

一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法

胡路遥 达飞鹏 王露阳

(东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要 针对传统彩色编码光栅三维轮廓术中光栅易受到物体表面彩色纹理的干扰, 从而造成编码条纹颜色误判和相位误差增大这一问题, 提出一种基于互补彩色光栅的三维测量方法, 给出了理论分析、光栅设计原理、补偿算法与实验分析。对图像进行初步的解耦校正后, 通过预先设计的光栅互补特性, 依据彩色响应模型求取物体表面逐点的反射率, 并对红绿蓝(RGB)三通道反射率的不平衡进行补偿, 消除物体表面彩色纹理的干扰, 改善光栅的正弦性。以补偿后的图像来指导彩色编码条纹的分割解码并用傅里叶变换法提取出包裹相位, 依据解码结果指导相位展开, 继而完成整个三维测量过程。实验证明该方法对彩色纹理的补偿准确有效, 降低了彩色纹理对测量的影响。

关键词 测量; 彩色补偿; 互补编码; 彩色分割

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0212002

A Novel Color Fringe Projection Method for 3D Measurement of Colorful Objects

Hu Luyao Da Feipeng Wang Luyang

(School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract A novel method based on color texture compensation is proposed for three-dimensional (3D) shape measurement of colorful objects. In 3D fringe projection interferometry based on color structured light, color fringe patterns are normally disturbed by the color of the object's surface. In order to obtain correct fringe order and accurate phase map, a couple of complementary color-encoded fringe patterns are projected onto the surface of object. After decoupling thus the reflectivity matrix of each pixel can be calculated and fringe patterns can be compensated based on the complementary characteristics of the patterns. Wrapped phase map is retrieved through Fourier transform method. Reliable phase unwrapping can be carried out by using the compensated fringe patterns. Experimental results demonstrate the efficiency of the proposed method.

Key words measurement; color compensation; complementary color-encoding; color segmentation

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 100.5070; 100.5088; 330.1710

1 引言

近年来, 基于光栅投影的三维轮廓提取术以其低成本、高精度、大视场、实时性强和抗干扰等优点成为三维测量中的热点研究方向^[1~3]。在结构光三维测量术中, 传统的灰度结构光由于单幅信息量小, 实现编码需要投影多幅图像^[4], 对提高实时性不利。由于彩色结构光能提供更为丰富的信息, 因而国内外多名学者对彩色编码光栅技术进行了深入的研

究, 提出了多种基于彩色编码技术的三维测量方法, 例如三色相移法^[5]、基于格雷编码的彩色编码方法^[6]和基于双色条纹投影的傅里叶轮廓术^[7]等。

随着结构光三维测量得到越来越广泛的应用^[1], 被测对象的特性也更加复杂。需要测量的对象不再局限于简单浅色物体, 而是扩展到物体表面存在丰富颜色、高度跳变、镜面等情况, 这些不利因素极大地降低了基于彩色编码的三维测量术的精

收稿日期: 2011-07-25; 收到修改稿日期: 2011-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(60775025, 51175081)和江苏省自然科学基金(BK2010058)资助课题。

作者简介: 胡路遥(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维测量及图像处理等方面的研究。

E-mail: huluyao1989@126.com

导师简介: 达飞鹏(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事三维测量及三维人脸识别等方面的研究。

E-mail: dafp@seu.edu.cn(通信联系人)

度。其中物体表面的彩色纹理对彩色条纹的分割与正弦性都有很大影响,而彩色分割和条纹的正弦性又直接影响彩色光栅三维测量的精度。因此,在目前关于彩色结构光三维测量的研究中,被测物体往往都是自身颜色为白色或浅色,或者在被测物体表面上喷上一层白粉。而喷白粉违背了非接触的原则,彩色编码光栅三维轮廓术的应用范围受到了极大的限制。针对这一问题,文献[8]提出分别投影 3 幅红绿蓝 (RGB) 纯色正弦图像到被测物体上进行三维测量,该方法没有彩色编码,在解决高度跳变的问题上有所不足;文献[9]提出投影互补码光栅,以其相对大小关系不变性的原理来得到正确解码,该方法未能消除光栅正弦性受到的影响。文献[10]提出投影一幅纯白和一幅纯黑的图到物体表面,以此进行彩色补偿;文献[11]提出预先标定白板的颜色响应,近似获取物体表面的彩色纹理来减小其影响。上述方法在改善光栅的正弦性上均有不足。

