

文章编号 1004-924X(2010)09-2002-07

# 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法

姜宏志, 赵慧洁, 李旭东, 李冬

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**为了实现强反射表面三维形貌的光学非接触测量,提出一种改进的投影栅相位法。分析了强反射表面的反射光特点及其对相位解算的影响,指出了反射光亮度范围与相机动态范围的不一致是导致传统投影栅相位法测量失效的主要原因;提出了亮暗条纹投射、多曝光时间采集图像和图像合成等技术,使相机亮度测量范围与强反射表面的反射光亮度范围相一致,并分析了此方法的可行性和适应范围。最后,给出了改进投影栅相位法的条纹投射与图像采集步骤。实验结果表明,改进的投影栅相位法克服了强反射表面引起的条纹图像饱和或过暗问题,能够成功测量出99.6%以上的三维点云,有效解决了测量点云缺失问题,能够实现强反射表面三维形貌光学非接触测量。

**关键词:**强反射表面;投影栅相位法;三维形貌测量

**中图分类号:** TB92; O436.2    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2002

## Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface

JIANG Hong-zhi, ZHAO Hui-jie, LI Xu-dong, LI Dong

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology,  
Ministry of Education, School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** An improved non-contact optical measuring method, projected fringe profilometry, is proposed to realize the 3-D structure measurement of high reflective surfaces. The reflection characteristics of high reflective surfaces and their effects on phase computation are analyzed, and it is pointed out that the failure reason of the traditional projected fringe profilometry is the mismatch of the range of reflection intensity with the dynamic range of the measuring camera. Then, the techniques of light-dark fringe projection, multi-exposure time image acquisition and image synthesis are introduced to match the measuring range of intensity of camera with the range of reflection intensity. The feasibility and useable range of the method are analyzed. Finally, the processes of fringe projection and image acquisition in the improved profilometry are given. Experimental results indicate that the improved profilometry is able to handle the problems of fringe image saturation and dark images. Moreover, it has obtained 3-D data cloud more than 99.6%, and solve the problem of loss of 3-D data. In conclusions, the improved method

**收稿日期:** 2009-11-12; **修订日期:** 2009-12-10.

**基金项目:** 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042403); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0705)

can measure the 3-D profiles of high reflective surfaces with non-contact methods.

**Key words:** high reflective surface; projected fringe profilometry; 3-D profile measurement

## 1 引言

强反射表面三维形貌测量一直是光学非接触测量研究的热点和难点。光学非接触测量以正确接收物体表面反射光作为测量基础,而对于具有强反射表面的物体来说,物体表面的强反射性质会使图像饱和或过暗,产生信息失真,导致测量精度大幅下降,甚至难以进行正常测量。

针对这一问题,国内外提出了不同的解决方法。刘元坤<sup>[1]</sup>测量类镜面物体表面的三维形貌时,将显示器或周围景物等作为投射光源,利用单相机观测物体表面所反射的投射光源的像来进行测量,但这种方法的测量精度不高,而且测量范围较小。RICHARD<sup>[2]</sup>利用被测物体表面在不同角度下反光区域也不尽相同的特点,避开镜面反射区域,利用漫反射进行多角度局部测量,再整体拼接成完整被测表面,此方法在整体拼接过程会引入误差,影响测量精度。SHINJI<sup>[3]</sup>利用被测物体表面镜面反射和漫反射的不同偏振特性,在观测相机前加装偏振片,利用偏振片滤除具有偏振特性的镜面反射,只让漫反射光进入观测相机,从而实现测量,但对强反射表面来说,漫反射光较弱,降低了测量精度。另外,也有人提出采用向具有强反光表面喷涂某种粉末,使被测物体呈现漫反射特性,以利于光学三维测量,但是,粉末不均匀增加了测量误差。因此,目前没有解决强反射表面三维形貌测量的快速、有效方法。

投影栅相位法<sup>[4-5]</sup>作为典型的非接触光学主动测量方法,可用于无明显纹理特征表面的三维形貌测量。主要测量步骤包括条纹投射与图像采集、相位解算、立体匹配和三维复现等。条纹投射与图像采集是使用投射器将光栅投射到物体表面,利用相机拍摄受到物体表面调制的光栅条纹。相位解算先由解相算法解调相位,计算得到被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 区间的相位,再通过相位展开算法还原连续真实的相位。立体匹配<sup>[6]</sup>是通过极线约束和连续单调相位,寻找双目视觉的同名匹配点,得到左右图像的匹配点对。最后,由三维重建原理<sup>[7-8]</sup>,根据匹配点计算物体三维形貌。

