

# 动态三维面形测量的研究进展

张启灿 苏显渝\*

(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,光学非接触三维面形测量技术被深入研究和广泛应用,其中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,再从中解调重建出被测物体的三维面形分布。与单帧图像的傅里叶条纹分析方法相结合,这种基于条纹投影的调制和解调技术被拓展应用到动态过程(物体)的三维面形测量和重建中,以满足日益增长的动态过程分析需求。回顾了近年来在基于条纹投影和傅里叶分析的动态过程三维面形测量以及薄膜振动模式检测研究中的进展,讨论了不同动态过程的测量方法和测量系统,给出了相关应用的实验结果。讨论了该技术的优点和面临的挑战,并指出了该领域今后的发展动向。

**关键词** 光学测量;三维面形测量;动态过程;条纹投影;傅里叶分析;形变分析

**中图分类号** TN247; O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010001

## Research Progress of Dynamic Three-Dimensional Shape Measurement

Zhang Qican Su Xianyu

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

**Abstract** Three-dimensional (3D) shape measuring techniques, using a combination of grating projection and a most frequently used mathematical tool-Fourier fringe analysis, have been deeply researched and extensively applied. Such kind of techniques is based on the idea of projecting and superposing a carrier fringe pattern onto the surface of the tested object, and then reconstructing its corresponding 3D shape from the deformed fringe pattern modulated by the height of the tested object and captured by a camera from some other view direction. This paper mainly reviews the basic principles and typical applications of the combined technology based on grating projection and Fourier fringe analysis that we developed over past ten years. The fundamental concepts of time-average fringe method for vibration mode analysis and its experimental results are also presented. Lastly, the advantages and challenges of this technique and the current development of real-time measurement in this research field are described as a discussion and conclusion.

**Key words** optical measurement; three-dimensional shape measurement; dynamic process; fringe projection; Fourier analysis; deformation analysis

**OCIS codes** 120.3940; 100.6890; 120.2650; 120.7280

## 1 引言

在实际应用中,尤其是在工业生产加工领域中,常常需要对产品或操作对象进行三维(3D)面形测量,获得操作对象准确的三维面形数据。正是在实际生产生活中日益增长的大量需求,促使三维面形测量技术的兴起和发展,如今光学三维传感已成为光学计量和信息光学的主要领域和方向之一<sup>[1,2]</sup>。伴随着计算机技

**收稿日期**: 2012-07-16; **收到修改稿日期**: 2012-08-21; **网络出版日期**: 2012-10-24

**基金项目**: 国家自然科学基金(60527001,60807006,60838002,61177010)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0357)资助课题。

**作者简介**: 张启灿(1974—),男,博士,教授,主要从事动态三维面形测量、三维传感等方面的研究。

E-mail: zqc@scu.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: xysu@scu.edu.cn

术、数字图像获取设备、发光器件等光电元件和技术的发展,一些三维测量技术已经进入商业应用的成熟阶段,同时新的三维传感技术和测量方法还在不断涌现<sup>[3~5]</sup>。

基于条纹投影(光栅投影、结构光照明)的光学三维面形测量技术通常是从变形的光栅条纹图像中解调出被测物体的三维轮廓信息,具有非接触、测量速度快和精度高以及易于在计算机控制下实行自动化测量等优点,是众多三维面形测量方法中最具有应用前景的一类方法。该类技术自20世纪后期以来,已得到深入的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>[6,7]</sup>。

通过二维(2D)结构光场的投影和解调,被测物体的三维面形被全场、高速地重建出来<sup>[8]</sup>。投影的结构光场可以是黑白二值光栅<sup>[9,10]</sup>、二元编码的正弦光栅<sup>[11,12]</sup>、锯齿光栅<sup>[13]</sup>、彩色编码光栅<sup>[14~16]</sup>或者是一系列的多帧格雷码条纹<sup>[17]</sup>,其中最常用的是二维 Ronchi 或正弦光栅。

光学投影系统可以由两种方式构建,一种是采用传统柯拉照明系统将光栅模板投影成像到被测物体的表面,可以得到稳定的结构光场,但系统的灵活性不高;近些年更常用的投影系统则是由可编程控制的空间光调制器(SLM)、液晶显示屏(LCD)或者数字微镜器件(DMD)构成,可以精准地控制待投影结构光场的周期、颜色和花样。

测量技术的发展,促使多种针对静态被测物体的条纹分析方法被深入研究和推广应用,比如叠栅轮廓术(MT)<sup>[18]</sup>、相位测量轮廓术(PMP)<sup>[19,20]</sup>、傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[21~24]</sup>和调制度测量轮廓术(MMP)<sup>[25]</sup>等。同时,动态被测物体的三维面形测量也成为研究热点,对应的一些测量技术也相继被报道出来。Zhang 等<sup>[26]</sup>投影一系列灰度随机变化的条纹到动态对象表面,成功重建了动态场景随时间变化的高度。Zhang 等<sup>[27]</sup>拆卸了 DMD 投影仪的色轮,搭建了高速投影单元,以 180 frame/s 的速度投影相移条纹,利用三步相移技术提取相位信息来重建被测动态物体,并成功将该系统推广运用。

在这些基于结构光的三维面形测量技术中,由 Takeda 等<sup>[21,22]</sup>在 1982 年提出的 FTP,由于只需要一帧图像就能全场高精度地重建被测物体三维面形,成为近年来常用的一种三维测量技术。在 FTP 中,投影 Ronchi 或者正弦条纹到被测物体表面,条纹像将受被测物体的高度分布调制而发生变形,用成像设备从另一个角度记录该变形条纹图像,并对其进行傅里叶变换、频域滤波和逆傅里叶变换等操作,最终从解调的相位分布中重建被测物体的三维信息。对比 MT,FTP 无需定位条纹的中心,能自动识别条纹级次和被测物体面形的凹凸,它能重建每一像素点上物体的高度信息而不需要在条纹间作插值;对比 PMP 和 MMP,FTP 只需要一帧或者两帧变形条纹图像,这一优点使得实时数据处理和动态过程三维重建成为可能。

在 Takeda 的研究成果之后,众多学者对 FTP 方法深入研究,做了不少改进和推广运用<sup>[28~40]</sup>。Macy<sup>[28]</sup>将一维(1D) FTP 加以改进,提出了二维 FTP;二维傅里叶变换和滤波技术在一些应用中成功得到了实现<sup>[29~32]</sup>;π 相移的正弦条纹投影技术可以将面形变化的测量范围提高三倍<sup>[23]</sup>;一些基于 FTP 的改进技术可以测量陡峭、不连续或者有孤立区域的被测物体,或者可以完成被测物体的 360°全貌测量<sup>[33~36]</sup>;为了提高测量精度,FTP 应用中的相位误差也得到了详细研究<sup>[37,38]</sup>。此外,基于 FTP 的动态三维面形测量也开始受到关注和研究<sup>[39~41]</sup>,并且提出了对应的三维傅里叶条纹分析方法<sup>[42,43]</sup>。

作者所在的课题组十余年来一直致力于研究 FTP 的应用,并将该技术引入到动态三维面形测量中来,形成了基于条纹投影和傅里叶条纹分析的动态三维面形测量整套技术方案,也成功实现了在不同领域的应用。本文以课题组该方向上的主要研究成果为主线全面回顾这方面的研究,以为动态三维面形测量技术<sup>[24,40,41]</sup>近年的发展做一初步总结。

## 2 基于 FTP 的动态三维面形测量基本原理

处于变化过程中的动态物体三维面形是一个和时间有关的量,如果沿时间轴对该动态过程进行满足采样定理的采样量化,就可以用类似传统 FTP 方法来重建每一个采样时刻对应的三维面形。测量过程可以简单描述为:通过投影系统将条纹投影到动态被测物体表面,将动态被测物体的高度信息调制到投影条纹的相位变化中,摄像系统按时间序列采样、获取被测物体表面的一系列变形条纹,并由图像采集系统将变形条纹图送入计算机进行后期的数据处理。基于傅里叶变换的条纹分析处理分为 3 个步骤:1)通过二维或者三维

