

基于互补色编码条纹投影的三维形貌测量方法

王露阳 达飞鹏

(东南大学自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要 针对彩色编码条纹投影轮廓术中,被测物体表面颜色易与投影条纹颜色发生干扰的问题,提出了一种新的基于互补色编码条纹投影的三维测量方法。先后向被测物体投影一幅主彩色编码正弦条纹图和一幅与前者包含的彩色编码条纹颜色互为补色的彩色条纹图。利用两者颜色互补的特点,判断两幅图像中对应像素点的颜色状态来确定其在主彩色编码正弦条纹图中所属条纹的正确颜色,解决物体表面颜色干扰导致的条纹颜色误判问题,得到准确的彩色编码信息。采用傅里叶变换法获取主彩色编码正弦条纹图中包含的正弦条纹的包裹相位,基于彩色编码信息展开相位。实验表明,提出的方法能有效降低被测物体表面颜色对投影条纹颜色的干扰,可靠地实现物体的三维测量。

关键词 光学测量;相位展开;彩色编码;互补色

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0612004

Three-Dimensional Shape Measurement Technique Based on Complementary Color-Encoded Fringe Projection

Wang Luyang Da Feipeng

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

Abstract In order to measure the object with colorful surface whose surface color may interfere with the color distinguish of projected fringe pattern, a novel method based on complementary color-encoded fringe projection is proposed. Two fringe patterns are projected onto the object in sequence. The first frame is encoded in a hybrid way which is with the sinusoidal color fringe and with the color coding information. The second frame is other color fringe pattern whose color is the previous encoding color's complementary one in each according pixel. Based on the color complementary feature of the two patterns, the color information of each pixel in the captured color-encoded sinusoidal fringe image can be established with the assistance of the complementary color pattern, so that the interference of object's color can be eliminated. Phase retrieval is done by the Fourier transform method applied to the sinusoidal fringe and unwrapped according to the color coding information. Experimental results show that the proposed technique is valid and can be applied to the measurement of colorful object.

Key words optical measurement; phase unwrapping; color coding; complementary color

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 100.5070; 100.5088; 330.1710

1 引 言

近年来,基于结构光投影的三维轮廓提取术以其高精度、易于全局分析和高分辨率^[1]等优点成为三维测量领域的研究热点,并日趋广泛地应用于实际测量工程中。基于结构光投影的三维轮廓提取术

依托于相移法^[2~5]和傅里叶变换轮廓术(FTP)^[6~9]等方法获得包裹相位,继而对相位进行展开。常见的相位展开方法有:采用二元编码条纹展开相位^[10]、基于调制度展开相位^[11]、基于中心摄动法展开相位^[12]和基于质量图指导法展开相位^[13]等。针

收稿日期: 2010-11-26; **收到修改稿日期**: 2011-02-25

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

作者简介: 王露阳(1986—),女,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: jenny.lyw@gmail.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

对高度不连续的物体进行测量时,彩色编码条纹投影轮廓术的优势在于彩色编码条纹能够提供更丰富的利于三维信息提取的信息,根据编码信息可更加可靠地实现相位展开。随着研究的不断深入以及测量快速性要求的提高,宋雷等^[14]提出一种新型彩色复合条纹测量方法。Su等^[15]提出将正弦条纹融入彩色编码条纹的思想来设计投影条纹。此类方法试图将三维测量所需的信息从一幅投影条纹图中获得从而改善测量实时性。但在实际测量中被测物体表面颜色不可避免地会与条纹本身颜色产生干扰,将大大影响彩色编码信息获取的准确性,也不利于相位的可靠展开。文献[16]中提出向彩色物体依次投影红色、绿色、蓝色正弦条纹图像,基于相移法得到包裹相位,然后通过三幅彩色条纹具有的三种不同条纹频率实现相位展开,但由于三色通道不平衡等因素的存在,该方法尚有不足。

针对彩色编码条纹投影轮廓术中彩色物体的测量问题,本文提出了一种新的基于互补色编码条纹投影的三维测量方法。向彩色被测物体表面依次投影一幅主彩色编码正弦条纹图和一幅与前者包含的彩色编码条纹颜色互为补色的彩色条纹图,利用两者颜色互补的特点解决主彩色编码正弦条纹图在彩色分

