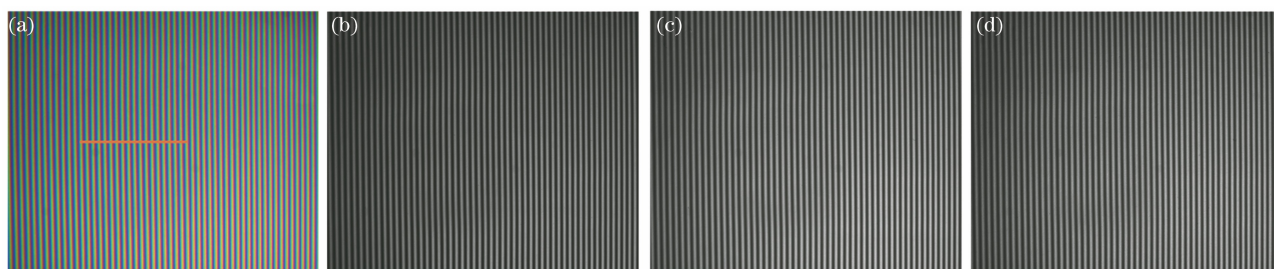


图 10 三通道校正前参考平面条纹图。(a)捕获的平面彩色编码条纹图案;(b)红色通道灰度条纹图案;(c)绿色通道灰度条纹图案;(d)蓝色通道灰度条纹图案

Fig. 10 Reference plane fringe patterns of three channels before correction. (a) Captured plane color-encoded fringe pattern; (b) red channel fringe pattern; (c) green channel fringe pattern; (d) blue channel fringe pattern

从图 12 中还可以看出,由于 θ_1 不为零,因此最终计算出的相位与真值相比有明显的整体偏差,通过系统标定可以减小偏差。对待测物体的测量结果如图 13 所示。图 13(a)为采用 18 步相移相位计算方法^[24]得到的理想还原结果,图 13(b)为校正前还原图像,图 13(c)为仅进行强度校正后的还原结果,图 13(d)为强度校正和相移校正后的还原结果。图 14 为图 13 中 4 种还原情况表面的剖面线对比,其

中,校正后的曲线与理想曲线有整体偏移,这是由 θ_1 不为零引起的;同时还注意到曲线在 2300 pixel 左右出现明显的起伏,这是由投影光轴与成像光轴的夹角产生的图像阴影所致;在物体最高处附近,两步校正后的还原结果不及仅进行强度校正后的还原结果,其原因是本文的相位校正是全局校正,会出现局部过校正的情况。但就整体而言,两步校正后残余误差会更小。

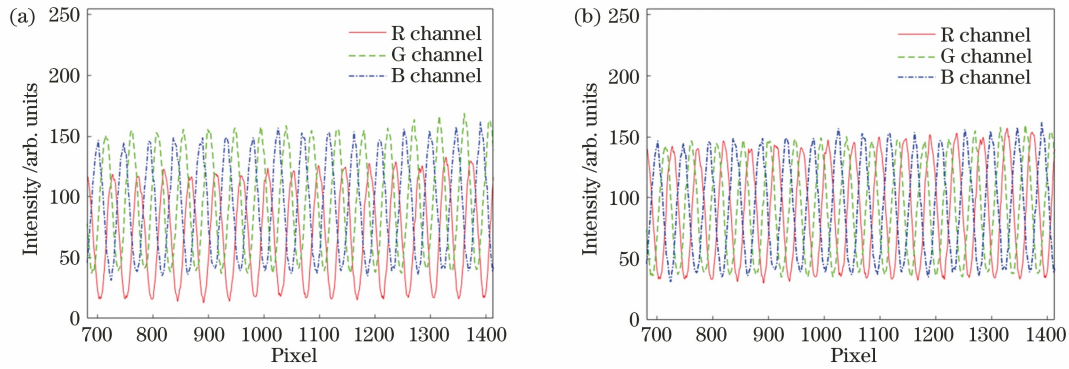


图 11 参考平面某横截面的测量结果。(a)调整前三通道灰度值;(b)调整后三通道灰度值

Fig. 11 Measurement results of a cross-section of reference plane. (a) Gray intensity of three channels before adjustment; (b) gray intensity of three channels after adjustment