针对物体表面颜色对于彩色光栅的质量造成严重干扰这一问题,本文首先基于彩色响应模型分析了该干扰主要是源自 RGB 三通道反射率不平衡的影响^[10],进而设计一幅带有周期信息的彩色格雷编码光栅并加以正弦调制,然后对调制后图像的每一个像素取其 RGB 的补值,得到另一幅互补辅助光栅图像。将两幅光栅分别投影到物体表面,利用互补特性获取各个像素点的反射率矩阵,并根据反射率矩阵对光栅图像进行补偿。实验证明,补偿后的图像有效地削弱了物体表面彩色纹理的影响,条纹光栅的颜色信息和正弦性都得到很好的改善。由此得到准确的彩色分割效果与条纹阶次信息,用于指导相位展开并获取三维信息。

2 测量系统与流程

基于彩色光栅的三维测量方法的系统构建如图 1 所示。测量系统的硬件设备为 Hcp-610x 型投影仪、分辨率为 2048 pixel × 2048 pixel 的 MegaPlusII ES4020 彩色 CCD、Matrox Solios 图像采集卡以及用作处理器的 Core2 计算机。

图 2 给出了三维测量的具体流程。首先将一对互补光栅投射到物体表面,经 CCD 采集被物体表面高度信息调制变形后的光栅图像,通过图像采集卡传递并保存在计算机中。得到的原始图像由于受到物体表面彩色纹理的影响,条纹颜色信息和正弦性都有较大的误差。对该原始图像进行彩色补偿,可以改善条纹颜色信息和正弦性。采用傅里叶变换法从补偿后的图像

