

受限空间内表面三维形貌测量技术

曾祥军 吴庆阳 霍金城 贺威

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要 提出一种利用光学导管在受限空间内进行三维形貌测量的方法。由多块反射镜构成的光学导管可以将投影系统在空间外产生的条纹图像投射到空间内表面;同时也可以将空间内采集到的图像传送到空间外并被 CCD 接收。避免了由于空间制约引起的阴影和遮挡,实现了在受限空间内部进行三维测量。实验结果表明了该方法有效可行。

关键词 测量;三维形貌测量;投影条纹;受限空间;光学导管

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1208005

Three-Dimensional Shape Measurement Method for Internal Surface in Confined Space

Zeng Xiangjun Wu Qingyang Huo Jincheng He Wei

(Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract A three-dimensional (3D) shape measurement method for confined space using an optical tube is proposed. Considering small cross-sectional area and high reflectivity, a optical tube is designed for image transmission. With the optical tube, fringe patterns can be easily projected onto internal surface from external space. The collected images transferred from interior space to external space are recorded by CCD. Accordingly, shade and occlusion caused by the limitation of measurement space are avoided and 3D shape measurement for internal surface of confined space is realized. Experimental results show feasibility and validity.

Key words measurement; three-dimensional shape measurement; projecting fringe; confined space; optical tube

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 080.3620; 100.5088

1 引言

基于数字条纹投影技术的光学三维(3D)测量方法具有非接触、高精度、扫描速度快等优点,在工业检测、逆向工程、文物考古、医学成像等领域得到了广泛的应用^[1~6]。该技术以光学三角法为测量原理^[7],要求投影光轴与成像光轴成一定的夹角,进而实现 3D 测量,即投影系统将条纹序列图像直接投影到被测物体表面,成像系统从另一角度进行图像采集,其测量的精度与夹角有很大关系。因此,当测

量环境的物理空间受限时^[8],如测量发动机内缸、小口容器、内雕工艺品的内部结构以及人体口腔内牙列等对象的 3D 形貌时,图像的传播路径受限,通常无法满足光线直线传播条件,投影仪较难将图像投影到测量表面,导致成像系统难以直接采集到带有条纹的物体表面图像,从而限制了数字条纹投影轮廓术在受限空间的应用。

目前,针对受限空间内表面的光学 3D 测量的方法可分为两大类:使用光纤传像束进行传像的方

收稿日期: 2012-07-17; **收到修改稿日期**: 2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11109052), 深圳市基础研究计划项目(JC200903120031A, JC201005280565A)和深圳大学应用技术开发项目(201151)资助课题。

作者简介: 曾祥军(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学三维测量方面的研究。

E-mail: cengxiangjun1@email.szu.edu.cn

导师简介: 吴庆阳(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事三维传感和机器视觉等方面的研究。

E-mail: wuqy@szu.edu.cn(通信联系人)

法^[9~11]和使用微型器件缩小仪器体积的方法^[8,12]。由于图像可沿着光纤传像束自由传播,并且光纤传像束具有自由度大、能任意弯曲等特点,因此能够将图像从外部投影到物体的内部,并将图像从物体内部传出到外部并被 CCD 接收,从而实现对物体内部的 3D 测量。但是光纤传像束因受本身材料特性和传像原理^[13,14]的限制,其用于 3D 测量的效果并不理想。光纤传像束是采用数量巨大的光纤按照一定的形状进行有序排列捆扎而成,其制作难度大,价格昂贵;容易出现断丝、暗丝现象,使输出像面出现盲点;受到制作工艺的影响,输入输出端排列形状可能发生变形,导致输出图像变形;当传递图像分辨率较高时,其光纤束直径也相对较大;单个像素的分辨率较低。而使用微型器件,目前不仅成本较高,而且微型 CCD 和投影器件的分辨率较低,成像质量不高,进而导致测量的精度不高。

本文提出一种基于光学导管的 3D 图像采集方法。利用平面镜成像原理,通过光学导管内部的平面镜组改变图像的传播路径,使图像在狭窄的导管内沿着指定方向进行传递,从而实现图像在受限空间的投影和采集,拓展了结构光投影 3D 测量技术在受限空间领域的应用范围。

