

# 改进的结构光相位三维测量方法

龙清, 李宏宁\*, 杨明\*\*, 杨鑫\*\*\*

云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

**摘要** 随着三维测量技术的不断发展,如何快速、精准地测量大场景物体三维形貌成为研究热点。对相位测量轮廓术进行改进,运用改进的相位计算方法对物体三维信息进行测量,并结合幅度信息解决了相位测量轮廓术仅能测量表面信息,但不能确切测出所在物体的位置的问题,该方法适合测量大场景中各物体的三维信息。实验结果表明:所提方法原理简单,对不连续物体的测量结果较好,既可以确定物体位置,也可测量物体表面三维信息。

**关键词** 相位测量; 幅度信息; 三维信息测量; 不连续物体

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2410009

## Improved Three-Dimensional Measurement Method for Structured Light Phase

Long Qing, Li Hongning\*, Yang Ming\*\*, Yang Xin\*\*\*

School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China

**Abstract** With the development of three-dimensional (3D) measurement technology, how to quickly and accurately measure the 3D shape of large scene objects has become a research hotspot. This study improves the phase measurement profilometry, uses an improved phase calculation method for measuring the 3D information of the object, and combined with the amplitude information, the problem that the phase measurement profilometry can only measure the surface information, but can not accurately measure the position of the object is solved. Our proposed method can suitably measure the 3D information of each object in a large scene. The experimental results show that the proposed method is simple in principle and is good for measuring discontinuous objects. Furthermore, it not only determines object position but also measures the 3D information on the surface of the object.

**Key words** phase measurement; amplitude information; three-dimensional information measurement; discontinuous object

## 1 引言

随着科技的发展,三维成像技术日益重要,光学和光电子学技术的发展使得新的光学三维传感方法不断涌现,一些三维测量技术已广泛应用于商业。这些方法操作简便、运算周期短、工作效率快。目前光学三维测量在许多领域,如工业设计<sup>[1]</sup>、文物保护<sup>[2]</sup>、虚拟现实<sup>[3]</sup>等具有广泛的应用前景,其中结构光法更为常见。

结构光法首先由 Takeda 等<sup>[4-5]</sup>提出,获得了场景里的点与图像点之间的对应关系,但不完善的相位图无法展开以及展开过程中会发生频谱混叠,故 Zhou 等<sup>[6-7]</sup>将相移干涉技术引入三维形貌测量领域,提出了相位测量轮廓术。然而实际投影到场景的条纹受 Gamma

效应影响,导致正弦性不好从而影响测量结果,Lei 等<sup>[8]</sup>提出了一种将二值条纹散焦成正弦条纹,并将其投影到场景中测量物体三维信息的方法,利用解相位<sup>[9-10]</sup>后的相位得到测量物体的三维信息,该方法利用投影仪的散焦解决非线性 Gamma 效应的影响,但没有对投影仪的散焦内核进行研究。2006 年, Zhang 等<sup>[11]</sup>受 Pentland<sup>[12]</sup>散焦思想的启发,提出了通过计算幅度信息独立计算各点散焦内核进行三维信息测量的方法,称为时间散焦分析法,解决了三角测距<sup>[13-14]</sup>无法估算仅摄像机或光源可见的深度的问题。

通过比较发现,仅需拍摄同一组图像并对在时间上形成的序列进行傅里叶变换,便可得到相位信息和幅度信息,运用这两种信息对大场景进行三维形貌测量。通过实验验证发现:经傅里叶变换后,相位相减的

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-09-20; 录用日期: 2021-11-11

通信作者: \*lihongning\_yynu@126.com; \*\*ym19yangming@163.com; \*\*\*suzhouyx@hotmail.com

计算方法的精度比传统的相位测量轮廓术的计算结果高;利用相位信息,能测量出精度更高的三维信息,利用幅度信息,可测量物体在场景中的确切位置,故将两种信息相结合得到可以测量大场景三维形貌的方法。

