

# 基于自适应条纹投影的彩色物体三维形貌测量

陈超<sup>1\*\*</sup>, 高楠<sup>1</sup>, 王向军<sup>2</sup>, 张宗华<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>河北工业大学机械工程学院, 天津 300130;

<sup>2</sup>天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 针对三维形貌测量技术中彩色物体表面反射率的非均匀性影响测量结果的问题, 提出一种基于自适应条纹投影的三维形貌测量技术, 该方法可避免彩色物体表面反射率非均匀的影响, 提高系统的测量精度。彩色相机采集 RGB 光强图像, 并根据物体表面颜色的反射特性计算每个像素点的最优投射光强和颜色; 采集水平和垂直的正弦条纹序列, 利用计算所得绝对相位值将相机图像坐标系中每一个像素点的最优投射光强和颜色映射到投影仪像素坐标系; 投射自适应条纹序列进而测量彩色物体的三维形貌。实验结果表明, 该方法能够有效测量彩色物体三维形貌, 具有很高的测量精度。

**关键词** 机器视觉; 自适应条纹投影; 三维形貌测量; 彩色物体; 相位测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815008

## Three-Dimensional Shape Measurement of Colored Objects Based on Adaptive Fringe Projection

Chen Chao<sup>1\*\*</sup>, Gao Nan<sup>1</sup>, Wang Xiangjun<sup>2</sup>, Zhang Zonghua<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** An adaptive fringe projection method is proposed to avoid measurement errors, which is caused by non-uniform surface reflectivity of colored objects, and to enhance accuracy of a 3D measurement system. RGB images are captured by a camera, and optimal color and intensities at each pixel are calculated according to reflectivity characteristics. A set of horizontal and vertical fringe patterns are captured and the corresponding absolute phase are calculated. Optimal color and intensities at each pixel in the camera pixel coordinate system are transformed into the projector coordinate system by using calculated absolute phase. The adapted fringe patterns are projected by projector for measuring object's 3D shape. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively measure the 3D shape of colored objects and has high measurement accuracy.

**Key words** machine vision; adaptive fringe projection; three-dimensional shape measurement; colored objects; phase measurement

**OCIS codes** 150.0155; 120.4630; 120.4640; 120.5050; 120.5060

## 1 引 言

基于条纹投影的三维形貌测量技术已在检测、逆向工程和医疗诊断等方面得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>, 该技术凭借高精度、高速、全场和非接触等优点, 已成为目前非接触三维测量方法中的主流方法。其通过向被测物体表面投射正弦条纹序列, 处理经被测物

体表面调制的变形条纹图, 得到携带物体高度信息的相位值, 再经过系统标定后恢复物体的三维信息。

一般情况下, 基于条纹投影的测量技术针对的是表面反射率变化范围较小的物体。但在工程应用中, 存在许多表面反射率非均匀的彩色物体。如果投射高亮度的条纹图像, 相机所采集的物体表面高反射率的区域产生饱和, 进而产生相位和测量

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2018-01-13; 录用日期: 2018-03-01

基金项目: 重大科学仪器设备开发重点专项(2017YFF0106404)、国家自然科学基金(51675160)、河北省应用基础研究计划重点基础研究资助项目(15961701D)、河北省高层次人才资助项目(GCC2014049)、河北省人才工程培养经费资助项目(A201500503)、河北工业大学联合培养博士研究生项目(2017GN0002)

\* E-mail: zhzhangtju@hotmail.com; \*\* E-mail: chenchaohebut@hotmail.com

误差;相反,如果投射低亮度的条纹图像,所采集的物体表面低反射率的颜色区域会产生较低的信噪比,同样会产生相位和测量误差。因此,国内外学者针对上述问题进行了大量研究,主要分为两类<sup>[4]</sup>,一类是高动态范围方法,另一类是调节投射光强方法。

Zhang 等<sup>[5]</sup>通过采集不同曝光时间下的相移条纹序列,在每个像素点处选择亮度最大但不饱和的亮度值合成最终的相移条纹序列,避免了在反射率较高和较低的区域出现条纹图像饱和和低信噪比,但是需要多次曝光来采集图像,消耗时间较长且曝光时间不能定量确定;Feng 等<sup>[6]</sup>根据被测物体表面的反射率绘制直方图,将直方图中波谷位置作为最佳曝光时间,解决了自适应曝光问题,但该方法需要采集多幅条纹图像;Zhao 等<sup>[7]</sup>提出的快速高动态范围条纹投影方法能够使投影仪的刷新频率达到 700 Hz;Jiang 等<sup>[8]</sup>提出的高动态范围实时测量方法使用反向条纹补全原始条纹,不需要改变曝光时间,但与其他方法相比,稳健性较差。

