

三维测量结构光一维编码投影机的设计

刘凯¹, 王江¹, Yo-Sung Ho²

¹四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

²韩国光州科技大学电气工程及计算机科学学院, 韩国 光州 61005

摘要 以商用投影机作为光源的结构光三维测量系统中,所有的编码图案都是以二维矩阵的形式由计算机传送给投影机,再由投影机以二维图像的形式投射至被扫描对象。如果编码是条纹式图案,没有考虑到条纹式结构光编码中灰度信息在同一行或者同一列保持不变的特点。因此,根据条纹式编码的单方向变化特性,提出一种将一维编码序列自动扩展成二维编码图像的结构光扫描专用的投影机设计方案,利用包含所有灰度信息的一维编码序列和设计好的扩展电路,对结构光编码图像进行像素扩展,以提高结构光三维成像的投影效率。实验结果表明,与液晶显示投影机相比,投射同样样式的结构光编码图像时,该投影设计的速度可以提高71.8%,且能够保持相位精度差的数量级在 10^{-3} ,有效地提高了结构光三维测量中结构光编码图像的投影重建效率。

关键词 测量; 编码图像; 编码序列; 像素扩展; 投影效率

中图分类号 TN27 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061202

Unidimensional Scalable Method for Structured Light Projection of 3D Measurement

Liu Kai¹, Wang Jiang¹, Yo-Sung Ho²

¹College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

²School of Electrical Engineering and Computer Science, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Korea

Abstract In the structured light 3D measurement system using the commercial projector as the source, all the encoding patterns are projected with the two-dimensional matrix form. The computer transmits the patterns to the projector, and the patterns are projected onto the scanned object by two-dimensional images. If the code is a striped pattern, the characteristics of stripe structured light coding that the gray information remains unchanged in the same line or in the same column are not considered. Therefore, according to the unidirectional characteristic of the fringe encoding, we present a design scheme of a special structure projector, which can automatically extend one-dimensional gray sequence into encoded structured light. One-dimensional coding sequence with all gray information and a designed pixel-extended circuit are used to expand the pixel of structured light coded image, in order to improve the projection efficiency of structured light 3D imaging. The experimental results show that the speed of projection is improved by about 71.8% compared with liquid crystal display projection method, and the order of magnitude of phase accuracy difference is 10^{-3} . The projection efficiency of dual encoded structured-light images in 3D measurement is effectively improved.

Key words measurement; encoded images; encoding sequence; pixel extending; projection efficiency

OCIS codes 120.6650; 120.5050; 180.5810

1 引言

结构光测量(SLI)技术是一种主动光学三维测量

技术^[1],随着科技的发展,三维信息的测量和处理已经逐渐成为三维(3D)领域的研究热点^[2]。在三维测量领域中,结构光测量技术因具有非接触性^[3]、可靠

收稿日期: 2017-10-19; 收到修改稿日期: 2017-11-30

基金项目: 国家自然科学基金-(61473198)、四川省科技厅重点研发项目(2018GZ0198)

作者简介: 刘凯(1973—),男,博士,博士生导师,主要从事计算机视觉、主动与被动立体视觉和数字图像处理方面的研究。E-mail: kailiu@scu.edu.cn

性和精确性的优点^[4],已经成为人们首选的三维测量技术之一^[5],也被广泛应用于很多领域,如缺陷检测、逆向工程等。SLI技术在测量过程中利用投影机,在物体表面投射多幅具有规律相移量的编码图像,使物体在同一位置出现多个亮度值,利用这些亮度值计算相位并重建三维视图^[6]。在实际应用中,针对结构光测量过程中测量速度的改进一般着眼于在三维重建中寻求相位计算和编码解码算法方面的提高,如Zhao等^[7]提出一种抑制相位测量轮廓术饱和和误差的方法,虽然重建精度有一定程度的提高,但速度受限。Gao等^[8]提出基于单幅灰度图像的快速三维重建方法,该方法虽然也达到了快速三维重建的要求,但对灰度图像的要求比较高,不具有普遍性。

