

光学学报

一种二值编码条纹聚焦投影的三维测量方法

严飞^{1,2}, 祁健¹, 刘银萍³, 吴迪¹, 刘佳^{1,2*}

¹南京信息工程大学自动化学院, 江苏 南京 210044;

²江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044;

³南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

摘要 针对离焦投影二值条纹生成正弦条纹进行测量时, 条纹对比度和测量景深降低的问题, 提出了一种聚焦投影二值编码条纹的结构光测量方法。以正弦条纹单周期内的强度值为规律, 对二值条纹进行编码。按特定方式对编码后的二值条纹进行处理后, 可生成用于实际测量的正弦相移条纹。同时, 结合二加一相移算法进行改进, 复用获取正弦条纹的二值条纹来生成测量所需的背景灰度图像, 减少一幅均匀平面图案的投影, 进而提高测量速度和精度。实验结果表明, 所提方法以标准球为实验对象, 测得的均方根误差为 0.0425 mm。在投影仪全程聚焦的情况下, 采用二值条纹进行测量, 在避免非线性影响的同时, 能够减少对正弦条纹对比度和测量景深的影响, 进而可获取高精度的重建结果。

关键词 测量; 三维测量; 离焦投影; 二值编码; 条纹对比度; 测量景深

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2212002

Three-Dimensional Measurement Method for Binary-Coded Fringe Focus Projection

Yan Fei^{1,2}, Qi Jian¹, Liu Yinping³, Wu Di¹, Liu Jia^{1,2*}

¹School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

²Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

³School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract Considering the problem of the reduced fringe contrast and measured depth of field when the defocused projection of binary fringes is used to generate sinusoidal fringes for measurement, a structured light measurement method based on the focused projection of binary-coded fringes is proposed. Taking the intensity value of sinusoidal fringes in a single cycle as the law, the binary fringes are encoded, and the encoded binary fringes are processed in a specific way to generate sinusoidal phase-shift fringes that can be used for the actual measurement. Meanwhile, with the two-plus-one phase shift algorithm, the background gray image required for the measurement generated by the binary fringes is reused, which reduces the projection of a uniform plane pattern and improves the measurement speed and accuracy. The experimental results indicate that by taking the standard sphere as the research object, the proposed method can achieve a measured root-mean-square error of 0.0425 mm. When the projector is in focus all the time, binary fringes are employed for measurement, which can avoid the influence of nonlinearity, reduce the influence on the contrast of sinusoidal fringes and the measured depth of field, and yield high-precision reconstruction results.

Key words measurement; three-dimensional measurement; defocused projection; binary code; fringe contrast; depth of field measurement

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-25; 录用日期: 2022-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(61605083)、江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目(BE2020006-2)

通信作者: *liujia@nuist.edu.cn

1 引言

光学三维测量技术^[1]在现代测量中具有重要的意义。在众多三维测量技术中,条纹投影轮廓术具有结构简单、精度高、速度快、成本低和易实现等优点,其在工业和科学研究领域中都有较为广泛的应用^[2-3]。投影条纹到被测物体表面上,利用相机采集并分析受物体表面高度调制的图像,进而测得物体的三维面形数据。商用的数字投影仪通常是一种非线性设备,设计时专门考虑到了人类视觉的补偿。若不校正数字投影仪和相机存在的 Gamma 非线性效应,则会在测量结果中引入非线性误差。因此,为了使用条纹投影轮廓术进行高精度的三维面形测量,对投影仪进行 Gamma 校正是非常有必要的。