Waddington 等<sup>[9-10]</sup>提出一种使用最大输入光强避免图像饱和的方法,由于使用全局的投射光强,该方法能够使得低反射率区域的信噪比降低,该团队后来提出将最大投射光强和投射条纹图像结合的方法合成条纹序列,但需要复杂的预标定<sup>[11]</sup>;Li 等<sup>[12]</sup>提出一种根据局部表面反射特性调节最大投射光强的方法,在高反射率的区域投射低强度的光强值,在低反射率的区域投射高强度的光强值;Lin 等<sup>[13-14]</sup>提出一种自适应条纹投影避免图像饱和的方法,该方法在建立相机像素坐标系统和投影仪像素坐标系统关系的基础上,使用单应性矩阵,但当被测表面不是平面时,该方法并不能精确地建立这种对应关系。

尽管上述两类方法在一定程度上解决了非均匀反射率物体表面形貌的测量,但仍存在两个问题:一方面,没有考虑被测物表面的颜色对投射光颜色的影响;另一方面,需要采集大量的光强图像计算最优的投射光强。因此,本文提出一种基于自适应条纹投影测量彩色物体的三维测量技术,该方法依据被测物体表面颜色的反射特性计算最优的投射光强和颜色,从而提高三维形貌测量的精度。

## 2 基本原理

### 2.1 相位计算

由于相移方法能给出精确的相位值,本文采用标准四步相移法计算折叠相位。相机采集的 4 幅彼

此间有  $\pi/2$  相位移的条纹图光强表达式为

$$I_t(u^c, v^c) = I^*(u^c, v^c) + I^{**}(u^c, v^c) \times \cos[\varphi(u^c, v^c) + t \times \pi/2], t = 0, 1, 2, 3, \quad (1)$$

式中  $(u^c, v^c)$  为相机的像素坐标,  $I^*(u^c, v^c)$  为背景光强,  $I^{**}(u^c, v^c)$  为条纹对比度,  $\varphi(u^c, v^c)$  为待计算的相位值,其包含被测物体的高度信息。通过(1)式可得

$$\varphi'(u^c, v^c) = \arctan \left[ \frac{I_3(u^c, v^c) - I_1(u^c, v^c)}{I_0(u^c, v^c) - I_2(u^c, v^c)} \right], \quad (2)$$

(2)式计算出的包裹相位主值  $\varphi'(u^c, v^c)$  在一个周期内具有唯一值,但在整个测量场中呈锯齿状周期分布。本文使用最佳三条纹选择方法<sup>[15]</sup>进行相位展开,获得连续的绝对相位值  $\varphi(u^c, v^c)$ 。

### 2.2 自适应条纹投影

本文方法的测量流程如图 1 所示。1)投影仪投射红、绿、蓝三幅光强图像到被测物表面,采集经被测物表面反射的图像,并根据物体表面颜色的反射特性计算每一个像素点的最优投射光强值和颜色值;2)分别投射水平和垂直的条纹序列,采集经被测物表面调制的变形条纹图像,使用最佳三条纹选择的方法计算绝对相位,将最优投射光强和颜色值映射到投影仪像素坐标系统;3)投射自适应的条纹序列测量表面反射率非均匀的彩色物体。

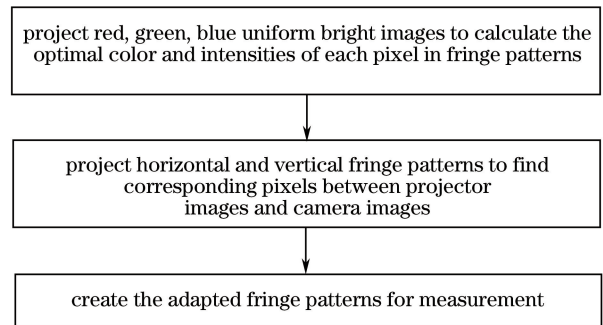


图 1 本文方法的流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed method

#### 2.2.1 计算最优投射颜色和光强

使用表面有红、绿、蓝三色区域的平板验证被测物表面的颜色对投射光颜色的影响,如图 2 所示。投影仪分别投射红、绿、蓝三颜色的正弦条纹到平板表面[图 2(a)],采集图像后绘制某一行的剖面图,结果如图 2(b)~(d)所示。红、绿、蓝条纹分别在红、绿、蓝颜色区域内得到最高的条纹调制度,而在其他区域得到较低的条纹调制度。因此,要精确测量复杂颜色表面的物体,必须确定最优的投射光颜色,以保证获得最高的条纹调制度。

