

文章编号:1002-2082(2020)03-0580-06

# 多频光栅物体高精度廓形三维测量及重建研究

虞梓豪<sup>1</sup>, 刘瑾<sup>1</sup>, 杨海马<sup>2</sup>, 李美莹<sup>1</sup>, 徐炜<sup>3</sup>, 徐斌<sup>3</sup>

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海市 201600; 2. 上海理工大学 光电信息与  
计算机工程学院, 上海 200093; 3. 苏州立人听力器材有限公司, 江苏 苏州 215129)

**摘要:** 针对目前实际系统中, 由于噪声的存在, 单频光栅逐点解相时无法获得全场相位值, 导致对廓形复杂、体积小物体的重建精度低, 提出多频结构光栅投影实现体积较小、形貌复杂物体的高精度重建。系统算法基于随时间序列变化改进的四步相移法对多频光栅进行解相, 多频光栅解相是对每种频率的光栅单独展开相位, 每种频率的光栅解相是逐点进行的, 单频光栅中因噪声得到不连续的相位可通过其他频率光栅拟合修补, 得到一个全场范围内连续的相位。经实验单频结构光测量体积小、形貌复杂物体的误差范围为 0.1 mm~0.5 mm, 而文中所提出方法精度达到了 0.03 mm~0.05 mm, 该方法精度提高了 10 倍左右。

**关键词:** 三维测量; 多频外差法; 四步相移法; 结构光; 廓形重建

中图分类号: TN206; TH89

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0303006](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303006)

## Research on 3D measurement and reconstruction of high-precision profile of multi-frequency grating object

YU Zihao<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1</sup>, YANG Haima<sup>2</sup>, LI Meiyang<sup>1</sup>, XU Wei<sup>3</sup>, XU Bin<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China; 2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. Suzhou SoundLink Hearing Equipment Co., Ltd., Suzhou 215129, China)

**Abstract:** In the current practical system, due to the existence of noise, the full-field phase value cannot be obtained when the single-frequency grating is phase-resolved point by point, which leads to the low reconstruction accuracy of small objects with complex profiles. A multi-frequency grating projection method was proposed to realize the high-precision reconstruction of the objects with small volume and complex morphology. The system algorithm decomposed the multi-frequency grating based on the improved four-step phase-shifting method which changed with time series. The multi-frequency grating decomposition separately expanded the phase of each frequency grating, and the grating decomposition of each frequency was carried out point by point. The discontinuous phase in the single-frequency grating due to noise could be repaired by fitting other frequency gratings, and a continuous phase in the whole field could be obtained. Experimental results show that the error range of single-frequency structured light is 0.1 mm~0.5 mm for measuring small and complex objects, while the precision of our method is 0.03 mm~0.05 mm, which can be improved by about 10 times.

**Key words:** three-dimensional measurement; multi-frequency heterodyne method; four-step phase-shifting method; structured light; profile reconstruction

收稿日期:2019-05-05; 修回日期:2019-07-12

基金项目:国家自然科学基金 (U1831133, 61701296); 上海市自然科学基金 (17ZR1443500); 上海航天科技创新基金 (SAST2017-062); 宝山区科技创新专项基金 (17-C-21)

作者简介:虞梓豪 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理、三维重建等技术研究, E-mail: [18872300345@163.com](mailto:18872300345@163.com)

通信作者:刘瑾 (1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光电检测及智能监控技术研究。E-mail:[flyingpine@sina.com](mailto:flyingpine@sina.com)