傅里叶变换将得到变形条纹对应的傅里叶频谱,满足空间采样定理的正弦变形条纹,其频谱的零频和基频成分也相互分离;2)利用合适的带通滤波器(如汉宁滤波器、巴特沃思滤波器等)滤出其中一支基频成分,对其做傅里叶逆变换,计算出对应的相位分布;3)运用三维相位展开算法对截断在主值区间的相位分布进行三维空间的相位展开,经过相位-高度映射后得到不同采样时刻的动态测量对象三维高度分布。

## 2.1 测量系统

用于动态三维测量的系统光路结构与传统静态 FTP 相同,测量装置如图 1 所示。成像系统装置是接收变形条纹像的面阵探测器,按照物体变化速度和测量时间分辨率的要求,所采用成像系统的记录速度也有相应要求。 $E'_p - E_p$  为投影系统的光轴, $E'_c - E_c$  为成像系统的光轴,两光轴相交于参考平面上的点  $O$ ,参考平面与成像系统的光轴垂直。条纹的栅线垂直于  $E_p E_c O$  平面,条纹像被投影系统投影到待测物体表面,由于受到物体高度分布  $Z(x, y)$  的空间调制,成像系统将得到携带有物体高度分布信息的变形条纹像。成像系统出瞳到被测物体的距离为  $l_0$ ,  $d$  是成像系统与投影系统之间的距离。

周期  $p_0$  的光栅条纹  $G$  被投影到参考平面后,成像系统从另一个角度  $\theta = \arctan(d/l_0)$  拍摄到的条纹像可以表示为

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n r_0(x, y) \exp\{i[2n\pi f_0 x + n\phi_0(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $x$  轴与条纹栅线垂直, $y$  轴与栅线平行,坐标系如图 1 中所示。 $A_n$  为傅里叶级数的系数, $r_0(x, y)$  代表参考面上的非均匀反射率分布函数, $f_0$  为条纹像的空间基频( $f_0 = 1/p_0$ ), $\phi_0(x, y)$  为参考面上的相位分布。与该测量系统光路相对应的实验系统如图 2 所示。

静态被测物体的面形不随时间变化,对其测量时,成像设备记录的变形条纹图像和采样时刻  $t$  无关,可以表示为空间采样点阵  $x, y$  的函数  $g(x, y)$ 。如果被测物体是动态过程,它的面形随时间变化,对其测量时,成像设备记录的变形条纹图像不仅是空间采样点阵  $x, y$  的函数,还和采样时刻  $t$  有关,应该表示为  $g[x, y, z(t)]$ ,同时,傅里叶条纹分析得到的相位信息也是采样时间的函数,记为  $\phi(x, y, t)$ 。一般而言,动态测量中的空间坐标  $x$  和  $y$  虽然也和采样时间  $t$  有关,但比起高度  $z$  坐标的变化来,它们随时间变化的量很小,可以忽略。

成像设备拍摄到动态物体表面一系列变形条纹的强度分布可以写成

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

式中  $r(x, y, t)$  为拍摄对象表面不同时刻的非均匀反射率分布函数, $\phi(x, y, t)$  为不同时刻由拍摄对象表面高度变化所引起的相位变化, $m$  表示以成像设备的帧频速度  $V_f$  在时间  $T$  内拍摄到的变形条纹总帧数(总帧数  $m = V_f \times T$ )。诚然,所采用成像设备的帧频速度越快,在时间  $T$  内获取到的帧数  $m$  越多。这样的动态记录方式提供了一个被测对象的时空信息系列,其中三维空间信息将用变形条纹图像中解调出来,时间信息用拍摄频率来表达。

对(2)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。选用合适的带通滤波器将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,得到的复分布为

$$\hat{g}[x, y, z(t)] = A_1 r(x, y, t) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y, t)]\}. \quad (3)$$

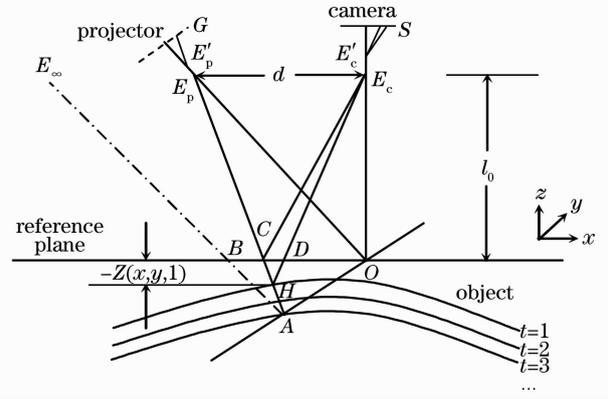


图 1 基于 FTP 的动态三维面形测量系统光路图

Fig. 1 Optical geometry of dynamic 3D shape measurement system based on FTP

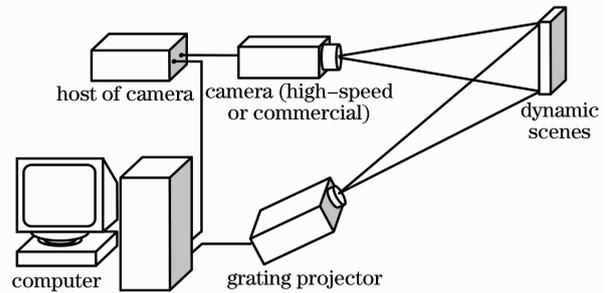


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

对参考平面上的频谱分布公式(1)式施以同样操作,可得到复分布

$$\hat{g}_0(x, y) = A_1 r_0(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\}. \quad (4)$$

依据图 1 所示的测量系统结构参数和几何关系,由物体高度变化引起的相位变化为

$$\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \phi_0(x, y) = 2\pi f_0(\overline{BD} - \overline{BC}) = 2\pi f_0 \overline{CD} = 2\pi f_0 \frac{-dZ(x, y, t)}{l_0 - Z(x, y, t)}. \quad (5)$$

由于相位值是通过反正切函数运算得到,计算结果被截断在函数主值范围 $(-\pi, \pi]$ 内,呈锯齿形的不连续状分布。因此,在按相位-高度映射关系由相位值求出被测物体的高度分布之前,必须将此截断的相位展开恢复为连续相位,需要顺序搜索相位间断点,并用加减 $2n\pi$ 的方法进行修正,这一过程就是相位展开或称相位解截断、相位去包裹<sup>[44~47]</sup>。

根据(5)式,被测高度分布 $Z(x, y, t)$ 可以表示为

$$Z(x, y, t) = \frac{l_0 \Delta\Phi(x, y, t)}{\Delta\Phi(x, y, t) - 2\pi f_0 d}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\Phi(x, y, t)$ 为截断相位 $\Delta\phi(x, y, t)$ 三维空间展开后的连续相位分布。在实际的测量中,测量系统到被测物体的距离 $l_0$ 远大于物体表面的高度起伏,即 $l_0 \gg Z(x, y, t)$ , (6)式可以简化为

$$Z(x, y, t) \approx -\frac{l_0}{2\pi f_0 d} \Delta\Phi(x, y, t) = -\frac{1}{2\pi\lambda_e} \Delta\Phi(x, y, t), \quad (7)$$

式中的 $\lambda_e$ 为测量系统的等效波长,它由系统结构参数 $\theta$ 和正弦条纹周期 $p_0$ 决定,可表征测量系统的检测精度。

## 2.2 三维相位计算和展开

在对滤波后的基频分量进行逆傅里叶变换之后,获得一系列复分布,可以用以下两种方法从复分布中计算对应时刻的截断相位场分布。1) 将变形条纹图三维序列按照采样记录时刻分为多个二维图像的集合,逐帧进行二维空间的相位计算,直接将 $\hat{g}(x, y, t)$ 和 $\hat{g}^*(x, y, t=0)$ 相乘,再求出此乘积复分布的相角就可以得到任意 $t$ 时刻的变形条纹相对于参考平面的相位差 $\Delta\phi(x, y, t)$ :

$$\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \phi(x, y, 0) = \arctan \frac{\text{Im}[\hat{g}(x, y, z(t))\hat{g}^*(x, y, t=0)]}{\text{Re}[\hat{g}(x, y, z(t))\hat{g}^*(x, y, t=0)]}, \quad (8)$$