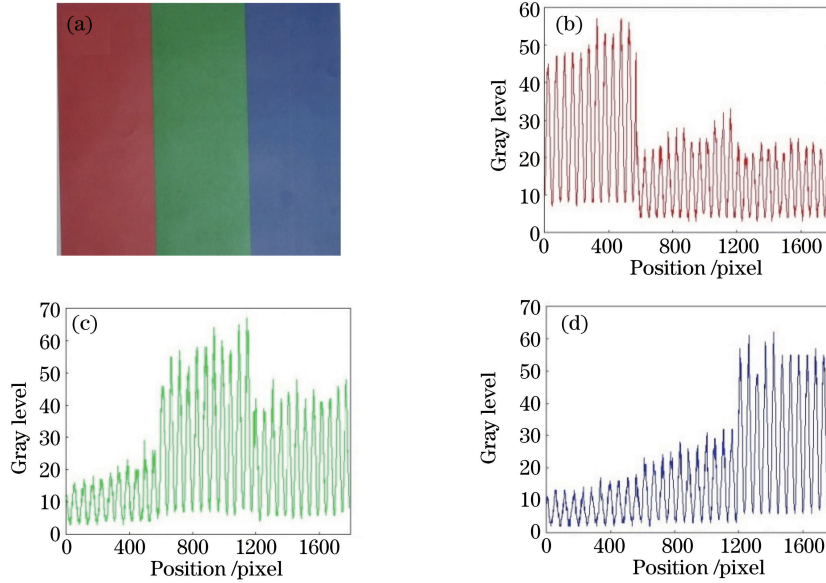


图 2 平板和投射红、绿、蓝条纹在平板上的剖面图。(a)平板;(b)红色条纹;(c)绿色条纹;(d)蓝色条纹

Fig. 2 Flat board and profile of projected red, green, blue fringe patterns on the board.

(a) Flat board; (b) red fringe; (c) green fringe; (d) blue fringe

分别投射红、绿、蓝三幅光强图像到被测物体表面,采集经被测物表面反射的图像。光强最大的颜色就是该点的最优投射颜色,数学表达式为

$$C(u^c, v^c) = \{l \mid \text{Max}[L_l(u^c, v^c)], L_l(u^c, v^c) < 255\}, l = R, G, B, \quad (3)$$

式中  $L_l(u^c, v^c)$  为相机采集的不同颜色通道的光强值,  $C(u^c, v^c)$  为该点的最优投射颜色, 投射光强值是任意的, 只需保证图像不发生饱和即可。

自适应条纹投影测量系统由相机和投影仪组成, 如图 3 所示。投影仪投射光强图像到被测物表面, 相机从另一角度采集经被测物表面反射的光强图像。进入相机的光由三部分组成: 经被测物表面反射的环境光  $r(u^c, v^c)I^r(u^c, v^c)$ ; 直接进入相机的环境光  $I^e(u^c, v^c)$ ; 经被测物表面反射的光强图像  $r(u^c, v^c)G_l(u^p, v^p)$ 。相机拍摄到的图像可利用公式表示为

$$L_l(u^c, v^c) = kr(u^c, v^c) [I^r(u^c, v^c) + G_l(u^p, v^p)] + kI^e(u^c, v^c), \quad (4)$$

式中  $k$  为相机的敏感系数,  $r(u^c, v^c)$  为被测物表面反射率, 如果测量环境是黑暗的或者投射的光强足够亮, 那么环境光的影响可忽略, (4) 式可简化为

$$L_l(u^c, v^c) = kr(u^c, v^c)G_l(u^p, v^p), \quad (5)$$

由(5)式可知, 当相机的敏感系数  $k$  恒定时, 采集光强完全依赖于投射光强。要采集到高调制度的条纹, 只需设置合理的投射光强值。假设  $G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p)$  为投影仪最优的投射光强值,  $L_l^{\text{ideal}}(u^c, v^c)$  为相机理

想的采集光强值, 则(5)式可改写为

$$L_l^{\text{ideal}}(u^c, v^c) = kr(u^c, v^c)G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p), \quad (6)$$

理论上, 如果使用 8 bit 代表光强值, 那么  $L_l^{\text{ideal}}(u^c, v^c)$  为 255, 该值既可以保证条纹图像的高对比度, 又可以避免图像达到饱和。只要计算出  $kr(u^c, v^c)$ , 就可以求得  $G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p)$ 。因此, 引入另外两个参数: 投射光强  $G_l^0(u^p, v^p)$  和采集光强  $L_l^0(u^c, v^c)$ , 则(5)式可重写为

$$L_l^0(u^c, v^c) = kr(u^c, v^c)G_l^0(u^p, v^p). \quad (7)$$

将(6)式和(7)式相除, 可得到最优的投射光强为

$$G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p) = \frac{L_l^{\text{ideal}}(u^c, v^c)}{L_l^0(u^c, v^c)}G_l^0(u^p, v^p), \quad (8)$$

式中  $G_l^0(u^p, v^p)$  选取的唯一要求是使得采集的图像不发生饱和, 本文投射的光强值为 128, 即  $G_R^0(u^p, v^p) = (128, 0, 0)$ 、 $G_G^0(u^p, v^p) = (0, 128, 0)$  和  $G_B^0(u^p, v^p) = (0, 0, 128)$ 。如果  $G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p) > 255$ , 则  $G_l^{\text{opt}}(u^p, v^p) = 255$ , 因为投影仪的最高灰度级为 255。