在结构光编码图像投影方面提升测量速度的相关研究并不多。Xiong等^[9]提出的用于绝对相位还原的对称式和非对称式二元结构光编码从结构光编码这一角度来改善重建速度,取得了不错的效果,但该方法需要精确的光学器件传感器,成本高昂且难以保证精度。结构光编码图像的投影速度直接决定SLI的测量速度。目前市场上已有的投影机虽然功能繁多,却没有针对结构光特征提出专用投影方法,都有一定的局限性。本文针对三维测量中结构光编码图像的特征,提出一种基于一维灰度像素扩展的高速投影方法。

2 SLI结构光编码扩展投影原理

2.1 SLI结构光编码投影原理

SLI是一种主动非接触式三维测量技术,由投

影机、照相机和处理单元(智能终端)组成,其原理是利用投影机将正弦波编码的结构光编码图像投影到物体表面,利用照相机同步捕捉包含被扫描物体表面信息的编码图片,最后由处理单元对图片信息进行计算,得出目标物体的三维信息。经典的SLI技术中会用到很多种类的结构光编码,根据投影机投射编码图像的不同,结构光测量编码可分为线结构、二进制结构和相位测量轮廓术(PMP)结构等。对于线结构光编码,假设在目标物体上沿竖直方向移动投射的编码图像,可表示为

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p \delta(n - y^p), \quad (1)$$

式中: $I_n^p(x^p, y^p)$ 表示像素点在投影机中的坐标, n 为整数值变化系数,它的变化范围是 $[0, H-1]$ (H 是投影机的垂直分辨率); A^p 为用来控制光强动态范围的常数; $\delta(\cdot)$ 是狄拉克脉冲函数,当 $x=0$ 时 $\delta(x)=1$,当 $x \neq 0$ 时 $\delta(x)=0$ 。对于PMP编码图像,利用投影机投射出一系列相位变化为 $2\pi n/N$ 的编码图像,可表示为^[10]

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos\left(\frac{2\pi f y^p}{H} - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (2)$$

式中: A^p 和 B^p 为用来控制光强动态范围的常数; H 为编码图像的高度; f 为投影正弦图像的空间频率; $N(N \geq 3)$ 为PMP图像总数, n 为相移系数。(2)式表示沿 y 方向扫描投影的图像。图1(a)所示为 $n=218$ 时的线结构光编码图像,图1(b)所示为大小为 $600 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 、相移系数为4的PMP结构光编码图像。

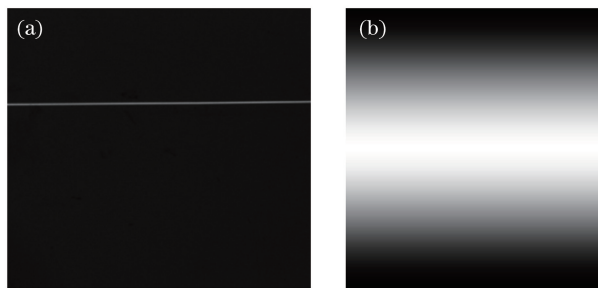


图1 (a)线结构编码图像;(b)PMP编码图像

Fig. 1 (a) Encoded image of line structure; (b) encoded image of PMP

2.2 结构光编码投影特征

通过对2.1节结构光三维测量中用到的结构光编码图像的对比可知线结构光编码、二进制结构光编码以及PMP结构光编码有一个共同的特征:灰度信息只在单方向上变化,在沿 y 方向扫描的结构光中,相应的灰度信息只在竖直方向上呈现规律变

化,在纵向上灰度值一直重复,沿 x 方向扫描与之同理。图2(a)所示为沿 y 方向扫描中,相移系数为4的PMP结构光编码图像的一维灰度序列曲线。从该曲线编码特征可以得出,一幅基频结构光编码图像在纵向上的灰度值一直相等,列分量上的灰度值在 $0 \sim 255$ 范围内呈正弦规律变化。

