

文章编号: 0258-7025(2010)11-2918-07

# 分离物体三维测量的彩色结构光编码新方法

麻 珂 张启灿

(四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064)

**摘要** 提出了一种结合颜色、格雷码和正弦光栅的编码新方法,用于测量空间分离物体的三维面形。该彩色格雷码正弦条纹图案表现为用颜色信息编码的正弦条纹图案,利用此条纹图案来记录物体的三维面形数据。首先投射一幅彩色格雷码正弦条纹来调制被测物体的三维信息,摄像机拍得物体表面的变形条纹图,然后应用傅里叶变换方法获取截断相位,根据编码特征进行解码来指导截断相位的展开,获得展开相位,进而恢复出物体的三维面形。该方法编码稳定,解码方法可靠,只需要拍摄一幅图,就可以较好地重建空间分离物体的三维面形。空间分离物体的实验结果以及与基于调制度排序的截断相位二维空间展开结果的对比,均证明了该方法的正确性和可行性。

**关键词** 光学测量;三维面形测量;机器视觉;颜色编码条纹;分离物体

中图分类号 TN247;O438.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2918

## A New Color Structured Light Coding Method for Three-Dimensional Measurement of Isolated Objects

Ma Ke Zhang Qican

(Department of Opto-Electronics, School of Electronics and Information Engineering,  
Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** A new coding method based on color Gray-code is proposed for measuring the three-dimensional (3D) shape of the isolated objects in space. This coded fringe appears to be a color coded sinusoidal fringe, which is used to record the information of object's 3D shape. Firstly, a digital color coded sinusoidal fringe is projected onto the tested object's surface to modulate the height information of the measured object into its phase distribution, then the color Gray coding is used to obtain the fringe order and the sinusoidal fringe is used to get the wrapped phase. With only one image, 3D shape of the isolated objects can be exactly reconstructed. An actual measurement is done, the results of the reconstructed shapes prove its correctness and feasibility.

**Key words** optical measurement; three-dimension shape measurement; machine vision; color-coded fringe; isolated objects

### 1 引 言

基于结构光投影的光学三维传感技术是三维测量技术中常用的方法,这种方法有非接触测量和全场分析的优点。此类方法主要有相位测量轮廓术(PMP)<sup>[1]</sup>、傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[2~5]</sup>、彩色编码条纹投影技术<sup>[6,7]</sup>等。PMP 测量精度较高,但是需要拍摄至少三幅图,常用来测量静态物体;FTP 测

量速度快,只需要一幅图就可以获取物体的三维面形。如果被测物体表面高度变化剧烈,或者是存在若干孤立区域,使用相位空间展开算法对上面两种方法所获取的截断相位进行相位展开时,很难得到可靠的展开相位<sup>[8,9]</sup>。而在彩色编码条纹投影技术中,在展开截断相位时,每一个条纹的相位级次都只由本身对应的色条颜色信息决定,和上一个条纹

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-16

基金项目: 国家自然科学基金(60807006)资助课题。

作者简介: 麻珂(1987—),男,硕士研究生,主要从事三维测量和机器视觉方面的研究。E-mail: amazel2@163.com

导师简介: 张启灿(1974—),男,博士,副教授,主要从事光学三维传感、动态过程三维测量和相位展开等方面的研究。

E-mail: zqc@scu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040m435S)

的级次无关,可以有效地避免相位空间展开错误的累计蔓延。只使用一幅图就可以比较方便地测量甚至是具有高度陡变或者孤立区域的物体面形。

结构光投影的一个关键问题就是正确确定投影条纹和变形条纹之间的对应关系,彩色编码条纹投影技术同样面临这个问题,它带来了 2 个主要的困难<sup>[10]</sup>:1)不能正确地识别颜色信息。拍摄得到的图像中的任一点的颜色值不仅与投射的图案有关系,也与物体表面的反射率、阴影、视角方向、测量系统的颜色串扰和传感器噪声有关系。从拍摄物体图像中一个像素点的彩色值不能直接得到对颜色的正确估计,可能会导致错误的标识级次。2)编码级次的丢失。实验时,场景中一般都有遮挡、阴影,或者是表面不连续,并不是拍摄的图案中每一点的条纹信息都是可见的。如果在某些区域不能识别条纹信息,将会导致相位展开错误。

