

# 结构光三维成像技术

苏显渝 张启灿 陈文静

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

**摘要** 近年来,结构光三维成像技术被深入研究和广泛应用,通常采用的技术方案是投影一个载频条纹到被测物体表面,利用成像设备从另一个角度记录受被测物体高度调制的变形条纹图像,再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。与全息三维成像对应,结构光三维成像过程也是两步成像过程,先获取物体被结构光条纹调制的二维图像,再从包含变形条纹的二维像中通过数字重建方法得到物体的三维数字像。主要回顾了本课题组在基于结构光三维成像技术研究中的进展,讨论了基于傅里叶条纹分析、相移条纹分析和动态过程三维成像的方法,给出了相关应用的实验结果,分析了结构光三维成像的特点以及该领域今后的发展动向。

**关键词** 成像系统; 三维成像; 结构光; 三维面形测量; 条纹分析; 全息显示

**中图分类号** TN247; O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209001

## Three-Dimensional Imaging Based on Structured Illumination

Su Xianyu Zhang Qican Chen Wenjing

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

**Abstract** In recent years, three-dimensional (3D) imaging technique based on the structured light illumination has been studied deeply and applied widely. Most commonly, in the technique proposal, a fringe pattern with a carrier frequency component is projected onto the imaged object, then the deformed fringe patterns caused by the height distribution of the tested object's surface are recorded by a imaging device from the other direction. By demodulating the deformed fringe patterns, the 3D digitized reconstruction of the object can be retrieved. Comparing with 3D holographic imaging, such 3D imaging process based on the structured light projection can also be divided into two imaging steps. The two-dimensional (2D) fringe image modulated by the imaged object is captured by a camera. Then, the 3D digitized image of the object can be reconstructed by demodulating the deformed fringe patterns. The progress in this 3D imaging techniques based on the structured light illumination made by author's research group is reviewed. Different 3D imaging methods based on the Fourier fringe analysis, phase-shifting fringe analysis and dynamic 3D imaging are deeply discussed and some related experimental results are also demonstrated to readers. In addition, the characteristics of the 3D imaging based on structured light imaging and their developing trends in the future are pointed out as well.

**Key words** imaging systems; three-dimensional imaging; structured illumination; three-dimensional surface measurement; fringe analysis; holographic display

**OCIS codes** 100.6890; 150.2945; 150.6910; 100.2650; 090.2870

## 1 引 言

结构光三维(3D)成像技术能够保存物体三维空间信息(包括三维形貌、灰度、颜色信息),并在重建过程中可以完整地恢复物体的三维特征,具有重

要的科学价值。全息三维成像是一种记录和重现三维信息的重要科学方法,它可以完整地再现物光波的信息,从三维再现的真实性来看,是无与伦比的。从三维显示的角度来看,全息三维显示的分辨率和

**收稿日期**: 2013-11-22; **收到修改稿日期**: 2014-01-06

**基金项目**: 国家自然科学基金(69577014, 69827001, 60527001, 61177010, 60807006)、国家重大仪器专项(2013YQ490879)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-11-0357)

**作者简介**: 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学、三维传感与机器视觉等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn

真三维显示特点也是无与伦比的。但是全息记录和再现过程要求采用相干照明,对环境振动要求小于波长数量级,使这种方法并不适于室外作业。另外,从信息的数字记录和实物仿形意义上的重建来说,全息方法也不一定是最好的。传统的全息成像技术本质上是一种模拟、非实时性、繁琐的纯光学技术。

自1948年Gabor发明全息术以来,全息术经历了不断发展的阶段,例如:离轴全息、反射全息、彩虹全息、计算全息、模压全息等<sup>[1-2]</sup>。近年来,兴起的数字信号处理技术及其相关器件设备(计算机、数码摄像机、CCD器件、新型液晶显示屏、空间光调制器和因特网等)以及自动化控制技术不断冲击传统全息成像技术,使之向现代全息显示技术发展<sup>[3]</sup>。2009年,在深圳召开的第八届国际显示全息学术会议上,深圳市泛彩溢有限公司展示了一种无记录介质真彩色全息三维显示系统,该系统采用一种特制的功能屏和多投影仪,将多个不同角度的影像合成逼真的彩色全息三维影像<sup>[4]</sup>。最近,一个由300个百万像素的投影仪组成的裸眼三维显示系统已经报道,可以在100 inch (1 inch = 2.54 cm)显示屏上观察到动态的三维像<sup>[5]</sup>。实际上,很多现代全息显示技术,已经在很大程度上突破了最初光学全息的概念,即不再限于将全息技术看成利用光学干涉和衍射原理记录并再现物体真实三维图像的技术,而是一种广义的物体三维信息传递和显示的技术。数字信息处理技术及其有关器件设备的进展为三维成像和三维显示技术的发展提供了更大的发展空间。

结构光三维成像技术是一种利用辅助的结构光照明获取物体三维像的技术,它采用的技术方案是投影一个载频条纹到被成像的物体表面,利用成像设备从另一个角度记录受被成像物体高度调制的变形条纹图像,再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。与全息三维成像相对应,结构光三维成像过程也是两步成像过程,先获取物体被结构光条纹调制的二维图像(调制加光学成像),然后从包含变形条纹的二维像中通过数字重建方法得到物体的三维数字像,前者包括投影和成像,本质上是应用光学中的成像过程<sup>[6]</sup>,后者是条纹图像的信息处理过程,类似于干涉测量中的干涉条纹的处理。结构光三维成像的过程包含数字重建的步骤,并以物体三维空间信息的数字量作为输出,其早期的目的不是三维显示,而是三维测量,因此早期的结构光三维传感工作更多地涉及三维测量和信息处理<sup>[7]</sup>。基于结构光的三维面形测量技术具有非接

触、测量速度快、精度高和易于在计算机控制下实行自动化测量等优点,已被深入研究并被广泛用于机器视觉、自动化控制加工、工业自动检测、产品质量控制、实物仿形、生物医学、三维动画和影视特技制作等领域<sup>[8-11]</sup>。最早的结构光三维测量方法是叠栅轮廓术(MT)<sup>[12]</sup>,随后傅里叶变换(FT)轮廓术(FTP)<sup>[13-14]</sup>、相位测量轮廓术(PMP)<sup>[15]</sup>、调制度测量轮廓术(MMP)<sup>[16]</sup>、散斑投影轮廓术<sup>[17]</sup>等结构光三维面形测量方法逐步被提出。