## 2 实验原理

所提方法的基本原理为:将周期性二值图案投射到被测物表面,距投影仪不同距离的点在时间辐射度轮廓上显示出不同程度的模糊和变形,处理拍摄到的条纹图,得到被测物体表面的相位值和幅度值,从而测量物体三维信息。实验原理如图 1 所示,移动的条纹投影模式为  $I_l, l=0, 1, \dots, L-1$ , 参考面为聚焦投影的平面,其他地方均散焦。 $I_l$  为移动投影模式在点 A 处形成的条纹序列,经场景调试后点 A 移动到了点 P, 点 P 形成的条纹为  $I_l''$ , 因散焦模糊,故条纹为正弦条纹。经过相机拍摄后,点 P 的相位值在参考面上为点 A' 的相位值,  $I_l'$  为移动投影条纹在点 A' 处形成的条纹序列,  $\Delta\varphi$  为点 A 和点 A' 之间的相位差,即序列  $I_l$  和序列  $I_l''$  之间的相位差。

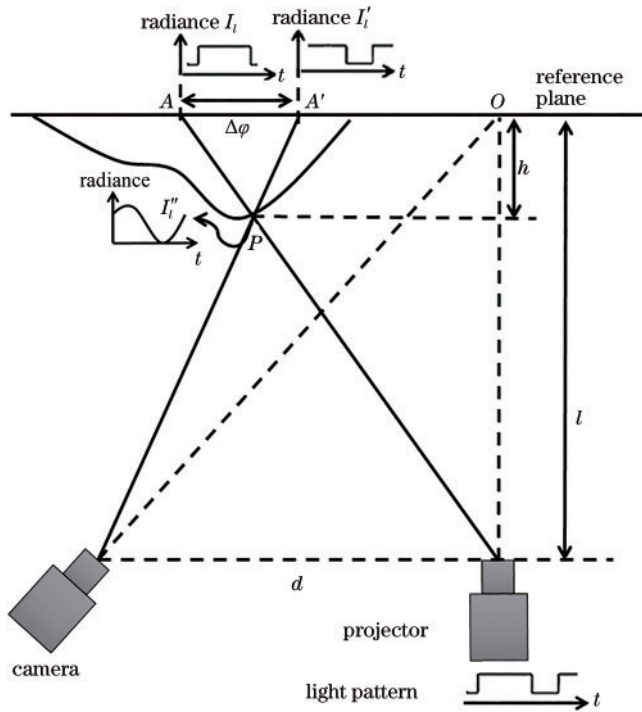


图 1 实验原理图

Fig. 1 Diagram of experimental principle

序列  $I_l, I_l', I_l''$  同时包含幅度信息和相位信息<sup>[8]</sup>, 分别表示为

$$\begin{cases} I_l = I_1'(x, y) + I_1''(x, y) \cos \phi_1(x, y) \\ I_l' = I_1'(x, y) + I_1''(x, y) \cos \phi_2(x, y) \\ I_l'' = I_2'(x, y) + I_2''(x, y) \cos \phi_2(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_1'(x, y)$  为环境光;  $I_1''(x, y)$  为调制光;  $\phi_1(x, y)$  为点 A 的相位信息;  $\phi_2(x, y)$  为点 P 与点 A' 的相位信息。

$I_l$  与  $I_l'$  处于同一平面, 故环境光与调制光一致, 但相位不同; 序列  $I_l'$  与  $I_l''$  相位一致, 但因模糊, 高频信号有所丢失。傅里叶变换后, 有

$$\begin{cases} I_l = \mathcal{F}(I_l) = A_0 + \sum_{k=1}^{L-1} A_k \cos(\omega_k l - \varphi_k) \\ I_l' = \mathcal{F}(I_l') = A_0 + \sum_{k=1}^{L-1} A_k \cos(\omega_k l - \varphi_k') \\ I_l'' = \mathcal{F}(I_l'') = A_0'' + \sum_{k=1}^{L-1} A_k'' \cos(\omega_k l - \varphi_k') \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $A$  为幅度信息, 其中  $A_0$  为环境光;  $\omega$  为角频率;  $\varphi$  为相位信息。

拍摄的场景图像均模糊, 将模糊的场景图像看作一个经低通滤波器后产生的图像。场景离投影仪越近, 条纹散焦程度越大, 此时基频振幅  $A_1''$  越大, 二次谐波振幅  $A_2''$  越小。两项相比,  $A_1''$  为低频信号,  $A_2''$  为高频信号, 由此可定义离焦度  $\theta$  为

$$\theta = \frac{A_2''}{A_1''}, 0 < \theta < 1. \quad (3)$$

根据式(3)可知, 场景离投影平面越近, 离焦度  $\theta$  越小。在固定的投影仪-相机系统中,  $\theta$  值单一对应固定的距离值, 校准得到该对应关系, 则在本系统下便可由  $\theta$  值计算场景距离, 离焦核由离焦度  $\theta$  值与距离的关系定义<sup>[11]</sup>。