### 2.2.2 建立坐标系的对应关系

如图 3 所示, 被测物体上任意一点  $M^w(x^w, y^w, z^w)$  分别与相机像素坐标系和投影仪像素坐标系上  $M^c(u^c, v^c)$ 、 $M^p(u^p, v^p)$  一一对应。因为点  $M^p$  和  $M^c$  有相同的相位值, 所以使用垂直和水平条纹序列即可找到所有的对应点对, 假设  $M^c$  在垂直和水平方向的绝对相位值为  $\varphi_v(u^c, v^c)$  和  $\varphi_h(u^c, v^c)$ , 则对应的  $M^p$  在投影仪像素坐标中的位置为

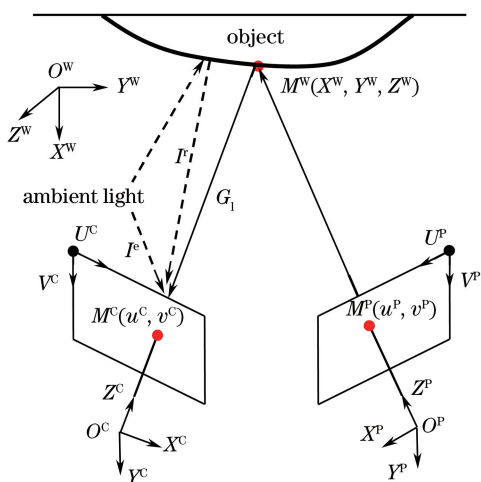


图 3 自适应条纹投影系统的原理图  
Fig. 3 Schematic diagram of adaptive fringe projection system

$$\begin{cases} u^p = \frac{V\varphi_v(u^c, v^c)}{2\pi T} + \frac{V}{2} \\ v^p = \frac{H\varphi_h(u^c, v^c)}{2\pi T} + \frac{H}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $V$  和  $H$  分别为投射条纹图像的宽和高,  $T$  为投射条纹的最大周期。相机像素坐标系和投影像素坐标系由于像素大小的不同并不能整像素地一一对应,因此将相机坐标系中的点  $(u^c, v^c)$  对应投影仪像素坐标系中的点  $(u^p, v^p)$  及其周围的 8 邻域区域<sup>[16]</sup>,即调节点  $(u^p, v^p)$  的光强和颜色意味着调节点  $(u^p, v^p)$  及其周围的 8 邻域区域的光强和颜色。建立相机像素坐标系统和投影仪像素坐标系统的对应关系后,即可将相机像素坐标系中每一个像素点的最优投射光强值和颜色值映射到投影仪像素坐标系。

### 3 实验结果与分析

为了验证算法的正确性,搭建了一套基于自适应条纹投影的测量系统。该系统主要由一台投影仪和一台相机组成,如图 4 所示。投影仪(CP270, BenQ, 台湾)包含一个数字微镜器件,物理分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ,相机(ECO655CVGE, SVS-VISTEK, 德国)物理分辨率为  $2448 \text{ pixel} \times 2050 \text{ pixel}$ ,一个变焦镜头的调焦范围为  $12 \sim 36 \text{ mm}$ 。实验前,使用反函数法<sup>[17]</sup>补偿系统的非线性误差,对于所有的标定和测量实验,使用最佳三条纹个数为 100、99、90 的 3 组正弦条纹计算绝对相位,每组中的 4 幅条纹图相位差为  $90^\circ$ 。

本文使用白色平板标定测量系统,将平板固定



图 4 自适应条纹投影测量系统

Fig. 4 Adaptive fringe projection measurement system

在精度为  $1 \mu\text{m}$  的水平移动台上,在大约垂直于相机光轴方向上移动 60 个位置,每次移动  $1 \text{ mm}$ 。在每个位置,投影 12 幅具有最佳三条纹个数的正弦条纹到平板表面以获得所有像素点的绝对相位信息,建立绝对相位和深度之间的关系,完成测量系统在深度方向的标定<sup>[18]</sup>。