2 测量原理

2.1 条纹投影 3D 成像系统模型

基于数字条纹投影技术的 3D 成像系统如图 1 所示,主要由投影仪和摄像机构成。投影仪将条纹图像投影到被测物体表面,摄像机从与投影方向成一定夹角的方向进行图像采集,得到变形的条纹图像,计算机对采集图像进行处理得到相位信息图,基于光学三角法可由相位信息重建出物体表面的高度信息。

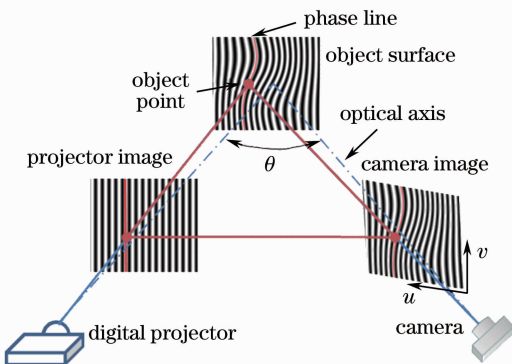


图 1 条纹投影三维成像系统模型

Fig. 1 Model of fringe projecting 3D imaging system

2.2 光学导管的设计原理

由图 1 可以看出,条纹投影 3D 测量方法是直接将结构光图像投影到被测物体表面并从与投影方向成一定角度的方位采集图像完成测量,其测量的环境条件是有足够的空间实现图像投影和采集,投影光路以及成像光路不能被遮挡或限制。而当测量空间受限时,投影和成像的路径就会受到限制,导致传统的 3D 测量方式难以进行。如图 2(a)所示,测量位置 P 的 3D 形貌时,传统的测量系统需要通过减小投影光轴和成像光轴的夹角才能完成测量,而 P 点的位置越深, θ 就需要变得越小,由光学三角法可知,测量精度与 θ 有关,当 θ 太小时,其精度就无法保证。本文所设计的光学导管[结构如图 2(b)所示]利用平面镜反射传像原理,将投影光路和成像光路压缩在一条狭窄的通道内。使投影图像可以从正面投射到测量面,并且在保证成像光路与投影光路具有较大夹角(45° 左右)的情况下,将采集到的图像经过反射镜的多次反射后传递给 CCD 进行接收,实现了受限空间内表面的 3D 测量。

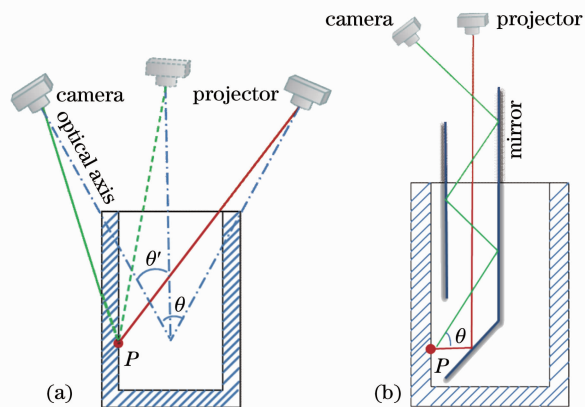


图 2 (a)传统 3D 成像模型; (b)利用光学导管的受限空间 3D 成像模型

Fig. 2 (a) Traditional 3D imaging model; (b) 3D imaging model of confined space using an optical tube

3 系统设计

所设计的受限空间 3D 测量系统如图 3 所示。主要由三部分组成:投影系统、光学导管和成像系统。

3.1 投影系统

投影系统是数字条纹投影轮廓术的重要组成部分。在狭窄、受限空间环境进行测量时,投影图像需满足:尺寸较小(厘米量级),以便在狭窄空间进行传输;发散角小,图像被投影到较远的距离时不会产生大幅度的放大;景深大,能够获得较大的测量深度。