在彩色条纹投影基础上,本文提出了一种新的编码方式,使用格雷码、颜色信息和正弦光栅编码生成彩色条纹,编码稳定、抗干扰能力较强。条纹的强度呈正弦分布,排列顺序已知的格雷码和颜色信息用来对条纹正弦周期进行标记。拍摄受待测物体表

面调制的变形彩色条纹图像后,进行相关处理即可完成正确可靠的相位展开。实验证明该方法编码和解码稳定可靠,能很好地克服上述两个困难。

## 2 原 理

首先使用格雷码和颜色信息对待投影的每一个正弦条纹周期进行编码标记,同时考虑到投影和成像设备的颜色显示和响应性能,预先采集数据对系统进行颜色校准和非线性校正,获得在该投影-成像设备组合条件下,能正确反映编码颜色信息并能获得其线性响应的、有利于正确解码的投射条纹图案。然后,将该图案投射到待测物体表面,拍摄受高度调制的变形彩色条纹图像,通过傅里叶变换获取该图像截断相位信息,同时对该图像进行条纹边缘提取和分色处理,得到每一个正弦条纹周期相应的相位级次,指导完成相位的正确展开,从而可以重建待测物体的三维面形分布。

算法流程共分为两部分,如图 1 所示,第一部分是编码设计,包括颜色校准和非线性校正,以及条纹图案编码;第二部分是图像处理。

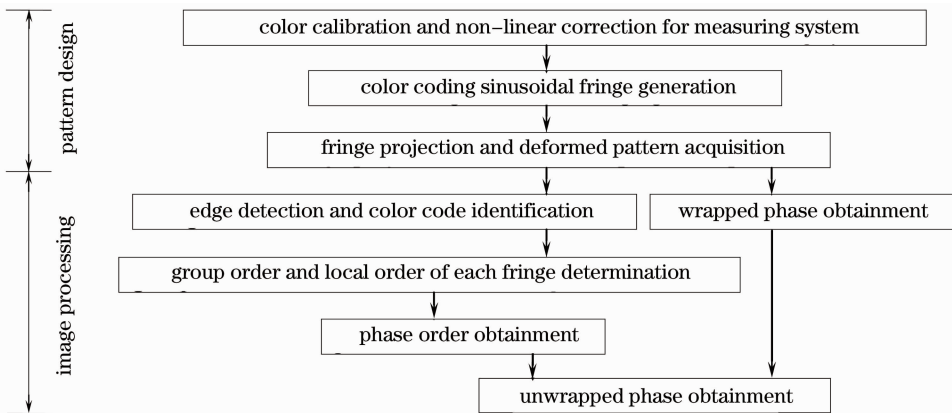


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flow

### 2.1 测量系统的颜色校准和非线性校正

本文方法所采用的测量系统和 FTP 方法<sup>[3,4]</sup>一样,由投影系统和拍摄系统基于三角法测量原理实现。在测量系统的现实使用中,从投影图案到变形图案的映射是非线性的,本文中这种非线性主要表现为颜色的串扰和正弦条纹的非线性。颜色的串扰表征了测量系统对红绿蓝(RGB)三通道信号的响应单一性,严重的颜色串扰将会导致条纹相位级次的判断错误;投影光场正弦性的好坏对相位的测量有很大的影响。通过对拍摄的变形条纹图像进行颜

色校准和对将要投射的条纹图案进行非线性校正可以改善测量系统本身的非线性对测量结果的影响。

为了分析投影仪和相机之间颜色的串扰,参考 D. Caspi 等<sup>[11~13]</sup>提出的模型,认为投影矩阵中任意像素点  $P$ , 拍摄矩阵中任意像素点  $C$ , 物体的反射率矩阵  $F$  和颜色串扰矩阵  $X$  之间满足  $C = X \times F \times P$ , 即  $X = C \times P^{-1} \times F^{-1}$ 。在该步骤中,需要的图像包括预先拍摄白板获得的图像和投射彩色条纹到物体所获得的图像。对物体只需要拍摄一幅图案,对该图像进行处理既能完成反射率矩阵的计算,又可以计