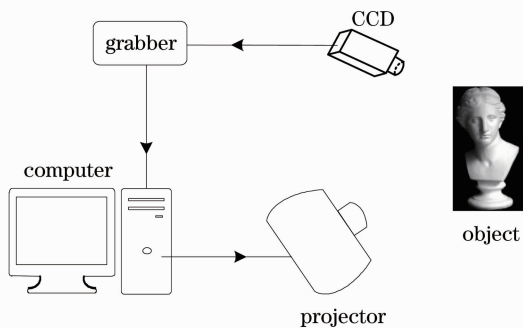


图 1 系统构建
Fig. 1 System setup

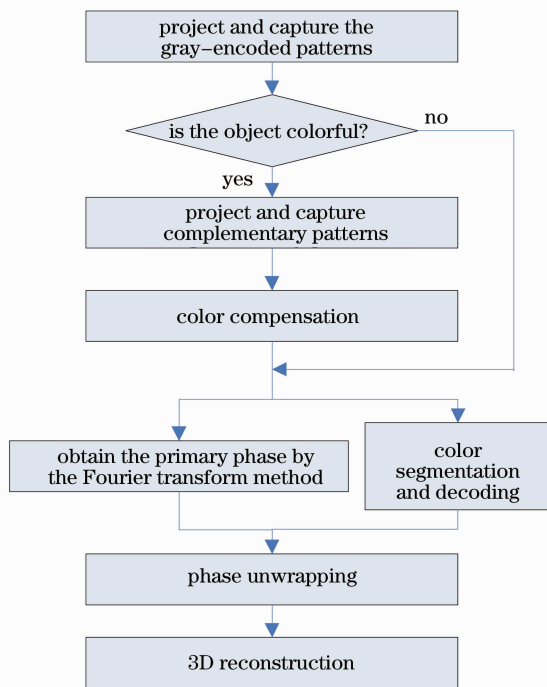


图 2 测量流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed method

中提取出包裹相位信息,针对正弦光栅的特点,采用一种 RGB 颜色空间与 HSI(色调-饱和度-强度)颜色空间结合的彩色分割方法,得到分割结果后解码并进行相位展开。根据展开之后的相位图,利用三角法原理^[5]可以求得每一个像素点的高度信息,得出三维点云图。需要指出的是,在测量通常的白色物体或者浅色物体的时候,可以选择性地不追加投影第二幅辅助光栅,相当于传统的彩色格雷编码测量方法^[12]。

3 彩色补偿方法

3.1 互补光栅设计原理

互补彩色编码条纹如图 3 所示。首先设计一幅采用格雷编码的彩色条纹图,该编码采用 6 种纯色,即红(100)、品红(101)、蓝(001)、青(011)、绿(010)、

黄(110),按格雷编码规则生成彩色编码,即保证相邻条纹之间汉明距离均为1,从而大大减少了误码率,提高了系统稳健性^[12]。该编码图具体如图3(a)所示。

为了减少三维测量中投影的幅数,将正弦条纹与彩色编码结合起来。采用对彩色编码的三个通道均进行正弦调制的方法。设格雷编码光栅的第 n 条编码条纹其RGB分量分别为 $I_{rn}(x,y), I_{gn}(x,y)$,

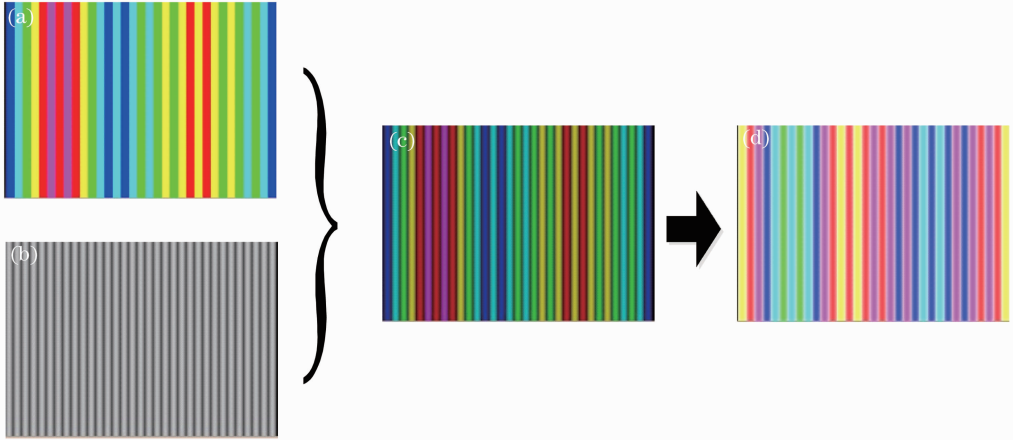


图3 互补型彩色正弦条纹光栅。(a)格雷编码序列;(b)正弦条纹;(c)彩色编码正弦条纹;(d)互补辅助条纹

Fig.3 Schematic diagram of complementary sinusoidal patterns. (a) Gray code; (b) sinusoidal patterns; (c) color-encoded sinusoidal patterns; (d) complementary patterns

为了有利于条纹边界的准确分割,采取提高调制点的方法,将灰度变化范围设定在75~180。彩色格雷编码与正弦条纹结合之后如图3(c)所示。

为了精确地补偿物体彩色纹理对三维测量的影响,根据该格雷编码光栅设计出一幅辅助光栅。其设计原则是两幅图的像素值 $[r \ g \ b]^T$ 完全互补,即叠加之后为 $[255 \ 255 \ 255]^T$ 。因此,对每一个像素取 $[255-r \ 255-g \ 255-b]^T$ 即可得到互补辅助光栅。由于格雷编码光栅的灰度变化范围设定在75~180,因而通过求补所得到的辅助光栅其灰度变化范围也在75~180,保证了两幅光栅在光强上是均衡的。