由于傅里叶变换轮廓术只需要一帧图像就能全场重建被测物体三维面形,成为近年来常用的一种动态过程三维测量技术<sup>[18]</sup>,对应的三维傅里叶条纹分析方法也相继提出<sup>[19-20]</sup>。虽然相位测量轮廓术技术需要获取多帧相移条纹图像,最初仅适用于静态测量,但随着高速投影和摄像技术的发展以及算法的改进,相位测量轮廓术技术在动态三维测量也得到应用和推广<sup>[21-22]</sup>。

本课题组二十余年来一直致力于结构光三维面形测量的研究,包括点、线、面结构光三维面形测量方法<sup>[23-25]</sup>,最初的研究工作更多地涉及三维测量方法及其应用,随后从广义信息传递和变换的观点研究及全息三维成像和结构光三维成像的共性和差异性,提出基于等效光波概念的三维(数字)照象术<sup>[26]</sup>。本文回顾了课题组在基于结构光三维成像技术研究中的进展,讨论了基于傅里叶条纹分析、相移条纹分析和动态过程三维成像的方法,给出了相关应用的实验结果,还分析了结构光三维成像的特点,并讨论了该领域今后的发展动向。

## 2 结构光三维成像

结构光三维成像的基本原理可用图1表示[图1(b)表示获取的变形条纹],为了表达简洁,假定投影和成像光路都是远心光路,当一个正弦光栅图形被投影到三维漫反射物体表面时,从成像系统获取的变形光栅像可表示为

$$I(x, y) = R(x, y) \{ C [ 0.5 + 0.5 \cos \phi(x, y) ] \}, \quad (1)$$

式中  $R(x, y)$  是物体表面不均匀的反射率,即光学影像,包括物体表面的灰度和色度信息,  $C$  表示均匀的投影光强,相位函数  $\phi(x, y)$  表示了条纹的相位。当漫反射物体是一个标准平面(参考平面)时,条纹的相位具有线性分布的特点:

$$\phi(x, y) = 2\pi x / p_0, \quad (2)$$

式中  $p_0$  为在参考平面上条纹的周期。当漫反射物体

是一个分布为  $h(x, y)$  的三维表面时,增加了由高度引起的附加相位调制:

$$\varphi(x, y) = 2\pi x/p_0 + 2\pi h(x, y)/\lambda_e. \quad (3)$$

式中  $\lambda_e$  称为等效波长,一个等效波长正好等于引起  $2\pi$  相位变化量的高度变化。

这时,从成像系统获取的变形光栅像可表示为

$$I(x, y) = R(x, y) \times \{C\{0.5 + 0.5\cos[2\pi x/p_0 + 2\pi h(x, y)/\lambda_e]\}\}. \quad (4)$$

由于物体表面的高度变化引起的条纹相位变化,导致观察到变形条纹。通过相移技术人们很容易从多帧相移条纹图形中分离出  $\phi(x, y)$ ,从而重建  $h(x, y)$  的分布,通过相移技术也可以从条纹的调制度中分离出  $R(x, y)$ ,获得物体表面的光学影像。

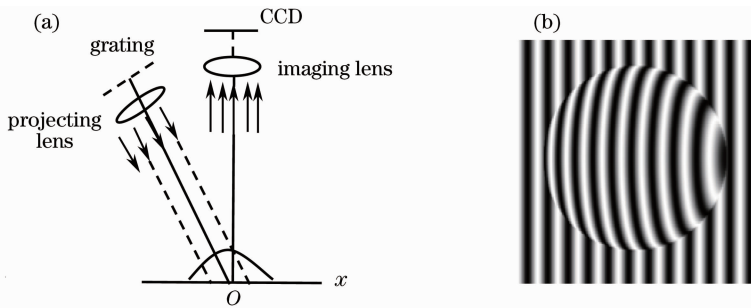


图1 结构光 3D 成像示意图

Fig. 1 Schematic of 3D imaging based on structured illumination

全息成像是以物光波与参考光波的干涉为基础,干涉计量是以被测波面与基准波面的干涉为基础,由于结构光计量中的变形光栅图与传统的干涉计量中的条纹图相类似,因此变形光栅像有时又被称为“干涉图”<sup>[7]</sup>。在干涉计量中,光波长被作为度量微观起伏的尺度,而在结构光三维成像中与投影条纹间距有关的“等效波长”被作为度量三维宏观面形的尺度。一般地,干涉计量主要用于光学波面检测,结构光计量主要用于粗糙表面(相对于波长而言)检测,虽然这是两个完全不同的物理过程,光波长和等效波长在数量上存在巨大差异,但从广义的信息传递和变换观点来看二者又存在共性。这些共性主要体现在:1)干涉条纹和结构光变形条纹具有相近的形态和数学表达式;2)两种计量方法都采用相移测量技术和相移算法或者傅里叶分析方法计算相位,计算得到的相位均被截断在反三角函数的主值范围内,因而不是连续的,为了从相位函数重建波面或重建三维面形,都需要对截断相位进行相位展开;3)两种方法测量精度和测量范围不同,但具有大致相同的相对测量精度。从广义信息传递和变换

当然,成像系统也能直接获取物体表面的光学影像。通过傅里叶变换技术可以从单帧变形图像中分离出物体面形分布和物体表面的光学影像,这表明结构光三维成像技术可以得到物体三维空间信息的数字图像(包括三维形貌、灰度、颜色信息),作为数字化三维显示或实物仿形和三维打印的基础。对于更普遍的非远心光路的结构光投影和成像系统,由于投影光线是发散的,在基准平面上的相位分布已不是线性分布,但是根据系统结构参数,仍然可以建立物体的高度分布与条纹相位分布  $\phi(x, y)$  之间的映射关系,实现三维成像<sup>[27]</sup>。结构光三维成像系统采用的结构光场,除了条纹投影光场外,还包括各种黑白或彩色编码图形、散斑图形等。