许多研究提出了对非线性问题进行校正的方法,如主动改变投影条纹^[4]和被动补偿相位误差^[5-6]。此外,Lei 和 Zhang^[7]经过实验发现,投影仪的非线性 Gamma 影响实际上和时间是同步进行变化的,因此在实验中需要频繁进行重新校准操作,于是提出了二值方波离焦技术。二值离焦技术仅采用了一位二元结构光图案,故其不受非线性的影响。二值离焦技术通过使投影的焦平面远离物体而使投影的图案混合在一起,以形成用于实际测量的正弦条纹图案。传统的正弦条纹需要 8 位二元结构光图案,故投影速度会受到投影仪最大帧率的限制,而采用二值离焦技术只需要利用投影仪设备的 1 bit 投影模式,进而大大提升了投影速率。Ayubi 等^[8]提出了基于正弦脉宽调制的一维调制离焦技术来获取正弦条纹。通过在正弦信号中加入载频和对其进行限幅的操作,将正弦条纹变成稍微离焦就可以得到正弦条纹的二值条纹。此后,随着一维调制技术在三维测量方向的应用和发展,二维面积调制技术^[9-10]被应用到三维测量领域中,当投影仪未完全对焦时,对局部像素进行调制、离焦以创建更多灰度值来提高条纹质量。当条纹图案密集且投影仪几乎聚焦时,就能大幅降低相位误差。

由于存在高频谐波的影响,故离焦会使测量精度降低。同时,深度测量范围较小。因此,需要将物体放置在一个合适的区域内,才能在物体表面生成高质量的正弦条纹^[11]。然而,在实际测量中,大多数现有校准技术都要求投影仪处于聚焦位置处,故校准更为复杂^[12]。针对上述问题,本文在不采用离焦技术的情况下,对二值条纹进行独特编码,使之经过特定算法后可生成所需的正弦条纹图案,进而测得物体的三维形貌,并通过仿真和实验进行验证。同时,为了兼顾测量速度,结合二加一相移方法^[13]对所提方法进行优化,以减少一幅平面图案的投影。实验结果表明,所提方法能够在全程聚焦的情况下投影二值编码条纹完成物体的形貌测量,并且可以有效避免非线性的影响。

2 相移法原理

2.1 相移技术

相移技术^[14]因其精度高、不受物体表面剧烈变化或断裂影响等优点而被广泛应用^[15]。以三步相移算法求解截断相位为例,相机采集回受物体表面高度调制的变形条纹图像,对采集回来的图像进行运算就能获得截断相位数据,原理如图 1 所示。采集的相移图像可以表示为

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{(n-1) \times 2\pi}{N} \right], \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为像素坐标; I_n 为采集到的正弦图像; n 为采集图像的序号; A 为平均光强; B 为调制光强; φ 为待求解的相位主值; N 为相移步数。截断相位的表达式为

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

由于式(2)为反正切运算,计算出的相位主值会被截断在 $(-\pi, \pi]$ 之间,故相位主值也被称为截断相位。为保证全场相位的连续性,后续需要对截断相位进行展开。

2.2 二加一相移算法

根据 2.1 节的相移算法,传统的三步相移条纹图像可以表示为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) - \frac{2\pi}{3} \right], \quad (3)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) \right], \quad (4)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) + \frac{2\pi}{3} \right]. \quad (5)$$

为了减轻运动造成的测量误差,将第三幅图像替换为均匀的背景图像,并选择一个相移,称为改进的相移算法。因此,三幅图像的表示变为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin \left[\varphi(x, y) \right], \quad (6)$$

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\varphi(x, y) \right], \quad (7)$$

$$I_3(x, y) = A(x, y). \quad (8)$$

与三步相移算法相比,改进的相移算法仅用两幅条纹图像进行编码,第三幅图像对运动的敏感度低于带有条纹的图像,因此该相移算法的测量误差较小。此时,截断相位可表示为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_3} \right). \quad (9)$$

