

文章编号: 0258-7025(2010)08-2025-04

# 小型管道内壁三维成像测量系统

叶 晶 周常河 贾 伟

(中国科学院上海光学精密机械研究所强激光物理国家重点实验室, 信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 介绍了一种适用于管道内壁缺陷检测的三维重建系统。利用条纹投影的傅里叶变换轮廓术,采用两个普通显微物镜及振幅光栅构建了一套测量管道内壁三维形貌的装置,并对该装置进行了实验测试。利用显微物镜能得到小型物体放大清晰的像,从而实现了测量小型物体的三维形貌。此装置在驱动机构的带动下沿着管道轴线行进时,可以对管道内壁状况进行实时非接触检测,从计算机中重构出内壁的三维形貌具有较高的精度。实验结果证实了此方法的有效性和实用性。这种方法能缩小整个投影装置的体积,易于实现装置集成化,并能很好地应用于管道内壁的三维形貌的测量,具有明显的实用前景。

**关键词** 光学测量;傅里叶变换轮廓术;结构光;条纹投影;管道内壁

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2025

## Miniaturized Optical System for 3D Measuring of Pipe Inner Surface

Ye Jing Zhou Changhe Jia Wei

(State Key Laboratory of High-Field Laser Physics and Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A miniaturized non-destructive optical system for measuring the 3D flaws of inner surface of a pipe is proposed, which is based on Fourier transform profilometry (FTP) using two microscopes and an amplitude grating. It is possible to get a magnified and clear image of a small object by using a microscope. The images of the inner surface of pipe can be non-contact captured in real time when the sensor is moving along the pipe driven by a micro-robot. Experimental results show that the reconstruction of 3D surface of the inner surface is obtained with high precision. This method can be used to measure the 3D shape of pipe inner surface, so it should be interesting for practical applications.

**Key words** optical measurement; Fourier transform profilometry; structured light; fringe projection; pipe inner surface

### 1 引 言

管道在机械、核动力发电和军事领域具有非常广泛的应用,在现代城镇建设和工业企业中敷设给水、排水、燃气、热力、输电和输油等各种管道也愈来愈多。由于其作用的特殊性,有些管道在工作的过程中需要定期检测,以便尽早发现异常,减少事故发生和经济损失;有些更重要的管道除了需要做缺陷检测外,还要进行内壁的三维测量或者三维重建,以确定是否能够达到功能要求。由于管道的封闭性,

其内壁的检测和三维测量比较困难。目前管道内表面检测方法主要有内窥镜检测法<sup>[1]</sup>、激光单点扫描法<sup>[2]</sup>、超声波检测法<sup>[3]</sup>、光环截面成像法<sup>[4]</sup>等,但所有这些方法只能得到管道内截面二维数据信息,无法获得管道内壁的三维形貌。基于结构照明的光学三维传感技术在工业检测、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域有着广泛的应用<sup>[5]</sup>。自从 Takeda 等<sup>[6]</sup>提出了基于条纹投影的傅里叶变换轮廓术(FTP)以来,由于该方法具有单帧获取、全场分

收稿日期: 2009-12-29; 收到修改稿日期: 2010-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(60878035)和上海市科委(09520709300)资助课题。

作者简介: 叶 晶(1981—),男,博士研究生,主要从事光学三维测量技术方面的研究。E-mail: yejing123@hotmail.com

导师简介: 周常河(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事衍射光学、微光学和飞秒信息处理技术等方面的研究。

E-mail: chazhou@mail.shcnc.ac.cn

析和高分辨率等优点,引起了人们广泛的关注<sup>[7,8]</sup>。目前,该方法已成为结构照明型三维传感领域中应用较广泛的一种方法<sup>[9~11]</sup>。在以往的研究工作中,多数采用投影仪投影<sup>[12]</sup>,整套装置比较庞大,所测量的物体也都比较大<sup>[13,14]</sup>。张军等<sup>[15]</sup>报道了一种采用达曼光栅结合柱面镜的光栅投影系统,并用于三维物体的测量。本文采用傅里叶变换轮廓术,利用两个普通显微物镜成像的原理构建了一套小型的测量系统,对管道内壁情况的三维测量进行了研究。由于采用了小型的振幅光栅、电荷耦合器件(CCD)和发光二极管(LED)照明系统,使得整套测量装置的体积相对比较小,大约为 $10\text{ cm}\times 8\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ ,一次拍照可测量范围大约为 $15\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 。将该装置置于管道腔内,导线引出,图像采集卡与电脑置于管道外部,由牵引系统沿轴向逐渐移动完成对管道内壁的三维测量。利用该方法能得到管道内壁指定的任意区域的面型测量,从而完成管道内壁的缺陷测量和三维形貌测量。