## 引言

目前结构光的三维测量的研究主要集中在以下几个方面: 1) 提高三维测量的测量效率; 2) 提升三维测量的重建精度; 3) 研究不同的编码方法, 提高三维廓形重建的速度和鲁棒性; 4) 将结构光视觉和工业生产过程以及机器人应用等结合起来。结构光测量过程中会受投影仪非线性响应, 相机畸变以及环境光等因素影响, 导致物体测量精度不足。对于形貌简单、体积合适的物体重构难度不大, 而对于形貌复杂、体积较小的物体重构精度不够。采用多频结构光栅, 算法的核心是对现有四步相移进行改进, 结合多频外差原理<sup>[1]</sup>, 解相位时逐点解相, 多种频率展开相位值通过最小二乘法进行拟合, 得到一个全场范围覆盖的展开相位。同时, 本文以体积小、形貌复杂的螺丝模型为研究对象, 对提高小型物体重建精度进行验证。

结构光扫描技术精度的提升一直是国内外学者关注的问题之一。例如 Zhang 等人<sup>[2-4]</sup>提出从标定过程探讨标定精度问题, 但所提出的全场误差计算法易受到环境光照影响, 同时, 物体表面反射率改变时也需重新进行标定。J.M.Huntley 和 H. Saldner 等人<sup>[5]</sup>提出以正弦结构光算法为核心来改善重建精度。基于数字光栅投影的传统方法有对时间相位进行展开的四步相移法, 实际测量过程中物体边界发生急剧突变、高反射率因素都会导致解相周期发生错乱, 进而得到不连续的相位, 物体重建的精度也会受到影响。因此, 本文采用多频光栅结合四步相移算法进行改进, 实现了对小型物体和形貌复杂物体的高精度重建。

## 1 结构光栅三维重建原理

结构光三维测量技术的实现是基于光学三角法。DLP 投影仪作为结构光光源投出特定频率的光栅到物体表面, 对同种频率的光栅分别采集 0,  $\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  四幅不同的光栅调制图, 即四步相移法。然后利用 CCD 相机进行数据采集, 将采集到的形变光栅图与参考光栅对比, 解相位得到物体的三维廓形。其中系统工作的原理图如图 1 所示。

相移法的实质是光的干涉原理, 由于物体表面高度变换而得到变形的调制条纹。利用 CCD 摄像机采集得到二维的变形条纹图可表示为

$$I_N = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f x + \Delta\Phi(x, y)] \quad (1)$$

式中:  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  分别为摄相机接收到的光强

和背景光强;  $\Delta\Phi(x, y)$  为隐含物体高度信息的相位函数。

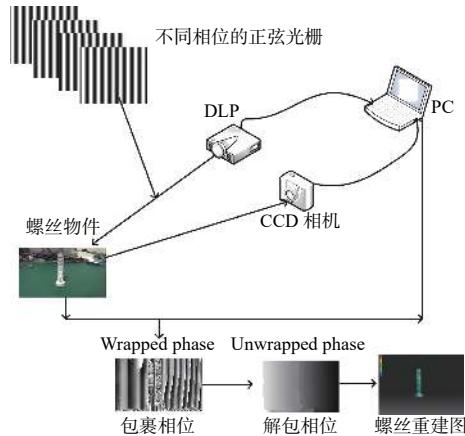


图 1 结构光三维重建系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of structured light three-dimensional reconstruction system

由(1)式可知, 方程存在 3 个未知量  $a(x, y)$ ,  $b(x, y)$  和  $\Delta\Phi(x, y)$ 。理论上给出 3 个不同相位的光强值便能得出  $\Delta\Phi(x, y)$ 。其中采用  $N$  步相移法的话, 相移量则为  $2\pi/N$ , 物体的相位函数表达式<sup>[6]</sup>为

$$\Delta\Phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right)} \right] \quad (2)$$

由(2)式可以计算出相位函数:

$$\Delta\Phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (3)$$

如何准确获得相机采集光栅的深度信息在重建过程中很关键。由图 2 光栅投影系统模型可知计算出的相位  $\Delta\Phi(x, y)$  与高度  $PP'$  的映射关系, 其中由式  $AB \times 2\pi f = \Delta\Phi(x, y)$  和  $\frac{PP'}{L - PP'} = \frac{AB}{d}$ , 可得高度为

$$PP' = \frac{L \times \Delta\Phi(x, y)}{2\pi f d + \Delta\Phi(x, y)} \quad (4)$$