#### 3.1 方法评价

为了验证本文方法测量彩色物体三维形貌的能力,利用一个  $3 \times 3$  的等边彩色棋盘格进行实验。将彩色棋盘格固定在精度为  $1 \mu\text{m}$  的水平移动台上,控制棋盘格每  $2 \text{ mm}$  移动一个位置,共移动 10 个位置,所有位置相对于参考平面的距离为  $-10 \sim 8 \text{ mm}$ ,在每个平板位置计算所有像素点的平均均方根误差(RMSE),将其作为测量的精度评价指标。分别比较传统的条纹(单一光强值为 128)投影方法<sup>[12,14]</sup>和本文方法在测量精度和采集图像数量上的不同,结果如表 1 所示。根据被测物表面的颜色选择合适的投射光颜色,通过被测物表面的反射属性计算出最优的投射光强值,以保证采集的条纹在反射率低的区域具有很高的调制度,在反射率高的地方不会出现条纹饱和。本文方法得到了  $0.025 \text{ mm}$  的测量精度。另外 3 种方法并没有考虑被测物表面的颜色对投射光颜色的影响,因此测量精度较低。在采集图像数量方面,本文方法使用 3 幅光强图像和 24 幅条纹图像计算最优的投射光强和颜色;Lin 等<sup>[12]</sup>和 Li 等<sup>[14]</sup>的方法分别需要预采集 33 和 48 幅图像计算最优的投射光强值。因此本文方法使用最少的图像数量即可得到最优的投射光强值。上述 4 种方法分别使用 12 条纹图像进行测量。

在重建彩色物体的三维形貌方面,使用上述方法分别测量彩色棋盘格的三维形貌。图 5(a)~(i)给出了传统条纹投影方法的测量结果;图 5(j)~(l)为文献[12]方法的测量结果;图 5(m)~(o)为文献[14]方法的测量结果。图 5(a)、(d)、(g)分别为投

表 1 本文方法与现有方法的对比实验结果

Table 1 Comparison of experimental results between the proposed and existing methods

| Method             | Number of captured images | Mean RMSE /mm |
|--------------------|---------------------------|---------------|
| Proposed method    | 27 + 12                   | 0.025         |
| Method of Ref.[12] | 33 + 12                   | 0.048         |
| Method of Ref.[14] | 48 + 12                   | 0.036         |
| Traditional method | 12                        | 4.035         |

射在彩色棋盘格表面上的红、绿、蓝正弦条纹图,可见对投射光颜色不敏感的区域,条纹的对比度较低,图 5(b)、(e)、(h)分别为对应的绝对相位图,在对比度较低的区域,绝对相位不单调,重建后的三维形貌存在噪声,如图 5(c)、(f)、(i)所示。在红色(或与红色相近颜色)区域,投射红色条纹可以获得较好的条纹对比度和三维形貌,其他区域则获得较低的条纹对比度和更差的三维形貌;绿色和蓝色区域的效果