割时的条纹颜色误判问题。

2 互补色编码条纹设计原理

互补色编码条纹构成原理如图1所示,共涉及两幅具有相同的条纹数量和条纹宽度的彩色编码条纹图案,先后投向被测物体。第一幅彩色编码条纹记为主彩色编码正弦条纹,选取白色、青色、绿色和黄色四色条纹根据格雷编码原理排列组成如图1(a)所示的彩色编码序列,对得到的彩色编码序列中的G分量进行正弦调制实现将正弦条纹信息融入G通道,最终得到如图1(d)所示的主彩色编正弦码条纹。彩色编码序列的生成方法是:若用3位二进制码描述每个颜色的红绿蓝(RGB)三个分量,即白色(111)、青色(011)、绿色(010)、黄色(110),则相邻的两个条纹颜色之间只有一位二进制码不同。同时,指定每相邻的4个条纹为一个编码子序列,每一编码子序列中包含的条纹颜色组合信息都具有唯一性。据此一共可得到29个编码子序列,共计32个条纹。这四种颜色的G分量均为255,R,B分量则在0和255这两个值中选取,使三个颜色通道在用于记录条纹颜色时更易于识别。

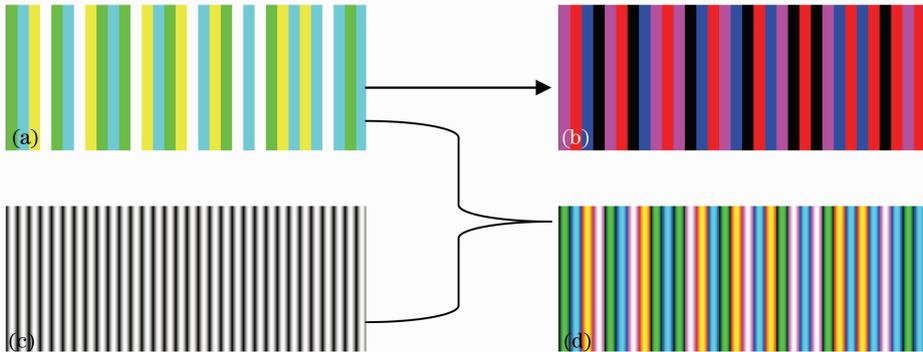


图1 互补色编码条纹构成原理图。(a)主彩色条纹编码序列,(b)补色条纹序列,(c)主彩色条纹中G通道记录的正弦条纹,(d)主彩色编码正弦条纹

Fig.1 Schematic diagram of complementary color-encoded fringe patterns. (a) encoding sequence of primary color fringe, (b) sequence of complementary color fringe, (c) sinusoidal fringe in G channel of primary color fringe, (d) primary color-encoded sinusoidal fringe

投影主彩色编码正弦条纹后,再向被测物体投影一幅补色条纹。设主彩色编码正弦条纹中包含的彩色编码条纹在 (x,y) 位置像素的K分量值为 $K_1(x,y)$,补色条纹中对应位置像素的K分量值为 $K_2(x,y)$,则满足

$$K_2(x,y) = |255 - K_1(x,y)| = \begin{cases} 0, & K_1(x,y) = 255 \\ 255, & K_1(x,y) = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $0 < x \leq w, 0 < y \leq h$, w 和 h 分别是彩色编码条纹宽度和长度方向的像素点数。所以补色条纹中包含黑色(000)、红色(100)、品色(101)、蓝色(001)条纹,具体如图1(b)所示。