3.2 彩色补偿

在传统的彩色结构光三维测量中,投影出的光栅受到被测物体表面颜色的影响,导致光栅颜色误判增加。由于物体表面具有不同的颜色,也就是对RGB三通道的反射率不平衡,导致CCD采集到的图像其颜色并不是投影光栅的颜色,而是光栅与物体自身颜色混叠后的状态。

参考Caspi等^[10]提出的彩色响应模型,即在测量系统中CCD采集到的像素值与输入投影仪的设定像素值之间的响应关系为

$I_{bn}(x,y)$,条纹宽度为 ω 个像素,则结合正弦条纹之后的彩色光栅RGB分量表达式分别为

$$\begin{cases} I'_{rn}(x,y) = \sin\left(\pi \frac{x}{\omega}\right) I_{rn}(x,y) \\ I'_{gn}(x,y) = \sin\left(\pi \frac{x}{\omega}\right) I_{gn}(x,y) \\ I'_{bn}(x,y) = \sin\left(\pi \frac{x}{\omega}\right) I_{bn}(x,y) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \times \mathbf{P} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{AKP}(\mathbf{I}) + \mathbf{M}_0, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{M}=[R \ G \ B]^T$ 是CCD相机采集到图像上任意指定点的像素实际值, $\mathbf{M}_0=[R_0 \ G_0 \ B_0]^T$ 是在环境光影响下的像素背景值。经测试,在室内光照条件下,环境光与投影光其光强差距大到可以忽略 \mathbf{M}_0 的影响。 $\mathbf{I}=[r \ g \ b]^T$ 是传递给数字光处理投影仪(DLP)的图像上对应点的像素设定值。矩阵 \mathbf{A} 是投影仪和CCD之间的三通道耦合矩阵。 \mathbf{P} 因子表征像素设定值与实际投影出的RGB光强之间的对应关系。反射率矩阵 \mathbf{K} 表征该点对RGB三个分量的不同反射率。

由于 \mathbf{A} 与像素的具体空间位置无关,因而可以一起在预处理中校正。只需要预先测量一次,其结果可以用于所有像素点的校正。为了快速性和简易性,采用一种不需要光度计的近似测量方法,分别投

影三幅 RGB 纯色图到白板上,以其响应来计算出三通道耦合矩阵 \mathbf{A} 。在近似认为白板对 RGB 的反射率均为 1 的时候,可以得到

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}. \quad (4)$$

三幅纯色图的编码值 $\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}$ 分别为 $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$,

$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$,因此在测量值 $\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$ 以求平均值的方式确定后,

可计算得到耦合矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0.441 & 0.192 \\ 0.113 & 1.241 & 0.135 \\ 0.047 & 0.322 & 1.058 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

求出其逆矩阵得

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{bmatrix} 1.0445 & -0.3330 & -0.1471 \\ -0.0931 & 0.8631 & -0.0932 \\ -0.0181 & -0.2479 & 0.9801 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

得到矩阵 \mathbf{A}^{-1} 后,对图像的每一个像素其 $[R \ G \ B]^T$ 值均乘以 \mathbf{A}^{-1} 进行校正,就可以消除三通道耦合对彩色图像质量的影响。

在进行解耦预校正之后,将格雷编码光栅和其互补辅助光栅投影到物体表面。设格雷编码光栅中任意一个像素点的 RGB 通道设定值为 x, y, z ,即该点实际像素值满足

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \times \mathbf{P} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则其互补辅助光栅中对应的像素点的实际像素值满足