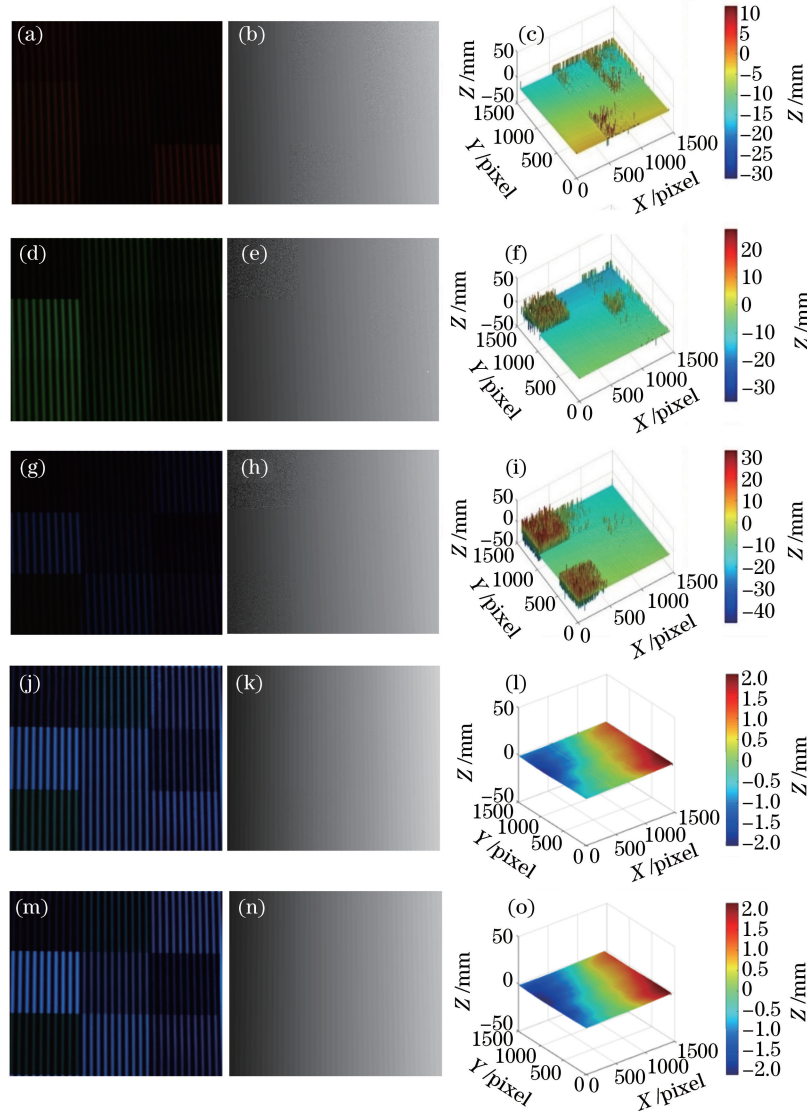


图 5 不同测量方法测量彩色棋盘格的测量结果。(a)~(c)红色条纹图及其对应的绝对相位图和深度数据;  
(d)~(f)绿色条纹及其对应的绝对相位图和深度数据绿色条纹图;(g)~(i)蓝色条纹图及其对应的绝对相位图和深度数据;  
(j)~(l)文献[12]方法采集的自适应条纹图及其对应的绝对相位图和深度数据;  
(m)~(o)文献[14]方法采集的自适应条纹图及其对应的绝对相位图和深度数据

Fig. 5 Measurement results for the color chessboard with the different methods. (a)-(c) Captured red fringe pattern, and its absolute phase map and depth data; (d)-(f) captured green fringe pattern, and its absolute phase map and depth data; (g)-(i) captured blue fringe pattern, and its absolute phase map and depth data; (j)-(l) captured adapted fringe pattern by Ref. [12] method, and its absolute phase map and depth data; (m)-(o) captured adapted fringe pattern by Ref. [14] method, its absolute phase map and depth data

与红色区域一致。在反射率较低的区域,需要投射高亮度的条纹图像;在反射率较高的区域,需要投射低亮度的条纹图像。图 5(j)和图 5(m)为采集的自适应条纹图像,图 5(k)和图 5(n)为相应的绝对相位图,图 5(l)和图 5(o)为重建后的三维形貌。虽然文献[12]和文献[14]的方法能够获得较好的深度数