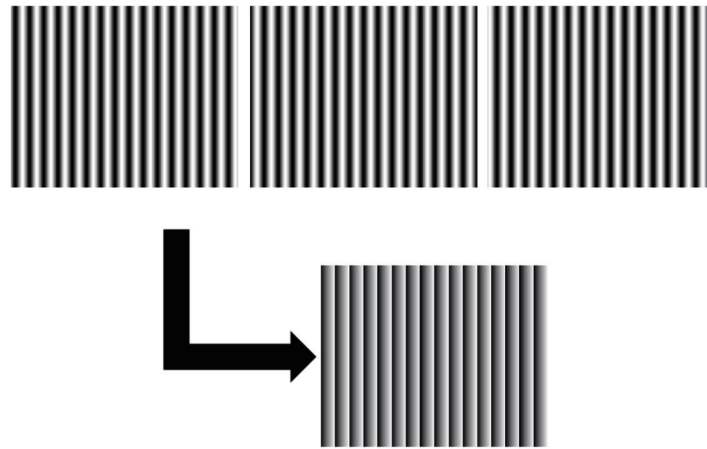


图 1 相移法原理

Fig. 1 Principle of phase shift method

3 聚焦投影二值编码条纹方法

3.1 二值条纹编码策略

本文提出了一种编码方法,该编码方法采用二值编码与相移技术相结合的编码策略。利用传统 DLP 投影仪投影二值条纹较灰度条纹投影速度更快,并且具有避免非线性影响的好处。图 2 为构造的二值编码

图案,实验通过处理 8 幅编码图案获取正弦条纹。参考正弦条纹单个周期光强变化的规律和对称特性,将 8 幅二值图案编码成为单个周期内两端白色条纹逐渐向中间位移的编码图案,即将正弦条纹对称地拆分成不同的区间,整体呈三角波样式,其余周期图案通过位移实现。

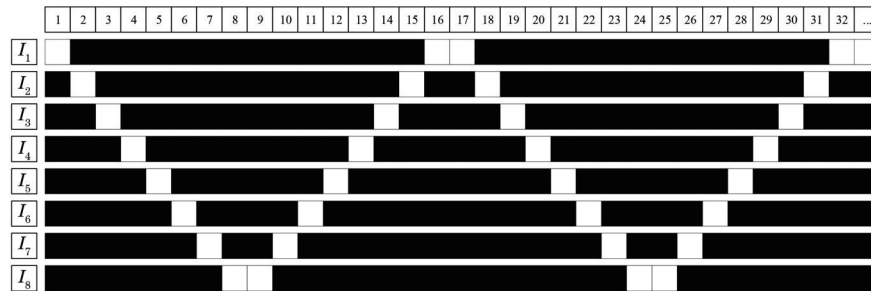


图 2 二值条纹编码示意图

Fig. 2 Schematic diagram of binary fringe coding

图 2 中黑色代表强度值为 0,白色代表强度值为 255,可见半个周期内组成的列向量线性无关。对采集的 8 幅图案和 1 幅全黑的图案进行处理即可获得正弦条纹,相关处理可以描述为

$$I_M = \left\{ \sum_{n=1}^8 (I_n - I_b) \times \left\{ \sin \left[\frac{(n - 4.5) \times \pi}{8} \right] + 1 \right\} \right\} / 2, \quad (10)$$

式中: I_M 为获得的正弦条纹图像; I_b 为全黑图像,用于补偿因实际测量时黑色光强值并不为 0 引入的误差,其处理原理如图 3 所示。利用二值编码图案生成的正弦条纹图案理论上是标准的正弦相移图案,而实际测量中由于利用多张二值图像来生成正弦条纹图像,故图像像素点强度值连续性稍弱于直接投影的正弦条纹图像,像素数据具有离散性。直接采集正弦条纹图像的过程中可能存在的噪声,这会导致采集图像中部分像素点强度值出错,而所提方法中二值图案同列中只

存在一列白色条纹,在生成正弦条纹图像时,对像素点强度值进行离散化处理的方式在一定程度上增加了抗噪性。

3.2 基于二加一相移算法的优化方法

使用多幅二值条纹图像叠加重生成正弦条纹图像将会降低一定的重建帧率,而二加一相移算法因为采用更少的相移图像,故能改善方法的速度性能,但需投影一幅额外的背景图案。同时,当将生成的正弦条纹图像与采集投影仪投影的平面图像数据代入到式(9)中进行运算解相时,由于方法生成正弦条纹时是对多幅图像进行运算处理的,因此可能会导致生成的正弦条纹图像与采集的投影仪投影的平面图像的平均光强不一致,这很可能会引入误差。

在 3.1 节中,用于生成正弦条纹图像的二值编码条纹图像已经提取到了每一列的白色光强,故复用各列白色条纹构成所需白场平面图像即可,进而可以减少额外所需的一幅平面图像的投影。获取的平面图像