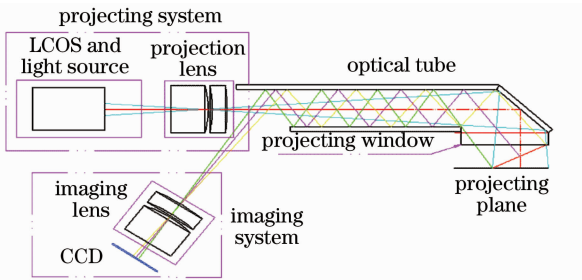


图3 受限空间三维测量系统结构设计

Fig. 3 Schematic design of the 3D measurement system of confined space

而市面上的成品投影仪主要用于信息显示,其投影图像的面积、发散角都很大,景深相对较小,不适合用于受限空间的3D测量。根据这些条件,设计了一套投影系统,该系统主要由光源、硅基液晶(LCOS)面板和投影物镜组成,如图3所示。以LED作为光源,将LED发出的光准直后均匀地照射到LCOS面板上,最后使用投影物镜将LCOS的像投射出去。投影系统的投影距离为20 cm,投影图像大小为18 mm×24 mm,景深达12 mm,增加了测量系统在受限空间测量的灵活性。

3.2 光学导管

光学导管是解决受限空间3D测量问题的关键,其主要目的是实现投影图像和采集图像在有限空间内的传输。如图3所示,系统前端部分为光学导管,是一个长160 mm,横截面为22 mm×25 mm的管道。管道内部的上下表面为反射面相对放置的两个平面反射镜,末端是一个大小为20 mm×30 mm的平面反射镜,与两个平面反射镜约成45°夹角。在光学导管的前端有一个大小为20 mm×30 mm的采集窗口,用于采集数据。由图2(b)可知,投影系统沿通道方向投影条纹图像,经末端的反射镜反射后从采集窗口投射到测量面,而成像光与投射方向成 θ 角由采集窗口进入光学导管,经导管上下表面的平面反射镜多次反射后从另一端口输出被成像系统接收。成像角度 θ 约为45°,保证了光学三角法的测量精度。在测量时,由于采集图像要经过光学导管两侧平面反射镜多次反射后才被CCD接收,并且该平面反射镜面积较大,镜面的弯曲变形会导致输出图像发生畸变。因此把光学导管设计成了一个整体,有效地保证了整个光学导管的强度,并在整个系统安装完成之后,对系统进行了标定,进一步降低了由于光学导管中镜面变形带来的误差。

与基于传像光纤束或微型器件的成像系统相

比,光学导管采用平面镜作为图像传递的介质,具有高分辨率、无色散等特点,而且结构简单、成本低且传像质量更高。此外,还可以根据测量环境对应物理空间的具体情况调整传输通道的大小和长度,改变系统的测量面积和深度。

3.3 成像系统

成像系统主要由光学透镜和CCD传感器组成,光学透镜将传输进来的图像进行成像,CCD传感器在成像面对图像进行记录并存储到计算机。采用普通的工业CCD作为采集设备,像素分辨率高,采集速度快,成本低。

4 实验及结果

整个实验测量系统如图4所示。实验使用的CCD为pointgrey公司的flea2相机,分辨率为1288 pixel×964 pixel,投影器件为LCOS面板,分辨率为640 pixel×480 pixel。光学导管长度为160 mm,单次测量范围为18 mm×24 mm×12 mm。实验选择不锈钢水壶和有浮雕图案的玻璃杯作为测量样本,分别对壶嘴与壶体连接处内部的焊缝和玻璃杯内表面的形貌进行测量,如图5和图6(a)所示,图6(b)为玻璃杯上圆环浮雕所对应内表面3D形貌的测量结果。水壶测量结果如图7所示,其中图7(a)为采集的其中一幅变形条纹图像,图7(b)为由变形条纹图像计算得到的包裹相位图,图7(c)为对截断相位进行展开得到的解包裹相位图,图7(d)为根据采集图像进行3D重建得到的结果。