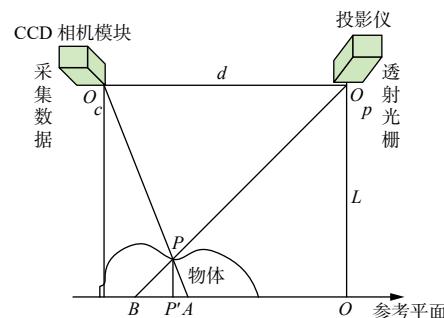


图 2 光栅投影系统模型图

Fig. 2 Model diagram of grating projection system

## 2 多频外差原理解相过程分析

多频外差的方式产生几种不同频率的结构光栅,采用多频外差法对小型物体廓形重建细节得到完整体现,且具有很好的抗干扰性。获取物体深度信息是重建的关键环节之一。此时的包裹相位实际上是对截断在 $[-\pi, \pi]$ 反三角函数相位的求解<sup>[7-8]</sup>。

多频外差的原理是频率相异的相位函数 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 叠加成频率较低的相位函数 $\varphi_{12}$ 。其中 $f_1$ 和 $f_2$ 分别为相位函数 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 的频率, $f_{12}$ 为相位函数 $\varphi_{12}$ 的频率,相位函数 $\varphi_{12}$ 的频率 $f_{12}$ 计算公式<sup>[9]</sup>为<sup>9</sup>

$$f_{12} = \frac{f_1 \times f_2}{f_1 - f_2} \quad (5)$$

相机、投影仪测量角度保持 $20^\circ \sim 30^\circ$ 位置,并且被测物和他们相对位置不发生改变,两种周期下绝对相位的关系为

$$\frac{\varphi_1}{2\pi} \times T_1 = \frac{\varphi_2}{2\pi} \times T_2 \quad (6)$$

相位包裹分布的关系为

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \begin{cases} \varphi_1 - \varphi_2 (\varphi_1 > \varphi_2) \\ 2\pi + \varphi_1 - \varphi_2 (\varphi_1 < \varphi_2) \end{cases} \quad (7)$$

两种周期结构光的绝对相位值<sup>[10]</sup>为<sup>10</sup>

$$\varphi_1 = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \Delta\varphi \quad (8)$$

其中:

$$n = NINT \left[ \left( \frac{T_2}{T_2 - T_1} \Delta\varphi - \phi_1 \right) / 2\pi \right] \quad (9)$$

$$\pi_1 = 2\pi n + \varphi_1 \quad (10)$$

式中 $n$ 表示该点的条纹周期数。

多频相位展开过程中,双频光栅对复杂物体重建细节体现不足,3种频率以上的光栅又会提高设备性能要求,且耗时,因此我们采用3种频率的光栅。实际操作中,使用的相机分辨率为1 080 pixel,通过使用visual studio2017软件中的python工具进行仿真,此过程中选取3种频率的光栅条距分别为 $T_1 = 15$  pixel,  $T_2 = 16$  pixel,  $T_3 = 17$  pixel,由(5)式多频外差公式可得,  $T_{12} = 240$  pixel,  $T_{13} = 272$  pixel,再叠加 $T_{12}$ ,  $T_{13}$ 可得,  $T_{123} = 2 040$  pixel,而我们要处理的图片为1 280 pixel,满足要求。

实际操作过程中DLP投影仪运用标准的四步相移法投射出3种频率的光栅投影,通过仿真,不同频率的 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 进行叠加得到频率更低的 $\varphi_{12}$ ,同理,通过对不同频率的 $\varphi_2$ 和 $\varphi_3$ 进行叠加得到 $\varphi_{23}$ ,然后将 $\varphi_{12}$ 和 $\varphi_{23}$ 进行叠加得到 $\varphi_{123}$ ,而且在三频的