## 2 实验系统

实验装置示意图如图1所示。光源发出的光通过透镜汇聚后,透过罗奇光栅,光栅垂直于图平面,经过一个显微物镜,照射到物体表面。此装置可分为投影光轴 $OH$ 和成像光轴 $OI$ ,两路光轴相交于参考平面 $P$ 上的 $O$ 点。投影后的条纹图像又通过一个显微物镜被CCD接收,通过计算机对图像进行处理。两光轴交叉成一个小角度,大约为 $20^\circ$ 。其中 $H$ 为投影装置的出瞳, $I$ 为成像装置的入瞳, $d$ 是 $I$ 和 $H$ 之间的距离。 $OI$ 垂直于平面 $P$ , $P$ 作为参考平面,其上的点的高度 $h_0(x,y)$ 为0。 $L_0$ 是 $I$ 到参考平面 $R$ 之间的距离, $A$ 是参考平面上的点, $D$ 为物面上的点, $DA$ 垂直于平面 $P$ ,即为 $D$ 点的高度 $h(x_1,y_1)$ 。

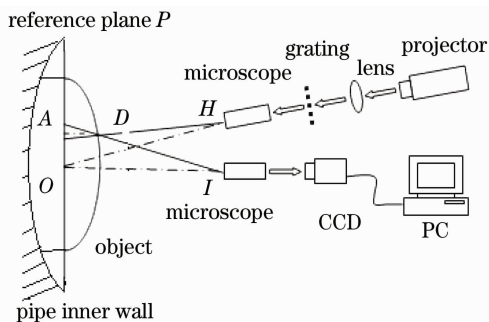


图1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

在傅里叶轮廓术中,需要得到物体的高度信息 $h(x,y)$ 。由正弦光栅投影到物体表面,得到的变形条纹分布为

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

式中 $r(x,y)$ 为物体表面反射率分布的函数, $\varphi(x,y)$ 为由于物体表面高度变化引起的相位调制, $f_0$ 为光栅像的基频, $A_n$ 表示各级傅里叶级数的权重因子。对于参考平面来说,高度分布 $h_0(x,y)$ 为0,(1)式变为

$$g_0(x,y) = r_0(x,y) \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\varphi_0(x,y)]\}, \quad (2)$$

式中 $r_0(x,y)$ 表示参考面反射率分布的函数, $\varphi_0(x,y)$ 表示初始相位调制。FTP方法对(1)式沿 $x$ 轴方向进行一维傅里叶变换,得到的频谱中零频反映的是背景光强分布,基频包含了所要求的相位信息。通过选择合适的滤波函数,对得到的频谱进行滤波,提取基频分量后进行傅里叶逆变换,得到复数信号

$$\hat{g}(x,y) = A_1 r(x,y) \exp[i2\pi f_0 x + \varphi(x,y)], \quad (3)$$

对(2)式进行同样的处理,可得到

$$\hat{g}_0(x,y) = A_1 r_0(x,y) \exp[i2\pi f_0 x + \varphi_0(x,y)]. \quad (4)$$

比较(3)式,(4)式,所测物体高度分布的不同将调制投影光栅条纹,结果导致复指数项中的相位发生了变化,大小为 $\Delta\varphi'(x,y)$

$$\Delta\varphi'(x,y) = \text{Im}\{\lg[\hat{g}(x,y)\hat{g}_0^*(x,y)]\}, \quad (5)$$

式中 $\hat{g}_0^*(x,y)$ 表示复共轭,求出的截断相位位差 $\Delta\varphi'(x,y)$ 分布在区间 $(-\pi,\pi)$ 上,呈不连续的分布,需要进行相位展开,将 $2\pi$ 的截断连起来,得到连续的相位分布 $\Delta\varphi(x,y)$ 。