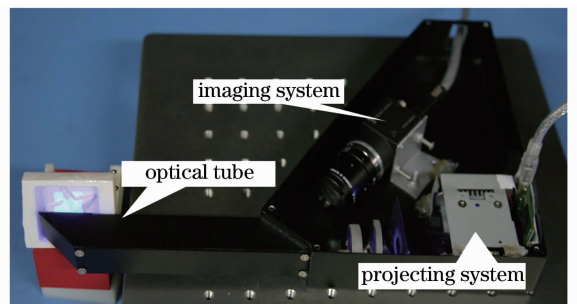


图4 测量系统初始模型

Fig. 4 Prototype of measurement system

为验证系统的测量精度,对一块高精度的标准件平面进行测量实验并将测量结果导入逆向工程软件Imageware进行评测。对测量得到的3D点云数据进行最小二乘法拟合,得到拟合平面,如图8所示,然后统计点云数据与拟合平面之间的距离,如表1所示。

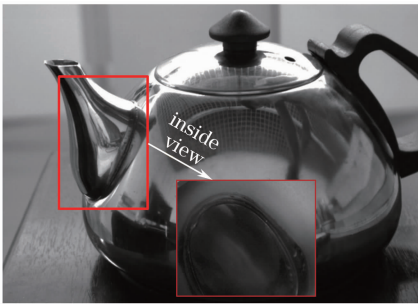


图 5 壶嘴内部焊接缝图像

Fig. 5 Image of soldering junction inside the spout

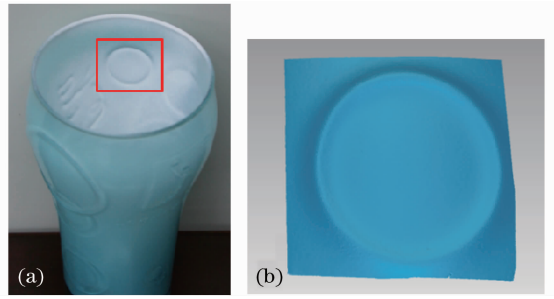


图 6 玻璃杯内表面形貌测量结果。(a)玻璃杯实物图；
(b) 3D 测量结果

Fig. 6 Shape measuring result of the inner surface of glass.

(a) Side view of the glass; (b) 3D measuring result

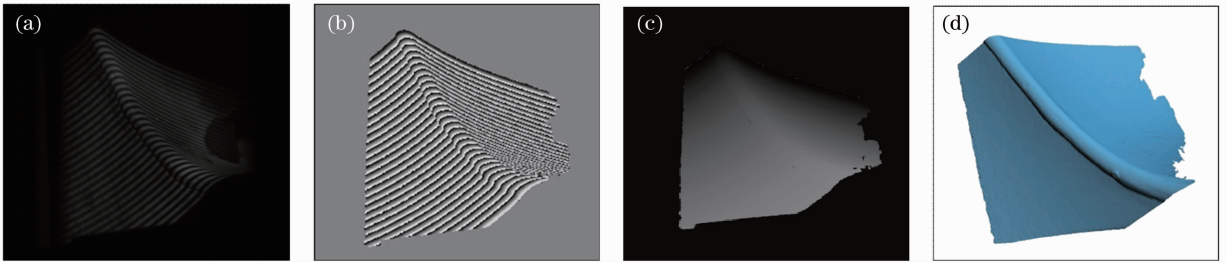


图 7 壶嘴内部焊接缝测量结果。(a)变形条纹图像；(b)包裹相位图；(c)解包裹相位图；(d) 3D 重建结果

Fig. 7 Measuring result of soldering junction inside the spout. (a) Deformed fringe image; (b) wrapped phase map; (c) unwrapped phase map; (d) 3D reconstruction