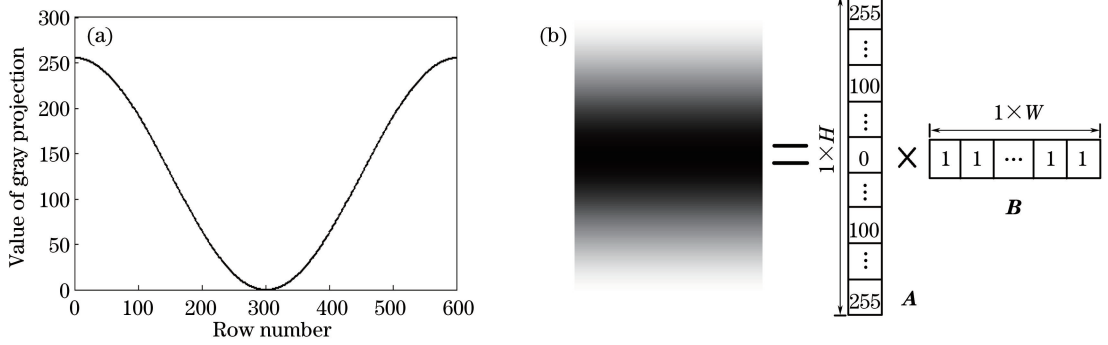


图2 (a)基频 PMP 的列灰度曲线;(b) $A_{H \times 1} \times B_{1 \times W}$ 等效矩阵图

Fig. 2 (a) Column gray curve of base frequency PMP; (b) equivalent matrix of $A_{H \times 1} \times B_{1 \times W}$

2.3 结构光一维灰度扩展投影原理及设计

假设目标投影编码图像 $G(x, y)$ 大小为 $W \times H$, 即编码图像为 $W \times H$ 的灰度矩阵, 如图 2(b) 所示。图像在行灰度值重复不变的情况下, 对于结构光编码的投影按常规二维图像处理, 即对每个点的值进行扫描和判断, 投影阵列需要建立与像素点的一一对应关系。目前, 在 SLI 技术中使用的投影方法, 如液晶显示(LCD)投影法, 均采用每个像素点和显示投影电极建立一一对应关系。

针对单方向呈现规律变化的结构光编码图像进行投影时, 在行分量上除了第一个点外, 后续每次装载扫描都是重复操作, 每一行的灰度值都有 $W - 1$ 次操作是重复的, 对于一幅 $W \times H$ 的光栅图像就会重复 $(W - 1) \times H$ 次。避免这种重复投影是本投影机设计的关键所在。首先, 从结构光编码方式中提取单方向上呈现规律变化的一维向量。线结构光编码图像的编码公式[(1)式]可以提出线结构光一维向量 $Z^p_1(1, y^p)$, 可表示为

$$Z^p_1(1, y^p) = A^p \delta(n - y^p), \quad (3)$$

根据 PMP 编码图像公式[(2)式]可以提取 PMP 规律变化的一维向量 $Z^p_1(1, y^p)$, 表示为^[11]

$$Z^p_1(1, y^p) = A^p + B^p \cos\left(\frac{2\pi f y^p}{H} - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (4)$$

对比结构光一维向量的编码方式和原编码方式, 可知该一维向量包含了结构光编码全部灰度信息。得到包含所有灰度信息的一维向量后, 需要对其像素进行扩展, 完成结构光编码图像投影。

图 3 所示为一维向量扩展原理示意图。该一维扩展原理是在 LCD 投影基础上对像素阵列电极进行重新设计, 受 LCD 投影法^[12]中显示单元和编码图像像素点一一对应关系的启发, 投影机的投影像素为 $W_m \times H_n$, 利用栅极和源极共同决定像素电极工作的特性, 根据一维向量的不同, 可以让所有的栅极串联在一个电平信号下, 保持有效脉冲状态, 即所有列驱动电路中的信号相同且同步发生变化, 投影机的每行像素电极串联起来成为类似一个像素点的像素条 $[H_1, H_2, \dots, H_m]$ 。根据 2.2 节中得到的包含所有灰度信息的结构光一维编码向量 $W_k (W_1,$