正弦光栅中,选择合适的初始光栅频率,使得 $\varphi_{123} = 1$ ,这样能够让相位在全场范围内进行展开<sup>[11]</sup>。如图3所示为展开相位图,图中展开的相位连续,无噪声点。

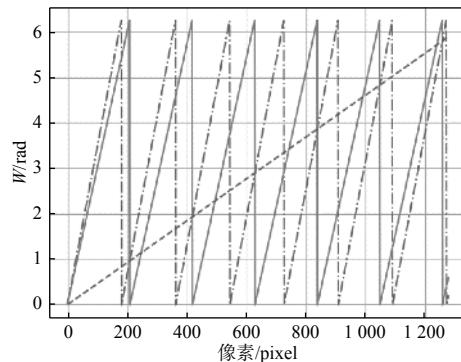


图3 多频外差法解相过程

Fig. 3 Multi-frequency heterodyne method for phase decomposition

## 3 单频光栅和多频光栅三维重建对比

基于四步相移的单一频率结构光仿真中,采集装置为DLP投影仪和CCD相机,重建物体为实际比例的螺丝模型。通过仿真发现,单一频率结构光进行重建时,环境光对结果影响非常大,细节体现不足。仿真中参数设置,通过测量摄相机到参考平面的距离为 $L = 26$  cm,投影仪光心到摄相机光心的距离为 $D = 10$  cm,投影光栅的频率为 $f = 1/16$  Hz。

其中图4(a)为参考光栅解相位仿真图。采用四步相移法对采集的参考光栅与调制光栅进行解相位,于是可以仿真得到图4(b)中的光栅形变的仿真图以及相位包裹前与包裹后的仿真图。图4(a)中所示在像素400 pixel~600 pixel和800 pixel~1 000 pixel解相位不完全连续。

如图5所示为部分螺丝廓形重建图,螺纹细节无法显示,同时噪声影响很大,多次测试与标准螺丝相比误差达0.1 mm~0.5 mm。

通过对多次仿真结果进行分析可知,单频正弦光栅投影频率为低频时,由于频率与周期互为倒数关系,导致正弦光栅投影周期过大,通过对螺丝模型进行分析,周期过大时,由于螺丝模型体积比较小,部分地方形貌复杂,投射的物体表面的光栅条纹可能相位无法被解调出来,此时测量物体的精度变低,物体细节丢失;而单独采用

高频光栅时, 虽然可以提升物体细节的辨别, 但易发生大于半个周期的条纹被投影在物体突变或不连续区域, 算法展开会不连续, 产生信息丢失等错误<sup>[7, 12]</sup>。

