

基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量

戴美玲 杨福俊 杜晓磊 何小元

(东南大学江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 提出了一种新的基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量方法。利用计算机产生一幅正弦条纹图和两幅单一强度图分别通过红绿蓝(RGB)三个通道合成为一幅彩色条纹图,并由液晶投影仪投影到被测物体表面,彩色变形条纹由彩色电荷耦合器件(CCD)采集并保存在计算机中。对畸变的彩色条纹进行三色分离处理,利用其中的红色条纹分量与蓝色背景相除消除不均匀反射率的影响,进而通过条纹强度正则化与修正的反正弦算法得到物体的三维形貌。对投影仪的非线性输出响应导致条纹强度的非正弦性提出了修正方法,提高了单幅条纹图形貌测量精度。最后给出了实验结果,并与传统的四步相移方法相比较,验证了新方法的有效性。

关键词 光学测量;三维形貌测量;彩色条纹;相位分析;投影仪非线性强度响应校正

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0712002

Three-Dimensional Shape Measurement Based on Single-Shot Color Fringe Projection of Sinusoidal Grating

Dai Meiling Yang Fujun Du Xiaolei He Xiaoyuan

(*Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China*)

Abstract A novel fringe projection profilometry based on one snapshot color sinusoidal fringe pattern is proposed. One color fringe pattern encoded with a sinusoidal fringe and two uniform intensity patterns is projected by a digital video projector and the deformed fringe pattern is recorded by a color charge coupled device (CCD) camera. The captured color fringe pattern is separated into its red, green, blue (RGB) components and division operation is applied to red and blue channels to reduce the effect of non-uniform reflectivity. Shape information of the tested object is decoded by applying an arcsine algorithm to the normalized fringe pattern. A simple technique is introduced to compensate for nonlinear intensity response of the digital video projector. The experimental results and the comparison with four-step phase-shifting method demonstrate the validity of the proposed method.

Key words optical measurement; three-dimensional (3D) shape measurement; color fringe pattern; phase analysis; calibration of nonlinear intensity response of projector

OCIS codes 120.6650; 120.5050; 100.0100

1 引 言

目前,条纹投影形貌检测技术正向着采用白光照明的数字视频投影仪投影,实时数字图像采集和条纹自动化处理,即更加实用的方向发展。相移法和傅里叶方法是研究最多的两种主要方法^[1~8]。传

统的相移方法如三步相移、四步相移等由于要投影多幅条纹图一般只能用于静态测量。虽然从原理上讲利用三色相移条纹合成单幅彩色图投影和彩色相机采集技术可以实现基于单幅图像的三维形貌测量,但是由于彩色相机存在色彩“串音”问题(即颜色

收稿日期: 2011-01-27; **收到修改稿日期**: 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(10727201, 10972055)资助课题。

作者简介: 戴美玲(1985—),女,博士研究生,主要从事光测力学与图像处理等方面的研究。

E-mail: 220090809@seu.edu.cn

导师简介: 杨福俊(1968—),男,博士,教授,主要从事应用光学方法研究新型材料与结构的力学性能等方面的研究。

E-mail: yang-fj@seu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

互扰现象),因此需要对分离后的三色相移条纹图像进行复杂的后处理;另外采用数字视频投影仪进行彩色条纹图投影,还存在灰度非线性响应的问题,从而影响了测量的速度和精度^[5]。尽管傅里叶方法只需一幅变形条纹图即可用于动态测量,但是其测量精度依赖于一级频谱的分离^[1],而对于测量表面形状复杂、曲率变化快速的物体,一级频谱的精确分离比较困难。另一方面,该方法需要通过人工反复试错的方式进行滤波,无法实现真正的全自动条纹处理。文献[9,10]基于数字光投影(DLP)视频投影仪单色投影模式分别提出三频和双频条纹投影技术,分别实现 240 frame/s 和 150 frame/s 的高速循环投影 3 幅一组的相移条纹图案,采用时域的三步相移法能够获得准确度较高的解相结果,然而条纹图投影与电荷耦合器件(CCD)的图像采集同步控制存在一定困难,再者对于快速移动的物体来说上述方法仍然不能精确测量。

本文提出一种新的基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量方法,将计算机生成的一幅正弦条纹图和两幅强度均匀分布图样通过图像处理技术分别输给彩色图像的红绿蓝(RGB)三个通道合成一幅彩色条纹图。对于投影仪的非线性输出特性影响条纹的正弦性问题,建立了预先标定的解决办法。