据,但测量精度均较低。因此,需要将投射光的颜色和亮度相结合,投射局部亮度值和颜色的条纹测量彩色物体的三维形貌。

采用本文方法测量彩色棋盘格时,分别采集红、绿、蓝三幅光强(光强为 128),结果如图 6(a)所示。

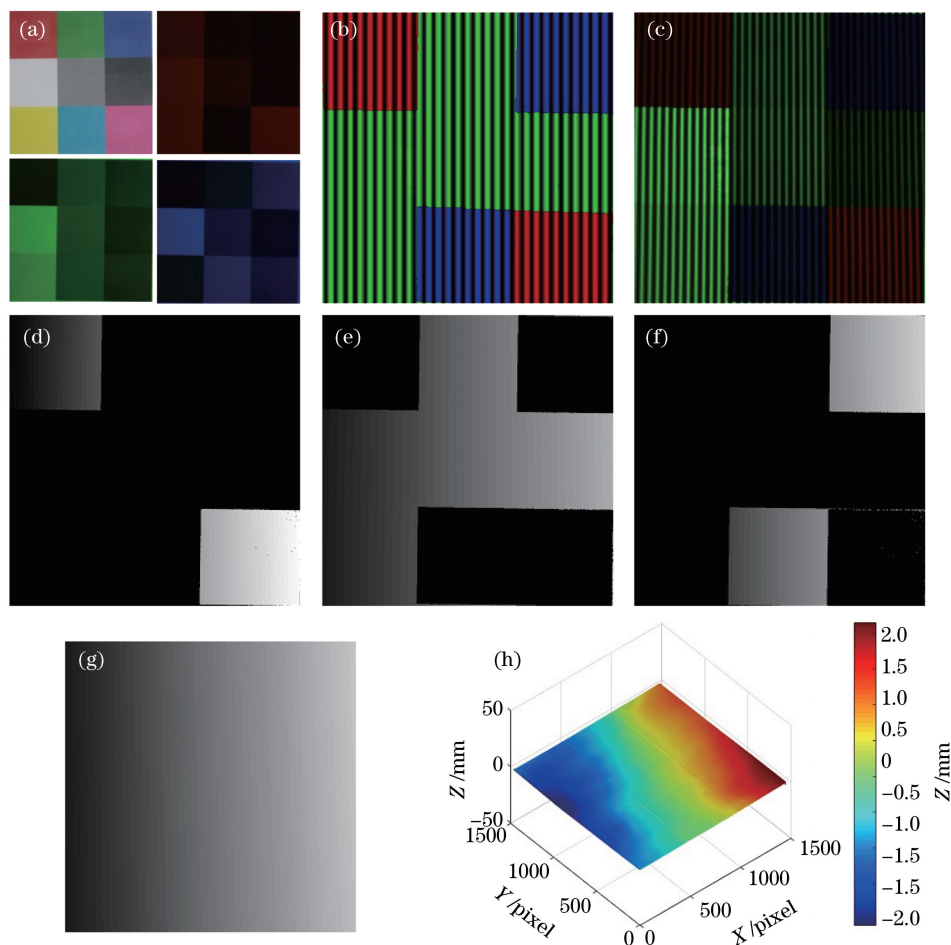


图 6 本文方法测量彩色棋盘格的测量结果。(a)彩色棋盘格和分别投射红、绿、蓝颜色的光强图像; (b)投射的自适应条纹图; (c)采集的自适应条纹图; (d)~(g)红、绿、蓝颜色通道和完整的绝对相位; (h)深度数据  
Fig. 6 Measurement results for color chessboard with the proposed method. (a) Color chessboard projected red, green, blue uniform bright images; (b) projected adapted fringe pattern; (c) captured adapted fringe pattern; (d)-(g) red, green, blue channel and complete absolute phase maps; (h) depth data

使用(3)式和(8)式分别计算每个像素点的最优投射颜色和光强值,利用(9)式将最优的投射颜色和光强值映射到投影仪像素坐标系下,可得自适应投射的条纹图,如图 6(b)所示;将自适应的条纹投射到彩色棋盘格表面,采集的条纹如图 6(c)所示;在不同颜色的平板区域投射不同颜色和光强值的条纹图,得到最高对比度的条纹图像,从而计算出平滑的绝对相位图,图 6(d)~(f)分别给出了红、绿、蓝三颜色通道计算的绝对相位图;图 6(g)为整幅图像

的绝对相位;图 6(h)为重建后的深度数据。根据物体表面的颜色和反射特性投射最优颜色和光强值的条纹,使得采集的条纹具有最高的条纹对比度,从而得到效果最好的三维结果。与传统的条纹投影方法相比,本文方法能够获得更好的三维结果。