3 相位提取

图2给出了基于互补色编码条纹投影实现三维测量的具体流程。

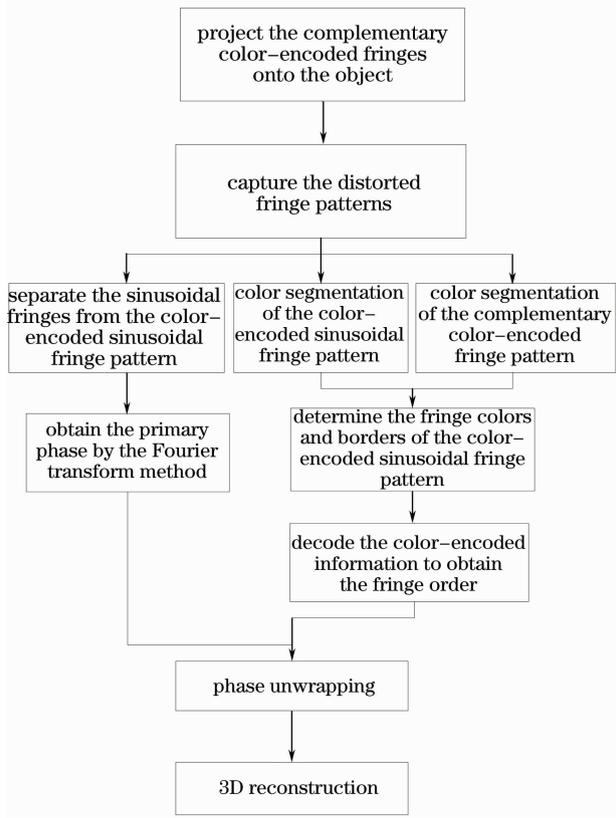


图2 基于互补色编码条纹投影的三维测量流程图
Fig. 2 Flow chart of 3D measurement based on complementary color-encoded fringe projection

3.1 傅里叶变换轮廓术基本原理

图3为条纹投影测量系统光路图,将采集到的主彩色编码正弦条纹中G通道信息分离出来,得到整幅图由G分量描述的一个携带待求相位信息的正弦条纹变形光场为

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 + \phi(x, y)], \quad (2)$$

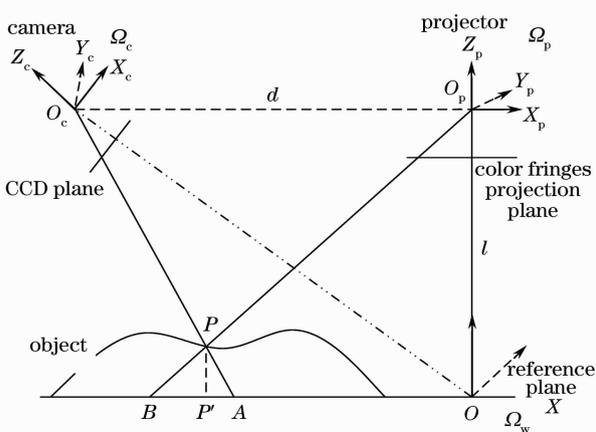


图3 条纹投影测量系统光路图
Fig. 3 Optical geometry of measurement system based on fringe pattern projection

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为条纹对比度, f_0 为投影条纹频率, $\phi(x, y)$ 为条纹变形后的附加相位值。

对(2)式进行傅里叶变换得到其频谱分布为

$$G(f, y) = A(f, y) + Q(f - f_0, y) + Q^*(f + f_0, y), \quad (3)$$

式中 $A(f, y)$ 为 $a(x, y)$ 的傅里叶变换, $Q(f - f_0, y)$ 为 $b(x, y) \exp[i\phi(x, y)]/2$ 的傅里叶变换, * 表示共轭复数。

对该频谱滤波提取含有相位信息的基频分量, 然后通过傅里叶逆变换得到每一点的相位分布。相邻的两种不同颜色条纹的交界区域, 不同颜色之间的会产生 R, G, B 通道间的串扰^[17], 光栅中 G 通道记录的正弦条纹在条纹边界处会一定程度受到 R, B 分量的干扰, 可采用滤波方式将噪声消除从而保证包裹相位获取的精度。同时, 由于涉及反正切运算, 故这里解得的相位 $\phi(x, y)$ 为包裹相位, 变化范围为 $-\pi \sim \pi$, 需要对其展开得到绝对相位的分布。