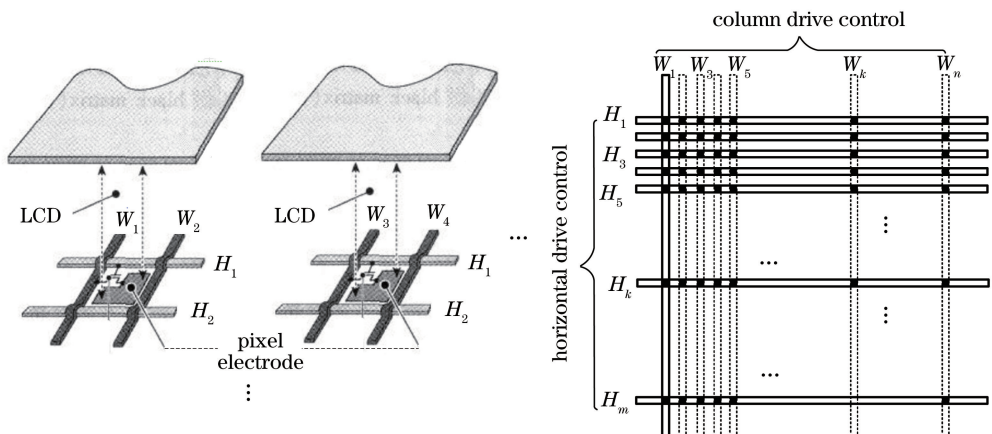


图3 一维向量扩展原理示意图

Fig. 3 Scalable principle of one-dimensional vector extending

W_2, W_k, W_n), 将 W_k 向量中每一个点上的值(即灰度值)对应输入到像素电极的行驱动电路中, 当列驱动电路得到 W_k 的一个像素点灰度值, 转化成对应的

电压值(即电平信号), 对应的整行像素条 H_k 获得栅极和源级一起作用的电平信号, 显示出对应的灰度信息。

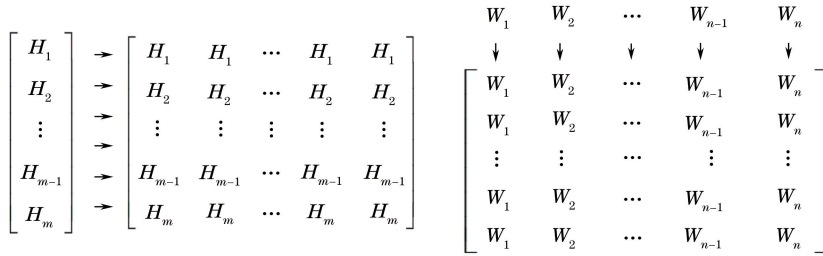


图 4 行列扩展模式示意图

Fig. 4 Schematic of column and row scalable

整个投影过程只需要结构光编码图像单向规律变化的一维向量就能瞬时完成一维图像到二维图像的扩展投影。图 4 所示为行与列不同方向上一维向量 W_k 、 H_k 的扩展方式, 根据结构光编码的特征, 当投影机得到目标编码图像的一维向量后, 确定行列扩展方向并以图中的方式将一维向量灰度信息扩展成像素条, 像素条全部得到数据后即完成投影。在整个过程中, 无需建立每个像素电极和结构光编码图像像素之间的一一对应关系。

3 实验与结果

通过实验验证本文方法的有效性。实验一用 SLI 技术中的线结构光模拟本文提出的基于一维扩展映射的方法, 实验二用自制的一维灰度扩展编码投影样机进行结构光三维测量。实验所使用的三维测量系统包括两台分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的 PROSILICA GC650C 工业相机和一台计算机, 在模拟实验中使用 CASIO XJ-M140V 投影机, 分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 。实验中结构光编码图像和相位灰度级为 256, 实验相位信息数据灰度值在 $0 \sim 255$ 之间。图 5 所示为测量实验系统示意图。