由式(2)可知, 通过傅里叶变换后可以求得条纹序列的相位信息为  $\varphi_k = \arctan(B_k, C_k)$ , 直流分量的初相位信息  $\varphi_1$  无意义, 故选用基频信号的初相位角  $\varphi_2$  作为该序列的初相位值, 得到相位差公式为

$$\Delta\varphi = \varphi_2'' - \varphi_2, \quad (4)$$

式中:  $\varphi_2$  为点 A 的相位信息;  $\varphi_2''$  为点 P 的相位信息。该方法可以独立测量被测物各点相对于参考面的相位偏移量, 各点的数据误差不会被积累而影响到周围点的数据值。

结合式(3)和式(4)对物体测距进行测量, 有

$$\begin{cases} h = l - ae^{b\theta} \\ h = \frac{ld}{AA' + d}, AA' \in (0, 2\pi] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $AA' = f\Delta\varphi/2\pi$ ,  $f$  为条纹频率。运用式(5)便可以将物体具体位置和表面信息测量出来。本实验理论上只要投影条纹在时间上移动形成序列, 上述测量方法便可测量被测物的三维形状, 但序列太长会导致处理数据用时太长, 实时性不够。经分析, 最少拍摄 5 幅图像便可计算幅度信息和相位信息, 从而得到物体的三维信息。

## 3 实验结果

### 3.1 实验平台的基本描述

图 2 为搭建的实验平台, 其中光源发射器为 EPSON 301M 投影仪 (EB-C301MS), 相机型号为佳

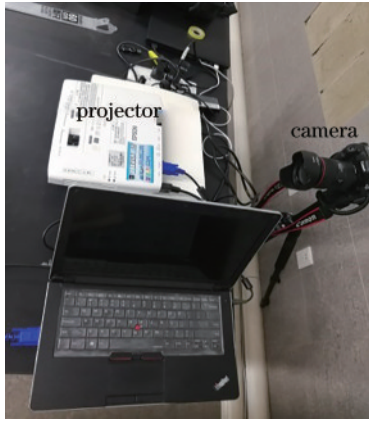


图2 实验平台

Fig. 2 Diagram of the experimental platform

能 EOS 5D Mark III, 待测物体放置在投影仪-相机系统的正前方。

### 3.2 实验结果

实验分为两个部分,首先是验证改进的相移测量轮廓术的可行性,其次是验证所提方法的可行性。

#### 1) 相位测量轮廓术改进方法的可行性验证

以白板为例,对通过傅里叶变换轮廓进行相位测量的方法与传统的相移法进行对比,实验结果如图3所示。两种方法的全局平均误差如表1所示。

由图3结果可知:传统相位计算方法在不连续表面处的测量结果不理想,且测量误差较大;改进的相位计算方法可提高对不连续深度处的测量精度,更为简便。用改进的相位测量轮廓术对不连续的平面及复杂的人脸石膏模型的三维形貌进行测量,并用 $5 \times 5$ 的中值滤波

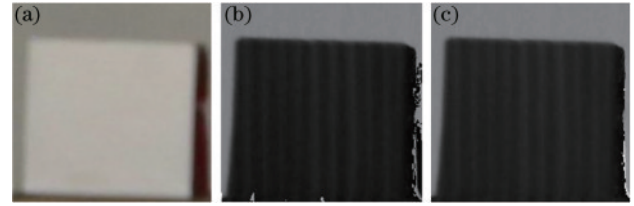


图3 相位计算方法改进前后的结果对比。(a)被测物;(b)传统相位计算方法的结果;(c)改进方法的结果

Fig. 3 Result comparison of phase calculation method before and after improvement. (a) Object to be measured; (b) result of traditional phase calculation method; (c) result of improved method

表1 相位计算方法改进前后的误差比较

Table 1 Error comparison of phase calculation method before and after improvement

Parameter	Traditional phase calculation method	Improved method
Error of phase	0.1427	0.1179

模板进行滤波,滤波后图像更为平滑,结果如图4所示。

从白盒和人脸石膏模型的测量结果来看:改进的相位计算方法计算的相位信息更易分辨,且可以测量不连续物体以及较为复杂物体的三维情况,且测量结果较好,各点独立计算且相位展开独立计算,不连续点的测量结果并不影响周围其他点的测量。