算出被测物体在对应采样时刻的相位分布。

颜色校准的具体步骤:投射 3 幅基色条纹图到白板上,对 3 幅拍摄图像分别使用傅里叶变换提取白板的调制度信息来确定反射率  $f$ ,求得的 3 个值作为  $F$  矩阵的 3 个对角线元素的值,得到了白板的反射率矩阵  $F$ ,代入方程  $X = C \times P^{-1} \times F^{-1}$  中,得到颜色串扰矩阵  $X$ ,存储此颜色串扰矩阵。拍摄物体之后,对彩色变形条纹图像的 3 个通道使用同样的步

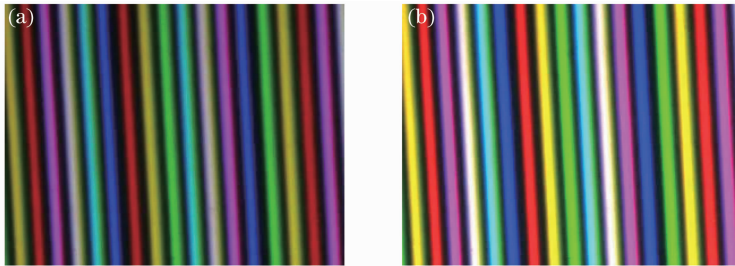


图 2 图像的颜色校准。(a)颜色校准之前的图像,(b)颜色校准之后的图像

Fig. 2 Image color calibration. (a) before color calibration, (b) after color calibration

要给测量系统提供正弦性更好的投影光场,获得更好的测量精度,还需要对投影的正弦光栅条纹进行非线性校正。对于将使用到的 7 种颜色,每一种颜色对白板拍摄 6 幅图,灰度值分别为 0, 50, 100, 150, 200, 255,对每一幅拍摄图求得平均值,作为在该输入灰度情况下的输出灰度。然后对输出灰度进行 4 次曲线拟合分别得到 7 种颜色图案的 3 个通道的投影-成像灰度响应曲线,并由此建立了查找表,然后依据该查找表,决定将要投射的正弦条纹每一个像素的强度值,期望成像设备最终拍摄回来的

骤,获取被测物体表面的反射率矩阵  $F_0$ ,将  $F_0$  代入  $P = (X \times F_0)^{-1} \times C$ 。 $P$  即为拍摄物体图像经过颜色校准之后的图像,完成对拍摄物体图像的颜色校准。图 2(a)为颜色校准之前拍摄到的物体表面变形条纹图像,图 2(b)为颜色校准之后的图像。不难看出,颜色校准改善了颜色的亮度,势必会提高颜色识别的正确率。

图案具有更好的正弦性。通过对白板进行测量以验证本方法的精度,使用非线性校正前后的两个条纹分别拍摄白板。对拍摄的图像截取相同区域进行对比。计算两幅图案的相位值,使用相位点云数据分别拟合出理想平面<sup>[14]</sup>,点云与理想平面的距离即可用来衡量系统的测量误差。非线性校正之前所有评测点的标准偏差为 0.0378 rad,非线性校正之后所有评测点的标准偏差为 0.0182 rad,测量精度提高了 1 倍。前后的误差分布如图 3 所示。