2 测量原理与方法

2.1 单幅正弦条纹相位解调

一般来说,正弦栅线投影三维表面形貌测量技术中相机采集的变形条纹强度可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y) + R(x, y)\{1 + \sin[2\pi fx + \varphi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 为与测量周围光环境有关的背景项, $R(x, y)$ 为物体表面反射率, f 为参考平面上条纹的空间频率, $\varphi(x, y)$ 为包含物体高度信息的条纹相位。由于条纹投影测量一般在环境光很弱的暗室内进行,(1)式中背景项 $A(x, y)$ 可以忽略,因此(1)式可改写成

$$I(x, y) = R(x, y)[1 + \sin \Psi(x, y)], \quad (2)$$

式中 $\Psi(x, y) = 2\pi fx + \varphi(x, y)$ 。为了获得归一化的正弦条纹图,与物体表面反射率有关的 $R(x, y)$ 必须消除。对于反射率分布比较均匀的情形,可通过均值滤波的方式实现。然而,大多数情况下,物体表面反射率分布很不均匀。因此,本文提出采用如下的方法消除反射率的影响。将计算机生成的一幅正弦条纹图和两幅强度均匀分布图样通过图像处理技

术分别输给彩色图像的 RGB 三个通道合成一幅彩色条纹图,考虑到多数彩色传感器绿色分量与红、蓝分量有“串音”耦合现象(如图 1 所示^[11]),所以实验时将绿色分量的灰度设为 0。利用彩色 CCD 相机采集得到彩色变形条纹图,再由图像处理方法分解成 RGB 三色分量,分别用对应颜色线条表示。将其中红色条纹图与仅反映物体表面反射率的蓝色背景图相除即可消除 $R(x, y)$ 。对已消除 $R(x, y)$ 的条纹图进一步进行归一化处理就可得到正弦分布条纹

$$g(x, y) = \sin \Psi(x, y). \quad (3)$$

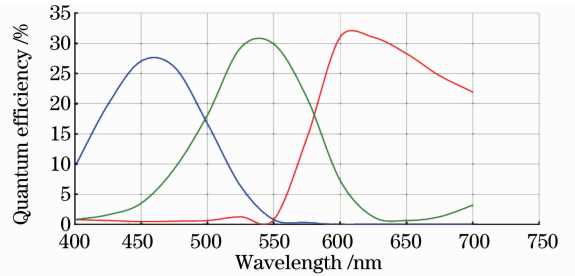


图 1 彩色传感器响应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of color-sensor response

由于正弦函数 $\sin x$ 在每个周期 $x \in (2k\pi - \pi, 2k\pi + \pi)$ (k 为整数)内存在二义性,即 $\sin x = \sin(\pi - x)$,因此一般不用反正弦函数解调条纹相位。鉴于 $\sin x$ 值在半周期 $(2k\pi - \pi/2, 2k\pi + \pi/2)$ 内单调递增,而在另半周期 $(2k\pi + \pi/2, 2k\pi + 3\pi/2)$ 内单调递减的特性,正确的条纹相位 $\Psi(x, y)$ 的“包裹”值为

$$\Psi(x, y) = \begin{cases} \arcsin[g(x, y)] & g(x, y) \in [-1, 1) \\ \pi + \arcsin[-g(x, y)] & g(x, y) \in [1, -1) \end{cases} \quad (4)$$

进一步利用解“包裹”算法可获得条纹的绝对相位^[12],从而重构出物体的三维形貌。

2.2 数字视频投影仪的非线性修正

对于采用单幅或相移正弦条纹投影的形貌测量系统,投影仪和图像采集系统对正弦条纹的线性输出与线性记录是保证测量结果准确性的重要条件。而目前商用的数字视频投影仪,即使是高端产品也存在非线性输出的缺点。为了保证三维形貌测量的精确度,国内外有关学者提出了一些有效的方法。如文献[13]提出的一种投影仪伽马校正的半经验计算公式,而文献[14]通过实验标定建立了可直接用于补偿相位误差的查找表,文献[15]则提出了一种相位迭代补偿算法。这些方法都是对采集的图像进行处理的方法,可以说是一种后处理方法,且后两种方法都是针对相位的,处理的方法更复杂。因此,本

文提出了校正投影仪非线性输出特性的修正方法,这是一种更为简单、方便的,且是在条纹投影前的处理方法,可以称为前处理方法。它可以减少投影系统的误差向后传递,避免误差在后处理中被放大的可能。方法简述如下:

1)正式测量前,将投影仪投向某一固定物体表面,逐步改变投影图样的灰度(如由 10, 20, 30, ..., 最后至 255)并用科研级的 CCD 相机同步采集被投物体表面图像存于计算机内;

2)在所有记录的图像中选择同一个小区域或一个点,逐幅统计所选点的灰度值,得到投影仪的输入灰度(被投影仪投影图样的灰度)与输出灰度(采集图像中被选点的灰度)响应,对输入-输出灰度数据进行四次曲线拟合得到被校准投影仪的输入输出曲线(类似图 2 所示的结果);

3)图 2 表明投影仪的输入输出响应是非线性的,因此,如果要得到线性的正弦条纹图,就由计算机输入一个预先设定的非线性正弦条纹图给投影仪,经投影仪非线性校正,可以得到较为完美的正弦分布规律的条纹图,而计算机输入的非线性正弦条

纹图灰度值由图 2 及希望获得的正弦条纹图灰度、周期来设定。

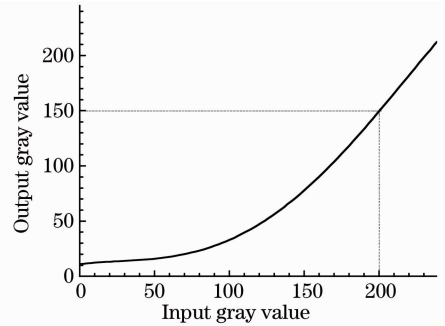


图 2 LCD 投影仪灰度输入输出响应

Fig. 2 LCD projector's response of input and output gray values

图 3(a), (b) 分别为相机采集的投影仪校正前、后投影到同一平板面的条纹图,图 3(c), (d) 分别对应于校正前、后同一区域的条纹灰度分布曲线。图 3(b), (d) 的结果就是由本文介绍的方法获得的,显然经过校正后的条纹能很好地保证其正弦分布特性。

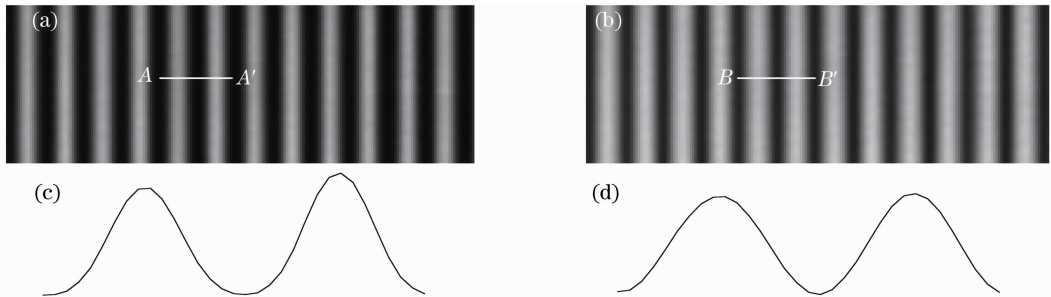


图 3 投影仪输入输出修正前(a)、后(b)相机采集的条纹图像,图 3(a)的 AA' (c)和图 3(b)的 BB' (d)位置的灰度分布
Fig. 3 Fringe patterns acquired by camera without (a) and with (b) applying intensity correction on the projector, and intensity distributions along cross sections AA' (c) and BB' (d) as shown in Figs. 3(a) and (b), respectively

3 实验及其结果

实验以均一灰度值蓝色分量作为背景,红色分量为条纹图,周期为每条 20 pixel,绿色分量为 0,将它们组合为一幅彩色条纹,由数字投影仪投影到被测物体表面,并用彩色 CCD 进行采集。为了对比,在测量系统其他参数不变的条件下,将 4 幅校正过的黑白相移条纹图投影到物体上,相移的步长为 90° 。采集的单幅彩色变形条纹如图 4(a)所示,将其分离得到红色条纹图和蓝色背景图,其去色后的灰度图像分别为图 4(b), (c)。将图 4(b), (c)相除得到初步消除非均匀分布反射率影响的条纹图 4(d)。为了消除图像采集系统的均匀随机噪声需对