3.2 基于互补色编码条纹的相位展开

如图2给出的测量流程所示, 基于互补色编码条纹进行相位展开时, 除了向被测物体投影主彩色编码正弦条纹之外, 增加了一幅补色条纹, 用于辅助主彩色编码正弦条纹的彩色分割, 降低物体表面颜色对条纹颜色的干扰。由于在投影条纹设计中, 主彩色编码正弦条纹中包含的彩色编码条纹和补色条纹在颜色上互补, 但融入正弦条纹后, 对应像素的颜色互补性丢失, 所以在测量过程中对采集到的图像需先进行彩色分割得出条纹颜色, 然后根据颜色互补特性改善分割效果, 以消除物体本色的干扰。基于互补色编码条纹的相位展开可分为两个步骤。

3.2.1 图像彩色分割

对采集到的主彩色编码正弦条纹图像及其补色条纹图像进行彩色分割的过程是一个正确判断图像中每一像素点所属条纹的正确颜色信息和边界信息的过程。由于阈值迭代分割算法^[18]具有易于实现、处理快速和精度高等优点, 本文通过分别对 RGB 颜色通道采用迭代阈值分割, 最后综合三个通道信息实现整幅图像的彩色分割。图像彩色分割面临两个问题: 1) 由于主彩色编码正弦条纹中携带了正弦调制信息, 单位条纹内部靠近条纹边界处 G 分量值较低, 在阈值分割时容易误判为 0, 故采用迭代法选取得到的阈值无法得出条纹边界附近的正确颜色信息, 导致边界分割不准确; 2) 由于测量针对彩色物体进行, 物体表面颜色不可避免与投影条纹颜色产生

干扰,将导致条纹颜色的误判进而影响相位展开。针对上述问题,当采集到的彩色编码正弦条纹图完成彩色分割后,通过补色条纹的彩色分割结果来辅助判断其中对应位置处的颜色状态来消除误判区域,同时,由于补色条纹由未经正弦调制的纯色条纹组成,条纹边界处色差大,易于清晰地分割出条纹边界,可帮助克服主彩色编码条纹中条纹边界附近的颜色误判问题。

补色条纹的辅助分割原理如下:由于主彩色编码正弦条纹中包含的彩色编码条纹每一像素点的颜色与补色条纹中相应位置像素点的颜色互为补色,设前者在 (x,y) 位置像素的 K 分量值为 $K_1(x,y)$,后者在 (x,y) 位置像素的 K 分量值为 $K_2(x,y)$;经由 CCD 采集得到图像中 (x',y') 位置的像素对应于彩色编码条纹图中 (x,y) 位置的像素,设采集到的主彩色编码条纹的分割图中 (x',y') 位置像素的 K' 分量的值为 $K'_1(x',y')$,补色条纹的分割图中 (x',y') 位置像素的 K' 分量的值为 $K'_2(x',y')$ 。

首先,假设两种颜色的条纹投影到被测物体表面,受物体表面颜色及环境光照等因素的作用影响后,这两种由 RGB 分量描述的颜色中相同分量的大小关系依然不变,即当且仅当 $K_1(x,y) < K_2(x,y)$ 时, $K'_1(x',y') < K'_2(x',y')$;当且仅当 $K_1(x,y) > K_2(x,y)$ 时, $K'_1(x',y') > K'_2(x',y')$ 。基于这项假设,只要判断主彩色编码正弦条纹和补色条纹分割图中对应位置像素点的 K' 分量值的大小关系,便能得出这个位置像素点在主彩色编码正弦条纹分割图中 K'_1 分量的状态值,此时得到的 K'_1 分量值便是该像素点所属条纹颜色的 K_1 分量值。据此即可得出这个位置像素所属条纹的颜色从而消除物体表面颜色的干扰。判断 K'_1 分量状态值时遵循

$$K'_1(x',y') = \begin{cases} 0, & K'_1(x',y') < K'_2(x',y') \\ 255, & K'_1(x',y') > K'_2(x',y') \end{cases} \quad (4)$$

理论上, $K'_1(x',y') \neq K'_2(x',y')$,因为主彩色编码正弦条纹及其补色条纹的分割图中对应位置处像素的 RGB 分量值都处在 0 或者 255 两种不同状态。但在实际测量过程中,被测物体表面颜色和彩色条纹颜色的相互影响结果可能呈现出一些异常情况。例如表面反射率较低的区域,条纹本身颜色将被吸收,则当 $K_1(x,y) = 255$ 且 $K_2(x,y) = 0$ 或反之时,在分割图中都可能会出现 $K'_1(x',y') = K'_2(x',y') = 0$ 的结果;不难推测,在反射率高的区域则可能出现 $K'_1(x',y') = K'_2(x',y') = 255$ 的结果,此时(4)式