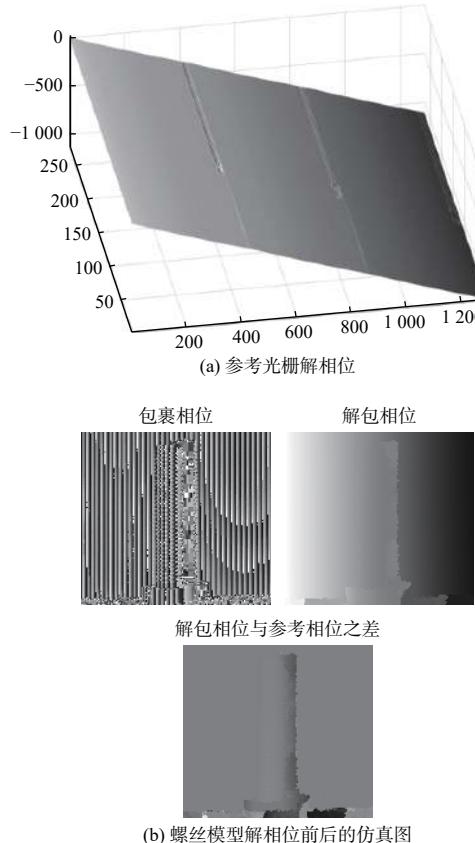


图 4 螺丝模型重构过程

Fig. 4 Reconstruction process of screw model

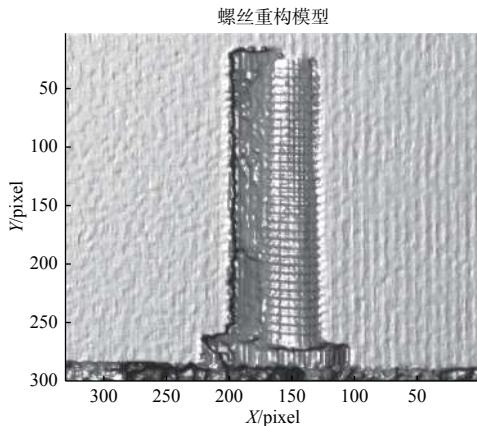


图 5 采集部分螺丝廓形重建图

Fig. 5 Acquired part of reconstructed screw profile

为验证多频外差法对物体重建的精度和实现效果, 实验对象为螺丝模型。DLP 投影仪, 相机为 MV-UB130M 黑白相机, 分辨率为  $1280 \text{ pixel} \times 1024$

pixel, 帧率为 30 帧/s。三维重建系统实物搭建如图 6 所示。

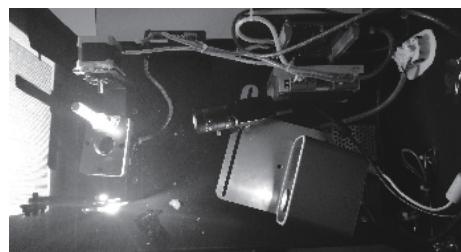


图 6 三维重建系统实物搭建图

Fig. 6 Physical map of three-dimensional reconstruction system setup

多频光栅参数设定, 相机采用焦距  $6 \text{ mm} \sim 12 \text{ mm}$  可调焦相机, 相机曝光时间最好设置为  $1/60 \text{ s}$  的整数倍, 相机曝光时间设置为  $33.333 \text{ ms}$ 。将相机的光圈设置为 16, 投影仪与相机间所成夹角为  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 3 种光栅的频率分别为  $1/64, 1/58, 1/53$ 。

使用如下系统对螺丝模型进行重建, 重建步骤如下:

- 1) 用张正友棋盘格法对相机内参进行标定;
- 2) 进行多频正弦光栅投影, 对于螺丝模型每面投出固定几种频率的光栅, 并采用标准的四步相移法对每种频率的光栅解相位。采集每面数据所需时间大约  $7 \sim 8 \text{ s}$ 。投影出的光栅如图 7 所示。
- 3) 基于特征点的拼接;
- 4) 基于 ICP 的全局优化。