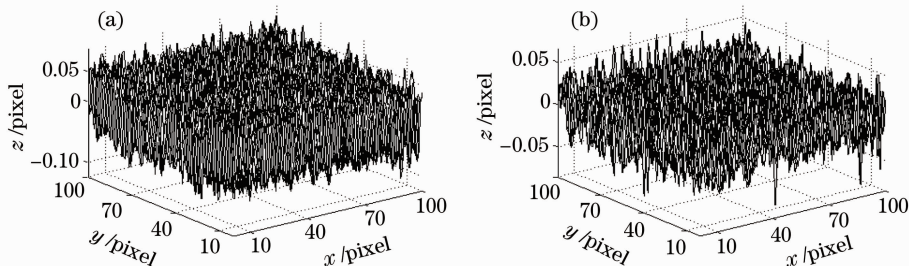


图 3 正弦光栅的非线性校正。(a),(b)分别为非线性校正前后点云数据与拟合平面的差

Fig. 3 Fringe non-linear correction. Phase error before (a) and after (b) non-linear correction

使用非线性校正虽然会压缩条纹的动态范围,但是拍摄回来的正弦条纹线性较好,失真较少,可以获取较正确的相位值。

## 2.2 条纹图案的编码

投射的条纹图案使用格雷码和正弦编码,表现为被彩色调制的正弦条纹图案<sup>[15,16]</sup>。图 4 为编码条纹图案。条纹图案分为格雷码图案和正弦图案两部分。编码图案的数学表达式为:  $F(x) = G(x) \times$

$[0.6 + 0.4\sin(2\pi x/T)]$ ,其中  $G(x)$  为格雷码图案,  $T$  为正弦条纹的周期,格雷码条纹图案的周期和正弦条纹图案周期相同。图 4(a)为格雷码图案的一部分。在二进制格雷码的编码方法中,黑白条纹的码值记为 0 和 1,投射 3 幅图案可产生  $2^3$  个不同码值。这 3 幅分布在时间序列上的图案分别对应彩色图的 3 个通道,即把不同时刻投射的 3 幅格雷码图案同时编码到一幅彩色图空间中。格雷码相邻码字

的 hamming 距离为 1, 大大减少了由一个编码状态到下一个编码状态的转换误差。同样, 转换到 RGB 三通道之后, 相邻条纹的区别也限于一个通道, 能够对颜色转换误差起到有效的限制作用。令格雷码数值等于红色通道的值 $\times 4$ +绿色通道的值 $\times 2$ +蓝色通道的值 $\times 1$ 。从格雷码编码转换到颜色图案 RGB 三通道的一个例子如表 1 所示。

表 1 三个时刻投射格雷码编码及对应的格雷码数值和颜色图案中的颜色

Table 1 Correspondence between Gray-code, Gray value and color

Gray code at $t_1$	Gray code at $t_2$	Gray code at $t_3$	Gray value	Color
0	0	0	0	K
0	0	1	1	B
0	1	1	3	C
0	1	0	2	G
1	1	0	6	Y
1	1	1	7	W
1	0	1	5	M
1	0	0	4	R

表 1 中 000 代表黑色条纹, 投影时不能反映正弦条纹的强度信息, 本文方法中没有采用。这样, 格雷码序列只组合成 7 种颜色, 这对实际测量是远远不够的。新方法变换格雷码的排列顺序, 采用 6 组格雷码的不同排布方式, 每种排布方式中均包含 7 个颜色格雷码来扩展编码长度。这 6 组格雷码数值

分别为: ①: 1, 3, 2, 6, 7, 5, 4; ②: 2, 6, 4, 5, 7, 3, 1; ③: 4, 5, 1, 3, 7, 6, 2; ④: 1, 5, 4, 6, 7, 3, 2; ⑤: 4, 6, 2, 3, 7, 5, 1; ⑥: 2, 3, 1, 5, 7, 6, 4。为了提高条纹识别的精度, 不希望相邻条纹的颜色相同, 对格雷码组的排列顺序有一定的限制, 比如①组的后面不能为③, ⑤组; ②组的后面不能为①, ④组, 其他组的排列也遵循同样的原则。本文实验中选择了①②⑤②③④③①⑥④⑤⑥①④的方式排列这 6 组格雷码。可以看出, 格雷码组的排列顺序和在格雷码组内部条纹的排列顺序都是唯一且已知的, 任意相邻两组格雷码组成的序列只出现一次, 任意相邻三个格雷码组成的序列只出现一次。编码生成的条纹总数目为 $14 \times 7 = 98$ , 已经可以满足大多数的测量需要。