式中 $*$ 为共轭运算,Im和Re分别为取虚部和实部。利用这种方法,可以得到每个采样时刻变形条纹的对应相位分布,构成被测动态对象的三维相位信息序列。时间轴的采样率越高,相邻两帧的相位差就越小,这将便于利用相邻帧相位差叠加进行三维相位分布的展开。2) 也可以将变形条纹图三维序列作为一个信号整体,进行三维傅里叶变换和三维频域滤波的条纹分析,以获得对应的三维截断相位分布<sup>[43]</sup>。

对动态过程进行三维面形测量时,相位展开不仅需要 $x, y$ 二维方向上进行,恢复相位在二维面内的连续分布,同时还要在 $t$ 方向上也进行展开,保证三维相位在时序上有正确的前后关联性。新增的 $t$ 方向使三维截断相位的展开路径不再局限于 $x, y$ 两个方向,给相位空间不连续点的展开增加了可展性和自由度。对于因噪声、阴影和欠采样等因素引起的相位不连续点,如果在当前帧的二维方向上难于获得正确的相位值,可以由相邻前后帧上相应点的相位值进行展开或推算来获得。

如果三维截断相位场每一点的相位值可靠,并且相邻帧相位差小于 $\pi$ (要求成像系统的帧速率足够高),此时的三维截断相位展开操作相对简单,可以先在二维空间中展开其中一帧截断相位分布,然后沿 $t$ 方向叠加相邻帧对应像素间的相位差,以得到整个三维空间准确的连续相位值。

在实际测量中,由于三维变形条纹中存在噪声、阴影、条纹断裂、采样不足等问题,使得三维相位展开与路径有关,不能简单地按行列进行展开。以调制度作为导向参数的展开方法可以引导截断相位的二维空间展开沿调制度从大到小的路径进行<sup>[47]</sup>,测量时记录的条纹图像数据中,调制度越高的部分,表明变形条纹质量越好,这些部分对应的相位值就越可靠。基于调制排序的二维相位展开算法也可以拓展应用到三维截断相位展开中来。对三维变形条纹的三维调制度分布进行排序,使三维相位展开路径始终沿调制度高的位置展向调制度低的位置。三维展开时还可以设定阈值,对调制度低于阈值的部分用模板进行覆盖,展开时绕过这些区域,待全部可靠点展开后再用插值方法得到模板覆盖区的近似相位值。该方法利用调制度为判据,将相位不可靠点留待最后进行处理,可将相位展开的误差限制在局部范围以内,避免相位展开中的误差传播。基于调制排序的三维相位展开算法原理示意如图 3 所示,图中箭头给出了三维相位展开的一条路径。

## 2.3 测量系统的标定

实际测量系统并不总能满足图 1 所示的结构要求,测量前需要对测量系统进行 X、Y 和 Z 3 个方向上的严格标定,首先建立 Z 方向上相位-高度( $h$ )的映射关系,考虑到投影和成像两个光学系统存在像差和畸变以及图像在两个系统焦面前后不同程度的离焦现象,认为成像面上每一点( $u, v$ )的已知高度分布  $h(u, v)$  和相位  $\Delta\Phi_h(u, v)$  二者的倒数成接近直线的非线性关系,采用下式所示的二次曲线拟合它们之间的对应关系<sup>[48]</sup>:

$$\frac{1}{h(u, v)} = a(u, v) + \frac{b(u, v)}{\Delta\Phi_h(u, v)} + \frac{c(u, v)}{\Delta\Phi_h^2(u, v)}. \quad (9)$$

相位-高度映射的具体做法是通过多个已知高度分布物体的测量计算产生一个与系统参数有关的隐式映射表,在该表中查表得到每一点上相位差和高度的函数关系  $a(u, v)$ 、 $b(u, v)$  和  $c(u, v)$ ,由此将相位信息映射转换为高度数据。在获得相位-高度映射参数之后,结合 Z 方向标定的结果,再采用机器视觉中通用的两步法面内坐标标定方法<sup>[49]</sup>,对测量系统的 X-Y 坐标完成标定。

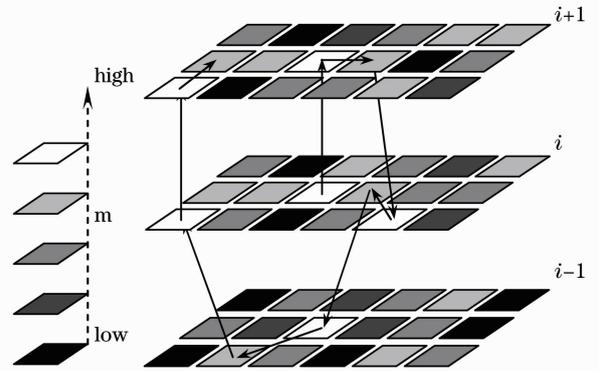


图 3 基于调制度排序的三维相位展开算法示意图  
Fig. 3 Sketch map of 3D phase unwrapping algorithm based on modulation ordering

## 3 动态三维面形测量的实际应用

依据被测动态对象的运动变化速度快慢以及三维面形测量时间分辨率上的精度要求,动态过程可大致划分为慢变化过程、快变化过程和高速旋转与瞬态过程三种类型。分别设计了对应的测量方案和装置,完成了一些实际的应用实例<sup>[50]</sup>。

### 3.1 慢变化过程的动态三维面形测量应用

以液体漩涡的产生和发展过程为慢变化过程测量应用对象,搭建了一个低成本的动态三维面形测量系统,电磁搅子搅拌液体染料产生漩涡,采用商用 CCD 相机以视频速度(25 frame/s)记录液体染料表面的变形条纹,数据处理重建了漩涡从产生到加深的动态变化全过程<sup>[51,52]</sup>。图 4(a)给出了其中一帧变形条纹(128 pixel $\times$ 128 pixel),图 4(b)是重建漩涡不同时刻三维面形中间行的高度数据,每条高度分布线上标注了相应的采样时刻。

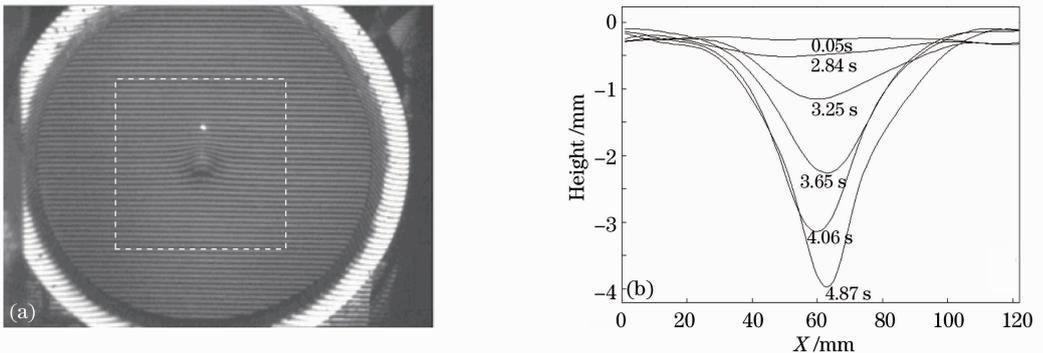


图 4 液体漩涡的动态三维面形测量结果。(a)漩涡加深过程中的一帧变形条纹;(b)重建漩涡不同时刻三维面形中间行的高度数据

Fig. 4 Dynamic 3D shape measurement of a liquid vortex. (a) One of the deformed fringes when the stirrer is working; (b) profiles of the reconstructed vortices at different times