传统投影栅相位法在测量强反射表面三维形貌时,条纹图像易出现饱和或过暗,导致测量失效。本文在分析传统投影栅相位法失效原因的基础上,提出在条纹投射与图像采集步骤中加入亮暗条纹投射、多曝光时间采集图像和图像合成等技术,实现了强反射表面的三维形貌测量。

## 2 强反射表面测量方法

### 2.1 相位解算

投影栅相位法中相位解算包括解相和相展开两个步骤。在强反射表面测量中,解相采用四步相移法<sup>[9]</sup>,令4幅条纹图像在坐标 $(x, y)$ 处的亮度 $g_i(x, y)$ 分别为:

$$g_i(x, y) = a(x, y) + r(x, y) \cos[\Phi(x, y) + i \times \pi/2] \quad (1)$$

$i=0, 1, 2, 3$

其中, $a(x, y)$ 为背景光亮度; $r(x, y)$ 为条纹调制度, $\Phi(x, y)$ 为需要解算的相主值, $i$ 为相移次数。四步相移法的解相公式为:

$$\Phi(x, y) = \arctan \frac{g_3(x, y) - g_1(x, y)}{g_0(x, y) - g_2(x, y)}, \quad (2)$$

为了得到单调连续的相位图,在强反射表面测量中,采用外差多频相展开方法<sup>[9]</sup>进行相位展开,得到单调连续的相位图。

从以上相位解算方法可知,相位图中任意点的相位只取决于多幅条纹图像在该点处的灰度值,与周围相邻像素的灰度值无关。

### 2.2 反射模型

入射光照射在物体表面会形成不同的反射模型,这些反射模型都可分为3个基本反射形式<sup>[10]</sup>:漫反射波瓣(Diffuse lobe)、镜面反射波瓣(Specular lobe)和镜面反射波尖(Specular spike),参见图1。漫反射波瓣表征反射光亮度各向同性的漫反射形式,镜面反射波瓣表示反射光能主要分布于镜面反射光线周围一定角度内的反射形式,镜面反射波尖表示反射光能集中于镜面反射方向上。

对于强反射表面来说,反射模型为漫反射波瓣、镜面反射波瓣和镜面反射波尖等3种基本反射形式的综合。当测量具有空间分布强反射表面

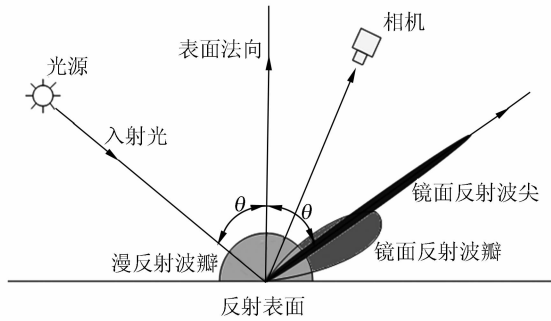


图 1 光的 3 种基本反射形式

Fig. 1 Three kinds of reflection components

时,表面上不同位置处反射光亮度不尽一致,因此,相机会观测到从镜面反射波尖到漫反射波瓣的不同亮度的条纹反射光。由于相机感光元件动态范围有限,当条纹反射光亮度差距较大时,对应于镜面反射波尖处条纹图像表现为饱和,而对应于漫反射波瓣处条纹图像表现为过暗,参见图 2。条纹图像饱和时,公式(1)中的  $g_i(x, y)$  无法真实反应强反射表面的条纹亮度,导致利用解相公式(2)计算出的相位值出现错误,无法正常测量。条纹图像过暗时,公式(1)中的  $g_i(x, y)$  数值过小,而相机本身的噪声和灰度量误差等因素将导致条纹图像信噪比出现较大下降,因此利用解相公式(2)计算出的相位值误差较大,无法满足测量精度的要求。

综上所述,强反射表面的反射光亮度范围与相机动态范围的不一致,是条纹图像上出现饱和或过暗等失真现象的主要原因,也是导致传统投影栅相位法测量失效的根本所在。

## 2.2 强反射表面测量基本原理

为了解决这种不一致性,本文提出了改进传统投影栅相位法中条纹投射与图像采集的步骤。改进方法包括两个:(1)从条纹投射器角度出发,投射亮条纹和暗条纹;(2)从相机角度出发,使用长短不同的多组曝光时间采集图像。方法(1)投射亮条纹于强反射表面,增加了图像中漫反射处的条纹亮度,避免了条纹图像在漫反射波瓣处过暗;投射暗条纹于强反射表面,降低了图像中镜面反射波尖处的条纹亮度,避免了条纹图像过亮而饱和。方法(2)用多曝光时间采集图像,增加了相机的亮度测量范围,可接收更宽亮度范围内的条纹。最后,通过图像合成算法,将在不同投射亮度条纹、不同曝光时间采集到的多个图像,合成一幅