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \times \mathbf{P} \begin{bmatrix} 255 - x \\ 255 - y \\ 255 - z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将两幅图像的实际像素值逐个进行对应点的叠加,得到

$$\begin{bmatrix} R + R' \\ G + G' \\ B + B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{RR} & a_{RG} & a_{RB} \\ a_{GR} & a_{GG} & a_{GB} \\ a_{BR} & a_{BG} & a_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_g & 0 \\ 0 & 0 & k_b \end{bmatrix} \times \mathbf{P} \begin{bmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2R_0 \\ 2G_0 \\ 2B_0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

化简得到方程组

$$R + R' = a_{RR}k_r + 2R_0, \quad (10)$$

$$G + G' = a_{GG}k_g + 2G_0, \quad (11)$$

$$B + B' = a_{BB}k_b + 2B_0. \quad (12)$$

可以分别解出每一个点的反射率矩阵 \mathbf{K} ,容易得到矩阵 \mathbf{K}^{-1} ,然后对正弦调制光栅中每一个像素点作如下运算:

$$\mathbf{M} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{A}^{-1}[\mathbf{AKP}(\mathbf{I}) + \mathbf{M}_0] = \mathbf{P}(\mathbf{I}) + \mathbf{K}^{-1}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{M}_0. \quad (13)$$

由于室内光照条件下 \mathbf{M}_0 近似为零,因此有 $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ 。经过这一系列运算之后,可以消除三通道耦合矩阵 \mathbf{A} 和反射率矩阵 \mathbf{K} 的影响,还原出准确的彩色编码信息与相位信息。由于彩色条纹之间存在一定的混叠与干扰,对应的互补彩色条纹之间也存在相应的干扰,通过叠加互补色,求取的反射率矩阵 \mathbf{K} 抵消了干扰。较之投射均匀白光求取的反射率 \mathbf{K} ,能起到更好的光栅条纹补偿效果,补偿后的图像具有更好的正弦性。

4 实验结果与分析

为了验证上述方法的有效性,以一个表面颜色丰富且具有高度跳变的魔方作为被测对象进行了实验,被测对象如图 4(a)所示。对魔方投影格雷编码彩色光栅,采集到被物体高度所调制变形的条纹光栅如图 4(b)所示。为了消除正弦性对亮度的影响,采用 RGB 彩色空间与 HSI 彩色空间相结合的方法对光栅进行彩色分割。由于魔方表面颜色的干扰,分割后的结果出现了严重的颜色误判现象,如图 4(c)所示。并且其正弦性也受到严重的干扰。

为了补偿该干扰,对魔方追加投影一幅互补辅助光栅,如图 4(d)所示。以上述方法进行彩色补偿之后得到图像如图 4(e)所示,可见魔方表面颜色的干扰已经基本被消除,得到的彩色分割结果较为准确,如图 4(f)所示。

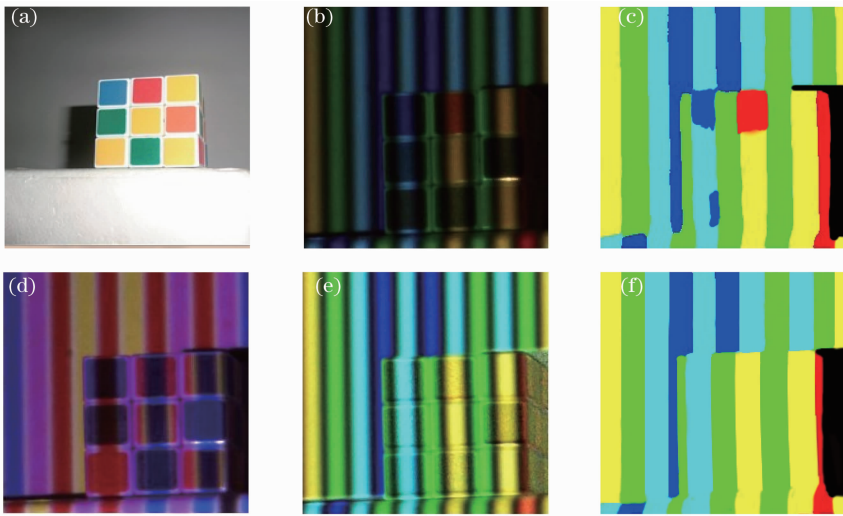


图 4 对魔方的测量实验。(a)彩色魔方;(b)彩色编码条纹;(c)直接分割结果;(d)互补辅助条纹;
(e)补偿后的条纹;(f)补偿后的分割结果

Fig. 4 Experimental results. (a) Rubik's cube; (b) color-encoded patterns; (c) segmentation result; (d) complementary patterns; (e) compensated patterns; (f) segmentation result of compensated patterns