相位的变化是由物体的高度变化引起的,高度分布表示为

$$h(x,y) = \frac{L_0 \Delta\varphi(x,y)}{\Delta\varphi(x,y) - 2\pi f_0 d}. \quad (6)$$

在本实验中, $L_0 \gg h(x,y)$ ,高度与相位的关系可近似为

$$h(x,y) \approx \frac{L_0 \Delta\varphi(x,y)}{-2\pi f_0 d}. \quad (7)$$

可由此计算出相位分布,即可得出被测管道的表面高度分布及三维形貌<sup>[16]</sup>。

### 3 实验结果及分析

实验中采用半径为 15 cm 的圆形管道的一段作为测量目标,在管道内壁有裂痕和不规则表面凸起,用此装置进行了测量,得出三维信息。选用 LED 白光作为投影光源, $L_0$  为 12.0 cm, $d$  为 2.5 cm。实验装置实物照片如图 2 所示。在 FTP 算法中,由(7)式可知,需要定标此系统的参数来实现三维面型的重构。此方法需要获取两帧图像来得到物体的三维信息、参考平面图像和形变后的图像,如图 3 所示。由于相位和高度大致成正比例的关系,所以采用一个相对规则的具有斜坡表面的物体来确定系统参数,此斜坡的最大高度约为 6 mm。对获取的参考平面条纹图像图 3(a)和形变后的投影图像图 3(b)采用 FTP 算法,经过傅里叶变换、滤波、逆傅里叶变换,相位展开得到连续的相位分布。重构的三维面型如图 4 所示,曲面上的任意一个点的相

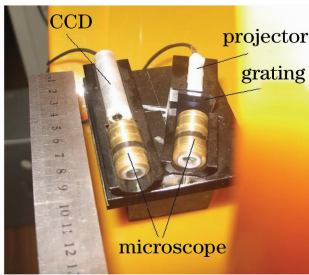


图 2 装置实物照片

Fig. 2 Photo of the experimental setup

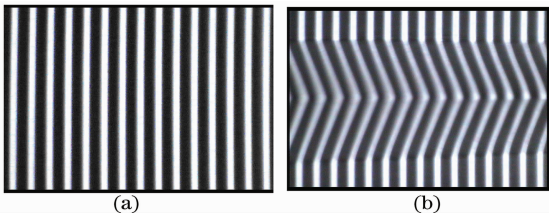


图 3 投影条纹图像。(a) 参考图像;(b) 规则斜面引起的形变条纹图像

Fig. 3 (a)Reference image on an illuminated plane; (b) deformed image of a test object for calibration

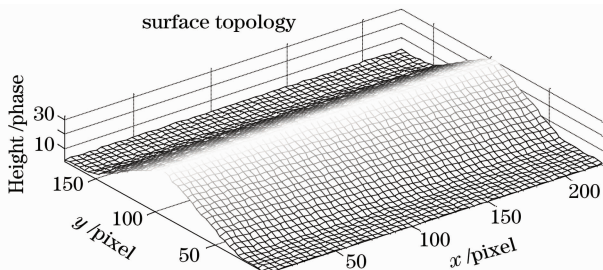


图 4 规则斜面的三维重构

Fig. 4 Reconstruction of the regular slope

位都能得到,选取一个相位最大值的点,得到相位差为 32 rad。由(7)式得到,对于这个特殊的系统, $2\pi$ 的相位差对应于 1.18 mm 的高度,可由此来确定待测物体的实际高度。

对管道内壁一块具有高度信息的不规则凸起的区域进行测量,其平面大小大约为 1 cm×1.5 cm,凸起部分最高点与参考平面大约相差 1 mm。形变后的投影条纹如图 5 所示,重建的三维形貌分布如图 6 所示,物体的轮廓比较清晰,与实际也相符合。同样对模拟的管道裂纹进行测量,重建的三维形貌分布如图 7 所示。

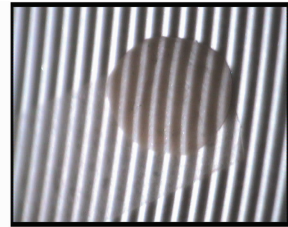


图 5 管道内壁不规则凸起投影后的形变条纹

Fig. 5 Deformed image of an irregular outward flaw in the inner surface of the pipe