无失真的条纹图像。

合成后的无失真条纹图像能否正确进行相位解算是本方法正确实施的关键。2.1 节中介绍的相位求取的特点表明,任意点的相位解算只取决于多幅条纹图像在该点处的灰度值。上述亮暗条纹投射、多曝光时间采集图像和图像合成过程可以保证同一点处的条纹投射亮度相同、曝光时间相同,从而保证解相公式(1)中背景光亮度  $a(x, y)$  和条纹调制度  $r(x, y)$  在相移中保持不变,满足相位解算要求,因此,保证了投影栅相位法测量的正确性。

强反射表面测量方法的基本原理决定了其适用范围取决于两个因素:一是测量镜面反射波尖的能力;二是测量漫反射波瓣的能力。镜面反射波尖的亮度越强,就必然要求相机曝光时间越短和投射暗条纹的亮度越低,才能保证镜面反射波尖的条纹图像不失真。漫反射波瓣的亮度越弱,就需要相机曝光时间越长、投射亮条纹的亮度越强,以保证条纹图像的信噪比。因此,这种强反射表面测量方法的适用范围由相机和投射器的能力决定。

但在测量以镜面反射波尖为主要反射形式的类镜面<sup>[1]</sup>三维形貌时,条纹的漫反射波瓣亮度非常弱,而由环境光噪声产生的镜面反射波尖亮度相对较强,虽然增加了亮条纹的投射亮度,但条纹反射光仍淹没在噪声之中,无法满足解相要求,需采用文献[1]中的方法进行测量。

## 2.3 条纹投射与图像采集步骤

改进的条纹投射与图像采集步骤如下:

步骤 1:计算图像合成算法所需的掩模图像序列  $M$ 。掩模图像的作用是确定图像中像素是否有效,有效为 1,无效为 0。

先从投射器中投射亮均匀光,分别采用多个曝光时间拍摄图像,依次存入图像序列  $I$  中,然后投射暗均匀光,同样分别采用多个曝光时间拍摄图像,依次存入图像序列  $I$  中。亮暗均匀光的亮度分别与亮暗条纹最亮处的亮度相同。多个曝光时间拍摄是按照曝光时间从长到短依次拍摄,则掩模图像序列  $M$  的计算公式为:

当  $i=1$  时,

$$M_i(x, y) = \begin{cases} 1 & I_i(x, y) \leq I_{\max} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

当  $i>1$  时,

$$M_i(x,y) = \begin{cases} 1 & I_i(x,y) \leq I_{\max} \\ M_j(x,y) = 0 (j=1,2,\dots,i-1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $i, j$  为图像序号,  $I_i(x, y), I_j(x, y)$  为图像序列  $I$  中第  $i, j$  幅图像  $I_i$  和  $I_j$  在坐标  $(x, y)$  处的灰度值,  $M_i(x, y), M_j(x, y)$  为与图像  $I_i$  和  $I_j$  相对应的掩模图像在坐标  $(x, y)$  处的掩模值,  $I_{\max}$  为掩模灰度阈值。公式(4)中  $M_j(x, y) = 0 (j = 1, 2, \dots, i - 1)$  条件可以保证遍历掩模图像序列中的所有图像, 在坐标  $(x, y)$  处掩模值为 1 的掩模图像数目  $< 2$ 。

步骤 2: 多曝光时间拍摄亮暗条纹图像。先投射亮条纹, 分别采用多个曝光时间拍摄强反射表面条纹图像, 依次存入图像序列  $P$  中; 再投射暗条纹, 分别采用多个曝光时间采集强反射表面条纹图像, 依次存入图像序列  $P$  中。

步骤 3: 将步骤 2 中所拍摄的亮暗条纹图像序列  $P$ , 合成具有新的条纹图像  $H$ 。设合成后图像  $H$  中坐标  $(x, y)$  的灰度值为  $H(x, y)$ , 则,

$$H(x,y) = \sum_{i=1}^n M_i(x,y) \cdot P_i(x,y), \quad (5)$$

式中,  $n$  为采用多个曝光时间拍摄亮、暗条纹的总次数,  $P_i(x, y)$  为图像序列  $P$  中第  $i$  幅图像  $P_i$  在点  $(x, y)$  处的灰度值,  $M_i(x, y)$  是第  $i$  幅掩模图像  $M_i$  在点  $(x, y)$  处的掩模值。