#### 2) 所提方法的可行性验证

为验证所提方法,在场景中从后往前依次摆放竖直白板,每块白板相距 50 cm,移动条纹拍摄场景,并对各板距离进行计算,结果如图5和表2所示。

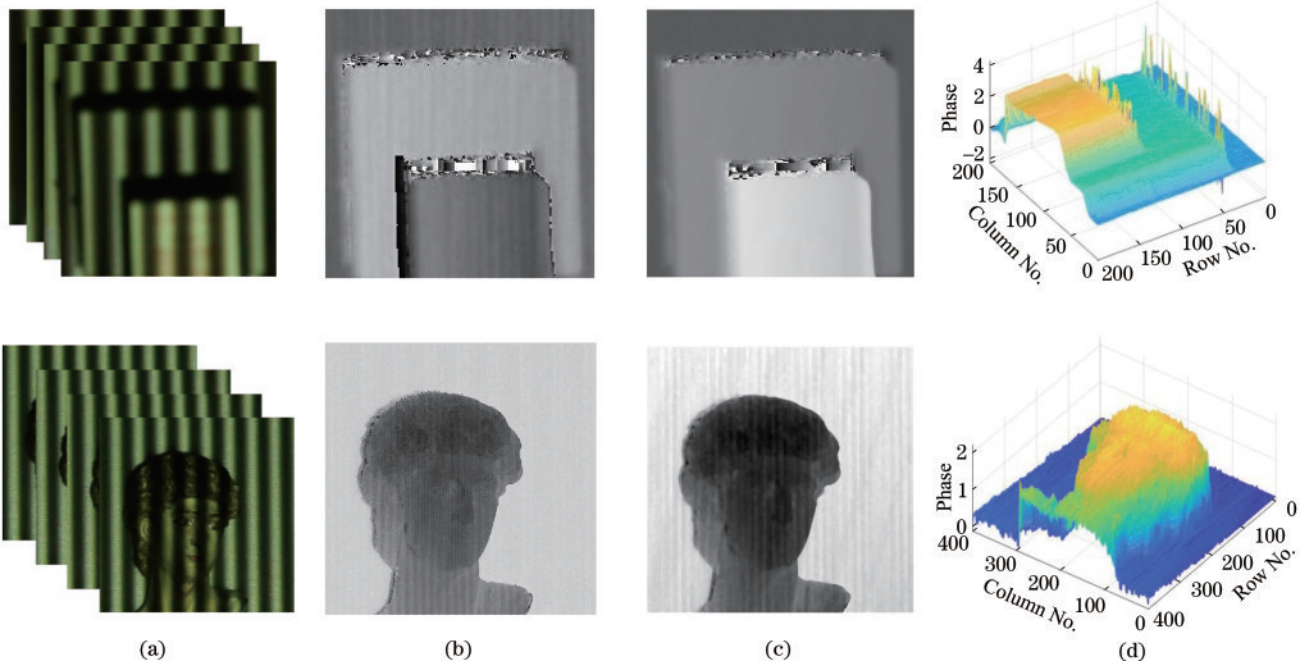


图4 改进的相位计算方法恢复的三维形状。(a)实际拍摄图像;(b)相位展开深度图;(c)相位差深度图;(d)三维结构图  
Fig. 4 Three-dimensional shape restored by improved phase calculation method. (a) Actual image; (b) depth map of phase unwrapping; (c) depth map of phase difference; (d) three-dimensional structured map