### 3.2 快变化过程的动态三维面形测量应用

采用高帧频摄像设备高速采集变形条纹来完成快变化动态过程的三维面形测量,搭建了振动鼓膜的动态三维面形测量系统<sup>[53]</sup>。

将一个直径为 250 mm 的中国双面鼓放入测量范围内,采用 SpeedCam Visario 作为成像设备,以

1000 frame/s 帧频拍摄记录鼓面的变形条纹(1536 pixel $\times$ 1024 pixel)。在开始捕获图像的同时立即用鼓槌快速连续敲击鼓另一面 3 次,全程拍摄另一面鼓膜的振动过程。整个过程一共拍摄了 1.5 s,共获得 1500 frame 动态图像。膜面中心点的振动过程如图 5(a)所示。振动鼓面在每一个采样时刻的三维面形均被准确地重建出来。图 5(b)给出了一个振动周期中 6 个采样时刻的鼓面中心行高度分布,同样标注了字为对应的采样时刻。图 5(c)和(d)分别绘制了鼓面在第 166 ms 和 167 ms 时的三维面形重建结果。从图中可以看到,在一个振动周期中,存在两种振动模式——(1,0)和(1,1),这表明实验时的敲击点并没有位于鼓膜的真正中心,如果敲击中心点只会有(1,0)模式存在,同时由于鼓膜表面非线性因素(如表面张力不均匀等)的存在,致使鼓膜振动在多个模式之间发生转换。

如果采用高速摄影相机,还可以  $5\times 10^5$  frame/s 的记录速度用于冲击和爆裂过程的三维面形测量<sup>[54]</sup>。

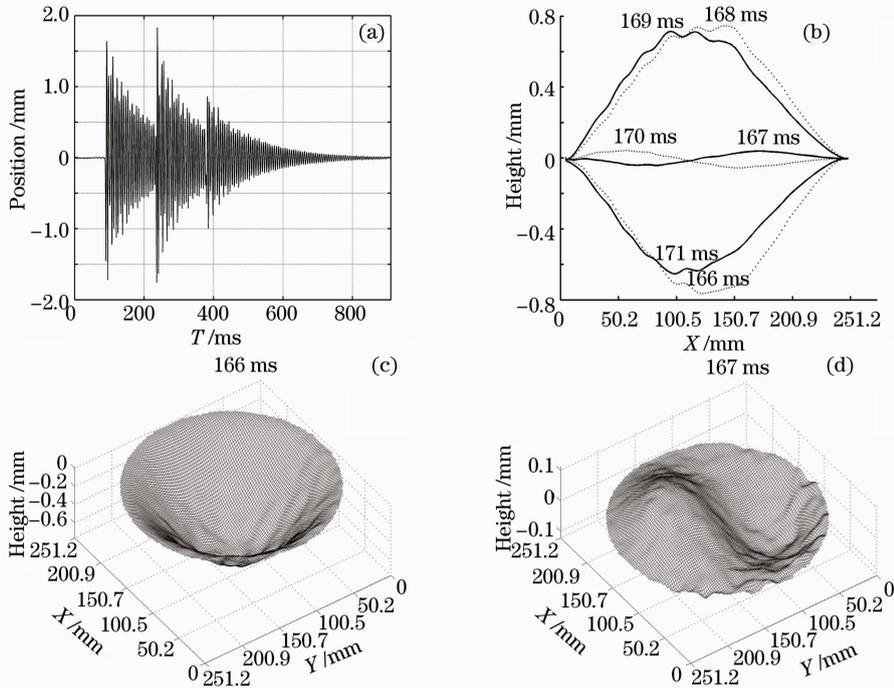


图 5 振动鼓膜的三维面形重建结果。(a)鼓膜中心点的振动位置;(b)一个周期内鼓膜直径上的振动情况;(c),(d)第 166 ms 和 167 ms 时振动鼓膜三维面形分布

Fig.5 Dynamic 3D shape measurement for a vibrating drum. (a) Vibration position at the center point of the tested drumhead; (b) restored profiles of six sampling instants in one period; (c), (d) grid charts of restored height distribution of the tested drumhead at 166 ms and 167 ms

### 3.3 高速旋转与瞬态过程的动态三维面形测量应用

频闪仪(Stroboscope)可以提供一定频率快速闪动的光源,1 s 内能开启和关断若干次,已被广泛用于高速摄影领域<sup>[55~57]</sup>。频闪光源照明急速周期性运动物体可以获得降低运动速度的,甚至是静止的观测结果。当频闪仪的照明光源闪动频率严格与被测物体的转动或运动速度相等或者是其整数倍时,将观察到物体相对静止,这就是所谓的“频闪效应(Stroboscopic effect)”。

将频闪效应与三维面形测量技术中的结构照明相结合,形成频闪结构光照明系统,用来完成高速旋转与瞬态过程中三维面形测量。该项应用中最关键的是如何拍摄到高速运动物体表面瞬间的清晰变形条纹图像,为此,全面考虑物体运动、频闪照明光源发光之间的时序关系,设计了专用的频闪结构光硬件控制单元对测量系统中被测物体的运动、频闪结构光照明和变形条纹成像记录三者严格同步控制<sup>[58]</sup>。同时,该控制单元还设计了计数分频功能,能对位置探测端检测到的物体频率信息进行分频,使低帧频商用成像设备能运用于高速运动的三维面形测量。

在图 6 所示的实验装置中,成像系统 CCD 到风扇叶片的距离  $l_0=620$  mm,投影系统与成像系统之间距离  $d=540$  mm,采用专门设计的频闪结构光硬件控制单元投影 2 line/mm 的正弦光栅产生频闪结构光场,

成像设备是接有 12 mm 标准镜头的 PULNiX-6AS CCD 摄像机, 经过图像采集卡 DT3152 数字化后的图像分辨率为 576 pixel $\times$ 768 pixel, 在后期数据处理时裁剪成 512 pixel $\times$ 512 pixel。

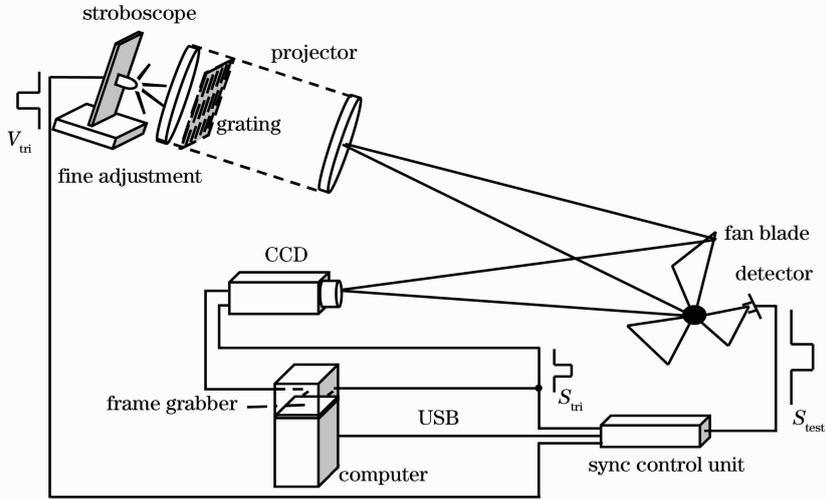


图 6 旋转风扇叶片形变测量系统装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of deformation measurement system for a rotating fan blade

用闪光持续时间为 664  $\mu$ s 的频闪结构光源, 对最大转速为 1112 r/min 的风扇进行了叶片动态形变测量<sup>[59,60]</sup>。从风扇开始旋转到稳定旋转这个过程中, 共拍摄了 200 frame 变形条纹图像。图 7(a) 给出了频闪同步照明下风扇旋转第 50 圈时叶片表面的变形条纹, 图 7(b) 绘制了扇叶旋转第 50 转时的重建三维面形分布。图 7(c) 给出了图 7(b) 所示的三维面形相对于叶片初始状态(旋转第 1 转)的形变分布。图 7(d) 给出了