实验中采用垂直方向投射结构光编码来模拟一维扩展后的像素条投影效果。Long 等^[13]的研究表明, 基于线结构光编码扫描的三维测量也可用

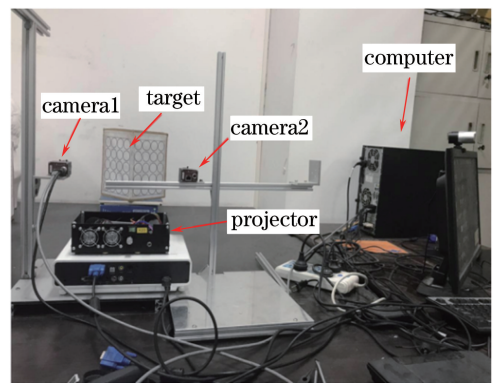


图 5 测量实验系统

Fig. 5 Measurement system setup

PMP 相位展开计算相位并重建。实验中, 针对头形石膏雕像投影了 600 幅亮度为 255、大小为 $600 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 、间隔依次为 1 pixel 的线结构光编码图像。图 6(a)所示为一个头形石膏雕像, 它是实验的扫描目标; 图 6(b)所示为 $n=218$ 时的线结构光编码图像; 图 6(c)所示为利用线结构光编码模拟一维扩展像素条扫描石膏的速摄, 其中 $n=218$ 。实验目的是对比一维扩展投影法与传统 LCD 投影法在三维测量中速度和精度的变化。排除三维重建效果受噪声等其他因素的影响, 实验采用傅里叶变换对相位展开得到相位图和三维重建结果图, 如图 7 所示。

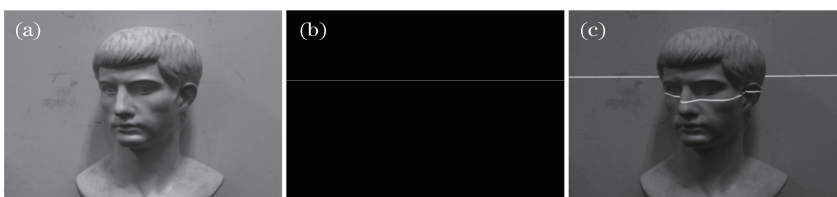


图 6 (a)扫描目标;(b)线结构编码图像;(c)扫描场景速摄

Fig. 6 (a) Target of scanning; (b) encoded image of line-structure; (c) snapshot of the scanning scene

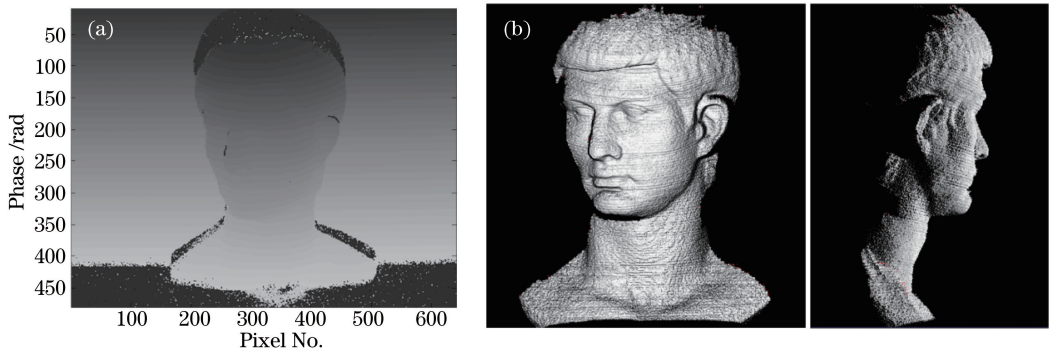


图 7 (a)三维重建的雕像相位图;(b)三维重建结果

Fig. 7 (a) Phase diagram of reconstructed statue; (b) result of 3D reconstruction