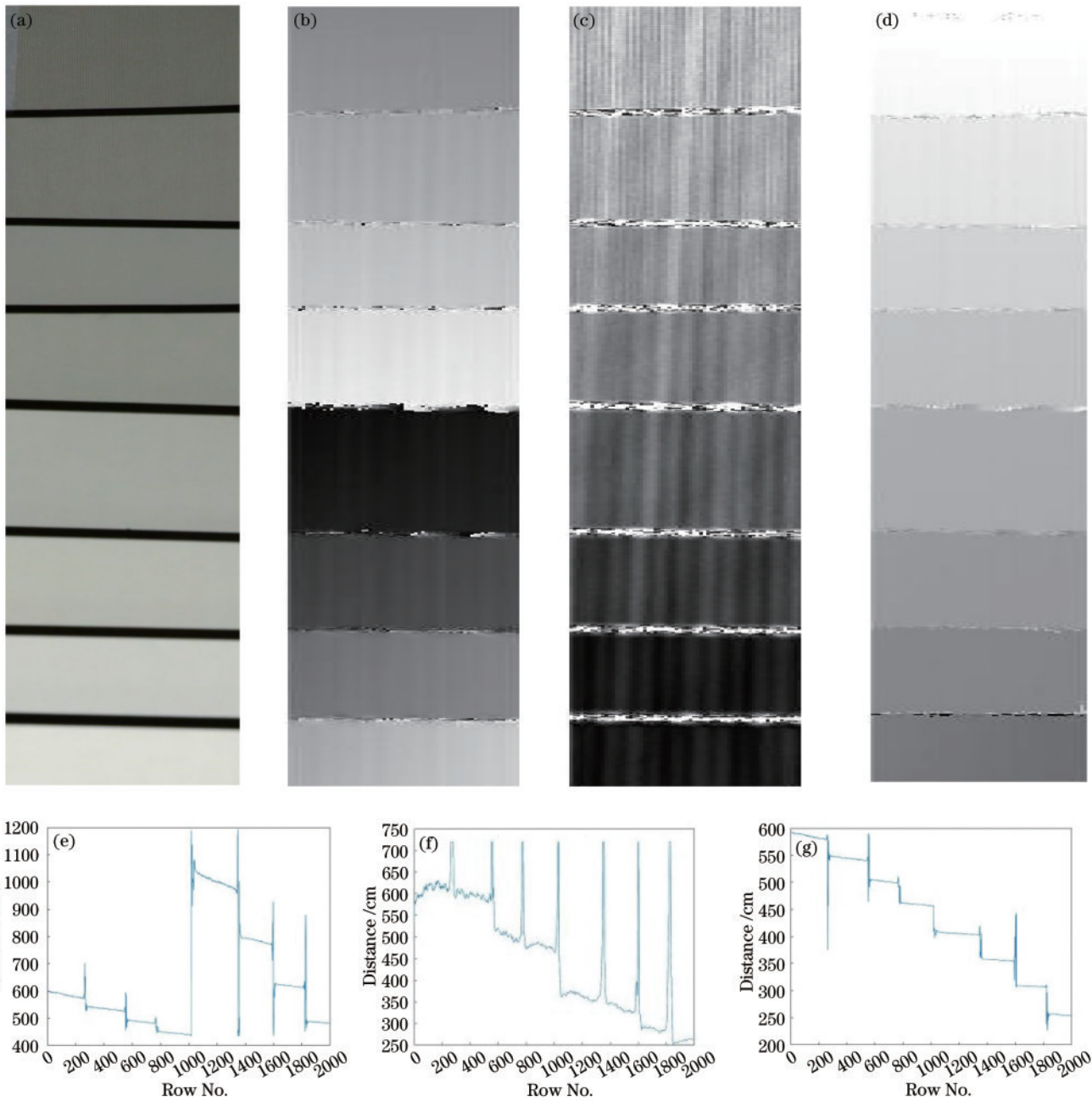


图 5 白板测试结果。(a)场景;(b)相位测量轮廓术;(c)时间散焦分析法;(d)所提方法;(e)图 5(b)中第 100 列的值;(f)图 5(c)中第 100 列的值;(g)图 5(d)中第 100 列的值

Fig. 5 Test results for whiteboard. (a) Scene; (b) phase measurement profilometry; (c) time defocus analysis method; (d) proposed method; (e) value in 100th column in Fig. 5 (b); (f) value in 100th column in Fig.5 (c); (g) value in 100th column in Fig.5 (d)

表 2 误差比较

Table 2 Error comparison

Parameter	Phase measurement profilometry	Time defocus analysis method	Proposed method
Error /cm	43.35	31.09	13.20

从图 5 可以看出:相位测量轮廓术在计算物体表面信息时,测量结果受相位影响,不利于确定物体具体位置,但恢复的物体表面信息较为准确;时间散焦分析法便于确定物体的具体位置,适合大范围场景的测量,但测量精度有待提高,在测量物体边缘时计算结果与

实际情况不符,有尖峰出现;所提方法的测量结果较好,既可确定物体在场景中的具体位置,又可得到物体表面的详细信息,且在边缘处的测量信息更准确,测量精度较前两种方法有所提升。

为验证所提方法的可行性,对复杂场景进行测量,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出:所提方法既可以确定物体在场景中的位置,也可测量物体表面信息,且能提高测量精度;但因测量场景过大,离相机较近的物体不能清晰成像而导致细节处的测量效果不好,但所提方法仍可以较好分辨出颜色相近的两个物体。