就需增加考虑 $K'_1(x',y') = K'_2(x',y')$ 的情况。针对上述异常情况, $K'_1(x',y')$ 可判定为 0 或 255 从而得到相应两种分割方案。考虑到主彩色编码正弦条纹分割结果中条纹边界颜色 G 分量由 255 被误判为 0,但在补色条纹分割结果中 G 分量被准确的判断为 0,选择在 $K'_1(x',y') = K'_2(x',y') = 0$ 时将 $K'_1(x',y')$ 判定为 255 以消除主彩色编码正弦条纹边界处的误判。诚然,这将在其他区域引入另一种误判情况,即在物体表面反射率较低的区域,投影的两幅条纹图中相应区域在彩色分割结果中表现为 $K'_1(x',y') = K'_2(x',y') = 0$,此时分两种情况考虑:采用分割方案二,当 $K_1(x,y) = 255$ 且 $K_2(x,y) = 0$ 时,不会引入新的误判,但 $K_1(x,y) = 0$ 且 $K_2(x,y) = 255$ 时,会错误地将 $K'_1(x',y')$ 判定为 255,这与 $K_1(x,y) = 0$ 的实际情况相悖。针对这类可能存在的新的误判,采用基于窗口的滤波方式,通过统计窗口内大多数点的颜色信息来滤除噪声点。由于主彩色编码正弦条纹中,编码条纹与正弦条纹一一对应,滤波后,可通过获得的包裹相位边界来修正分割图中的条纹边界,从而更好地指导相位展开。需要指出的是,当被测物体表面存在大量反射率较低区域时,条纹颜色被大面积吸收,此方法失效。

3.2.2 解码求得条纹阶次

通过补色条纹辅助完成主彩色编码正弦条纹图像的分割之后,将彩色分割后得到的条纹序列与生成投影条纹序列进行查找比对,即能得到每个条纹的阶次,这一过程称为解码。解码过程如下:

1) 将用于编码的四种颜色即绿色、青色、黄色、白色依次编号为 1, 2, 3, 4, 则相应得到投影的主彩色编码正弦条纹图及其最终分割图中每一像素所属条纹的编号信息集合;

2) 从左到右依次取出分割图中各个编码子序列包含的条纹,即每次取出相邻的四个条纹,将其包含的编号信息与投影的条纹图中的条纹编号序列进行对比,当找到匹配的组合时,就能确定取出的四个条纹的阶次信息。同理确定该行所有条纹的阶次,对图像逐行处理,即得到整幅分割图中每一像素点所属条纹的阶次;

通过上述步骤得到图像中每一点像素所属条纹的阶次,绝对相位为

$$\Phi(x,y) = \phi(x,y) + 2\pi(n-1), \quad (5)$$

式中 $\phi(x,y)$ 为包裹相位, n 为条纹阶次。基于图 3 所示光路图中几何关系可得被测物体的高度 PP' 和绝对相位 $\Phi(x,y)$ 的关系为

$$PP' = \frac{l[\Phi(x,y)]}{\Phi(x,y) + 2\pi d/f_0}, \quad (6)$$

式中 f_0 为投影光栅频率, d 为投影仪和相机之间的距离。

4 实验结果与分析

基于彩色结构光的三维测量系统如图 4 所示。硬件结构由投影仪、CCD 摄像机、图像采集卡和计算机组成。测量系统选择 Hcp-610x 型投影仪向被测物体投影彩色条纹, 采用分辨率为 2048 pixel × 2048 pixel 的 MegaPlusII ES4020 彩色 CCD 采集变形条纹图像, 使用 Matrox Solios 图卡传输至计算机处理。

为验证本文提出算法的有效性, 采用图 4 所示测量系统对彩色纸盒和彩色储物盒进行三维重构实验, 实物情况如图 5 所示。向两个实验对象先后投影主彩色编码正弦条纹及其补色条纹, 图 6 为采集到变形条纹图。对采集到的图像采用迭代阈值分割法分别得到图 7 所示的彩色分割结果。