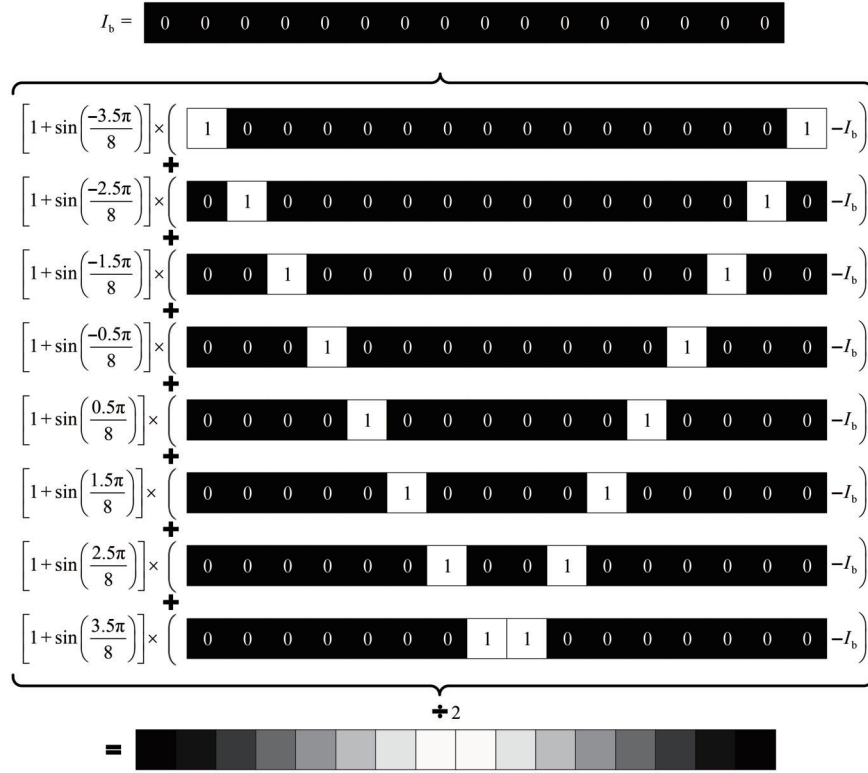


图 3 单个周期图像处理原理图

Fig. 3 Schematic diagram of single cycle image processing

可以表示为

$$I_m = \sum_{n=1}^8 (I_n - I_b). \quad (11)$$

利用二值编码生成的两幅正弦相移 (I_{M1} 、 I_{M2}) 和对应的白场平面图像 (I_{m1} 、 I_{m2}) 可以表示为

$$I_{M1}(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin[\varphi(x, y)], \quad (12)$$

$$I_{M2}(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y)], \quad (13)$$

$$I_{m1}(x, y) = A(x, y) + B(x, y), \quad (14)$$

$$I_{m2}(x, y) = A(x, y) + B(x, y). \quad (15)$$

当 $A(x, y) = B(x, y)$ 时, 构成的平面图像与生成的正弦条纹图像平均光强一致, 此时截断相位可以表示为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left(\frac{I_{M1} - \frac{I_{m1}}{2}}{I_{M2} - \frac{I_{m2}}{2}} \right), \quad (16)$$

由于式 (16) 是相减运算, 故降低了叠加图像求解截断相位的误差。求解截断相位的原理如图 4 所示。

4 实 验

为了验证所提方法的可行性和优越性, 进行了与传统三步相移方法和十二步相移方法的对比实验, 实验中参考和采用的正弦条纹周期数均为 32。实验所搭建的测量系统主要包括分辨率为 912 pixel × 1140 pixel 的 DLP 投影仪 (Light Crafter 4500) 和分辨