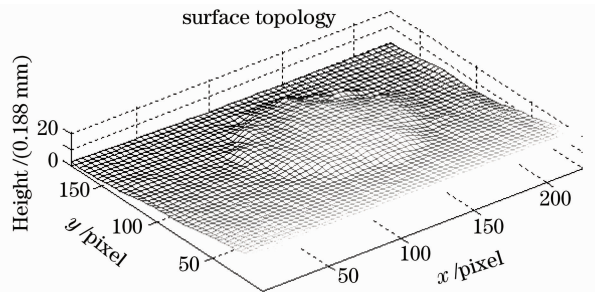


图 6 管道内壁不规则凸起的三维重构

Fig. 6 Reconstruction of the surface of the 3D irregular flaw in the inner surface of the pipe

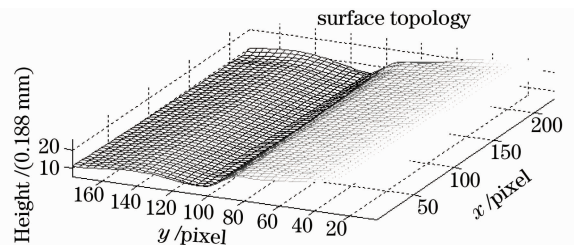


图 7 管道内壁裂纹的三维重构

Fig. 7 Reconstruction of the 3D surface of the crack in the inner surface of the pipe

影响三维重建精度的主要因素包括 CCD 和图像卡的噪声、相位测量精度、相位展开算法、结构光图像对比等。如果对投影系统和成像系统进行光学设计,不但可以获得更好的图像质量,缩短投影距离,还能进一步缩小整个装置的体积,以实现

管道内壁的测量。此外,采用噪声相对较少的 CCD 和图像采集卡,图像质量会进一步提高。

## 4 结 论

设计了一套基于两个显微物镜的小型三维测量装置,采用傅里叶变换轮廓术对管道内壁进行了检测,实验结果与实际相符合,证明了该装置能基本满足测量管道内壁三维形貌的要求。使用振幅光栅和显微物镜产生结构光投影非常方便,并且可以使用更小型的光栅而不影响投影条纹的质量。此方法提供了一种小型集成化管道内壁测量方法。实验结果表明,使用 FTP 算法和计算机的图像处理技术,这套装置能实现实时的处理数据,动态地测量管道内的三维形貌。

## 参 考 文 献

- 1 J. L. Cox. The surgical treatment of atrial fibrillation IV. surgical technique[J]. *J. Thorac. Cardiovasc. Surg.*, 1991, **101**(4): 584~592
- 2 W. W. Zhang, B. H. Zhuang. Non-contact laser inspection for the inner wall surface of a pipe[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**: 1380~1387
- 3 M. Belier, E. Holden, N. Uwdac. Cracks in pipelines and how to find them [J]. *Pipes & Pipelines International*, 2001, **46**(11): 26~34
- 4 S. Benussi, C. Pappone, S. Nascimbene *et al.*. A simple way to treat chronic atrial fibrillation during mitral valve surgery: the epicardial radio frequency approach[J]. *Eur. J. Cardio-thorac. Surg.*, 2000, **17**(5): 524~529
- 5 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 6 M. Takeda, H. Ina, S. Koboyashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 7 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277  
宋万忠, 苏显渝, 曹益平等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 272~277
- 8 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411  
张南洋生, 杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1407~1411
- 9 X. Su, W. Chen. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5): 263~284
- 10 S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Fujigaki *et al.*. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **40**(3): 153~161
- 11 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican *et al.*. Complex object shape measurement using modulation measurement profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1623~1628  
邵双运, 苏显渝, 张启灿等. 调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12): 1623~1628
- 12 Q. C. Zhang, X.-Y. Su. An optical measurement of vortex shape at free surface [J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(2): 107~113
- 13 Song Zhang, Peisen Huang. Novel method for structured light system calibration [J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 083601~083608
- 14 Yu Chunsheng, Peng Qingjin. A correlation-based phase unwrapping method for Fourier-transform profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **45**(6): 730~736
- 15 Jun Zhang, Changhe Zhou. Three-dimensional profilometry using a Dammann grating[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(19): 3709~3715
- 16 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229  
毛先富, 陈文静, 苏显渝等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 225~229