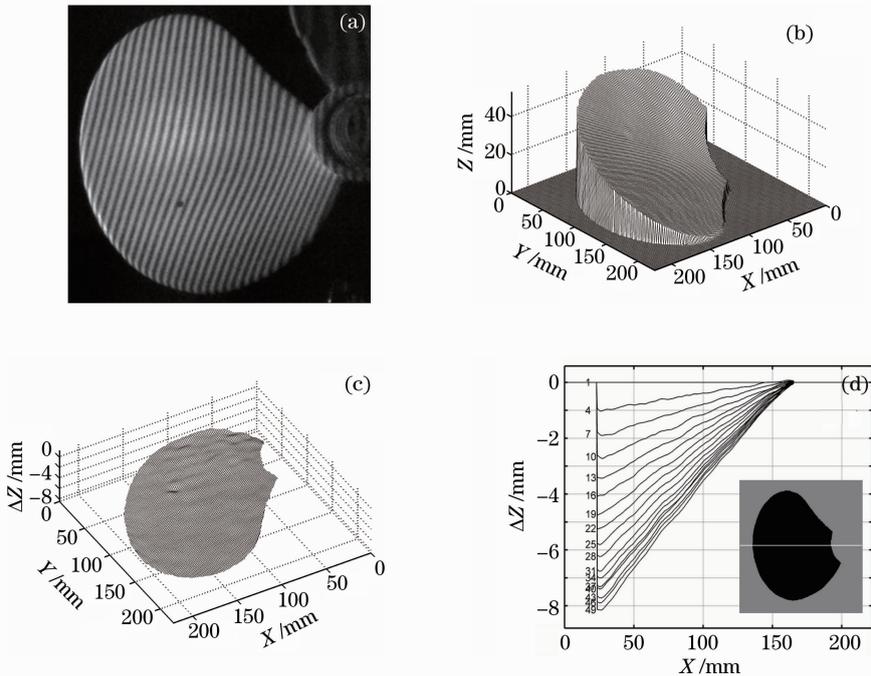


图 7 旋转风扇叶片的三维形变测量。(a) 第 50 转的变形条纹图; (b) 第 50 转时的叶片三维面形重建结果;

(c) 第 50 转时的叶片三维面形与第 1 转的形变分布; (d) 插图线上前 50 转相对于第 1 转的形变

Fig. 7 Dynamic 3D deformed shape measurement for a rotating blade. (a) Deformed fringes recorded at the 50th revolution; (b) 3D reconstruction result at the 50th revolution; deformation (relative to the first revolution); (c) 3D shape of the blade at the 50th revolution and deformation distribution at the first revolution; (d) deformations at the first 50 revolutions (relative to the first revolution) along the line shown in inset

风扇叶片旋转前 50 转分别相对于第 1 转,在插图所示线上的形变情况。从结果可以清晰地看出,随着旋转的加快,叶片面上离转轴中心越远的区域变形量越大;当风扇转动频率越接近相对稳定时,变形量也逐渐趋于稳定值。

该技术方案和测量系统可以运用到具有明显重复频率特征的运动(如旋转、振动等周期性运动)物体的三维面形测量和形变分析。当闪光频率信号是以用户预先指定的方式产生时,本方案也可以运用到不具有明显重复特征的运动(如膨胀、收缩、弹道飞行和爆轰等瞬态运动)物体的测量和形变分析中。另外,如果将前端的频率信号监测提取单元换成其他传感器件,还可以进一步拓宽该方法的运用领域,比如换成声控装置后,可以测量一些伴有明显爆炸声响的爆裂过程;换成压电装置后,可以测量碰撞变形等一些有表面接触的动态过程。

### 3.4 分裂物体的动态三维面形测量

特殊地,当动态测量对象在时间方向采样间隔过大或者被测物体在空间上破裂分离成几个独立部分时,从变形条纹中对应解调出来的截断相位,因在时间轴上相邻帧跳跃变化大或空间上局部孤立,会导致相位展开困难,无法获取三维空间里连续的相位分布。为了解决该问题,提出了一种条纹标记方法<sup>[61]</sup>。将一个设计好的标记嵌入到投影的正弦条纹中,用来跟踪识别条纹指定周期。嵌入的标记周期结构分布方向与正弦条纹栅线方向垂直,不会影响变形条纹的傅里叶频谱分布,可以很容易地用带通滤波器将其分离提取出来。同一根标记所在条纹周期的相位级次相同并且已知,所以即便是一根标记随物体分离分布在多个孤立区域

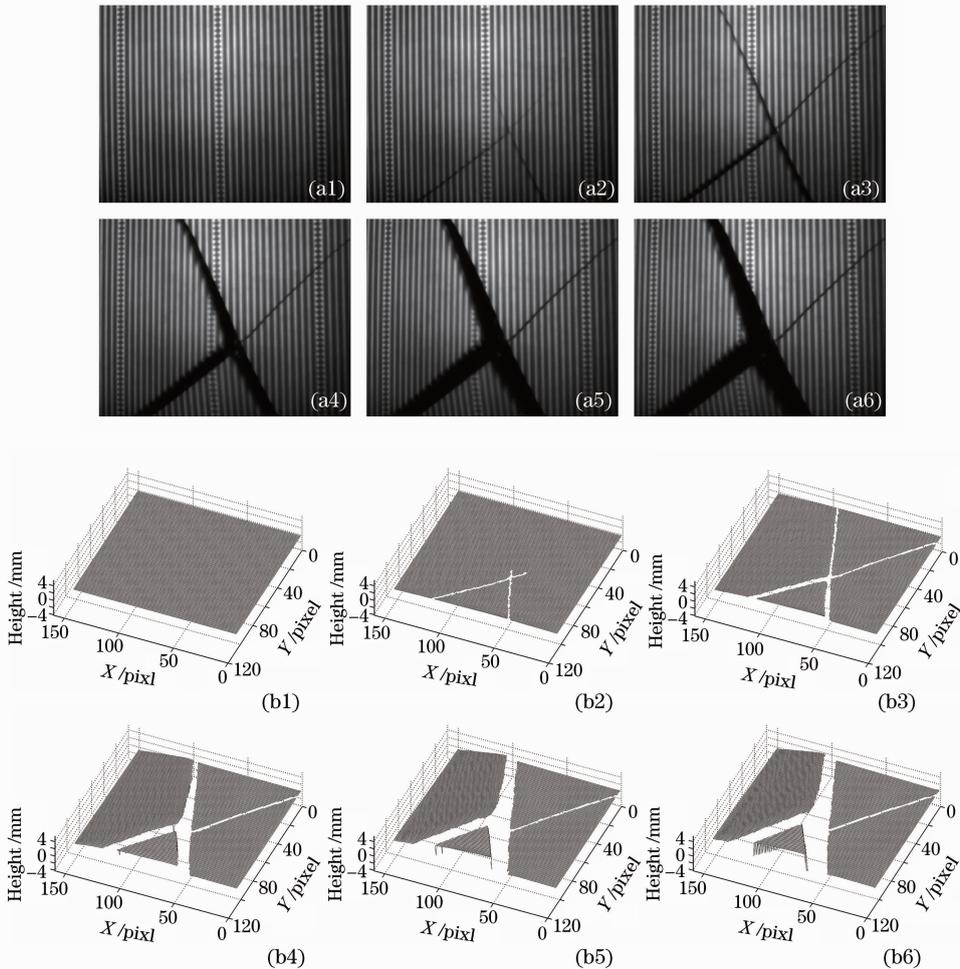


图 8 破裂瓷砖的动态三维面形测量结果。(a1)~(a6)破裂过程中 6 个时刻的变形条纹;

(b1)~(b6)对应(a1)~(a6)中采样时刻的三维面形重建结果

Fig. 8 Dynamic 3D shape measurement for a breaking tile. (a1)~(a6) Six frames of deformed fringe in breaking process; (b1)~(b6) reconstructed 3D shape of the breaking tile at the corresponding sampling instants in (a1)~(a6)

中,仍旧可以利用标记条纹的绝对相位级次指导每个孤立区域的对应相位展开,获取分裂表面的正确相位分布。在图8所示的实验结果中,一块正被打破的瓷砖明显地分裂为空间隔离的四块,彼此间孤立分布致使条纹空间断裂分开,对应的截断相位也因为这些间断而丢失了相互间的级次连续关系。利用标记条纹跟踪提取的相位级次信息,可以正确重建该破裂过程的三维面形分布。整个破碎过程共持续了235 ms,采集了47 frame图像,其中6 frame带标记的变形条纹如图8(a)所示。图8(b)给出了该破裂瓷砖在图8(a)各图中相应采样瞬间的重建三维面形分布。

出于同样的目的,动态三维面形测量中的条纹周期动态跟踪还可以采用其他标记方法,如利用不同颜色编码标记待投影正弦条纹的每一个周期,重建时用解码出来的颜色信息还原对应周期的级次,指导相位展开<sup>[62,63]</sup>;也可以采用点或者十字叉作为指定级次的标记点,指导绝对相位的计算<sup>[64]</sup>;另外一种可选方法是投影双频正弦条纹进行测量,低频条纹的相位跃变边界可以用作高频条纹对应截断相位的级次标记<sup>[65]</sup>。