的观点以及抽象的数学形态来看,可以将物体三维形貌虚拟成物光波面,把结构照明光场虚拟成参考光波面,三维面形对结构光场的空间调制所产生的变形条纹虚拟成物光波与参考光波的干涉。虽然结构光成像和干涉记录是两个完全不同的物理过程,光波长和等效波长在数量上存在巨大差异,但从广义的信息传递和数学形态来看又存在相似性。随着数字信号处理技术及其有关器件设备的进一步发展,结构光三维成像和全息三维成像的相似性和趋同性还在进一步增加。

三维打印技术的出现和快速普及,让传统的工业制造步入了一个新时代,对三维测量和三维成像的需求迅速增加。基于 DLP Discovery 投影平台,已经提出了光学脉冲宽度调制的结构光三维成像技术,并实现了 667 frame/s 三维图像的获取<sup>[21]</sup>,这种实时的结构光三维成像系统如果与一个多投影三维显示系统<sup>[5]</sup>结合,可以实现实时的动态裸眼三维显示。总之,结构光三维成像技术作为三维信息获取途径之一,为三维打印和三维显示提供三维数据,并在相互促进中得到进一步的推动和发展。

### 3 基于傅里叶条纹分析的三维成像方法

1982年, Takeda等<sup>[13]</sup>将傅里叶变换的思想引入到基于结构光投影的三维面形测量技术中, 提出傅里叶变换轮廓术。由于只需要获取一帧图像就能全场重建被测物体三维面形, 非常适合于动态过程三维测量和显示。

傅里叶变换轮廓术投影和成像原理示意图(以远心光路为例)如图1所示。当一个正弦光栅图形被投影到三维漫反射物体表面  $h(x, y)$  时, 成像系统获得的变形光栅条纹图由(4)式表示。

对(4)式作傅里叶变换, 可以得到其频谱表达式为

$$G(f_x, f_y) = A(f_x, f_y) + Q(f_x - f_0, f_y) + Q^*(f_x + f_0, f_y), \quad (5)$$

式中  $A(f_x, f_y)$  是  $\frac{1}{2}R(x, y)C$  傅里叶谱,  $Q(f_x, f_y)$  是基频分量, 表示  $\frac{R(x, y)C \exp[j2\pi h(x, y)/\lambda_0]}$  的傅里叶谱,  $Q^*(f_x, f_y)$  是  $Q(f_x, f_y)$  的共轭。频谱分布示意图如图2所示。

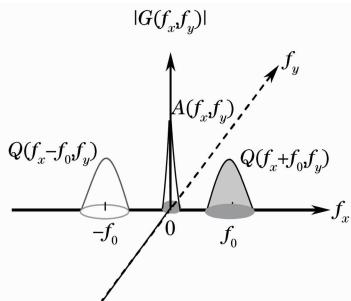


图2 正弦光栅投影时变形光栅像的频谱分布示意图  
Fig. 2 Diagram of the spectral distribution of deformed grating when sinusoidal grating is projected

选取合适的滤波器, 滤出由  $Q(f_x, f_y)$  表示的基频谱(图2中灰色部分), 再作逆傅里叶变换 (IFT), 就能得到携带漫反射物体表面三维信息复指数函数

$$g_o(x, y) = \frac{R(x, y)C}{2} \exp\left[\frac{j2\pi x}{p_0} + \frac{j2\pi h(x, y)}{\lambda_0}\right], \quad (6)$$

式中  $p_0$  为在参考平面上条纹的周期。计算(6)式相位信息, 并移去  $2\pi x/p_0$  表示的线性载频项, 就能得高度引起的附加相位调制  $2\pi h(x, y)/\lambda_0$ 。由于计算出来的附加相位调制截断在  $[-\pi, \pi]$  之间, 采用合适的相位展开算法就能得到自然相位<sup>[14]</sup>, 从而重建  $h(x, y)$  的分布。从(6)式中, 通过计算复指数函数的幅值图可以得到物体表面的光学影像  $R(x, y)$ 。当然也可利用成像系统直接获取物体表面的光学影

像, 包括表面的灰度和颜色信息。成像处理的流程如图3所示。

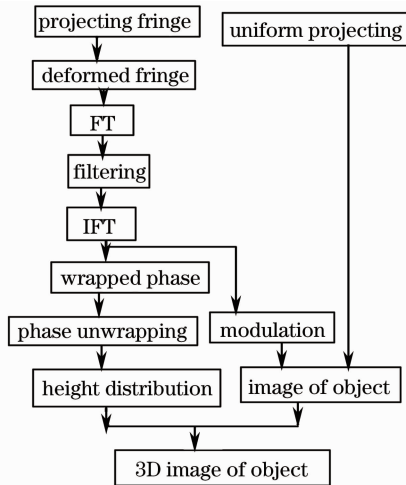


图3 傅里叶变换分析成像流程图  
Fig. 3 Flowchart of 3D imaging based on Fourier transformation analysis

对于更普遍的非远心光路结构光投影和成像系统, 在基准平面上的相位分布已不是线性分布, 可以通过对采集的参考平面上的条纹图, 进行傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换处理, 来得到参考平面的位相分布, 从而得到由漫反射物体高度分布引起的相位调制。图3给出了基于FTP方法三维成像的原理实验图, 图4为基于傅里叶分析的三维成像过程, 其中图4(a)是人脸模型的表面影像, 图4(b)是CCD采集的变形条纹图, 图4(c)是采用傅里叶分析方法重建的三维数字面形, 图4(d)是添加纹理后的三维面形。

图5为包括色度信息的结构光三维成像实例, 其中图5(a)表示花瓣模型的变形条纹图, 图5(b)表示花瓣模型的三维像。

由于傅里叶分析方法缺乏局部分析能力, 条纹局部不完善所引起的相位计算误差会传递到全场。由此, 一些时频分析技术, 包括窗口傅里叶变换 (WFT)<sup>[28]</sup>、小波变换 (WT)<sup>[29-30]</sup> 以及 S 变换<sup>[31-33]</sup> 被引入到条纹分析中, 有效地提高了单帧条纹分析能力。窗口傅里叶变换采用大小固定的窗口对所覆盖区的局部条纹进行分析, 在获得条纹的局部频率的同时, 保留了信号不同分量的空间位置信息。南洋理工大学 Qian<sup>[34]</sup> 对窗口傅里叶变换条纹分析方法做了深入的研究。采用 WFT 方法可以利用一帧条纹图像得到物体的面形和表面影像。条纹图的小波变换系数与条纹的傅里叶变换谱之间不存在直接的联系, 并且小波解相利用了泰勒一阶近似, 对物体中变化率大的区域, 测量误差较大。由此,