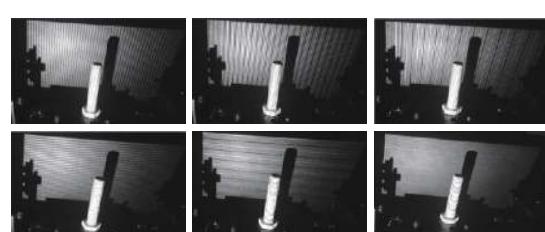


图 7 螺丝模型投射的多频光栅

Fig. 7 Multi-frequency grating projected by screw model

配准过程即对于空间中不同的 2 个点集, 他们存在一定的变换关系, 通过变换 2 个点集将其统一到同一坐标下, 如图 8 所示。

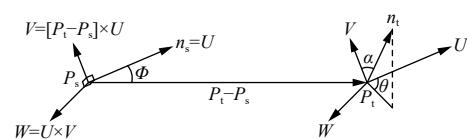


图 8 点云匹配

Fig. 8 Point cloud matching

根据坐标系  $(u, v, w)$ , 我们可以计算 3 个标量值<sup>[13-14]</sup>

$$\alpha = v \times n_j \quad (11)$$

$$\Phi = \frac{u \times (p_j - p_i)}{\|p_j - p_i\|} \quad (12)$$

$$\theta = \arctan(w \times n_j, u \times n_j) \quad (13)$$

随后通过平移和旋转变换即能得到点云粗校准。

ICP (iterative closest point) 算法即最近迭代算法, 点云匹配中的常用方法。求取空间坐标系中采集不同面  $m$  个对应的特征点(其中 2 个面特征点云数据重合率应达到 20% 以上), 通过刚体变换  $T$ , 不断迭代使得  $m$  对匹配特征点距离达到最小<sup>[13]</sup>。利用要将源点云转换到目标点云坐标系下, 可通过神经网络, 设置阈值进行迭代, 直到两点间距离误差满足要求, 即为精确配准<sup>[15-16]</sup>。特征点匹配后网格化的螺丝模型如图 9 所示。

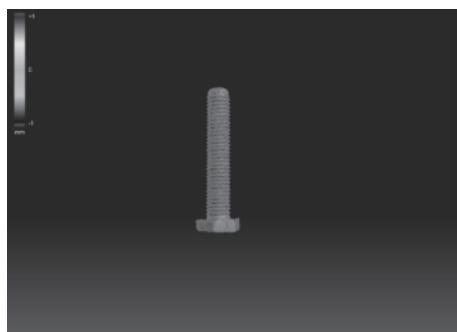


图 9 网格化螺丝模型

Fig. 9 Meshed screw model

## 4 实验结果分析

实验结果表明, 采用多频外差法进行光栅投影, 物体细节更加明显, 如图 10(a) 所示, 信息丢失更少, 得出的结果模型明显好于单一频率重建的结果, 图 10(b) 融合结果中螺丝模型底部存在明显缺陷。因此, 说明了采用多频光栅是提升物体廓形重建精度的一种相对较好的方法。

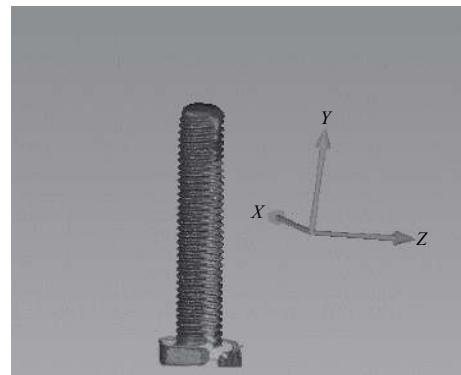
同时, 此实验环境为正常日光环境, 得到的螺丝廓形完整, 说明多频外差结合四步相移算法解相过程能够得到一个全场范围内连续的相位, 算法的改进也提高了结构光重建对环境光的抗干扰程度。

如表 1 所示, 基本原理基于多频外差法的单目视觉的结构光重建。由表 1 数据可知, 精度达到了  $0.03 \text{ mm} \sim 0.05 \text{ mm}$ 。同时, 通过图 11 多次测试牙距参数, 牙距重建误差小于  $0.03 \text{ mm}$ , 满足实际

生产需求。总体来说, 采用多频外差原理进行物体廓形重建, 对于小型物体细节还原效果好, 抗干扰强, 提高了物体重建精度。通过改善算法, 提高了精度, 减少了设备成本。



(a) 多频外差法螺丝融合结果



(b) 单频结构光螺丝融合结果

图 10 两种方法螺丝模型融合结果对比图

Fig. 10 Comparisons of two methods for screw model fusion results

表 1 重建参数比较

Table 1 Comparison of reconstruction parameters

M8螺丝	牙距/mm	长度/mm	六角直径/mm	头部厚度/mm
标准参数	1.25	64.0	1.9	10.0
重建参数	1.23	64.04	1.95	10.03