## 4 时间平均条纹分析用于薄膜振动模式的动态检测

基于条纹投影和傅里叶分析方法进行动态三维面形测量时,要求成像设备的采样记录速度至少是被测物体运动变化速度的两倍,才能准确重建被测物体随时间变化的三维面形分布。但对于以振动模式检测为目的的动态分析而言,采用低帧频商用成像设备也可以实现。借鉴时间平均全息干涉术的原理,我们将时间平均条纹分析法引入到基于结构光投影的薄膜振动模式分析中。只需获取一幅变形条纹图,便可对薄膜的振动模式进行定性分析和识别<sup>[66]</sup>。

### 4.1 振动模式检测的基本原理

设薄膜的振动属于正弦型强迫振动,其振动方程描述为

$$Z(x, y, t) = A(x, y) \cos\left(\frac{2\pi}{p_x}x\right) \cos\left(\frac{2\pi}{p_y}y\right) \sin\left(\frac{2\pi}{p_t}t\right), \quad (10)$$

式中  $A(x, y)$  为薄膜表面上  $(x, y)$  点处的振幅,  $p_x, p_y$  分别为物体在  $x, y$  方向上的振动周期,  $p_t$  为物体的振动周期。

和动态三维面形测量过程一样,投影正弦条纹到待测振动薄膜表面,将薄膜的振动信息调制到条纹的变化中。对于薄膜表面上任意一点,由于薄膜振动在  $Z$  轴方向上发生的位移而引起的相位调制可记为

$$\phi(x, y, t) = Z(x, y, t) \frac{2\pi l_0}{f_0 d}. \quad (11)$$

薄膜振动后,成像器件得到的变形条纹可以表示为

$$g(x, y, t) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y) + \phi(x, y, t)], \quad (12)$$

式中  $a(x, y)$  为背景光场分布,  $b(x, y)$  相当于条纹的对比度,  $t$  为对应的采样时刻,  $f_0$  为正弦条纹的空间载频 ( $f_0 = 1/p_0$ ),  $\phi_0(x, y)$  为投影条纹的初始相位分布。

假定成像设备的曝光记录时间比薄膜振动的时间周期  $T$  长很多(采用低帧频的商用 CCD 很容易实现这一条件),因此,该周期  $[0, T]$  内成像器件记录的振动薄膜表面光强是一个时间平均值:

$$\langle g(x, y, T) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T g(x, y, t) dt. \quad (13)$$

利用贝塞尔函数关系式

$$\exp(j\alpha \cos \theta) = J_0(\alpha) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} j^m J_m \cos m\theta. \quad (14)$$

将(10)~(12)式代入(13)式,并考虑  $m=0$ , (13)式可以表示为

$$\langle g(x, y, T) \rangle = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)] J_0 \left[ \frac{2\pi l_0 A(x, y)}{f_0 d} \right]. \quad (15)$$

对(15)式的变形结构光场做傅里叶变换,得到  $\langle g(x, y, T) \rangle$  的傅里叶频谱,选用合适的带通滤波窗,将基频分量滤出来并作逆傅里叶变换,得到对应的复分布:

$$\langle \hat{g}(x, y, T) \rangle = \frac{b(x, y)}{2} J_0 \left[ \frac{2\pi l_0 A(x, y)}{f_0 d} \right] \exp\{j[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\}. \quad (16)$$

对未振动膜面上的静止条纹也做相同的傅里叶条纹分析,得到对应的复分布:

$$\hat{g}_0(x, y, T) = \frac{b(x, y)}{2} \exp\{j[2\pi f_0 x + \phi_0(x, y)]\}. \quad (17)$$

分别取两个复分布的模,并计算二者的比值,将得到当前频率下的薄膜振动模式:

$$I = |\langle \hat{g}(x, y, T) \rangle| / |\langle \hat{g}_0(x, y, T) \rangle| = \left| J_0 \left[ \frac{2\pi l_0 A(x, y)}{f_0 d} \right] \right|. \quad (18)$$

采用该方法进行时间平均条纹分析,薄膜表面振幅小的点(即波节位置)对应条纹在整个积分曝光周期内模糊程度小,所以模的比值大;而振动最强烈的点(对应波腹位置)条纹的模糊程度大,模的比值自然小。(18)式表明,在振动与静止两种状态下,薄膜表面条纹傅里叶频谱基频的对应复分布模比值能有效地反映振动模式。同时,如果测量系统经过严格的标定,该方法还能由零阶贝塞尔函数准确地计算出薄膜表面各个位置的振动振幅  $A(x, y)$ 。

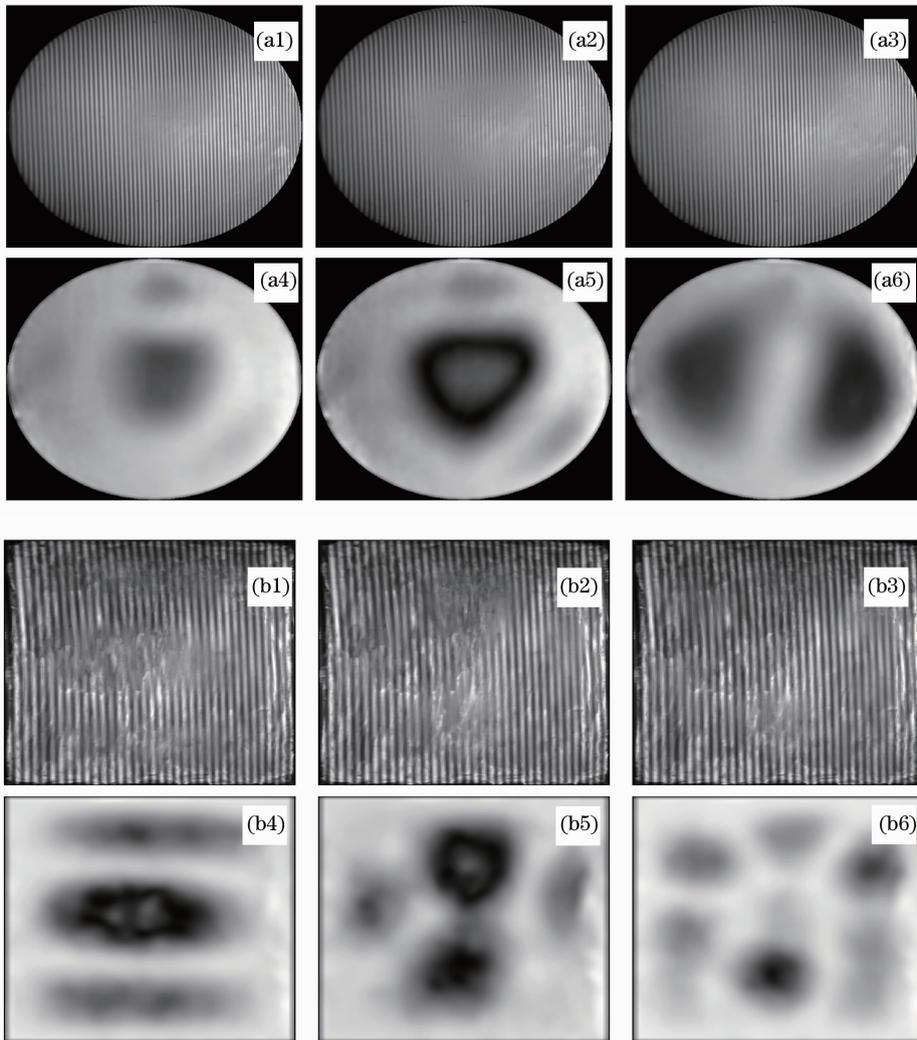


图9 薄膜振动模式检测中的时间平均条纹和相应的重建振动模式。(a1)~(a6)圆形膜:73.3 Hz 激励下的(0,1)模,82.2 Hz 激励下的(0,2)模和 91.1 Hz 激励下的(1,1)模;(b1)~(b6)矩形膜:125.7 Hz 时的(1,3)模,163.7 Hz 时的(3,1)模和 206.7 Hz 时的(3,2)模