Mansinha 等<sup>[31]</sup>于 1996 年提出一种能同时估计局部振幅谱和相位谱的方法——S 变换,它可以根据局部频率的大小自适应调节窗口尺寸,与傅里叶频谱保持直接联系的同时,又兼顾小波多分辨率分析

的特点。目前 S 变换脊方法和 S 变换滤波方法也用于基于结构光的三维测量研究中。图 6 显示了部分测量结果<sup>[32-33]</sup>。

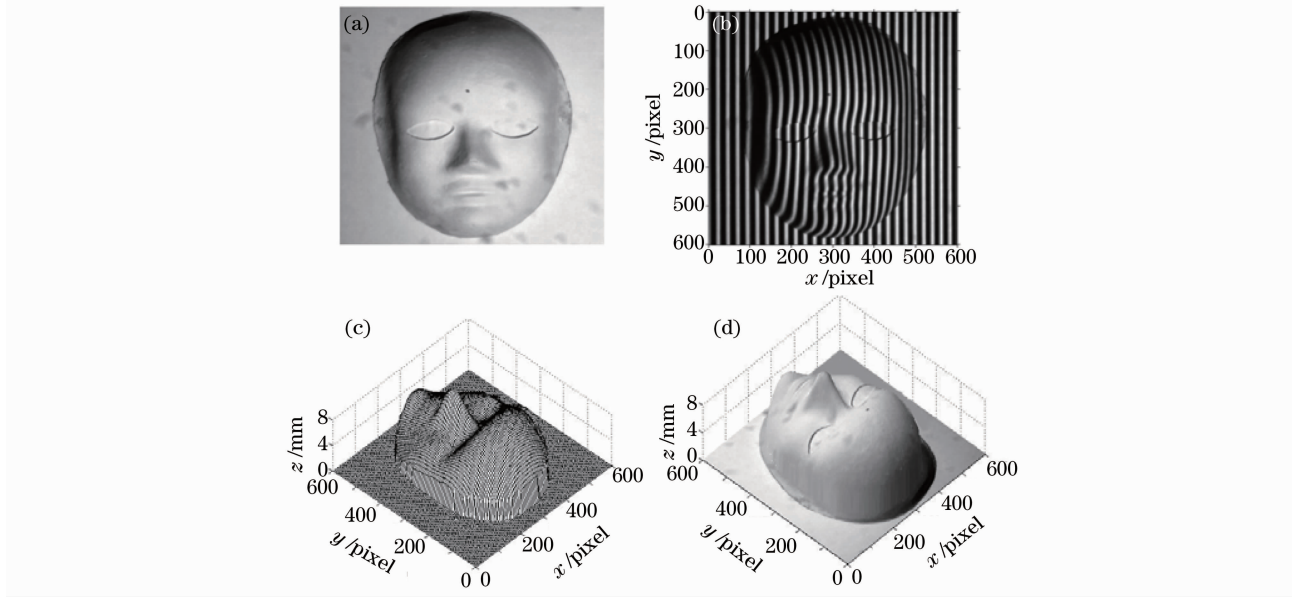


图 4 基于傅里叶分析的三维成像。(a) 人脸模型的表面影像;(b) CCD 采集的变形条纹图;  
(c) 采用傅里叶分析方法重建的 3D 数字面形  
Fig. 4 3D imaging based on Fourier analysis. (a) Face model; (b) deformed fringe;  
(c) 3D digital reconstruction by Fourier analysis; (d) 3D imaging with gray texture

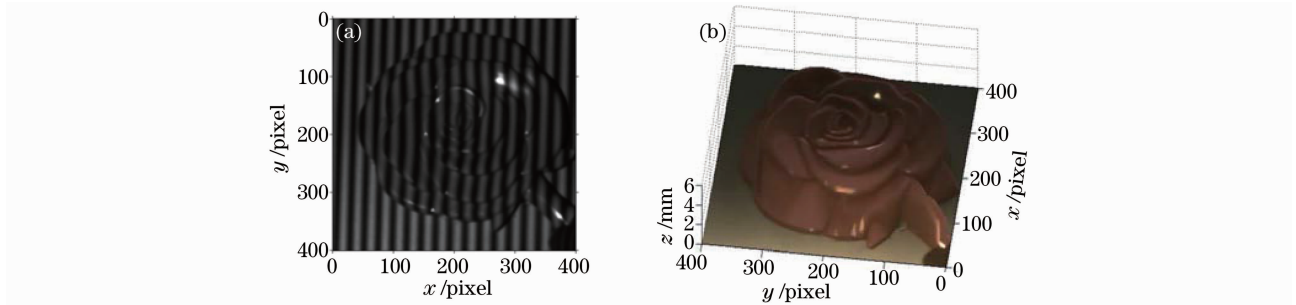


图 5 彩色花瓣模型三维成像。(a) 花瓣模型的变形条纹图;(b) 添加彩色纹理后花瓣模型的三维像  
Fig. 5 3D imaging of a colorflower model. (a) Deformed fringe pattern on the flower model;  
(b) 3D reconstructed flower image with color texture

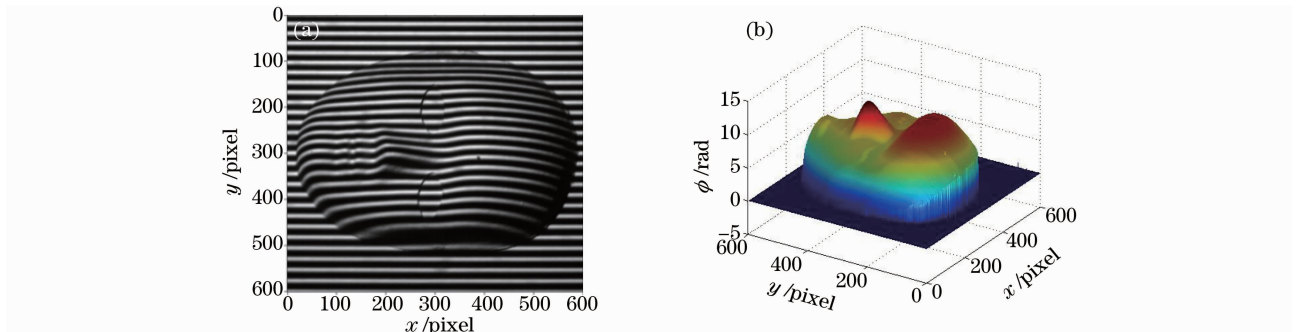


图 6 S 变换条纹分析。(a) 变形条纹图;(b) 相位图  
Fig. 6 S-transform fringe analysis. (a) Deformed fringe pattern; (b) phase distribution