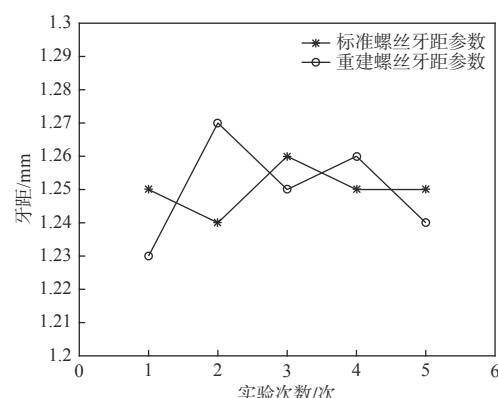


图 11 牙距误差图

Fig. 11 Pitch error map

## 参考文献:

- [ 1 ] SONG Lei, YUE Xiaofeng, WANG Le. Key technology of multi-frequency heterodyne phase shift three-dimensional measurement[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 33(4): 391-396.  
宋雷, 岳晓峰, 王乐. 多频外差相移三维测量关键技术[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 391-396.
- [ 2 ] ZHANG C, ZHAO H, ZHANG L, et al. Full-field phase error detection and compensation method for digital phase-shifting fringe projection profilometry[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(3): 035201.
- [ 3 ] NAVARRO C A, LOPEZ V M, CASANUEVA R, et al. Digital control for an arc welding machine based on resonant converters and synchronous rectification[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(2): 839-847.
- [ 4 ] WU Shuyu, YANG Yimin, ZHONG Zhenyu, et al. Phase error correction algorithm in grating projection measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 131-136.  
吴蜀予, 杨宜民, 钟震宇, 等. 光栅投影测量系统中的相位误差校正算法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 131-136.
- [ 5 ] HUNTLEY J M, SALDNER H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047.
- [ 6 ] PAN B, KEMAO Q, HUANG L, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(4): 416-418.
- [ 7 ] MAO Cuili, LU Rongsheng. Reverse error compensation method for improving the accuracy of multi-frequency fringe projection phase extraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 240-248.  
毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 240-248.
- [ 8 ] LI Zhongwei. Research on structured light three-dimensional measurement technology and system based on digital grating projection[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.  
李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [ 9 ] WANG Xi. Research on three-dimensional reconstruction technology based on digital grating projection structured light [D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2017.  
王曦. 基于数字光栅投影结构光的三维重建技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [ 10 ] HUANG Yanan, LOU Xiaoping. Research on phase correction and matching method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 237-241.  
黄亚楠, 廖小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(2): 237-241.
- [ 11 ] XIAO Z, CHEE O, ASUNDI A. An accurate 3D inspection system using heterodyne multiple frequency phase-shifting algorithm[J]. *Physics Procedia*, 2011, 19(1): 115-121.
- [ 12 ] LIU J Y, LI Y F. A whole-field 3D shape measurement algorithm based on phase-shifting projected fringe profilometry[C]//Automation, USA: IEEE International Conference on Information & Automation. USA: IEEE, 2014: 495-500.
- [ 13 ] CAO Shuang, GE Jinwen. Industrial component simulation installation based on point cloud data[J]. *Engineering Survey*, 2018, 46(11): 49-54.  
曹爽, 葛劲文. 基于点云数据的工业构件仿真安装[J]. 工程勘察, 2018, 46(11): 49-54.
- [ 14 ] YANG Bo. Research on point cloud data generation of automobile body[J]. *Internal Combustion Engine and Accessories*, 2018(15): 12-13.  
杨波. 汽车车身点云数据生成研究[J]. 内燃机与配件, 2018(15): 12-13.
- [ 15 ] YUAN Liang. Research on registration algorithm of point cloud data in three-dimensional reconstruction [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2010.  
袁亮. 三维重建过程中的点云数据配准算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [ 16 ] YANG Jie, LU Yuren, TIAN Ying, et al. Point cloud mosaic method based on improved ICP algorithm[J]. *Sensors and Microsystems*, 2018, 37(9): 41-43.  
杨杰, 卢钰仁, 田颖, 等. 基于改进ICP算法的点云拼接方法[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 41-43.