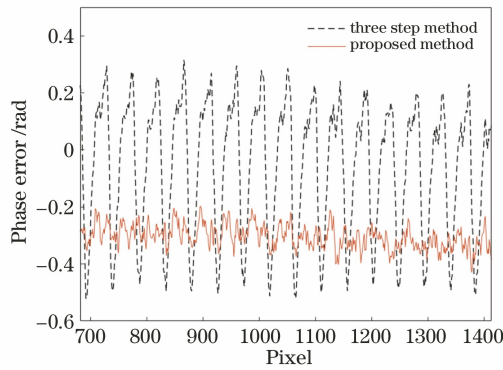


图 12 参考平面某横截面的相位误差校正结果比较
Fig. 12 Phase error correction result comparison of a cross-section of reference plane

5 结 论

对彩色条纹 3D 测量系统中的误差源进行了深入分析,将系统误差校正分为两个步骤:1)通过分析条纹强度均值与方差来校正由三通道强度不均引起的相位误差问题;2)基于 PDF 曲线校正颜色串扰导致的相移非标称的问题。所提方法在 RGB 三通道的 Gamma 值经预校正后,不要求取系统的颜色耦合系数,便能够同时补偿颜色串扰和三通道颜色强度不均等带来的相位误差。仿真和实验结果表明,所提方法可有效抑制相位误差,提高测量精度。从实验结果来看,所提方法能得到较好的结果,但与

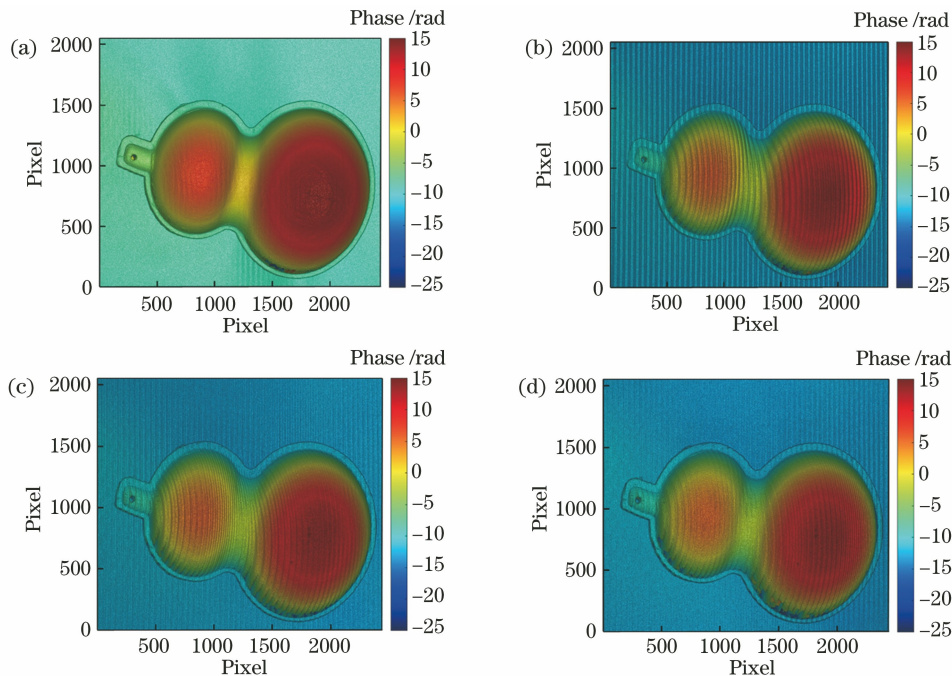


图 13 彩色条纹投影测量结果。(a)理想相位分布;(b)校正前相位分布;(c)强度校正后相位分布;(d)相移不准校正后相位分布
Fig. 13 Results of color fringe pattern measurement. (a) Ideal phase distribution; (b) phase distribution before correction; (c) phase distribution after intensity correction; (d) phase distribution after phase-shift deviation correction