Fig.9 Blurred time-average fringe and their corresponding vibration modes in detection of films' vibration modes. (a1)~(a6) For a circular membrane, mode (0,1) at 73.3 Hz, mode (0,2) at 82.2 Hz and mode (1,1) at 91.1 Hz; (b1)~(b6) for a rectangular membrane, mode (1,3) at 125.7 Hz, mode (3,1) at 163.7 Hz and mode(3,2) at 206.7 Hz

## 4.2 振动模式检测的应用实例

振动模式检测的实验装置和图 2 类似,信号发生器产生正弦周期信号,经功放放大后作为低音喇叭的激

励信号源,迫使覆盖在喇叭表面的薄膜作受迫振动,采用微视 MVC-II 系列低帧频商用 CCD(25 frames/s)记录振动薄膜表面的时间平均条纹<sup>[67]</sup>。一个振动物体是绷紧固定在喇叭边缘的一张圆形薄铝膜( $\Phi 345$  mm),利用上述方法和装置进行了条纹分析,得出在不同激励频率下的振动模式分布。图 9(a)给出了分别在 73.3、82.2、91.1 Hz 激励频率下的圆膜表面时间平均条纹和相应的重建出的(0,1),(0,2)和(1,1)振动模式。另一个振动物体是一张紧绷的矩形气球膜(200 mm $\times$ 104 mm),图 9(b)给出了在 125.7、163.7、206.7 Hz 激励频率下的矩形膜表面时间平均条纹和相应的重建出的(1,3),(3,1)和(3,2)振动模式。

利用时间平均条纹法,在结构光投影条件下,使用低帧频商用成像设备,只需获取一幅时间平均的变形条纹图,便可完成对薄膜振动模式的分析和识别。目前的实验虽然只针对低频(0~300 Hz)振动范围,但在提高系统的测量精度、降低系统的等效波长之后,该方法也可以完成对高频范围的振动模式分析。与传统的时间平均全息干涉术相比,该方法不需要记录介质,数据获取速度快,对测量环境的要求低,可以在暗室和非暗室的环境中进行,而且测量装置简单易于实现。

## 5 发展趋势和面临的挑战

本文主要回顾了我们十余年来在动态三维面形测量技术中的研究成果和进展,阐述了该技术方法的主要原理和一些典型应用实例,比如结合频闪效应重建高速周期运动物体的三维面形和形变;振动鼓膜三维面形的高速测量;旋转液面和破裂表面的动态变化测量等。同时还介绍了基于时间平均条纹分析的薄膜振动模式检测方法,给出了相应的理论分析和实验结果。

本文综述的基于条纹投影和傅里叶分析的动态三维面形测量方法,只需要一帧图像就能非接触、全场高精度地重建被测动态物体的三维面形,需要记录的数据量小,而且测量的时间分辨率仅受限于成像器件的速度,能全过程地再现被测物体的运动变化;条纹分析采用傅里叶变换方法,能自动识别条纹级次和被测物体面形的凹凸,不需要空间插值,算法相对简单快捷,易于实现硬件化加速。

尽管该方法目前已被深入研究并应用到不同的领域中,但随着新的需求的不断提出和技术的进步,动态三维面形测量技术将会提高采样速度、测量精度、三维重建的可靠性和实时三维重建方面取得新的进展。同时,仍旧面临着以下挑战,这也是我们今后研究工作开展的重点。

加快数据处理速度,增强实时性,是动态三维测量的一个关键的技术瓶颈。测量结果的实时重建与显示是动态三维面形测量在加工工业、在线监测等领域中成功推广应用的前提,也是该技术研究发展的一大挑战。充分利用图形处理器(GPU)的高速并行处理能力,在个人电脑中完成高速的实时重建成为必然的趋势<sup>[26,68,69]</sup>。

降低动态三维测量中系统环境的影响也是一个重要的研究内容,测量过程中周围环境光和外围设备的干扰是不可忽视的影响因素。比如,环境光的存在会影响频闪条纹投影方法中的变形条纹图像质量。另外,动态三维测量对象表面的颜色纹理也会影响系统的最终测量精度。投影彩色条纹可以降低条纹频谱的混叠,从而提高测量精度和动态范围,但随之而来的各颜色通道不同的输入-输出响应、颜色通道间的串扰以及彩色 CCD 相机的记录速度等新问题又将影响测量系统的速度和精度。剧烈的动态过程和有限的空间和时间采样率将对三维相位计算的精度和可靠的相位展开提出更严峻的挑战。

提高动态三维测量系统的精度是另一个关键的研究问题。一般说来,不同的测量系统对应不同的测量精度。同时,由于被测对象的运动变化,使得动态三维测量的精度总体说来比相同系统结构参数条件下的静态三维测量精度低。在较大视场的应用实例中,测量结果的精度大多仍停留在几十微米量级上,今后的一个主要任务是研究如何标定动态三维测量系统和提高动态三维测量的精度,以吻合相关应用的需求。

针对微结构表面的动态三维测量的需求也在逐步增加,例如微机电系统(MEMS)的动态测试<sup>[70]</sup>,这种测试对微机电系统设计、制造和可靠性具有非常重要的意义。采用结构光的方法,以纳米级精度实现频率达兆赫兹以上级的动态测量,也是正在面临的挑战。

**致谢** 感谢课题组的同事、已毕业和在读的研究生们对该领域研究工作所作出的贡献。

## 参 考 文 献

- 1 Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser Surveying[M]. Beijing: Science Press, 1999  
金国藩, 李景镇主编. 激光计量学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 2 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
- 3 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 4 B. Jähne, H. Haußecker, P. Geißler. Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 1: Sensors and Imaging [M]. San Diego: Academic Press, 1999
- 5 S. S. Gorthi, P. Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2010, **48**(2): 133~140
- 6 Sun Changku, Ye Shenghua. Laser Measurement Technology[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001  
孙长库, 叶声华. 激光测量技术 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2001
- 7 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
- 8 J. Salvi, J. Pagès, J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems [J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4): 827~849
- 9 Guo Jiping, Peng Xiang, Liu Xiaoli *et al.*. Dynamic 3D reconstruction and pipelined 3D modeling based on stripe boundary encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2884~2890  
郭继平, 彭翔, 刘晓利等. 条纹边界编码的动态 3D 重建及流水建模 [J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 2884~2890
- 10 Li Yong, Chen Yunfu, Jin Hongzhen *et al.*. Binary spatio-temporal encoded illumination for 3D Imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 670~675  
李勇, 陈云富, 金洪震等. 三维成像中的二值时空编码照明方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 670~675
- 11 Tao Xian, Xianyu Su. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(8): 1201~1206
- 12 Li Pingping, Zhang Qican. New method of sinusoidal grating generation based on area encoding [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, **9**(1): 36~41  
李平平, 张启灿. 产生正弦光栅的二值化面积编码新方法 [J]. 光学与光电技术, 2011, **9**(1): 36~41
- 13 L. Chen, C. Quan, C. J. Tay *et al.*. Shape measurement using one frame projected sawtooth fringe pattern [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **246**(4-6): 275~284
- 14 Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong. Matching technique of self-adaptation correlation in dynamic three-dimensional measurement by color grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 949~954  
韦争亮, 钟约先, 袁朝龙. 彩色栅线动态三维测量中自适应相关匹配技术 [J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 949~954
- 15 Zou Haihua, Zhao Hong, Zhou Xiang. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812009  
邹海华, 赵宏, 周翔. 基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术 [J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0812009
- 16 Qu Fang, Zhong Jingang. 3-D moving-lip shape measurement based on digital color-encoded structure light [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(5): 691~695  
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): 691~695
- 17 Zhang Wuming, Zhong Yuexian, You Zhifu *et al.*. A phase unwrapping method based on structured light binary code [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(5): 404~406  
张吴明, 钟约先, 由志福等. 基于结构光编码的相展开方法 [J]. 光学技术, 2002, **28**(5): 404~406
- 18 T. Yoshizawa. The recent trend of moiré metrology [J]. *J. Robustic Mech.*, 1997, **3**(3): 80~85
- 19 V. Srinivasan, H. C. Liu, H. Haloua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 20 X. Y. Su, W. S. Zhou, V. von Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 561~573
- 21 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 22 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 23 J. Li, X. Y. Su, L. R. Guo. An improved Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12): 1439~1444