#### 4 基于相移条纹分析的三维成像方法

在(1)式表示的变形光栅像中,有物体表面反射率  $R(x,y)$ 、投影光强  $C$  和相位  $\phi(x,y)$  三个未知量,需获取 3 帧以上变形光栅图才能求解出成像对象三维数据对应的相位分布  $\phi(x,y)$ 。因此,相移技术<sup>[15]</sup>把投影光栅在一个周期内均匀移动  $N(N \geq 3)$  次,每次移动  $2\pi/N$  相位,利用这  $N$  帧变形光栅图像来计算  $\phi(x,y)$ 。通过精确的相移装置将正弦光栅每次横向(即垂直于光栅方向)移动其空间周期的  $1/N$ ,这样对于像场中的每一点而言就是在时间上的一个正弦分布,利用相移干涉计量术中的相移算法就可以算出独立于  $R(x,y)$  和  $C$  的相位  $\phi(x,y)$ :

$$\phi(x,y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x,y) \sin(2n\pi/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x,y) \cos(2n\pi/N)} \right]. \quad (7)$$

由(7)式计算出的相位分布  $\phi(x,y)$  被截断在反三角函数的定义域内,不再连续,需要经过相位展开后得到相位的连续分布,并利用三维成像系统标定得到的相位-高度映射关系<sup>[27]</sup>进行映射转换后,就能最终得出物体表面的高度分布  $h(x,y)$ 。和相位数据  $\phi(x,y)$  分离过程同步,物体表面反射率  $R(x,y)$  也

可以在通过相移技术从条纹的调制度  $M(x,y)$  中分离出  $R(x,y)$ , 获得物体表面的光学影像

$$M(x,y) = \frac{1}{2}R(x,y)C =$$

$$\sqrt{\left[ \sum_{i=0}^{L-1} I_i(x,y) \sin\left(\frac{2i\pi}{L}\right) \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^{L-1} I_i(x,y) \cos\left(\frac{2i\pi}{L}\right) \right]^2}, \quad (8)$$

式中  $L$  为相移次数。在三维成像速度允许的情况下,成像系统也能直接获取物体表面的光学影像,包括表面的灰度和颜色信息。将物体表面光学影像逐像素贴图到三维高度分布上,便得到了成像对象包括三维形貌、灰度和(或)颜色信息的结构光三维成像结果。图 7 是基于相移条纹分析方法对一个塑胶模特儿头部的三维成像案例,图 7(a) 分别是成像系统单独记录的模特儿头部二维光学影像和 5 帧条纹相移的变形光栅图像,图 7(b) 是包含灰度纹理信息的三维形貌。图 8 展现了采用相移条纹分析方法对成年男性脸部进行三维成像的结果。图 8(a) 依次是成像系统中左右两路成像系统单独记录的人脸部彩色光学影像和 4 帧条纹相移的变形光栅图像,图 8(b) 图是包含彩色纹理信息的人脸三维成像结果。

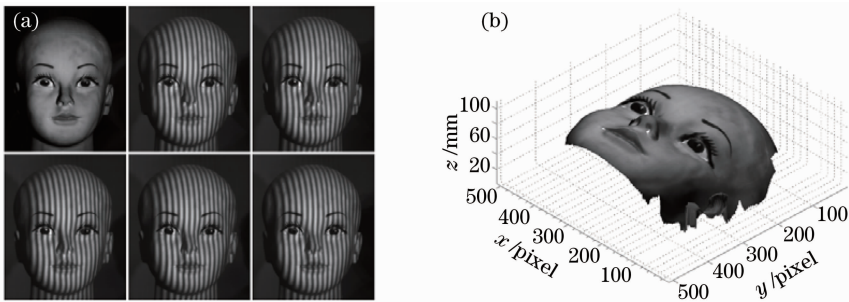


图 7 基于相移条纹分析的塑胶模特儿头部 3D 成像结果

Fig. 7 3D imaging results of a plastic head model based on phase shift fringe analysis

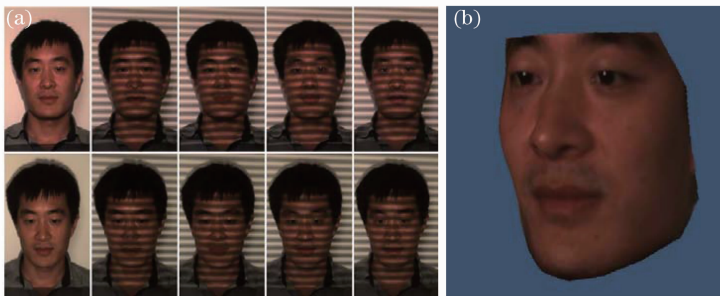


图 8 基于相移条纹分析的人脸 3D 成像结果

Fig. 8 3D imaging results of a adult male face based on phase shift fringe analysis

## 5 动态过程的三维成像

本课题组在动态过程三维成像技术的研究是基于傅里叶条纹分析方法延伸发展起来的。处于动态变化过程之中的物体三维面形是一个和时间有关的量,如果能将该动态变化过程沿时间轴对它采样量化,那么单独对于每一个时刻来说,仍然可以用传统的傅里叶条纹分析方法来进行计算动态物体的三维数字像。

$$g(x, y, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n r(x, y, t) \exp\{i[2n\pi f_0 x + n\phi(x, y, t)]\}, \quad t = 0, 1, 2, \dots, s, \quad (9)$$

式中  $A_n$  是傅里叶级数的系数,  $r(x, y, t)$  是不同时刻拍摄对象表面上的非均匀反射率分布函数,  $\phi(x, y, t)$  是不同时刻由于拍摄对象表面高度变化所引起的相位调制,  $s$  表示以成像设备的帧频速度在时间  $T$  内拍摄到的变形条纹总帧数 ( $s = f_s \times T$ , 其中  $s$  为总帧数,  $f_s$  为帧频)。这样的动态记录方式将提供了一个三维成像动态对象的时空信息系列,其中空间信息用图像来表达,时间信息用拍摄频率来表达。