### 3.2 彩色物体测量

使用本文方法测量彩色石膏模型,所得结果如图 7 所示。

图7(a)为彩色石膏模型和采集的红、绿、蓝颜

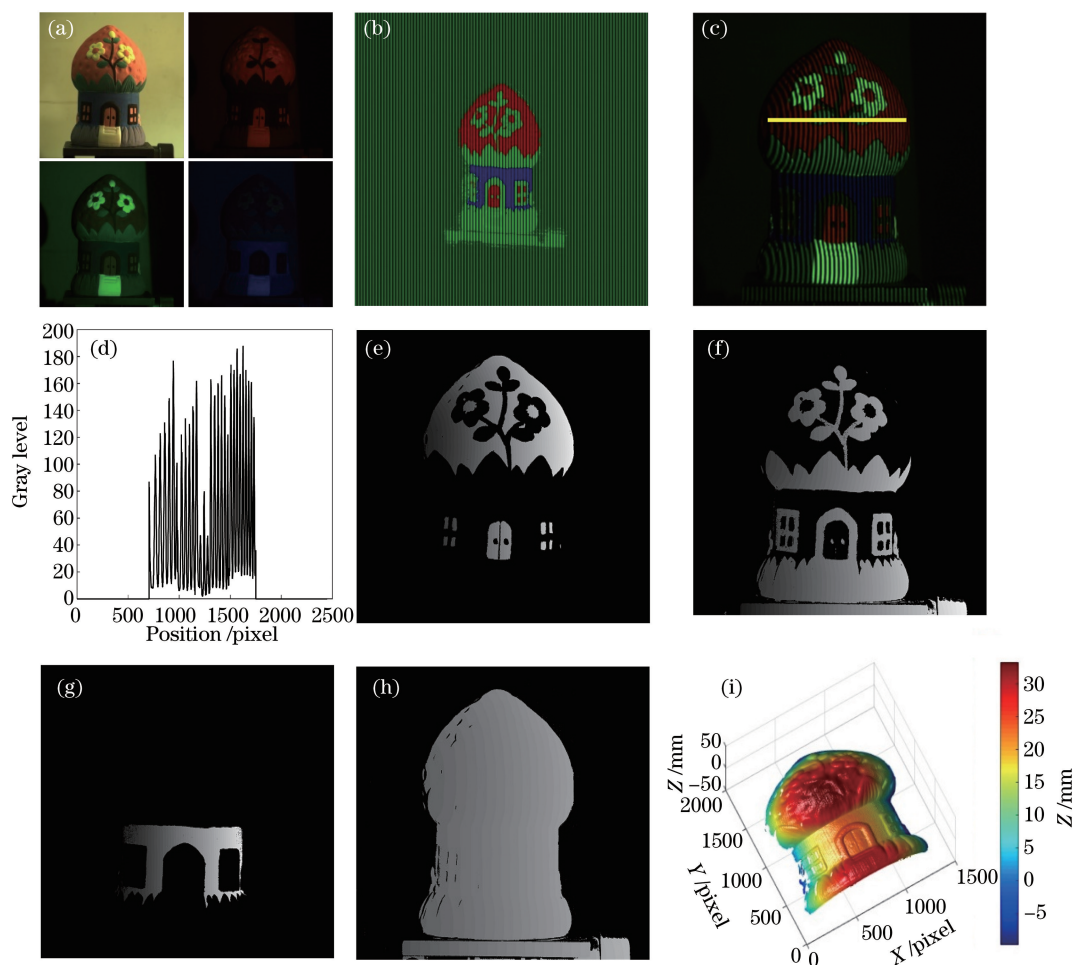


图7 本方法测量彩色石膏模型的结果。(a)彩色石膏模型和分别投射红、绿、蓝颜色的光强图像;(b)投射的自适应条纹图;(c)采集的自适应条纹图;(d)某一行的剖面图;(e)~(h)红、绿、蓝颜色通道和完整的绝对相位;(i)深度数据  
 Fig. 7 Measurement results for color plaster model with the proposed method. (a) Color plaster model and projected red, green, blue uniform bright images; (b) projected adapted fringe pattern; (c) captured adapted fringe pattern; (d) profile along a row; (e)-(h) red, green, blue and complete absolute phase map; (i) depth data

色的光强图像;计算最优的投射颜色和光强后,将其映射到投影仪像素坐标系下,产生自适应彩色条纹图像,如图7(b)所示;将图7(b)的图像投射到被测彩色石膏模型的表面,采集图像如图7(c)所示;图7(d)为图7(c)中黄线所在行的剖面图。为了使得采集的自适应条纹图具有较高的信噪比,投射光的强度要尽量高,由于投影仪投射光强最大值为255,因此采集的条纹图像的光强值不能完全达到理想光强值,采集的条纹图像光强分布不均匀,但在相机和投影仪参数固定的情况下,条纹的信噪比已经达到最大值;图7(e)~(h)分别给出了红、绿、蓝三颜色通道和整幅图像的绝对相位;将相位数据转换到深度数据后,得到物体的三维结果,如图7(i)所示。

## 4 结 论

提出了一种基于自适应条纹投影测量彩色物体三维形貌的测量方法。该方法根据被测物体表面的彩色纹理计算最优的投射光强和颜色,并将这些信息映射到投影仪像素坐标系,投影仪投射自适应条纹序列测量物体的三维形貌,其能够避免图像的饱和,并且维持很高的条纹对比度。与已有的解决方法相比,本文方法不但可以避免采集大量图像,而且考虑了被测物表面的颜色对投射光颜色的影响。

实验结果证明,本文测量方法能够高效精确地测量彩色物体的表面三维形貌。但是,考虑到环境光会使采集的条纹具有较低的信噪比,为避免引入

测量误差,该方法目前只能应用于黑暗环境下,因此,开发一种对环境光不敏感的自适应条纹投影方法测量彩色物体是后续工作的重点。

## 参 考 文 献

- [1] Zhong M, Chen F, Xiao C. Research on the nonlinearity mitigation by wavelet transform method in modulation profilometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071205.  
钟敏, 陈峰, 肖朝. 小波变换减小调制度轮廓术中非线性的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071205.
- [2] Da J, Qu H M, Tao T Y, *et al.* Real-time three-dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012003.  
笪健, 屈惠明, 陶天阳, 等. 结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012003.
- [3] Wu Q Y, Zeng Z, Zhang B C, *et al.* A 360° three-dimensional measurement system and its calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404002.  
吴庆阳, 曾增, 张佰春, 等. 一种新的360°三维测量系统及标定技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0404002.
- [4] Feng S J, Chen Q, Zuo C, *et al.* Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 18-27.
- [5] Zhang S, Yau S-T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [6] 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: 59-71.
- [7] Zhao H J, Liang X Y, Diao X C, *et al.* Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54(1): 170-174.
- [8] Jiang C, Bell T, Zhang S. High dynamic range real-time 3D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7337-7346.
- [9] 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.
- [10] Waddington C J, Kofman J D. 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.
- [11] Waddington C J, Kofman J D. Camera-independent saturation avoidance in measuring high-reflectivity-variation surfaces using pixel-wise composed images from projected patterns of different maximum gray level [J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 32-37.
- [12] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9887.
- [13] Lin H, Gao J, Mei Q, *et al.* Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703.
- [14] Lin H, Gao J, Mei Q, *et al.* Three-dimensional shape measurement technique for shiny surfaces by adaptive pixel-wise projection intensity adjustment [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 206-215.
- [15] 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.
- [16] Chen S, Xia R, Zhao J, *et al.* Analysis and reduction of phase errors caused by nonuniform surface reflectivity in a phase-shifting measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 033102.
- [17] Huang P S, Zhang C, Chiang F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1): 163-168.
- [18] Zhang Z H, Ma H, Guo T, *et al.* Simple, flexible calibration of phase calculation-based three-dimensional imaging system [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1257-1259.