率为 1280 pixel × 1024 pixel 的工业相机 (Point Grey FL3-U3-13Y3M-C)。

4.1 条纹对比度、鲁棒性和精度评价实验

为了证实所提方法的鲁棒性和生成正弦条纹后所提方法对条纹对比度的影响较小, 利用所提方法与传统相移方法对直径为 50.8140 mm 的标准球进行测量, 并对测量结果进行了精度评价。实验中环境和投影照明亮度始终保持不变。图 5(a) 为传统正弦条纹图像, 图 5(b) 为所提方法生成的正弦条纹图像。显然, 所提方法与传统方法获取的正弦图像平均亮度并不一致, 验证了 3.2 节中若采集直接投影的灰度平面图像数据与生成的正弦条纹图像一起计算, 将引入误差的结论。以均方根对比度方式计算采集的投影仪投影的正弦图像和所提方法生成的正弦条纹图像的对比度。采集投影仪投影的正弦图像对比度的计算结果为 20.6212, 而所提方法的对比度结果为 21.0821。对比度数据结果表明, 与离焦方法相比, 3.1 节中的方法对正弦条纹对比度的影响较小。

为了测试所提方法的鲁棒性, 将标准球物体放置于不同的测量距离处, 以采集不同光强的条纹图像进行测试, 实验结果如图 6 和图 7 所示。图 6 为重建的标准球点云数据。从图 6(a) 可以发现, 远距离测量物体时点云较为稀疏, 物体表面点云波动较大。从图 7(a) 所示的重建结果可以看出, 十二步相移法和所提方法得到的点云数据较三步相移法波动较小。从图 7(b) 所示的重建结果可以看出, 在投影仪对焦平面附近进行测量时, 重建结果均较好, 同时所提方法的重建结果

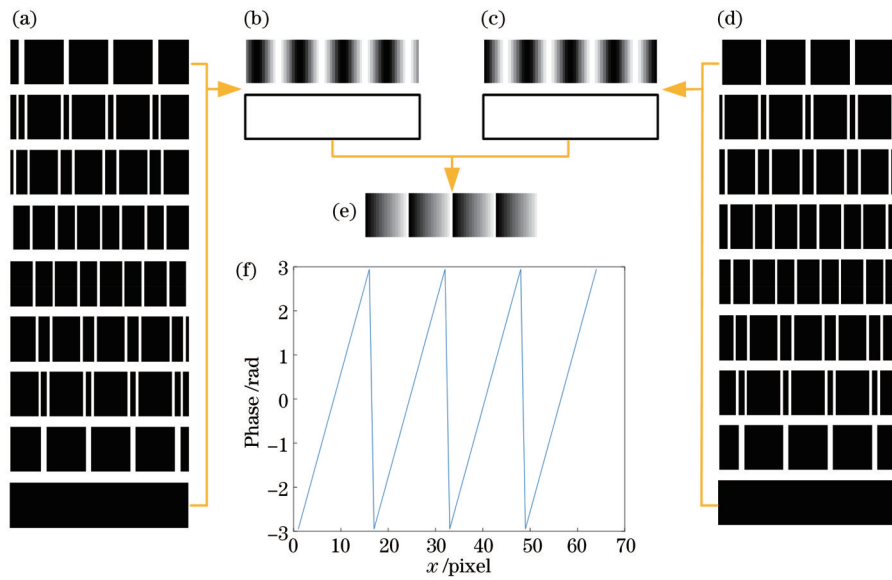


图 4 截断相位求解原理。(a)用于生成第一幅正弦图像的二值编码图像;(b)由图4(a)生成的正弦图像和平面图像;(c)由图4(d)生成的正弦和平面图像;(d)用于生成第二幅正弦图像的二值编码图像;(e)截断相位图像;(f)截断相位截面曲线
 Fig. 4 Principle of wrapped phase solution. (a) Binary coded images used to generate first sinusoidal image; (b) sinusoidal and planar images generated from Fig. 4(a); (c) sinusoidal and planar images generated from Fig. 4(d); (d) binary coded images used to generate second sinusoidal image; (e) wrapped phase image; (f) section curve of wrapped phase

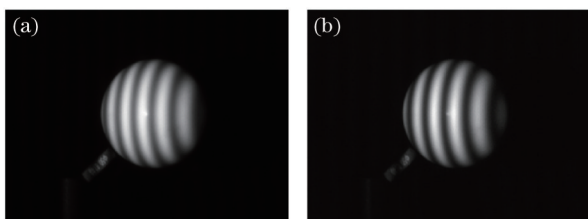


图 5 正弦条纹图像。(a)投影的正弦条纹图像;(b)所提方法生成的正弦条纹图像
 Fig. 5 Sinusoidal fringe images. (a) Projected sinusoidal fringe image; (b) sinusoidal fringe image generated by proposed method