为了验证本投影设计的有效性,采用根据上述原理和结构制成的一维扩展编码投影样机进行三维测量实验,保证实验样机能应用于不同扫描方向和不同三维重建场景中,沿纵向对呈 90° 垂直的标靶进行扫描测量。由于实验中使用自制投影样机,为了达到最佳重建效果,采用两个 PROSILICA GC650C 工业相机组成的双目立体视觉三维重建方法进行三维重建实验。图 8(a)所示为扫描标靶,图 8(b)和图 8(c)是在左右两个不同视角下捕获的

相同场景中标靶的图像。实验过程中,投影样机会依次投射出覆盖目标物体每个像素点的竖直像素条(图中亮线处),扫描不能保证覆盖每个像素点,但不影响实验对本文方法的验证。为了减小实验误差,利用 Zhang 等^[14]提出的沿极线搜索原理对标靶进行三维重建,图 9 所示为重建结果图。实验结果表明,本文提出的基于结构光编码图像一维灰度向量扩展的投影法能够成功完成结构光编码的投影和目标物体的三维测量重建。

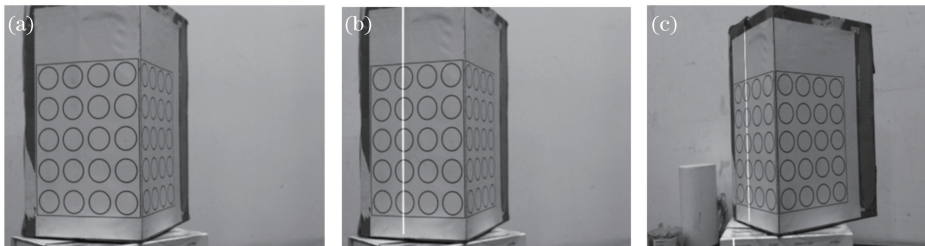


图 8 (a)扫描标靶;(b)左边相机扫描图;(c)右边相机扫描图

Fig. 8 (a) Target of scanning; (b) a snapshot of left camera; (c) a snapshot of right camera

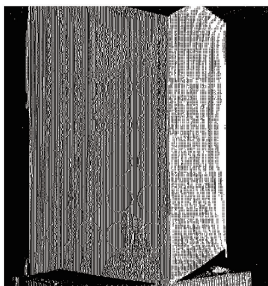


图 9 标靶的重建结果

Fig. 9 Reconstruction result of the target

4 分析与讨论

根据实验结果可知,本文提出的三维测量结构光一维扩展编码投影机的设计能够成功完成结构光编码的投影和目标物体的三维重建,与常用的 LCD

投影法相比,本文提出的方法结构光编码图像的投影速度和三维测量速度方面都有一定提高,对相位误差的影响在正常波动范围内。

图 10 所示为模拟实验中本文方法与 LCD 投影法重建得到的相位误差曲线。从图中可以看出, LCD 投影法重建结果的相位波动幅度相对较小,但本文方法相位误差与之相差甚微,相差数量级在 10^{-3} 内,属于正常波动。使用 LCD 投影法与本文方法得到的最大扫描频率分别为 103 kHz 和 600 kHz。

三维测量由于硬件设备相互之间的配合问题,投影机需要一定的睡眠时间,表 1 所示为在不同投影睡眠时间下,实验线结构光编码图像投影速度对比。

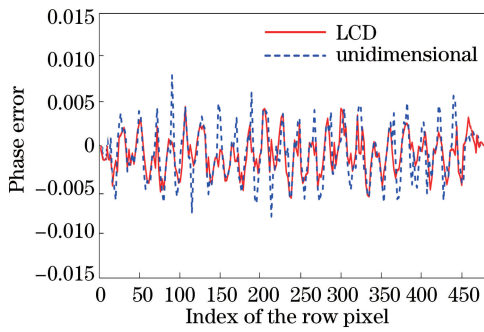


图 10 第 320 列的相位误差

Fig. 10 Phase error at the 320th column

表 1 投影速度结果(单位: frame/s)

Table 1 Result of projection speed measurement
(Unit: frame/s)