根据格雷码的特性, 可以推知该格雷码编码有以下两个特性: 1) 白色条纹向两边扩展, 两侧必定是补色, 而补色的两侧, 除了可能是白色外, 肯定是基色。2) 两个格雷码组交界处的两条条纹的颜色必定为基色。合理地利用这两个性质, 可以对识别颜色时的错误判断进行有益的修正。

图 4(b) 为对应的正弦条纹图案。把格雷码图案和正弦图案相乘, 获得如图 4(c) 所示彩色格雷码正弦条纹图案。经过对彩色格雷码正弦条纹的非线性校正之后, 条纹图案变成了如图 4(d) 所示的形式, 即为将要投影的图案。

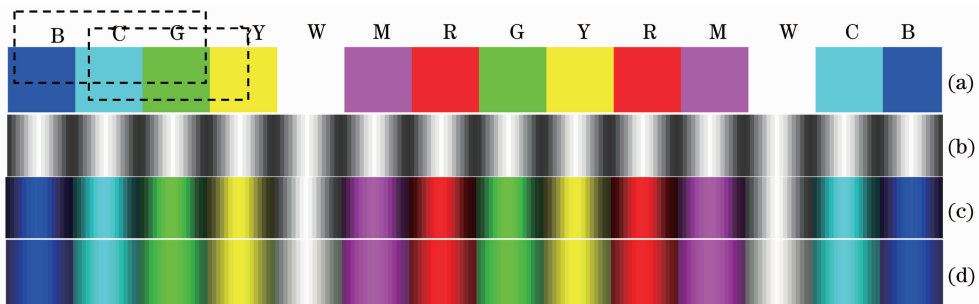


图 4 编码图案。(a) 格雷码编码图案, (b) 正弦图案, (c) 非线性校正之前的条纹图案; (d) 投影的图案

Fig. 4 Color Gray coded sinusoidal fringe. (a) Gray codes, (b) sinusoidal fringes, (c) fringe without non-linear correction, (d) projected fringe pattern

该编码方式编码稳定, 解码简单, 图像的抗干扰能力较强, 用空间唯一的颜色排列序列将每一个条纹周期对应编码, 物体表面的阴影、遮挡或者不连续性不会对其他区域的条纹判断识别造成影响, 可以较好地解决丢失级次的问题。

### 2.3 图像处理

在这种编码条纹图中, 每一根条纹携带三种信息, 分别是该条纹的截断相位信息、该条纹的组次信

息和在格雷码组内部该条纹的局部级次信息。其中组次和局部级次叠加即为该条纹的相位级次。把条纹的相位级次和截断相位叠加就可以得到展开相位。

1) 获取截断相位、条纹边缘和条纹颜色: 将拍摄图转换到根据色度、饱和度和亮度的方式叠加 (HSV) 空间后提取出条纹的强度正弦分布, 采用文献[4]所述的方法进行傅里叶变换, 得到截断相位

图,如图 5(a)所示。傅里叶变换计算出的相位分布会在每一个条纹周期中截断一次,故截断相位的边界信息对应于条纹的边缘,可以用来辅助确定每一个色条的边界区域。根据编码格雷码图案的特性,对颜色图 3 个颜色通道进行分色处理。在使用颜色

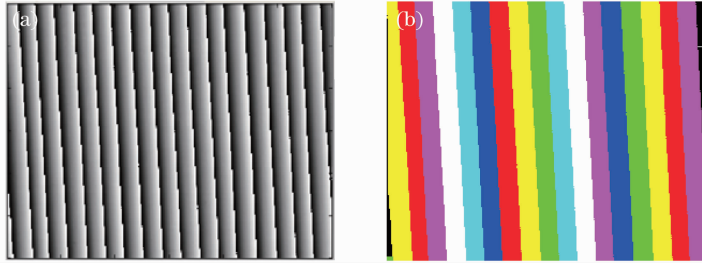


图 5 获取条纹的颜色编码。(a)截断相位,(b)恢复的色条图

Fig. 5 Color decoding of each fringe. (a) wrapped phase, (b) result of color code extraction