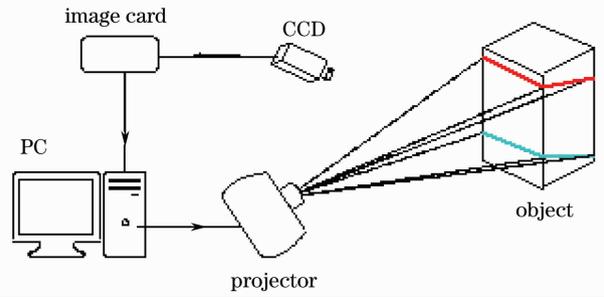


图 4 测量系统示意图

Fig. 4 Schematic of measurement system

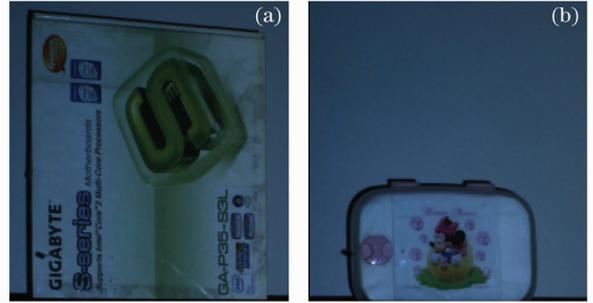


图 5 测量对象实物图。(a)纸盒,(b)储物盒

Fig. 5 Tested objects. (a) color carton, (b) storage box

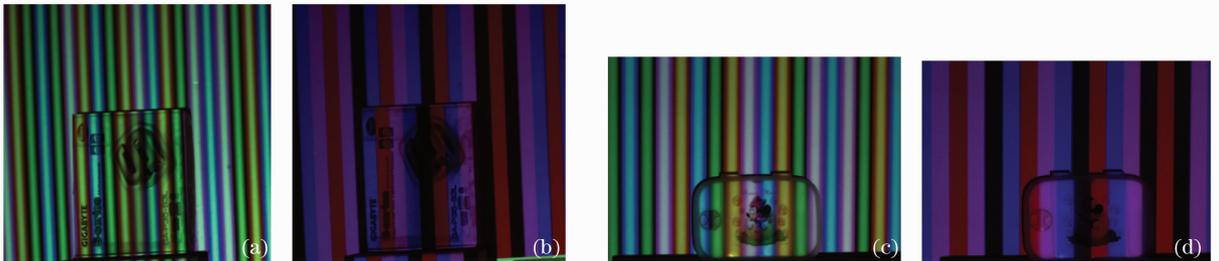


图 6 采集到的变形条纹图。(a)纸盒的变形主彩色编码正弦条纹图,(b)纸盒的变形补色条纹图,(c)储物盒的主彩色编码正弦条纹直接分割图,(d)储物盒的补色条纹直接分割图

Fig. 6 Deformed fringe captured by CCD. (a) deformed primary color-encoded sinusoidal fringe onto the carton, (b) deformed complementary color fringe onto the carton, (c) direct segmentation image of primary color-encoded sinusoidal fringe is projected onto the storage box, (d) direct segmentation image of complementary color fringe onto the storage box