Sleeping time /ms	Method		Difference
	LCD	Unidimensional	
0	59.48		
5	58.11	198.94	140.84
10	57.21	98.91	41.70
15	51.65	65.66	14.01
20	40.06	48.00	8.39
25	35.61	38.94	3.33

5 结 论

提出了一种应用于结构光投影三维测量的一维扩展映射方法,针对灰度信息重复投影问题,利用三维测量中使用的结构光编码图像特点,设计了以结构光编码图像一维向量序列为基础,进行像素扩展投影的投影样机。实验结果表明这种方法是有效的,能够高速投影目标结构光编码图像并快速重建被测物体表面的三维可视化图像,且能够保持相位精度差在 10^{-3} 数量级之内。采用本文方法可以将投影机最大扫描频率提高到 600 kHz,实验中睡眠时间取 5 ms,投影机投影速度可达 198.94 frame/s,投影速度较常用的 LCD 投影法可以提高 71.8%。这种以一维灰度向量序列为基础进行像素扩展的投影方法在快速三维重建领域十分有效,也可以用在一些无需高精度但需高速度的初步三维重建中。本文实验所用的是投影机样机,样机的稳定性和精确性还需进一步提高。

参 考 文 献

[1] Wang Y C, Liu K, Hao Q, *et al.* Robust active stereo vision using kullback divergencel [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(3): 548-563.

[2] Bian H D, Liu K. Robustly decoding multiple-line-structured light in temporal Fourier domain for fast and accurate three dimensional reconstruction [J]. Optics Engineering, 2016, 55(9): 093110.

[3] Sang X Z, Yu X B, Chen D, *et al.* Research progress on three-dimensional optical display technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050006.
桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050006.

[4] Osami S, Takamasa S. Three-dimensional step-height measurement using sinusoidal wavelength scanning interferometer with four-step phase-shift method [J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 084110.

[5] Wang J, Sankaranarayanan A C, Gupta M, *et al.* Dual structured light 3D using a 1D sensor [J]. Computer Vision, 2016, 9(17): 383-398.

[6] Lu M T, Su X Y, Cao Y P, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(3): 0308006.
卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308006.

[7] Zhao J, Wang Y C, Liu K. New method of restraining the saturated error in phase measuring profilometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1008001.
赵婧, 王永昌, 刘凯. 一种抑制相位测量轮廓术饱和误差的方法 [J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1008001.

[8] Gao X J, Zhang X D, Gao Y J. Fast method of 3D surface reconstruction based on single gray image [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 42-47.
高欣健, 张旭东, 高亚捷. 基于单幅灰度图像的快速三维重建方法研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 42-47.

[9] Xiong Y K, Zhang W Z, Yang S T, *et al.* Symmetric and asymmetric dual structure light coding methods for absolute phase retrieval [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0310002.
熊义可, 张万祯, 杨松涛, 等. 用于绝对相位还原的对称式和非对称式二元结构光编码 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0310002.

[10] Yang Y, Long Y F, Wu W, *et al.* Eliminating phase error caused by multi-path effect for phase measuring profilometry [J]. High Power Laser and Particle

- Beams, 2015, 27(4): 67-71.
- 杨洋, 龙云飞, 吴炜, 等. 消除相位测量轮廓术中多路径效应的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 67-71.
- [11] Ou P, Wang T, Li R X. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011102.
- 欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011102.
- [12] Lin F, Zhang W W, Fan Y, *et al.* Theory and systematic design of Rheinberg illumination based on programmable LCD [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0818002.
- 林飞, 张闻文, 范瑶, 等. 基于可编程 LCD 的莱茵伯格照明显微原理与系统设计 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0818002.
- [13] Long Y F, Wang S J, Liu K. Robust and efficient decoding scheme for line structured light [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 75: 88-94.
- [14] Zhang Q, Dong Y, Li H B, *et al.* Underwater curve constraint model based on non-parallel binocular vision [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0315001.
- 张强, 董玉, 李海滨, 等. 非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型 [J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0315001.