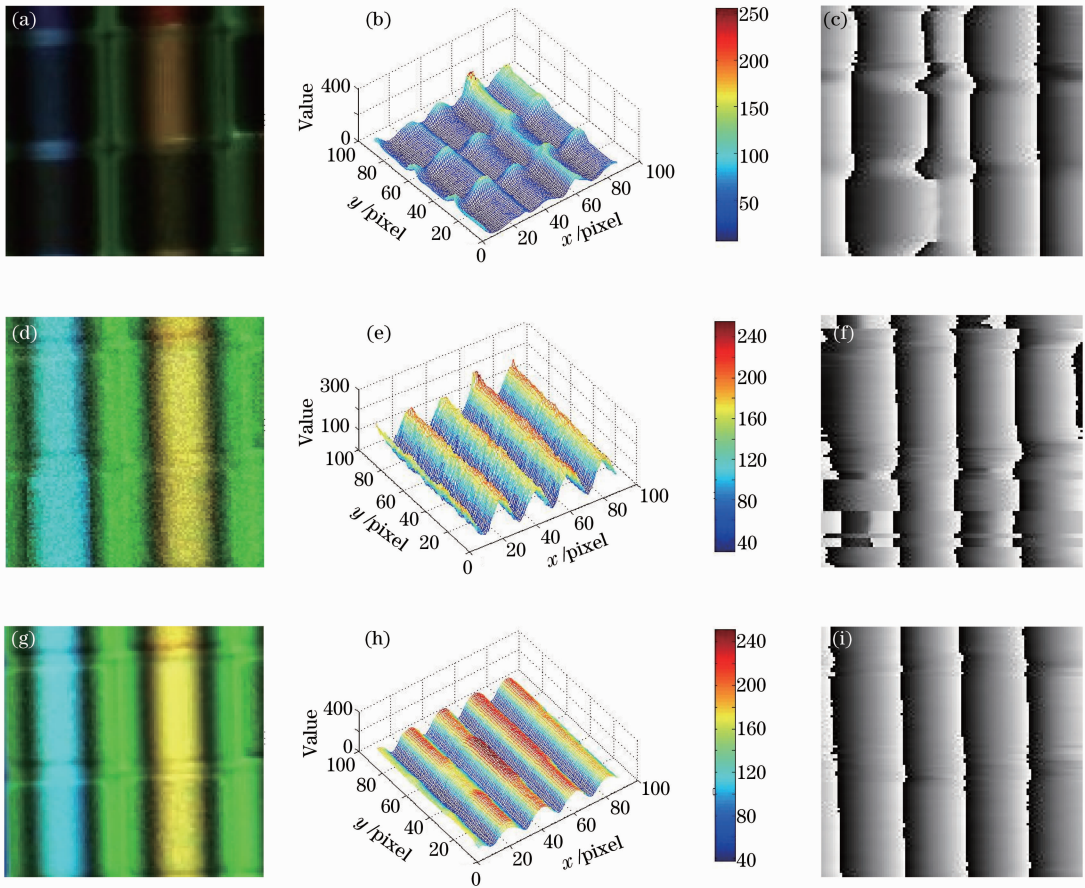


图 5 补偿效果分析。补偿前的(a)原始图像,(b)灰度化结果,(c)相位图;经文献[10]方法补偿后的(d)图像,
(e)灰度化结果,(f)相位图;经本文方法补偿后的(g)图像,(h)灰度化结果,(i)相位图