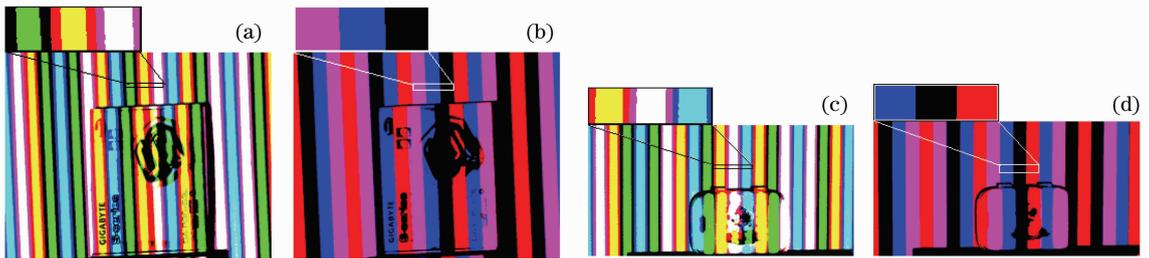


图 7 条纹图分割结果。(a)纸盒的主彩色编码正弦条纹分割图,(b)纸盒的补色条纹分割图,(c)储物盒的主彩色编码正弦条纹分割图,(d)储物盒的补色条纹分割图

Fig. 7 Color segmentation results of the captured images. segmentation image of (a) primary color-encoded sinusoidal fringe of carton, (b) complementary color fringe of carton, (c) primary color-encoded sinusoidal fringe of storage box, (d) complementary color fringe of storage box

图 7(a), (c) 为采集到的主彩色编码正弦条纹的直接分割结果, 不难发现, 物体表面颜色严重干扰了条纹颜色的判断, 同时从分割图右上角给出的细节图中可以看出条纹边界附近区域存在大量误判点; 另一方面, 观察图 7(b), (d) 所示的相应补色条纹的直接分割结果, 可知物体表面的颜色同样对补色条纹本身的颜色产生了干扰, 但条纹边界清晰。利用补色条纹来辅助改善主彩色编码条纹图的分割结果并选用分割方案二, 改善后的分割效果如图 8(a), (c) 所示。由图 8(a), (c) 可见, 边界附近区

域的颜色误判基本得以消除, 但此时物体表面反射率低的区域及阴影区域被判定为白色, 存在误判。通过窗口滤波方式进一步处理, 最后可得到如图 8(b), (d) 所示的主彩色编码正弦条纹的最终分割结果, 可见颜色误判情况得到了有效消除。另一方面, 通过傅里叶变换法由 G 通道正弦条纹获得包裹相位并以包裹相位边界修正分割图中的条纹边界。对最终分割图解码后得到条纹阶次信息, 最后根据包裹相位和对应的条纹阶次信息实现相位展开, 相位展开结果和三维重构结果如图 9 所示。

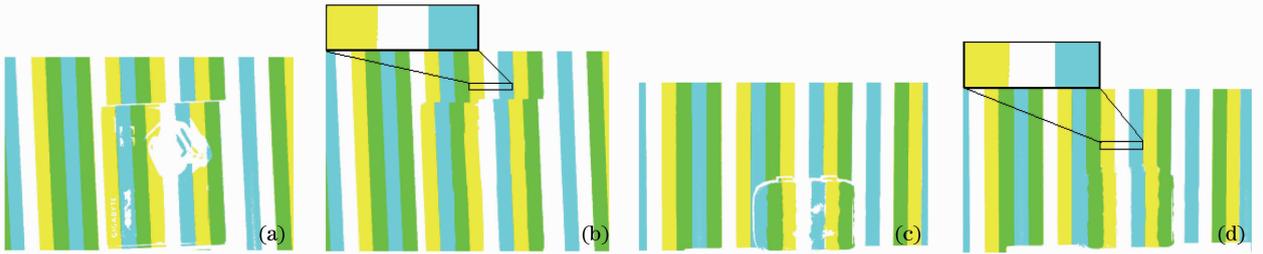


图 8 改善后的分割结果。(a) 补色条纹辅助后的纸盒的分割结果, (b) 滤波处理后纸盒的最终分割结果, (c) 补色条纹辅助后的储物盒的分割结果, (d) 滤波处理后储物盒的最终分割结果

Fig. 8 Improved color segmentation results of primary color-encoded sinusoidal fringe. (a) segmentation result of carton with the assistance of complementary color fringe, (b) final segmentation result of carton after noise filter, (c) segmentation result of storage box with the assistance of complementary color fringe, (d) final segmentation result of storage box after noise filter