较三步相移方法更光滑,与十二步相移法结果接近。然而,近距离测量采集正弦条纹图像时,被测物体离投影仪过近引起了过曝,导致图像中过曝区域的灰度值错误,进而造成解相错误,这会使得重建表面局部缺失,如图 6(c)和图 7(c)所示。所提方法在相同测量条件下,测量质量同样会受到一定影响,但仍可以获取较为正确的点云数据,并能较完整地重建出物体的三维面形。实验结果证明,所提方法在不同测量距离下对投影仪光照影响的鲁棒性较传统相移方法更好。

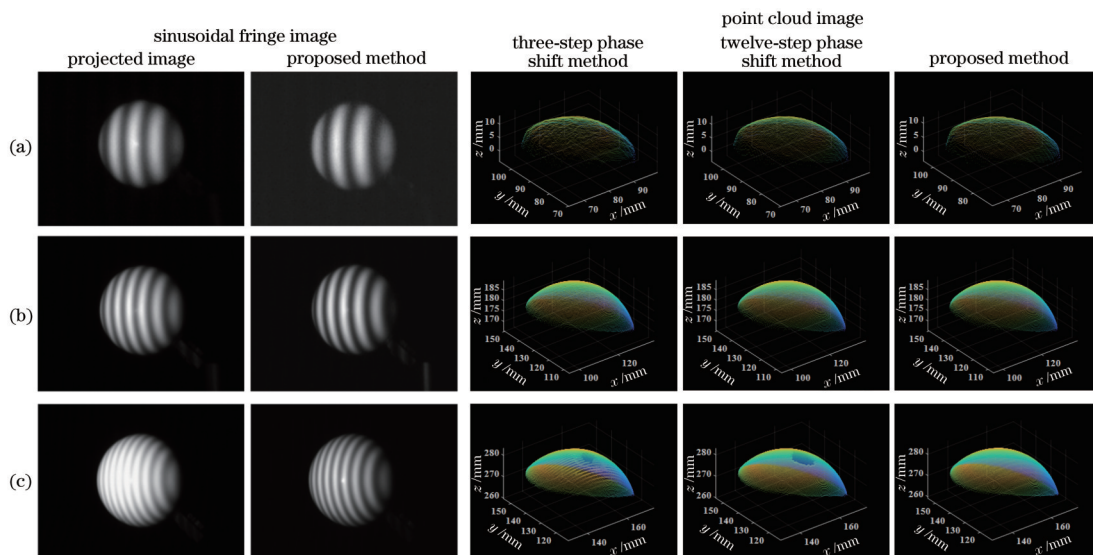


图 6 重建的点云数据。(a)远距离测量;(b)对焦平面附近测量;(c)近距离测量
 Fig. 6 Reconstructed point cloud data. (a) Distance measurement; (b) measurement near focal plane; (c) close measurement

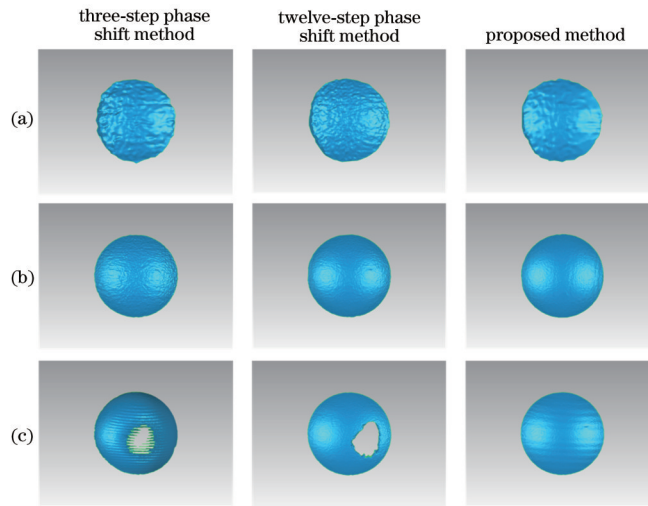


图 7 标准球重建结果。(a)远距离测量;(b)对焦平面附近测量;(c)近距离测量

Fig. 7 Reconstruction results of standard ball. (a) Distance measurement; (b) measurement near focal plane; (c) close measurement