由于解相和相展开的要求, 正弦条纹的相位和周期需变化。在条纹变化后, 掩模图像无需重新计算, 可从上述步骤 2 开始, 进行条纹拍摄与合成。

### 3 实验

实验时, 选择两个铝合金框零件作为被测对象, 分别采用传统投影栅相位法和改进的投影栅相位法进行三维形貌测量。在改进投影栅相位法的条纹投射与图像采集步骤中, 根据铝合金框零件特点, 曝光时间序列选择为 80, 40, 20, 10 ms, 投射亮条纹的亮度为暗条纹亮度的 5 倍。因此, 需要利用 8 幅亮暗条纹图像来合成一幅新的条纹图像。

图 2 和图 6 分别为传统投影栅相位法拍摄的条纹图像, 图 3 和图 7 分别为采用改进的投影



图 2 失真条纹图像(工件 1)

Fig. 2 Distortion fringe image(workpiece 1)

栅相位法得到的条纹图像, 对比改进前后的条纹图像可以看出, 本文方法能有效抑制条纹过暗或饱和, 基本解决了条纹图像失真问题。



图 3 合成后的条纹图像(工件 1)

Fig. 3 Synthesized fringe image(workpiece 1)

图 4 和图 8 分别为传统投影栅相位法测量这两个铝合金框零件得到的三维点云, 测量得到的三维点数分别为 47 813 个和 52 578 个, 无法正确测量的点数分别为 16 031 个和 38 613 个, 分别只有 74.9% 和 57.7% 的三维点能够正确测量, 点云缺失严重。图 5 和图 9 为采用改进的投影栅相位法测量该铝合金框零件得到的三维点云, 测量得到点数分别为 63 610 个和 90 849 个, 点云缺失数分别降为 234 个和 342 个。从以上实验可以看出, 改进方法可以成功测量 99.6% 以上的三维点, 有效解决传统方法的测量点云缺失和测量失效问题, 保证了测量顺利进行。

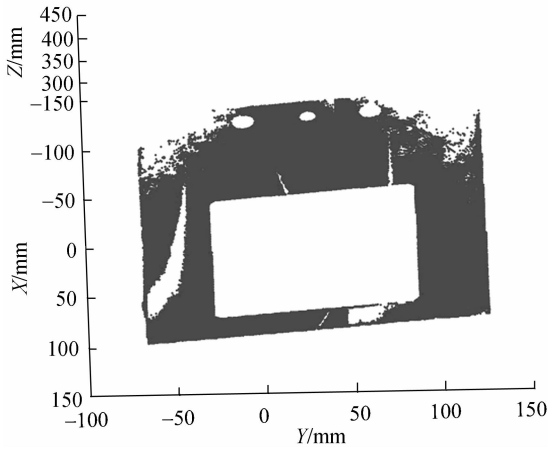


图 4 传统投影栅相位法测量的三维点云结果(工件 1)  
Fig. 4 Three dimensional cloud by traditional projected fringe profilometry(workpiece 1)

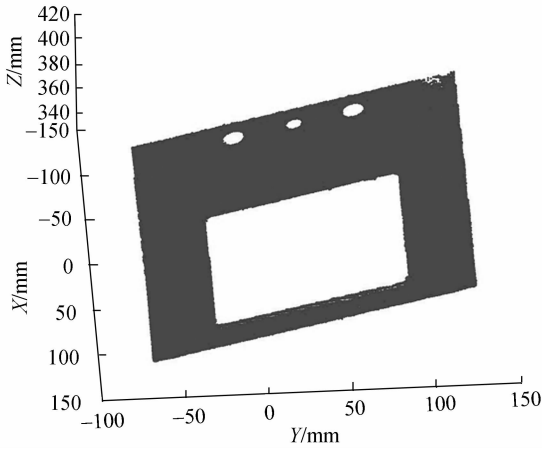


图 5 改进后方法测量三维点云结果(工件 1)  
Fig. 5 Three dimensional cloud by improved projected fringe profilometry(workpiece 1)