对(9)式进行傅里叶变换,在得到的频谱分布中,基频包含了所需的相位信息。和前文所述一样,通过一个合适的带通滤波器,将其中的一支基频分量过滤出来,然后对滤波后的基频分量进行逆傅里叶变换,得到三维相位分布  $\phi(x, y, t)$ ,对应着动态物体各个时刻的真实高度分布  $h(x, y, t)$ ,因此只需要求出相位差  $\Delta\phi(x, y, t)$  的连续已展开分布

同前文所述的傅里叶条纹方法一样,将一片罗奇(或正弦)光栅投影到待测动态物体表面,用高速相机进行快速摄像,记录下一系列变形条纹的强度分布。

为了讨论和数据处理方便,将成像系统记录的参考平面上的条纹定义为零时刻( $t=0$ )获得的无形变“变形”条纹,高速相机拍摄到的参考平面和动态物体表面的一系列变形条纹的强度分布就可写成

$\Delta\phi(x, y, t)$  后再利用相位和高度的对应关系式:

$$h(x, y, t) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{\Delta\phi(x, y, t) - 2\pi f_0 d}, \quad (10)$$

即可恢复出运动变化物体每个时刻的三维表面形态高度分布  $h(x, y, t)$ 。

当成像对象高速运动变化时,在重建其动态三维数据同时,成像系统如果不能直接同步获取动态物体表面的光学影像(表面的灰度和颜色信息),可以在傅里叶条纹分析时,从每一帧变形条纹的基频强度分布中计算出动态物体表面的调制度信息,作为三维成像动态对象在对应采样时刻的光学影像,再将像素贴图到三维高度分布上,便得到了动态对象包括三维形貌、灰度和(或)颜色信息的结构光三维成像数据。

图9是利用傅里叶条纹分析方法对鼓膜振动过

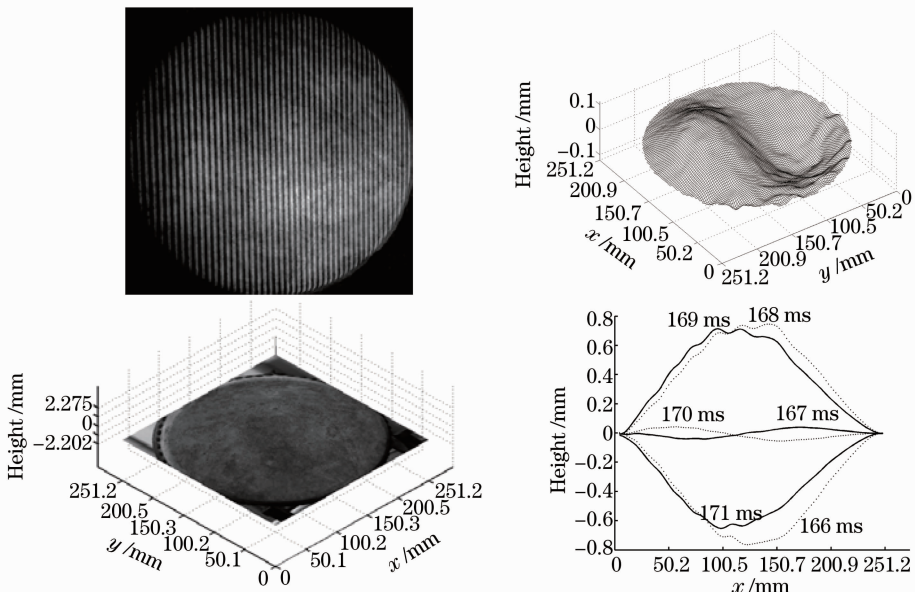


图9 振动鼓膜动态3D成像结果

Fig. 9 Dynamic 3D imaging results of a vibrating drumhead

程(频率约为 167 Hz)完成的动态三维成像结果<sup>[35]</sup>, 图中依次展示的是变形结构光栅图像、重建三维高度数据(167 ms)、包含灰度纹理信息的某采样时刻三维形貌和鼓面中线上一个周期内的振动分布。

图 10 为利用同样的条纹分析方法以及和成像物体运动同步的频闪结构光源,对 1162 r/min 旋转

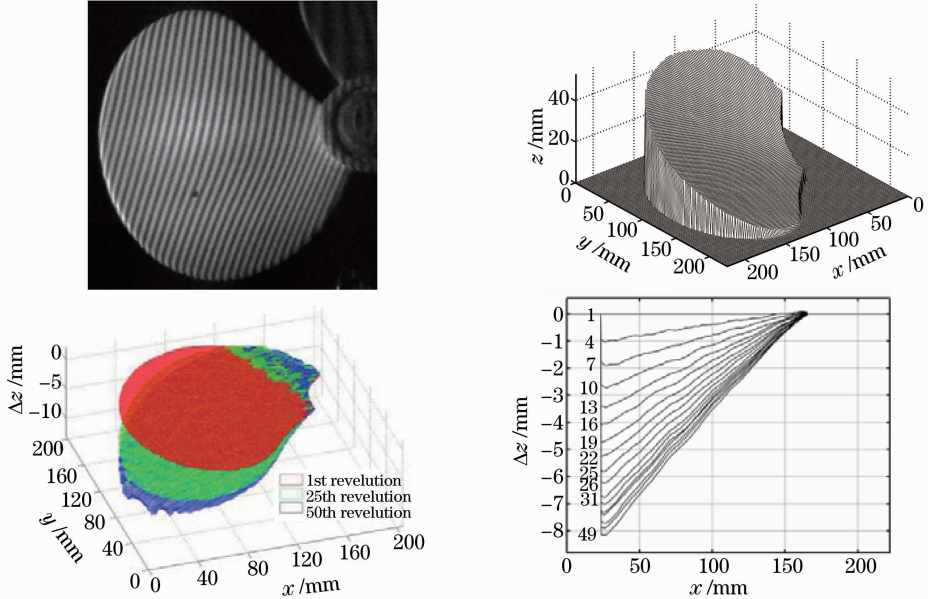


图 10 旋转叶片形变的动态 3D 成像结果

Fig. 10 Dynamic 3D imaging results of a rotating fan blade

图 11 为利用前述的傅里叶条纹分析方法,对双翼翼展 12 cm 的柔性扑翼微飞行器进行动态三维成像的结果<sup>[37-38]</sup>。在直流电压为 2.5 V、电流为 130 mA 的动力驱动下,实验重建结果数据复现了翅翼扑动的完整过程,给出了翅翼扑动过程的上扑、下