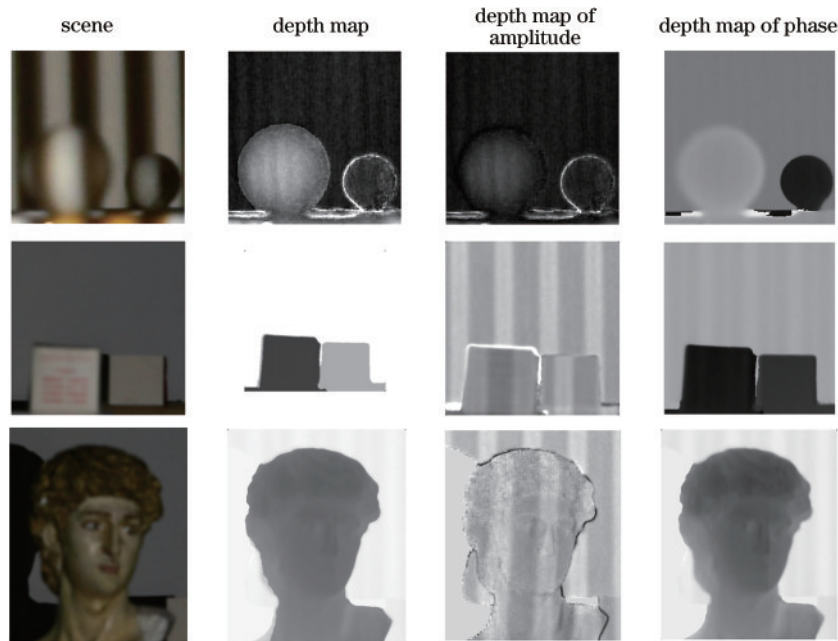


图6 所提方法的实验结果

Fig.6 Experimental results of the proposed method

## 4 结 论

结合时间散焦分析法和相位测量轮廓术,提出了大场景测量方法,并搭建实验平台对方法进行验证。实验结果表明:所提方法最少处理5张图像便可同时计算相位信息和幅度信息;幅度计算方法测量表面信息时精度不高,但可以判断物体远近;相位计算方法精度高,但不能真实反映物体远近情况。故可以结合两种方法对场景信息进行测量,但如何避免阴影出现和相位偏移还有待研究。与传统相位测量轮廓术相比,所提改进的相位测量轮廓术精度更高,对不连续物体有较好的测量结果。

## 参 考 文 献

- [1] 韩家杰,周建平,薛瑞雷,等.线结构光管道焊缝表面形貌重建与质量评估[J].中国激光,2021,48(14):1402010.  
Han J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Surface morphology reconstruction and quality evaluation of pipeline weld based on line structured light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402010.
- [2] 李英赫.三维数字技术在博物馆中的应用探究[D].呼和浩特:内蒙古大学,2013.  
Li Y H. Research on the application of three-dimensional digital technology in museums[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013.
- [3] 张凤军,戴国忠,彭晓兰.虚拟现实的人机交互综述[J].中国科学:信息科学,2016,46(12):1711-1736.  
Zhang F J, Dai G Z, Peng X L. A survey on human-computer interaction in virtual reality[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2016, 46(12): 1711-1736.
- [4] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(1): 156-160.
- [5] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [6] Zhou W S, Su X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(1): 89-94.
- [7] Malacara D. Optical Shop Testing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- [8] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [9] 文浩,姚鹏程,盖绍彦,等.基于区域量化算法的增强型双频解相位方法[J].光学学报,2021,41(12):1212003.  
Wen H, Yao P C, Gai S Y, et al. Enhanced dual-frequency phase unwrapping method based on regional quantification algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1212003.
- [10] 刘超,盖绍彦,达飞鹏.结构光测量中分区域相位误差补偿方法研究[J].中国激光,2018,45(6):0604002.  
Liu C, Gai S Y, Da F P. Sub-regional phase error compensation for structural light measurement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0604002.
- [11] Zhang L, Nayar S K. Projection defocus analysis for scene capture and image display[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 907-915.
- [12] Pentland A P. A new sense for depth of field[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(4): 523-531.
- [13] Huang P S, Zhang C P, Chiang F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. Optical Engineering, 2003, 42: 163-168.
- [14] Davis J, Nehab D, Ramamoorthi R, et al. Spacetime stereo: a unifying framework for depth from triangulation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 296-302.