图 4(d)进行 5×5 均值滤波处理。为了应用(4)式计算条纹相位,需对均值滤波后的条纹图进行归一化处理,即使条纹的强度分布在 $[-1, 1]$ 区间内。最后利用(4)式可得“包裹”相位如图 5(a)所示。需要说明的是,图 5(a)所示的“包裹”相位是采用文献[16]介绍的相位滤波器滤波后的结果。图 5(b)为四步相移法得到的“包裹”相位,图 5(c), (d) 分别对应于 5(a), (b)解“包裹”后相位分布灰度云图。由图 5(c), (d)可以看出,由于在面具顶部有阴影,所以对应于阴影处的相位有不连续的亮暗点,这一点对于相移法也不可避免。为了形象地说明本文提出的测量方法的精确度,将图 5(c)中 AA' 和 BB' 与四

步相移法的结果,即图 5(d)对等位置的相位分布进行对比,结果如图 6 所示。综合 5(c),(d)及图 6,可

以看出除了面具顶部因阴影无条纹处外,两者测量结果非常接近。

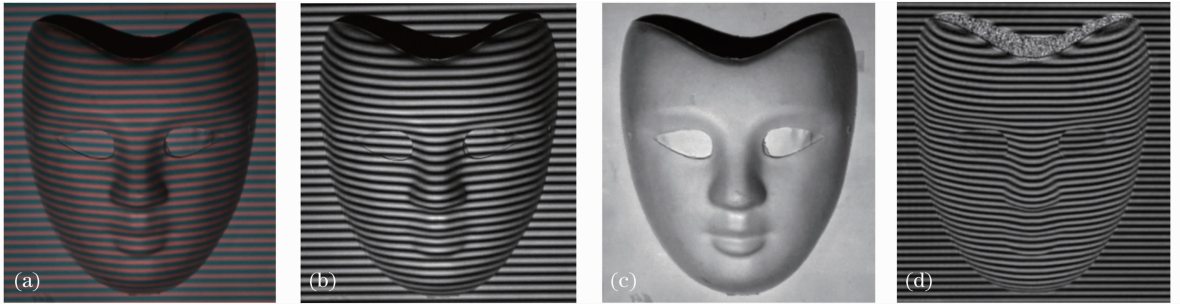


图 4 (a)彩色相机采集的含彩色投影条纹面具图像,(b)与(c)为图 4(a)经色彩分离处理得到的红色与蓝色通道灰度图像,(d)红色与蓝色通道图像相除后的图像

Fig. 4 Measured man mask (a) image acquired by color camera, (b) red and (c) blue channels corresponding to Fig. 4(a), and (d) result from division operation applied to the images in Figs. 4(b), (c)

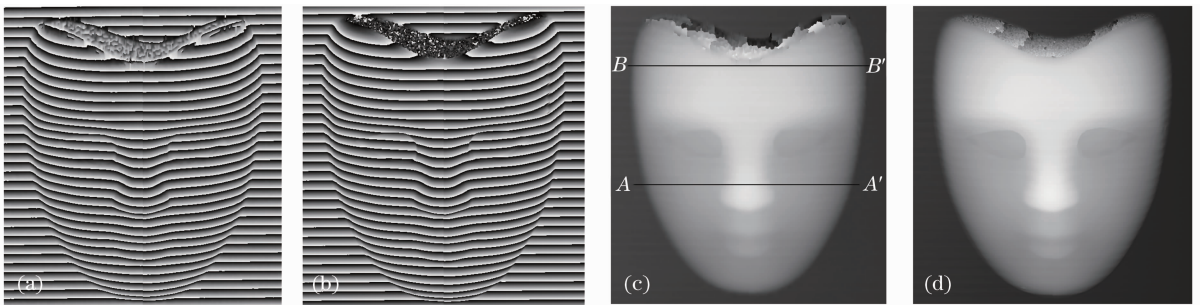


图 5 本文方法(a)和四步相移技术(b)获得的“包裹”相位灰度图,(c),(d)分别对应于图 5(a),(b)的去“包裹”后的相位灰度图

Fig. 5 Wrapped phase gray maps obtained by the proposed (a) and four-step phase-shifting (b) methods, unwrapped phase gray maps of (c) and (d) corresponding to Figs. 5 (a) and (b), respectively