风扇叶片形变过程完成的动态三维成像结果<sup>[36]</sup>, 依次展示了旋转叶片表面的变形结构光栅图像、重建三维高度数据、叶片旋转第 25 和 50 转时相对于静止时刻的形变,以及旋转前 50 转叶片径向上的形变分布。

扑以及上下扑动交替时的翅翼翻转三维高度数据。该图中显示的数据表明扑翼扑动频率为 17.54 Hz,能详尽地给出扇动过程中翅翼前缘上逐点的运动变化,为后期的空气动力学研究、力学建模分析、翼面材料选取和根弦优化设计提供准确可靠的原始数据。

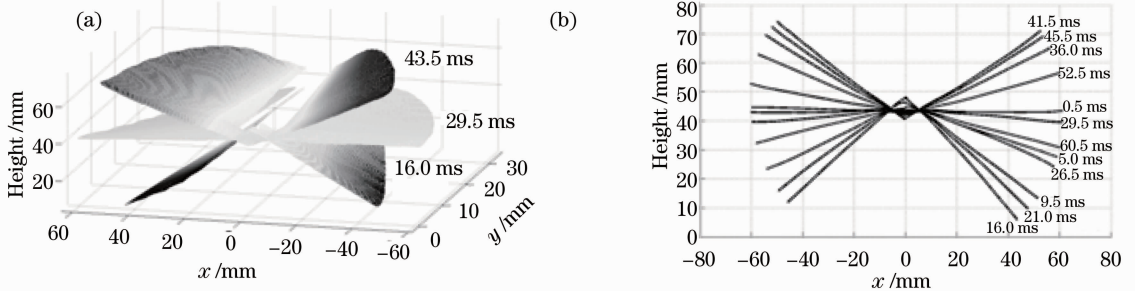


图 11 微飞行器扇动扑翼动态 3D 成像结果

Fig. 11 Dynamic 3D imaging results of a flapping wing

另外,基于前面阐述的相移条纹分析方法,Lei 等<sup>[39]</sup>成功地实现了实时动态三维面形测量。早期,他们将各通道照明的时间分离,再去除三通道上的颜色滤波器,用黑白 CCD 记录各通道照明产生的变形光场强度,从三帧相移条纹图中计算出被测物体的三维高度数据,快速完成了物体面形变化的三维

成像<sup>[22]</sup>, 随后,他们改进了投影的光栅条纹图像,投影了离焦的二值化图案,实现了千赫兹甚至是兆赫兹的高速三维成像系统<sup>[39]</sup>,被同行认为是该研究领域的技术领先者之一。图 12 是 Zhang<sup>[21]</sup> 利用相移条纹分析方法,以 667 Hz 的三维成像速度对一粒活体兔子心脏完成的动态三维成像结果,推动了该



项技术在生物医学中的应用。

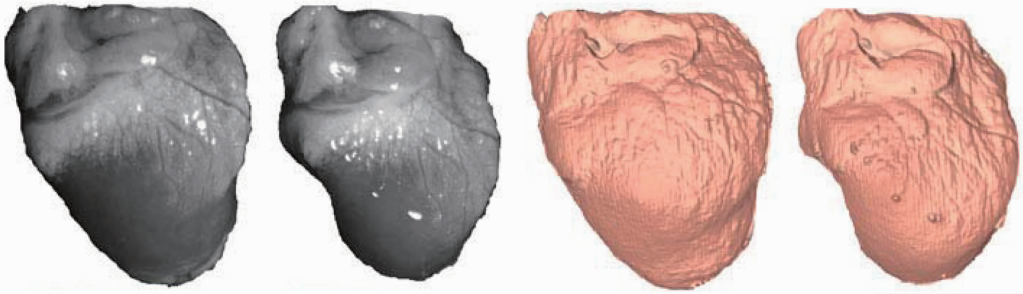


图 12 活兔心脏跳动的动态 3D 成像结果

Fig. 12 Dynamic 3D imaging results of a live rabbit heart

## 6 结 论

结构光三维成像技术是一种计算机辅助的数字三维成像技术,与传统的全息三维成像技术具有原理上的区别。全息成像技术是以光波的干涉和衍射为基础,而结构光三维成像是将一个载频条纹投影到被成像的物体表面,利用成像设备从另一个角度记录受被成像物体高度调制的变形条纹图像,再从获取的变形条纹图中数字解调重建出被测物体的三维数字像。从广义信息传递和变换的观点来看,全息三维成像和结构光三维成像也存在相似性。随着数字信号处理技术及其有关器件设备的进一步发展,结构光三维成像技术还有很大的发展空间,结构光三维成像技术将向高速度、高精度的方向发展,成像对象将向大尺寸和微结构的方向发展。

近年来,新的三维打印浪潮影响覆盖甚广,三维打印把虚拟世界里面的对象搬到现实中来。很多情况下,也需要把真实世界的对象搬到虚拟世界中,或者对真实世界的对象进行复制,三维成像技术建立了真实的三维世界和虚拟的三维数字世界的联系,因此具有广阔的应用前景。另一方面,新的三维显示技术飞速发展,将真实的三维世界或者虚拟的三维数字世界的景像呈现出来。三维成像技术为三维打印和三维显示提供了真实的三维数据源,可以预期,结构光三维成像技术在三维打印、三维显示、实物仿形、三维动画、影视特技、虚拟现实、生物医学、文物景观数字化、文化教育娱乐等领域将发挥越来越重要的作用。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Meiwen. Optical Holography and Its Applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.  
于美文. 光学全息学及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- 2 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer Generated Hologram[M].

Beijing: Tsinghua University Press, 1984.