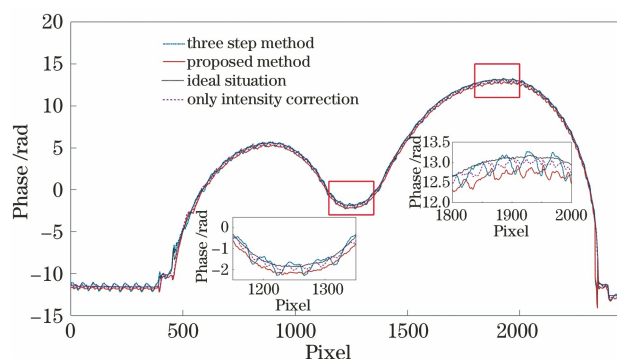


图 14 相位分布横截面比较

Fig. 14 Comparison of phase distribution cross-section

单色相移结果相比,处理结果仍然有残留误差,这是由强度校正不完全引起的,下一步将继续探索更准确的强度校正方法。

参 考 文 献

- [1] Wen H, Meng Z Z, Gao N, et al. Error measurement and compensation of multi-channel fringe projection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0712004.
温豪, 孟召宗, 高楠, 等. 多光通道条纹投影系统误差测量与补偿[J]. 光子学报, 2020, 49(7): 0712004.
- [2] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- [3] Suresh V, Zheng Y, Li B W. PMENet: phase map enhancement for Fourier transform profilometry using deep learning [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(10): 105001.
- [4] Liu Y H, Zhang Q C, Zhang H H, et al. Improve temporal Fourier transform profilometry for complex dynamic three-dimensional shape measurement [J]. Sensors, 2020, 20(7): 1808.
- [5] El-Morsy M A. A novel algorithm based on sub-fringe integration method for direct two-dimensional unwrapping phase reconstruction from the intensity of one-shot two-beam interference fringes[J]. Applied Physics B, 2019, 125(11): 1-16.
- [6] Li X X, Zhang W H. Phase error analysis and compensation for motion in high-speed phase measurement profilometry [J]. OSA Continuum, 2021, 4(4): 1191-1206.
- [7] An H H, Cao Y P, Li H M, et al. A composite grating phase-measuring profilometry based on mixed filtering window [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604007.
安海华, 曹益平, 李红梅, 等. 一种基于混合滤波窗口的复合光栅相位测量轮廓术[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604007.
- [8] Yang C Z, Cao Y P. Real-time phase measuring profilometry based on single-shot four-grayscale fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 1812003.
杨超智, 曹益平. 基于单帧四灰阶条纹投影的实时相位测量轮廓术 [J]. 光学学报, 2021, 41(18): 1812003.
- [9] Yu C, Li S K, Wang X Z. Fast three-dimensional shape measurement technique by means of wavelet transform based on parallel computing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512005.
余程, 李思坤, 王向朝. 基于并行小波变换的快速三维面形测量技术 [J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512005.
- [10] Zhang C, Chen W J. Method for improving measurement accuracy of wavelet transform profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712002.
张诚, 陈文静. 提高小波变换轮廓术测量精度的方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712002.
- [11] Yee C K, Yen K S. Single frame profilometry with rapid phase demodulation on colour-coded fringes [J]. Optics Communications, 2017, 397: 44-50.
- [12] Wang Y W, Liu L, Wu J, et al. Hilbert transform-based crosstalk compensation for color fringe projection profilometry [J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2199-2202.
- [13] Huang P S, Hu Q Y, Jin F, et al. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring [J]. Optical Engineering, 1999, 38(6): 1065-1071.
- [14] Pan J H, Huang P S, Chiang F P. Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement [J]. Optical Engineering, 2006, 45(1): 013602.
- [15] Hu Y, Xi J, Chicharo J, et al. Blind color isolation for color-channel-based fringe pattern profilometry using digital projection [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(8): 2372-2382.
- [16] 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.
- [17] Zhang Z H, Towers D P, Towers C E. Snapshot color fringe projection for absolute three-dimensional metrology of video sequences [J]. Applied Optics,

- 2010, 49(31): 5947-5953.
- [18] Ma S D, Zhu R H, Quan C G, et al. Blind phase error suppression for color-encoded digital fringe projection profilometry[J]. Optics Communications, 2012, 285(7): 1662-1668.
- [19] Wu M X, Wu G X, Zhang S M, et al. Point-to-point compensation method for color coupling and imbalance in color-fringe pattern profilometry [J]. Journal of Optics, 2020, 22(9): 095702.
- [20] Zhu Q, Zhao H, Zhang C W, et al. Point-to-point coupling and imbalance correction in color fringe projection profilometry based on multi-confusion matrix[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115202.
- [21] Yu X, Liu Y K, Liu N Y, et al. Flexible gamma calculation algorithm based on probability distribution function in digital fringe projection system[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 32047-32057.
- [22] Li W S, Su X Y, Su L K, et al. Phase-measuring profilometry in non-constant environmental light[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(5): 617-623.
李万松, 苏显渝, 苏礼坤, 等. 非恒定环境光条件下的相位测量剖面术 [J]. 光学学报, 2000, 20(5): 617-623.
- [23] Liu Y H, Zhang Q C, Liu Y K, et al. High-speed 3D shape measurement using a rotary mechanical projector[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7885-7903.
- [24] Li Y, Su X Y. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(11): 76-79.
李勇, 苏显渝. 用于可靠性导向相位展开的快速算法 [J]. 光电工程, 2005, 32(11): 76-79.