2)判断获取组次和局部级次:根据上面提到的格雷码编码两个特性,首先判断出每根条纹的组次。然后根据条纹设计的规则:每相邻 3 个条纹为一组且只出现一次;每两个格雷码组为一组且只出现一次这两个原则判断出局部级次和验证已判断出的组次。最后把组次和局部级次叠加,就可以获得整场

校准方法处理之后,对每根条纹来说,边缘处仍然可能和另外一种颜色发生串扰,条纹中心处的颜色是最可靠的。可以提取条纹中心区域的颜色信息来填充相应色条区域,得到变形条纹对应的色条图,如图 5(b)所示。

的相位级次。

3)获取展开相位:上面两步中,已经单独获得了条纹的相位级次和条纹的截断相位信息。把二者叠加即可以获得条纹的展开相位。截取上面提到的图像的第 200 行的一部分来说明算法的流程,如图 6 所示。编码颜色为白色的条纹在图中使用黑色线画出。

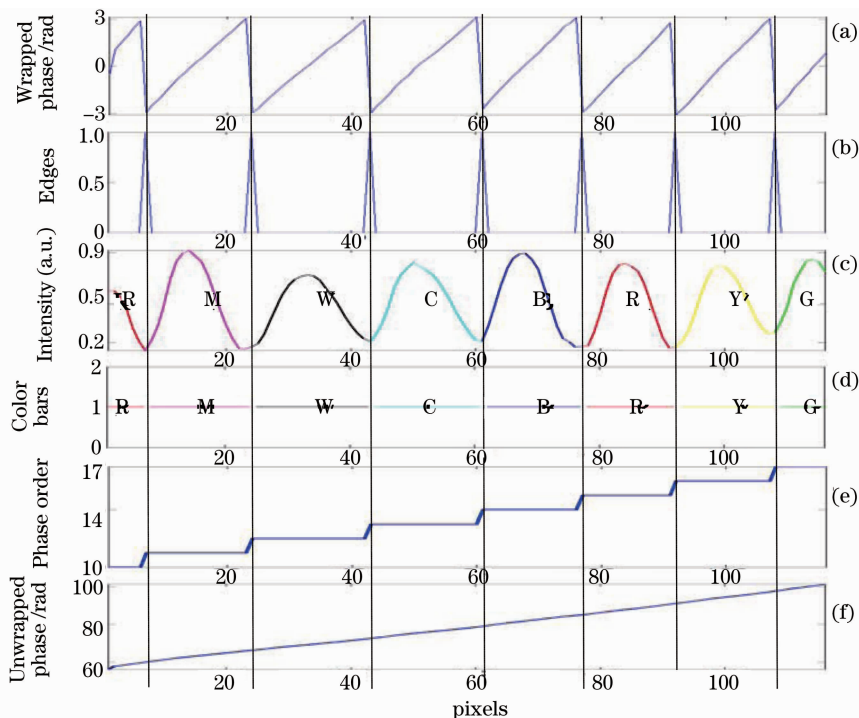


图 6 解码流程。(a)截断相位,(b)条纹边缘,(c) HSV 空间的条纹强度(曲线颜色为对应编码颜色),(d)恢复的颜色色条,(e)判断得到的相位级次,(f)展开相位

Fig. 6 Image processing algorithm flow. (a) wrapped phase, (b) fringe edge, (c) fringe intensity (colors of line corresponding to the color Gray code), (d) color bars, (e) fringe order, (f) unwrapped phase

通过颜色校准、正弦条纹的非线性校正、正确判断条纹边缘和颜色的区域填充操作四个步骤,在解

码阶段获得正确的颜色色条信息,较好地解决了不能正确识别颜色信息的困难。

### 3 实验结果的分析与对比

待测物体为两个空间位置不连续的物体,如图 7 所示,左侧为面具,右侧为鼠标,面具和鼠标的高度大致相同。成像设备为佳能 E503 单反相机,投影仪采用三洋液晶投影仪。实际测量中,投影光栅