- 24 X. Y. Su, W. J. Chen. Fourier transform profilometry; a review [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 25 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
- 26 L. Zhang, B. Curless, S. Seitz. Spacetime stereo: shape recovery for dynamic scenes [C]. *IEEE Computer conference on Computer Vision Pattern Recognition*, 2003, 367~374
- 27 S. Zhang, P. S. Huang. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement [J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(12): 123601
- 28 W. W. Macy. Two-dimensional fringe-pattern analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(23): 3898~3901
- 29 D. R. Burton, M. J. Lalor. Managing some of the problems of Fourier fringe analysis [C]. *SPIE*, 1989, **1163**: 149~160
- 30 D. R. Burton, M. J. Lalor. Multi-channel Fourier fringe analysis as an aid to automatic phase unwrapping [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(14): 2939~2948
- 31 J.-F. Lin, X.-Y. Su. Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(11): 3297~3302
- 32 C. Gorecki. Interferogram analysis using a Fourier transform method for automatic 3D surface measurement [J]. *Pure Appl. Opt.*, 1992, **1**(2): 103~110
- 33 X. Su, M. R. Sajan, A. Asundi. Fourier transform profilometry for 360° shape using TDI camera [C]. *SPIE*, 1997, **2921**: 552~556
- 34 J. Yi, S. Huang. Modified Fourier transform profilometry for the measurement of 3-D steep shapes [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 1997, **27**(5): 493~505
- 35 M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22): 5347~5354
- 36 Chen Wenjing, Su Xianyu, Tan songxin. Discussion on phase errors caused by frequency leakage in FTP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1429~1434  
陈文静, 苏显渝, 谭松新. 傅里叶变换轮廓术中频谱泄漏的讨论 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1429~1434
- 37 Chen Wenjing. Theoretical and Applied Study of Fourier Transform Profilometry [D]. Chengdu: Sichuan University, 2000  
陈文静. 傅里叶变换轮廓术的理论与应用研究 [D]. 成都: 四川大学, 2000
- 38 J. Kozloski, G. Serra. Analysis of the complex phase error introduced by the application of Fourier transform method [J]. *J. Modern Optics*, 1999, **46**(6): 957~971
- 39 Liu Xijun, Liang Chenjie, Guo Jiping *et al.*. Dynamic measurement of the 3D shape gravity waves in dragon washbasin [J]. *J. Vibration and Shock*, 2009, **28**(6): 168~178, 203  
刘习军, 梁臣杰, 郭季平等. 龙洗三维液体表面重力波的动态测量 [J]. *振动与冲击*, 2009, **28**(6): 168~178, 203
- 40 X. Su, W. Chen, Q. Zhang *et al.*. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2001, **36**(1): 46~64
- 41 Xianyu Su, Qican Zhang. Dynamic 3D shape measurement: a review [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2010, **48**(2): 191~204
- 42 H. S. Abdul-Rahman, M. A. Gdeisat, D. R. Burton *et al.*. Three-dimensional Fourier fringe analysis [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2008, **46**(6): 446~455
- 43 Qican Zhang, Zhiling Hou, Xianyu Su. 3D fringe analysis and phase calculation for the dynamic 3D measurement [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2010, **1236**: 395~400
- 44 T. R. Judge, P. J. Bryanston-Cross. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 1994, **21**(4): 199~239
- 45 A. K. Asundi, W. S. Zhou. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3556~3561
- 46 X. Su, L. Xue. Phase unwrapping algorithm based on fringe frequency analysis in Fourier transform profilometry [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(4): 637~643
- 47 X. Y. Su, W. J. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm; a review [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 48 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
- 49 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*,

- 2000, **22**(11): 1330~1334
- 50 Zhang Qican. Technical Study of Three-Dimensional Shape Measurement for Dynamic Process [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005  
张启灿. 动态过程三维面形测量技术研究 [D]. 成都: 四川大学, 2005
- 51 Q. C. Zhang, X. Y. Su. An optical measurement of vortex shape at a free surface [J]. *Opt. & Lasers Technol.*, 2002, **34**(2): 107~113
- 52 Zhang Qican, Su Xianyu. Dynamic liquid surface shape measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1506~1508  
张启灿, 苏显渝. 动态液面面形测量[J]. 光学学报, 2001, **21**(12): 1506~1508
- 53 Q. C. Zhang, X. Y. Su. High-speed optical measurement for the drumhead vibration [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8): 3310~3316
- 54 Li Jian, Su Xianyu, Li Zeren. A high brightness structure light projection system [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(1): 41~43  
李 剑, 苏显渝, 李泽仁. 一种高亮度结构光投影系统 [J]. 激光杂志, 2008, **29**(1): 41~43
- 55 Massachusetts Institute of Technology. Visionary Engineer, Harold Edgerton. <http://web.mit.edu/museum/exhibitions/edgertonexhibit/harolddocedgertonindex.html> [OC]. 2011
- 56 F. Fruengel, W. -J. Hiller, G. E. A. Meier *et al.*. High frequency stroboscope using LED's as light source [C]. *SPIE*, 1985, **491**(1): 396~399
- 57 A. K. Asundi, M. R. Sajan. Digital drum camera for dynamic recording [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(6): 1707~1713
- 58 Zhang Qican, Su Xianyu, Li Yong *et al.*. A stroboscopic structured illumination system for measuring 3-D profile of a high-speed rotating object [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(8): 53~56  
张启灿, 苏显渝, 李 勇 等. 高速旋转物体的频闪结构光三维面形测量系统 [J]. 光电工程, 2004, **31**(8): 53~56
- 59 Q. C. Zhang, X. Y. Su, Y. P. Cao *et al.*. An optical 3-D shape and deformation measurement for rotating blades using stroboscopic structured illumination [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11): 113601
- 60 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
- 61 Xiao Yanshan, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. 3-D profilometry for the impact process with marked fringes tracking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(8): 46~52  
肖炎山, 苏显渝, 张启灿 等. 采用标记条纹跟踪的冲击过程三维轮廓术[J]. 光电工程, 2007, **34**(8): 46~52
- 62 W. H. Su. Projected fringe profilometry using the area-encoded algorithm for spatially isolated and dynamic objects [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2590~2596
- 63 Ma Ke, Zhang Qican. A new color structured light coding method for three-dimensional measurement of isolated objects [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2918~2924  
麻 珂, 张启灿. 分离物体三维测量的彩色结构光编码新方法 [J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2918~2924
- 64 H. Guo, P. S. Huang. Absolute phase retrieval for 3D shape measurement by the Fourier transform method [C]. *SPIE*, 2007, **6762**: 676204
- 65 Ren Weifeng, Su Xianyu, Xiang Liqun. 3-D surface shape restoration for breaking surface of dynamic process based on two-frequency grating [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(3): 144~150  
任伟锋, 苏显渝, 向立群. 双频光栅用于动态过程破裂表面的三维重建[J]. 光电工程, 2010, **37**(3): 144~150
- 66 Wen Yongfu, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Vibration mode analysis of films using time-average fringe method [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 63~67  
文永富, 苏显渝, 张启灿 等. 用条纹时间平均法分析薄膜振动模式 [J]. 光电子·激光, 2009, **20**(1): 63~67
- 67 Su Xianyu, Zhang Qican, Wen Yongfu *et al.*. Time-average fringe method for vibration mode analysis [C]. *SPIE*, 2010, **7522**: 752257
- 68 Zhang Song. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt. & Lasers Eng.*, 2010, **48**(2): 149~158
- 69 Wenjing Gao, Nguyen Thi Thanh Huyen, Ho Sy Loi *et al.*. Real-time 2D parallel windowed Fourier transform for fringe pattern analysis using graphics processing unit [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(25): 23147~23152
- 70 Hu Chunguang, Hu Xiaodong, Li Dachao *et al.*. Application of three-dimensional phase unwrapping algorithm in precision motion measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 68~72  
胡春光, 胡晓东, 栗大超 等. 三维相位展开算法在精密运动测试中的应用 [J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 68~72