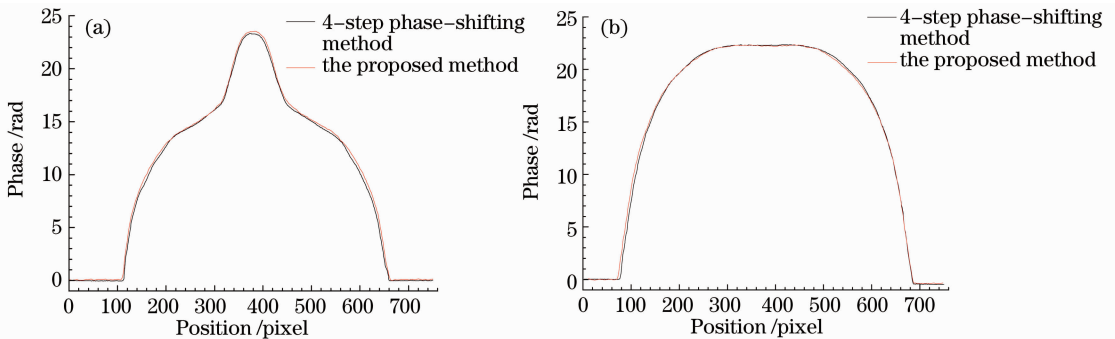


图 6 本文方法与四步相移方法测量结果比较,(a)对应于图 5(c)的 AA'及图 5(d)相同位置的相位分布,(b)对应于图 5(c)的 BB'及图 5(d)相同位置的相位分布

Fig. 6 Comparison of phase distributions corresponding to the cross sections (a) AA' and (b) BB' as shown in Fig. 5(c) as those of the same positions in Fig. 5(d)

4 结 论

正弦光栅投影形貌测量方法只需采集一幅彩色条纹图,不需要相移法的采集存储多幅条纹图和复杂的反正切相位计算,也不需要傅里叶变换技术进行正、逆傅里叶变换和试错滤波来计算相位,仅利

用正弦函数半周期内单调递增(减)特性,通过条纹的归一化处理 and 修正的反正弦相位计算即可重构出物体的三维形貌。该技术具有方法简单、速度快、精度可靠等优点,为真正的动态测量奠定了技术基础。与已有的数字视频投影仪的非线性输出特性的后处

理修正方法相比,提出的校正方法具有简单、易于实现且通用的特点,而且它是在条纹投影前的处理方法,可以减少投影仪系统的非线性误差向后传递,避免了误差在后处理中被放大的可能,这也是单幅条纹技术与公认测量误差最小的四步相移方法结果很接近的重要保证。对于真正的动态测量,单幅彩色条纹方法还需要克服表面不连续或者阴影影响相位连续解调等问题。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 2 Su Xianyu, Zhang Qican. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2010, **48**(2): 191~204
- 3 C. Quan, X. Y. He, C. F. Wang *et al.*. Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **189**(1~3): 21~29
- 4 Wang Z., Du H., Park S. *et al.*. Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(6): 1052~1061
- 5 Huang Peisen S., Hu Qingying, Jin Feng *et al.*. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1065~1071
- 6 Huang Mengtao, Jiang Zhuangde, Li Bing *et al.*. Evaluation of absolute phase for 3D profile measurement using fringe projection [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6): 320~322
- 7 Cui Haihua, Liao Wenhe, Cheng Xiaosheng *et al.*. A three-step system calibration procedure with error compensation for 3D shape measurement[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(1): 33~37
- 8 Shi Hongjian, Ji Hongwei, He Xiaoyuan. Optical 3D deformation measurement system and its application to investigation of mechanical behaviors of micro-structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312007
- 史红健, 计宏伟, 何小元. 一种三维变形光学测量系统及微结构力学性能测试应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312007
- 9 Zhang Zonghua, Towers Catherine E., Towers David P.. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency selection[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14): 6444~6455
- 10 Liu Kai, Wang Yongchang, Lau Daniel L. *et al.*. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5229~5244
- 11 http://www.alliedvisiontec.com/uploads/tx_nawavtcamera/ICX204-web_01.jpg
- 12 Dennis C. Ghiglia, Mark D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998
- 13 Z. Y. Wang, D. A. Nguyen, J. C. Barnes. Some practical considerations in fringe projection profilometry[J]. *Opt. Lasers Engng.*, 2010, **48**(2): 218~225
- 14 Li Zhongwei, Shi Yusheng, Wang Congjun *et al.*. Accurate calibration method for a structured light system [J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(5): 053604
- 15 Hubert A. Aebischer, Stephan Waldner. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4~6): 205~210
- 16 Pan Bing, Qian Kemao, Huang Lei *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 416~418