- 虞祖良, 金国藩. 计算机全息图[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- 3 Xu Daxiong. Modern holographic display technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(8): 16-18.  
徐大雄. 现代全息显示技术之发展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 16-18.
- 4 Fan Frank C, Choi Sam, Jiang C C. Use of spatial spectrum of light to recover three-dimensional holographic nature[J]. Appl Opt, 2010, 49(14): 2676-2685.
- 5 Jin-Ho Lee, Juyong Park, Dongkyung Nam. Optimal projector configuration design for 300-Mpixel multi-projection 3D display [J]. Opt Express, 2013, 21(22): 26820-26835.
- 6 Zhang Yimo. Applied Optics (Third Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.  
张以谟. 应用光学(第3版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 7 Su Xianyu, Li Jitao, Cao Yiping, et al.. Information Optics (Second Edition)[M]. Beijing: Science Press, 2011.  
苏显渝, 李继陶, 曹益平, 等. 信息光学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 8 Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 10-22.
- 9 Da Feipeng, Gai Shaoyan. Fringe Projection 3D Precision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2011.  
达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- 10 Zhang Guangjun. Vision Measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008.  
张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 11 Peng Xiang, Yin Yongkai, Liu Xiaoli. Phase-aided three-dimensional imaging and metrology [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900120.  
彭翔, 殷永凯, 刘晓利. 基于相位辅助的三维数字成像与测量[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900120.
- 12 Takasaki H. Generation of surface contours by moiré pattern[J]. Appl Opt, 1970, 9(4): 942-949.
- 13 Takeda M, Motoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Appl Opt, 1983, 22(24): 3977-3982.
- 14 Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. Opt & Lasers in Eng, 2001, 35(5): 263-284.
- 15 Srinivasan V, Liu H C, Halioua H. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Appl Opt, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 16 Su Likun, Su Xianyu, Li Wansong, et al.. 3-D profilometry based on modulation measurement[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(9): 1257-1262.

- 苏礼坤, 苏显渝, 李万松, 等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. 光学学报, 1999, 19(9): 1257-1262.
- 17 Hongjun Dai, Xianyu Su. Shape measurement by digital speckle temporal sequence correlation with digital light projector[J]. Opt Eng, 2001, 40(5): 793-800.
- 18 Xianyu Su, Qican Zhang. Dynamic 3D shape measurement; a review[J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48(2): 191-204.
- 19 H S Abdul-Rahman, M A Gdeisat, D R Burton, *et al.*. Three-dimensional Fourier fringe analysis[J]. Opt & Lasers in Eng, 2008, 46(6): 446-455.
- 20 Qican Zhang, Zhiling Hou, Xianyu Su. 3D fringe analysis and phase calculation for the dynamic 3D measurement [C]. AIP Conference Proceedings, 2010, 1236: 395-400.
- 21 S Zhang. Recent progress on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Opt & Lasers in Eng, 2010, 48(2): 149-158.
- 22 Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. Opt Eng, 2006, 45(12): 123601.
- 23 Su Xianyu, Zhang Guanshen, Chen Zexian, *et al.*. An automatic measurement system for 3-D shape of shoe last[J]. Photoelectric Engineering, 1989, 16(6): 1-5.  
苏显渝, 张冠申, 陈泽先, 等. 鞋楦三维面形光电自动测量系统[J]. 光电工程, 1989, 16(6): 1-5.
- 24 Jia Bo, Su Xianyu, Guo Lürong. 3D measurement of turbine blade profile by light knife[J]. Chinese J Lasers, 1992, 19(4): 271-275.  
贾波, 苏显渝, 郭履容. 采用激光光刀的叶片三维面形测量方法[J]. 中国激光, 1992, 19(4): 271-275.
- 25 Su X Y, Zhou W S, Von Bally V, *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. Opt Commun, 1992, 94(6): 561-573.
- 26 Su Xianyu. 3-D digital photograph based on the equivalent wave length[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2000, 11(3): 110.  
苏显渝. 基于等效光波概念的三维(数字)照象术[J]. 光电子 • 激光, 2000, 11(3): 110.
- 27 W S Zhou, X Y Su. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. J Mod Opt, 1994, 41(1): 89-94.
- 28 Wang Chenxing, Da Feipeng. A novel adaptive windowed Fourier transform for phase retrieval in 3D shape measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612005.  
王辰星, 达飞鹏. 三维测量中一种新的自适应窗口傅里叶相位提取法[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0612005.
- 29 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three-dimensional profilometry based on Mexican Hat wavelet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 197-202.  
周翔, 赵宏. 基于 Mexican Hat 小波变换的三维轮廓术[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 197-202.
- 30 Watkins L R. Review of fringe pattern phase recovery using the 1-D and 2-D continuous wavelet transforms[J]. Opt & Lasers in Eng, 2012, 50(8): 1015-1022.
- 31 Mansinha L, Stoekwell R G, Lowe R P. Pattern Analysis with two dimensional spectral localization; application of two dimensional stransform[J]. Physic A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1997, 239(1-3): 286-295.
- 32 M Zhong, W J Chen, T Wang, *et al.*. Application of two-dimensional S-transform in fringe pattern analysis[J]. Opt & Lasers in Eng, 2013, 51(10): 1138-1142.
- 33 M Zhong, W J Chen, X Y Su, *et al.*. Optical 3D shape measurement profilometry based on 2D S-transform filtering method[J]. Opt Commun, 2013, 300: 129-136.
- 34 Qian Kema. Windowed Fringe Pattern Analysis [M]. Bellingham: SPIE Press, 2013.
- 35 Zhang Q C, Su X Y. High-speed optical measurement for the drumhead vibration[J]. Opt Express, 2005, 13(8): 3310-3316.
- 36 Zhang Qican, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. Three-dimensional shape measurement for rotating blade using stroboscopic structured illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 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, 2004, 25(2): 207-211.
- 37 Wang Xiaohui, Zhang Qican. Three-dimensional shape and deformation measurement of flapping-wing micro air vehicle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s2): s212003.  
王效惠, 张启灿. 微飞行器扇动扑翼的三维面形及形变测量[J]. 光学学报, 2013, 33(s2): s212003.
- 38 Qican Zhang, Xiaohui Wang. A New Approach to Recording the Motion of Flapping Wings[OL]. <http://spie.org/x103719.xml>. [2014-1-6].
- 39 Shuangyan Lei, Song Zhang. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Opt Lett, 2009, 34(20): 3080-3082.

栏目编辑:何卓铭