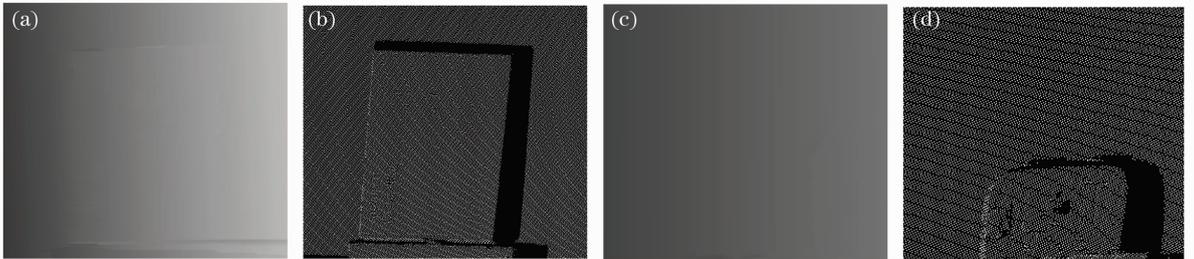


图 9 绝对相位和三维重构效果。(a) 纸盒的绝对相位分布情况, (b) 纸盒的三维重构效果, (c) 储物盒的绝对相位分布情况, (d) 储物盒的三维重构效果

Fig. 9 Absolute phase map and 3D reconstructed result. (a) absolute phase distribution of carton, (b) 3D reconstructed result of carton, (c) absolute phase distribution of storage box, (d) 3D reconstructed result of storage box

与传统的基于彩色编码条纹投影的三维测量方法相比, 本文利用互补色条纹能有效克服物体表面颜色对投影条纹颜色的干扰问题, 可靠地实现彩色物体的三维测量。

5 结 论

提出了一种基于互补色编码条纹投影的三维测量方法。向被测物体先后投影主彩色编码正弦条纹及其补色条纹, 通过判断对应位置像素点在两幅条纹图中的颜色状态来得到其在主彩色编码正弦条纹中所属条纹的正确颜色, 克服物体表面颜色对条纹

颜色判断的干扰。实验结果表明, 较于传统的基于彩色编码条纹投影的三维测量方法, 本文提出的方法在针对一般彩色物体进行测量时, 以多投影一幅补色条纹为代价, 可有效降低物体表面颜色对投影条纹颜色判断的干扰, 测量时具有较好的稳健性。

参 考 文 献

- 1 Qu Fang, Zhong Jingang. 3-D moving-lip shape measurement based on digital color-encoded structure light [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 691~694
- 曲 芳, 钟金钢. 基于数字彩色结构光投影的唇动三维测量[J]. *光学技术*, 2006, **32**(5): 691~694
- 2 Zhang Song, Yau Shingtung. High-resolution, real-time 3D

- absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2644~2649
- 3 P. S. Huang, Zhang Song. Fast three-step phase-shifting algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5086~5091
- 4 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. 3D vision based on the combination of gray code and phase shift light projection[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 5 Gong Qiong, Qin Yi. Extraction of real phase-shifting angle in two-step phase-shifting digital holography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1807~1811
巩琼, 秦怡. 二步相移数字全息中实际相移脚的获取[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1807~1811
- 6 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **22**(24): 3977~3982
- 7 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 8 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan *et al.*. Analysis of three dimensional measurement system and the coordinates calibration in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2780~2785
吴双卿, 张引, 张三元等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2780~2785
- 9 Wen Yongfu, Su Xianyu, Zhang Qican. Universal calculation formula and system calibration method based on 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
- 10 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 11 Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1858~1862
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制度测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1858~1862
- 12 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A novel phase-shifting method based on strip marker [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2010, **48**(2): 205~211
- 13 Zhang Song, Li Xiaolin, Yau Shingtung. Multilevel quality-guided phase unwrapping algorithm for real-time three-dimensional shape reconstruction[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 50~57
- 14 Song Lei, Yue Huimin. Fourier transform profilometry of colorful composite grating based on point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1368~1373
宋雷, 岳慧敏. 基于点阵投影的彩色复合条纹傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1368~1373
- 15 W. H. Su. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13167~13181
- 16 Zhang Zonghua, Catherine E. Towers, David P. Towers. Shape and colour measurement of colorful objects by fringe projection [C]. *SPIE*, 2008, **7063**: 70630N
- 17 P. S. Huang, F. P. Chiang. Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(1): 013602
- 18 A. K. Jain, B. Yu. Automatic text location in image and video frames[J]. *Pattern Recognition*, 1998, **31**(12): 2055~2076