编码条纹的周期为 8 个像素,预先做了非线性校正,获得的图像如图 7(a)所示,颜色校准之后的图像如图 7(b)所示,使用傅里叶变换方法获得的截断相位分布如图 7(c)所示,恢复的色条图如图 7(d)所示。

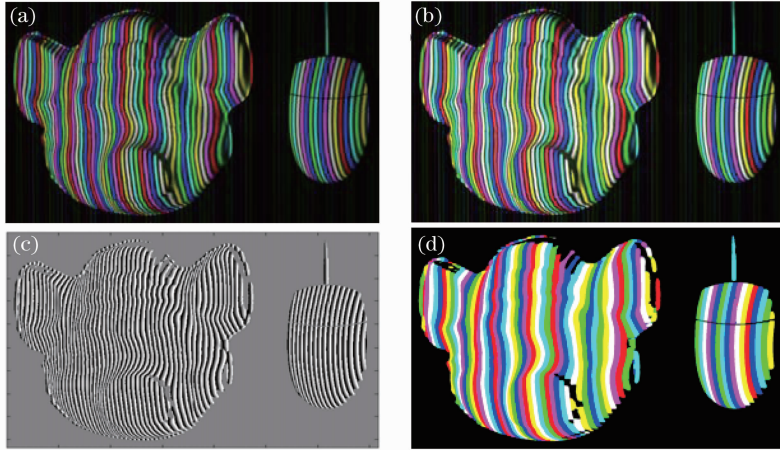


图 7 图像处理过程。(a)拍摄图像,(b)颜色校准之后的图像,(c)截断相位分布,(d)色条图

Fig. 7 Processing stages. (a) patten image, (b) after color calibration, (c) wrapped phase, (d) color bars extraction

采用文中所述方法进行图像处理,得到展开相位。展开结果和传统的调制度排序相位展开算法所获得的结果做对比。根据拍摄物体图像的调制度做

一个模板,分别与两个展开相位图相乘,得到如图 8 所示的图像。

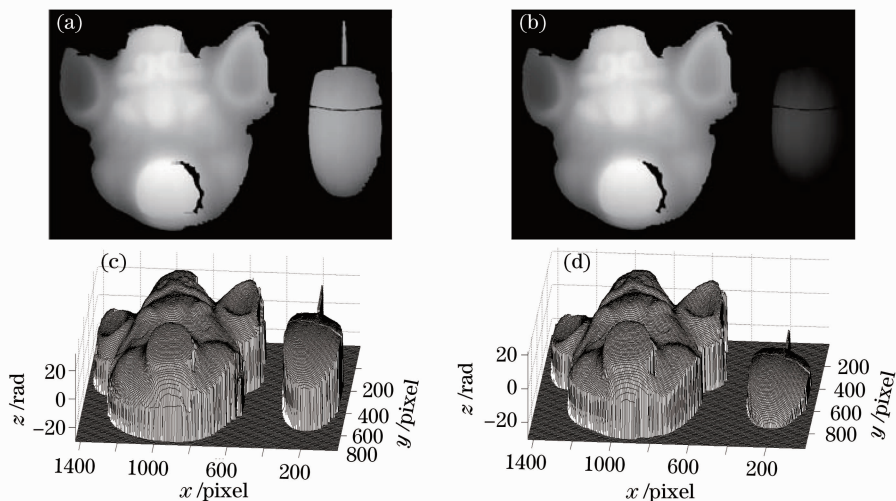


图 8 测量结果。(a)使用文中方法展开的连续相位图,(b)使用调制度排序算法展开的连续相位图,(c) (a)的三维显示,(d) (b)的三维显示

Fig. 8 Measurement result. (a) unwrapped phase with our method, (b) unwrapped phase with 2D space unwrap method, (c) 3D surface of (a), (d) 3D surface of (b)