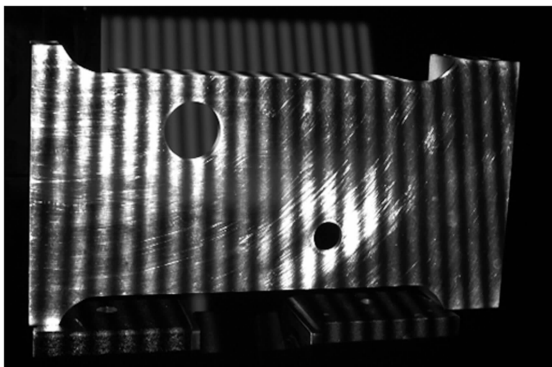


图 6 失真条纹图像(工件 2)  
Fig. 6 Distortion fringe image(workpiece 2)

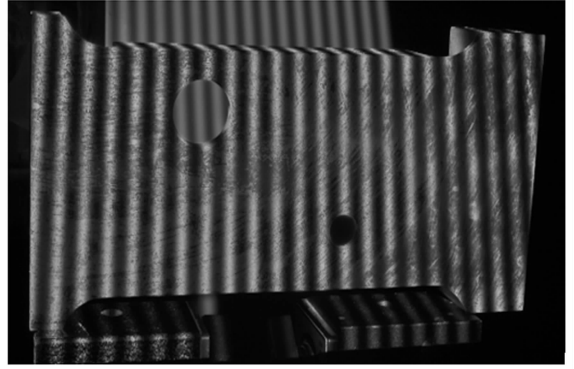


图 7 合成后的条纹图像(工件 2)  
Fig. 7 Synthesized fringe image(workpiece 2)

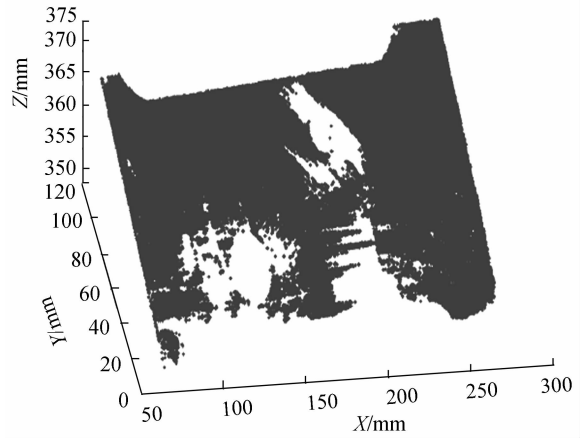


图 8 传统投影栅相位法测量三维点云结果(工件 2)  
Fig. 8 Three dimensional cloud by traditional projected fringe profilometry(workpiece 2)

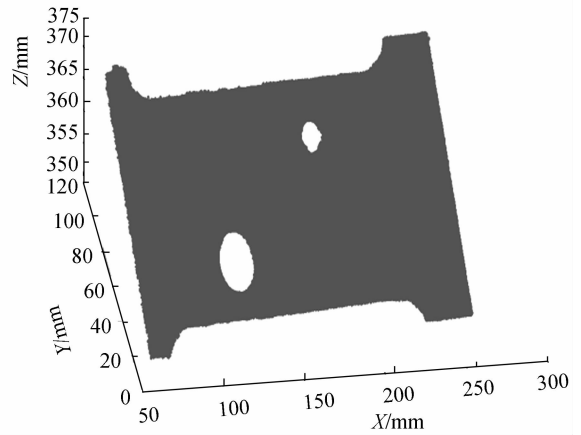


图 9 改进后方法测量三维点云结果(工件 2)  
Fig. 9 Three dimensional cloud by improved projected fringe profilometry(workpiece 2)

## 4 结 论

针对强反射表面形貌非接触光学测量问题,在分析强反射表面反射特点及其对相位解算影响的基础上,指出反射光亮度范围与相机动态测量范围的不一致是导致传统投影栅相位法测量失效的原因。提出将亮暗条纹投射、多曝光时间采集

图像、图像合成等新技术加入到传统的投影栅相位法中,解决条纹图像饱和或过暗导致的测量失效问题,并分析了此方法的可行性和适应范围。

实验证明,改进的投影栅相位法能够成功测量 99.6% 的三维点,有效解决传统方法的测量点云缺失问题,实现了强反射表面三维形貌非接触光学测量。

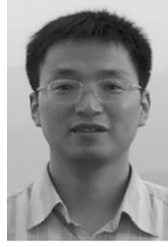
## 参考文献:

- [1] 刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法[J]. 光学学报, 2006, 2(11): 1636-1640.  
LIU Y K, SU X Y, WU Q Y. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 2(11):1636-1640. (in Chinese)
- [2] RICHARD K, JORG G, GUNTHER N. Adaptive optical 3D-measurement with structured light[J]. *SPIE*, 1999, 3824:169-178.
- [3] SHINJI U, GUY G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(5):639-647.
- [4] 赵慧洁, 吉相. 基于相位匹配的大视场视觉检测系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(6):700-703  
ZHAO H J, JI X. Novel vision system for large field inspection based on phase matching[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(6):700-703. (in Chinese)
- [5] 姜宇, 杨国辉. 基于光栅投影技术的刀具磨损三维特征提取方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 390-395  
JIANG Y, YANG G H. 3D feature extract method for tool wear based on grating projection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 390-395. (in Chinese)
- [6] 赵慧洁, 雷彦章, 姜宏志. 基于投影栅相位的立体匹配方法[C]. 南京:第十三届全国图象图形学学术会议, 2006:496-500.  
ZHAO H J, LEI Y ZH, JIANG H ZH. The Stereo Matching Method Based on the Projected Grating Phase methodk[C]. *The 13 National Conference on Image and Graphics. Nanjing, China*, 2006:496-500. (in Chinese)
- [7] 陈杰春, 丁振良, 袁峰. 三维重构不确定度的两阶段估计方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6):1110-1116.  
CHEN J CH, DING ZH L, YUAN F. Two-stage uncertainty evaluation of 3D reconstruction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):1110-1116. (in Chinese)
- [8] 潘淑杰, 董守平, 王红丽. 应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建 [J]. 光学精密工程, 2009, 17(5):1127-1133.  
PAN S J, DONG S P, WANG H L. Three dimensional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1127-1133. (in Chinese)
- [9] 雷彦章, 赵慧洁, 姜宏志. 一种单双目视觉系统结合的三维测量方法[J]. 光学学报, 2008, 28(7):1338-1342.  
LEI Y ZH, ZHAO H J, JIANG H ZH. A three-dimensional measurement method by combining binocular and monocular vision systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7):1338-1342. (in Chinese)
- [10] MITSURU B, KOZO O, MAKOTO I. Determining 3-D shapes of hybrid surfaces by laser rangefinder[J]. *SPIE*, 2001, 4398:86-97.

## 作者简介:



姜宏志(1978—),男,辽宁辽阳人,博士研究生,2001年、2004年于大连交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事机器视觉及三维形貌测量等方面的研究。E-mail: jhz1862@126.com



李旭东(1974—),男,陕西蓝田人,博士,副教授,1996年、2003年于北京航空航天大学分别获学士和博士学位,主要从事光电检测及信息处理等方面的研究。E-mail: xdli@buaa.edu.cn



赵慧洁(1966—),女,辽宁人,教授,博士生导师,1988年、1991年、1994年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士和博士学位,主要从事光电检测、机器视觉及信息处理等方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn



李冬(1985—),男,陕西西安人,硕士研究生,2007年于北京航空航天大学获学士学位,主要从事三维形貌测量方面的研究。E-mail: dongli@sa.buaa.edu.cn

(本栏目编辑:严寒)

## ● 下期预告

## 低温环境下 MEMS 微构件的动态特性及测试系统

余东生<sup>2</sup>,王晓东<sup>1,2</sup>,张习文<sup>2</sup>,王立鼎<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024;

2. 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024)

研究了 MEMS 微构件谐振频率等动态特性在低温环境下的变化规律,从理论上分析了环境温度的改变对微悬臂梁谐振频率产生的影响,并对低温环境下微构件的动态特性测试技术进行了研究,研制了低温环境下 MEMS 动态特性测试系统,采用半导体冷阱实现低温环境,利用压电陶瓷作为底座激励装置的驱动源,通过底座的冲击激励,使微悬臂梁处于自由衰减振动状态,使用激光多普勒测振仪对微悬臂梁的振动响应进行检测,从而获得微悬臂梁的谐振频率;通过使用一个真空腔体来防止微悬臂梁表面在降温的过程中结霜。利用研制的测试系统,在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到室温的环境下对单晶硅微悬臂的谐振频率进行了测试,实验结果表明随着温度的降低微悬臂梁的谐振频率略有增大,其谐振频率的温度变化率约为 $-0.263\text{ Hz/K}$ ,与理论分析的结果基本一致。该测试装置能够有效地完成在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到室温的环境下微构件的动态特性测试。