Fig. 5 Analysis of compensation effect. Before compensation: (a) original patterns, (b) gray patterns, (c) phase of patterns; compensated by the method of Ref. [10]: (d) patterns, (e) gray patterns, (f) phase patterns; compensated by proposed method: (g) patterns, (h) gray patterns, (i) phase of patterns

同时,经过彩色补偿之后光栅的正弦性也得以改善,从中可以提取出可靠的高度信息。采用傅里叶变换法来提取包裹相位,其精度在一定程度上受到正弦条纹的非正弦性影响^[19]。图 5(a),(d),(g) 分别是原始图像、经文献[10]方法补偿后的图像、经本文方法补偿后的图像三者中同一位置截取的部分数据。图 5(b),(e),(h) 分别为三者进行灰度化之后得到的图像,以三维图的形式呈现,其中 z 轴代表灰度值。图 5(c),(f),(i) 分别为三者求解出的包裹相位图。可以看出,未经补偿的原始图像正弦性较差,仅仅在魔方色块之间的白色区域有较好的响应,如图 5(b) 所示。并且其提取出的包裹相位误差也很大,本应是等宽的相位周期出现了严重的不平衡现象,如图 5(c) 所示。而经过文献[10]方法补偿

后,图像的正弦性得到一定程度的恢复,各个色块的灰度分布较为均匀,如图 5(e) 所示。同时解出的相位也有所改善。但是由于正弦性仍然不理想,相位仍然有一定的误差,如图 5(f) 所示。经互补彩色光栅方法补偿后的图像更为平滑,毛刺较少,具有更好的正弦性,如图 5(h) 所示。因而能提取出较好的相位,从图 5(i) 可以看出,相位分布均匀平滑,魔方色块之间的细微凹槽也在相位图上有所体现。

图 6 是从图 5 中提取出的某一行的数据,这样可以更清楚地体现正弦性的提高。准确的分割结果和良好的正弦性保证了重构结果的准确可靠。互补彩色光栅方法最终重构出的三维点云图如图 7 所示,可见魔方所有色块和色块之间的白色凹槽都得到准确的重构。

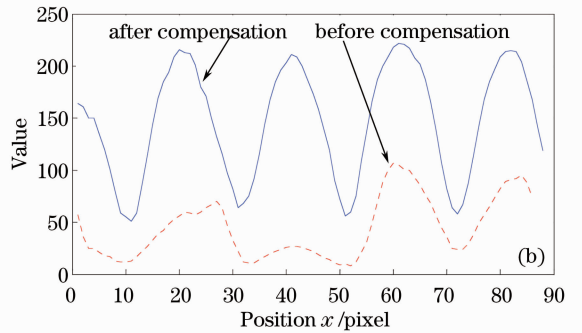
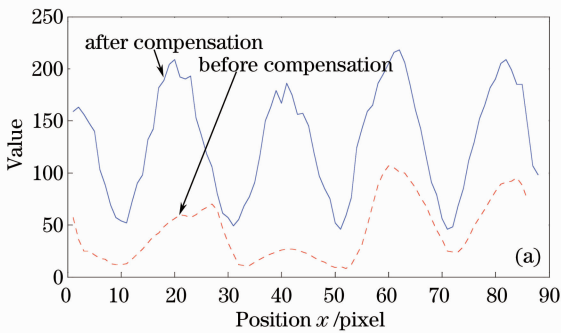


图 6 正弦性的补偿与改善。(a) 经文献[10]方法补偿后与原始图像的对比;(b) 经本文方法补偿后与原始图像的对比
Fig. 6 Contradistinction. (a) Contradistinction between the same line from the patterns compensated by the method of Ref. [10] and original patterns; (b) contradistinction between the same line from the patterns compensated by the proposed method and original patterns