把两种方法分别获得的截断相位相减,并截取其中一行,如图 9 所示。

从图 9(a)可以看出,除去边缘部分,二者在面具处的展开相位值吻合较好,在鼠标处的展开相位值则相差很多。图 9(b)为两种方法分别展开相位的第 300 行。经过计算可知对应鼠标处的任意一点,本文

方法和传统的调制度排序相位展开算法得到展开相位的差值为  $6\pi$ ,也即调制度排序相位展开算法在无条纹处的相位展开有错误,恢复高度也将会发生错误。从实验结果可以看出,使用本文方法获取的展开相位,在空间连续处与基于调制度排序的截断相位二维空间展开方法所获得展开相位吻合较好,在空间不

连续处也可以较好地恢复物体的三维面形,能弥补和纠正空间相位展开中由于条纹级次的缺失而导致的



展开错误(如本文实验中的鼠标区域)。经过系统标定之后,就可以恢复物体的三维形貌。

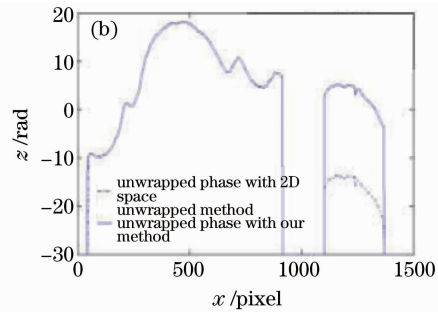


图9 两种方法展开相位的比较。(a)展开相位的差,(b)展开相位第300行的差异

Fig. 9 Contrast of the two unwrapped phases. (a) difference between them, (b) comparison in the same line

## 4 结 论

提出了一种结合颜色、格雷码和正弦光栅的新的编码方法。该方法只使用一幅图,快速准确地用两级级次叠加的方法获取条纹相位级次,与正弦光场所携带的截断相位叠加,可以较好地完成相位展开,恢复被测分离物体的三维面形。对两个空间分离的物体进行了三维面形的恢复重建,得到了比较满意的结果,并且与基于调制度排序的截断相位二维空间展开结果作了比较,证明提出的方法是正确可行的。

## 参 考 文 献

- Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166  
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 99~104  
毛先富, 陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 99~104
- Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1291~1295  
毛先富, 苏显渝, 陈文静 等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1291~1295
- Wen Yongfu, Su Xianyu, Zhang Qican. Universal calculation formula and system calibration method in Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2094~2098  
文永富, 苏显渝, 张启灿. 傅里叶变换轮廓术中一种普适的计算公式和系统标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2094~2098
- Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 207~211  
张启灿, 苏显渝, 曹益平等. 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 207~211
- Weihong Su. Projected fringe profilometry using the area-encoded algorithm for spatially isolated and dynamic object[J]. *Opt.*

*Express*, 2008, **16**(4): 2590~2596

- Huang Hongqiang, Feng Huajun, Xu Zhihai. 3-D imaging based on color encoded structure light [J]. *J. Zhejiang University(Engineering Science)*, 2001, **35**(6): 588~590  
黄红强, 冯华君, 徐之海. 彩色结构光三维成像技术[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2001, **35**(6): 588~590
- Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267  
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- Wang Qingfeng, Zhang Qican, Liu Yuankun. Three-dimensional measurement of object in water by tracking phase value[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1570~1576  
王庆丰, 张启灿, 刘元坤. 基于相位追踪的水中物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1570~1576
- L. Zhang, B. Curless, S. M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming [C]. *Proceedings of the 1st International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission (3DPVT)*, Padova, Italy, 2002: 24~26
- D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(5): 470~480
- Jordi Pages, Joaquim Salvi, Christophe Collewet *et al.*. Optimised de bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**: 707~720
- Alexandra Lathuiliere, Franck Marzani, Yvon Voisin. Colour 3D system characterization[J]. *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference*, 2006, (6-10): 3232~3237
- Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1527~1532  
李中伟, 王从军, 史玉升 等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1527~1532
- Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional imaging based on hybrid encoding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 161~165  
田劲东, 彭 翔. 一种复合编码的三维数字成像方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 161~165
- Sun Xuezheng, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1947~1951  
孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1947~1951