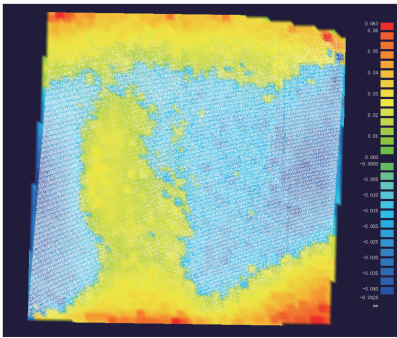


图 8 标准件平面 3D 测量结果

Fig. 8 3D measuring result of standard plane

表 1 点云数据与拟合平面之间的距离

Table 1 Distance of point clouds to fitting plane

Max /mm	Average /mm	Std. Dev. /mm
0.0632	0.0086	0.0071

5 结 论

提出一种基于条纹投影技术的受限空间 3D 测量方法,采用光学导管进行图像的投影和采集,实现了条纹投影 3D 测量技术在受限空间领域的应用。光学导管利用平面镜进行反射传像,因此与基于光纤传像束和微光学器件的测量系统相比具有更高的传像质量,且结构简单、成本低。实验结果证明了该

方法的可行性和实用性。因光学导管结构长度有限、柔性低,限制了系统的测量深度和灵活性,今后将进一步改进光学导管的结构以提高系统的测量范围和性能。

参 考 文 献

- 1 G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation[J]. *Sensors*, 2009, **9**(1): 568~601
- 2 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 3 Bian Xintian, Su Xianyu, Chen Wenjing. Analysis on 3-D object measurement based on fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 416~420
- 边心田, 苏显渝, 陈文静. 基于条纹投影的三维坐标测量方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 416~420
- 4 J. Geng. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2011, **3**: 128~160
- 5 Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Li Jianxin. Application of virtual grating phase-shifting fringe method for three-dimensional shape measurement[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(s1): s108003
- 朱荣刚, 朱日宏, 李建欣. 一种虚条纹相移算法在结构光三维测量中的应用[J]. *中国激光*, 2012, **39**(s1): s108003
- 6 Liu Changjie, Yang Xueyou, Ye Shenghua. A new visual technology of 3D measurement using LCD projection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2005, **19**(2): 41~44
- 刘常杰, 杨学友, 叶声华. 采用 LCD 投影实现三维曲面测量技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2005, **19**(2): 41~44

- 7 J. A. Jalkio, R. C. Kim, S. K. Case. Three dimensional inspection using multistriple structured light [J]. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(6): 966~974
- 8 A. Schick, F. Forster, M. Stockmann. 3D measuring in the field of endoscopy[C]. *SPIE*, 2011, **8082**: 808216
- 9 Lin Xiaoyan, Zhu Ronggang, Li Binpin *et al.*. Phase-shifting and frequency-shifting characteristic of fiber optic projector for the shape measurement[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 25~27
林晓艳, 朱荣刚, 李滨品 等. 用于面形测量的光纤投影器相移和频移特性[J]. *光学技术*, 2009, **35**(1): 25~27
- 10 Lin Xiaoyan. Optical fiber sensor for the shape measurement based on reference fringe phase shift method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 304~308
林晓艳. 参考条纹相移法光纤三维面形传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s2): 304~308
- 11 Fan Kuangchao, Li Ruijun, Song Hsinming. An innovative micro-3D measurement system with fiber image transmission[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2004, **2**(4): 302~307
范光照, 李瑞君, 宋欣明. 一种新型光纤传像微三维测量系统[J]. *纳米技术与精密工程*, 2004, **2**(4): 302~307
- 12 Ye Jing, Zhou Changhe, Jia Wei. Miniaturized optical system for 3D measuring of pipe inner surface[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2025~2028
叶晶, 周常河, 贾伟. 小型管道内壁三维成像测量系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2025~2028
- 13 Li Xiang, Liang Zhongzhu, Guo Peng *et al.*. Research progress of optical fiber bundles[J]. *OME Information*, 2009, **26**(7): 24~31
李响, 梁中翥, 郭鹏 等. 光纤传像束研究进展[J]. *光机电信息*, 2009, **26**(7): 24~31
- 14 Li Guiju, Wang Yanjie. Optical fiber bundle in optical systems [J]. *OME Information*, 2010, **27**(12): 28~32
李桂菊, 王延杰. 光学系统中的光纤传像束[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(12): 28~32

栏目编辑:何卓铭