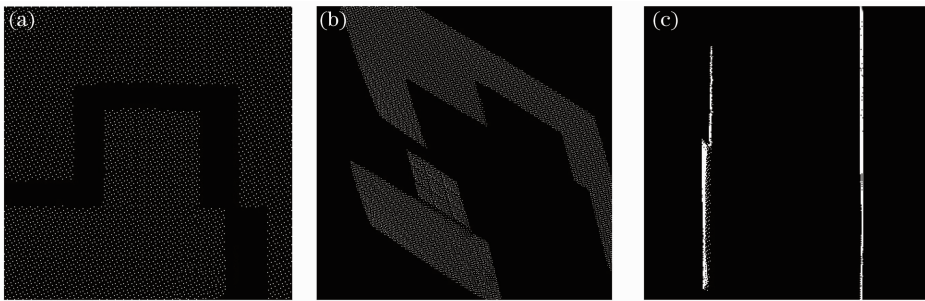


图 7 测量结果。(a) 三维点云正视图;(b) 三维点云斜视图;(c) 三维点云侧视图
Fig. 7 Measurement results. (a) Front view of point cloud; (b) oblique view of point cloud; (c) side view of point cloud

5 结 论

提出了一种针对彩色物体的快速三维测量方法,该方法通过投影一幅格雷编码彩色条纹光栅和一幅互补辅助光栅,逐一求解出每个像素的 RGB 三通道反射率并进行补偿,以补偿后的图像来指导彩色条纹的分割解码与相位提取,最终完成三维重建。

理论分析和实验均证明了该方法的有效性。彩色结构光三维测量的精度受到 RGB 三通道耦合、被测物体表面彩色纹理干扰等方面的影响,通过预先测量并计算耦合矩阵,削弱了耦合的影响。设计了基于格雷编码原则的彩色条纹,因为相邻条纹汉明距离为 1,降低了误码率,提高了鲁棒性。互补辅助光栅的引入很好地消除了物体自身颜色对彩色结构光的

干扰,恢复了条纹颜色信息,改善了光栅正弦性。使得彩色物体同样能够被彩色光栅投影方法精确测量,以一幅额外投影光栅的微小代价扩大了彩色光栅三维测量的适用范围。并且在被测物体为传统的白色或者浅色时,可以选择不追加投影该辅助光栅,这样测量速度和精度都等同于传统的彩色格雷编码测量方法。

参 考 文 献

- 1 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792~796
- 2 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 3 Su Weihung. Color-encoded fringe projection for 3-D shape measurements [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13167~13181
- 4 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C.. 3-D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1444~1447
康新, 何小元, Quan C.. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1444~1447
- 5 Pan Jiahui, Huang Peisen, Chiang Fupen. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3-D shape measurement; color coupling and imbalance compensation [C]. *SPIE*, 2004, **5265**: 205~212
- 6 Pan Jiahui, Huang Peisen. Color-coded binary fringe project technique [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(2): 77~85
- 7 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1153~1157
陈文静, 苏显渝, 曹益平等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1153~1157
- 8 Zhang Zonghua, Catherine E. Towers, David P. Towers. Shape and color measurement of colorful objects by fringe projection [C]. *SPIE*, 2008, **7063**: 70630N
- 9 Wang Luyang, Da Feipeng. Three-dimensional shape measurement technique based on complementary color-encoded fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0612004
王露阳, 达飞鹏. 基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0612004
- 10 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
- 11 Ma Ke, Zhang Qican. A new method to reduce the influence of object's color texture in three-dimensional shape measurement [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(4): 583~588
麻珂, 张启灿. 三维面形测量中减小物体彩色纹理影响的新方法[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(4): 583~588
- 12 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. 3-D vision based on the combination of Gray code and phase shift light projection [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 13 Liang-Chia Chen, Xuan Loc Nguyen, Fu-Hao Zhang *et al.*. High-speed Fourier transform profilometry for reconstructing objects having arbitrary surface colours [J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(9): 095502

栏目编辑:何卓铭