为了评价所提方法的测量精度,在测量点云数据的基础上拟合标准球,拟合结果如图 8 所示。对标准球的球体拟合误差分析结果显示在表 1 中,所提方法

拟合的球体直径为 50.814064 mm,均方根误差(RMSE)为 0.0425 mm。

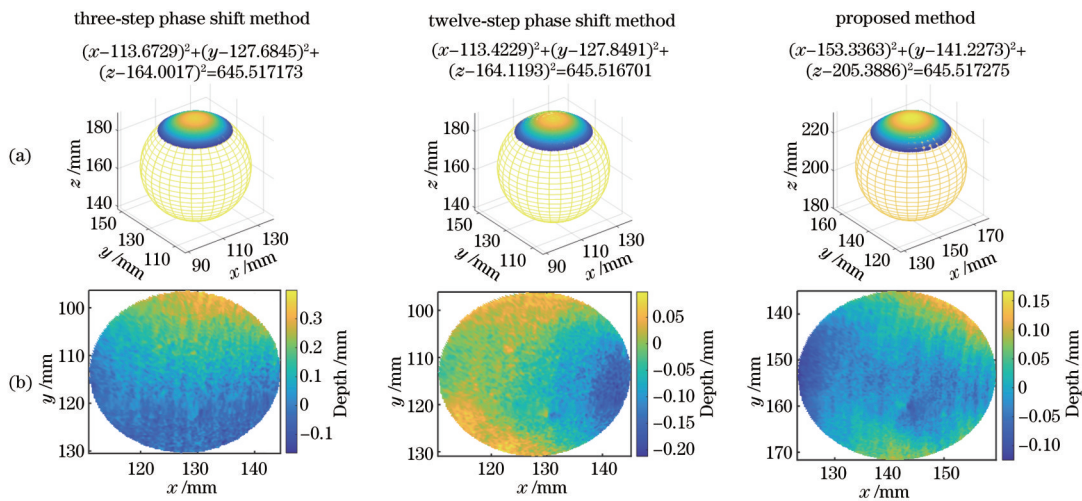


图 8 球体拟合结果。(a)拟合的球体;(b)深度分布

Fig. 8 Fitting results of sphere. (a) Fitted sphere; (b) depth distribution

表 1 球体拟合误差分析结果

Table 1 Analysis results of sphere fitting error unit: mm

Method	Fitted sphere diameter	RMSE
Three-step phase shift	50.814060	0.1165
Twelve-step phase shift	50.814041	0.0725
Proposed	50.814064	0.0425

4.2 小深度物体测量实验

该实验分别使用三步相移方法、十二步相移方法和所提方法测量一块标定板,引用文献[16]中的时间相位展开方法获取展开相位。重建结果如图 9 所示,图 9 中第一列为采集的变形条纹图案,仅从重建的结果无法直接比对。由于标定板精度较高,因此可看作

理想平面,对采集的多行点云数据进行直线拟合,拟合分析结果如表 2 所示。结果表明,所提方法均方根误差为 0.085 mm,误差平方和(SSE)为 2.895 mm,较三步相移方法精度更高,与十二步相移法结果较为接近。

4.3 较大深度物体测量实验

二值离焦测量方法相对于直接投影正弦条纹测量方法景深更小,但二值条纹离焦图案在一定范围内才能形成正弦性较好的条纹图像,且对于测量深度较大的物体,离焦程度往往难以把控。为了验证所提方法对景深的影响较小,进行了与传统正弦条纹投影测量方法的对比实验,实验对一深度为 160 mm 的石膏头像进行测量,重建结果如图 10 所示。从实验结果可以看出,三步相移方法因受到投影仪 Gamma 等非线性的

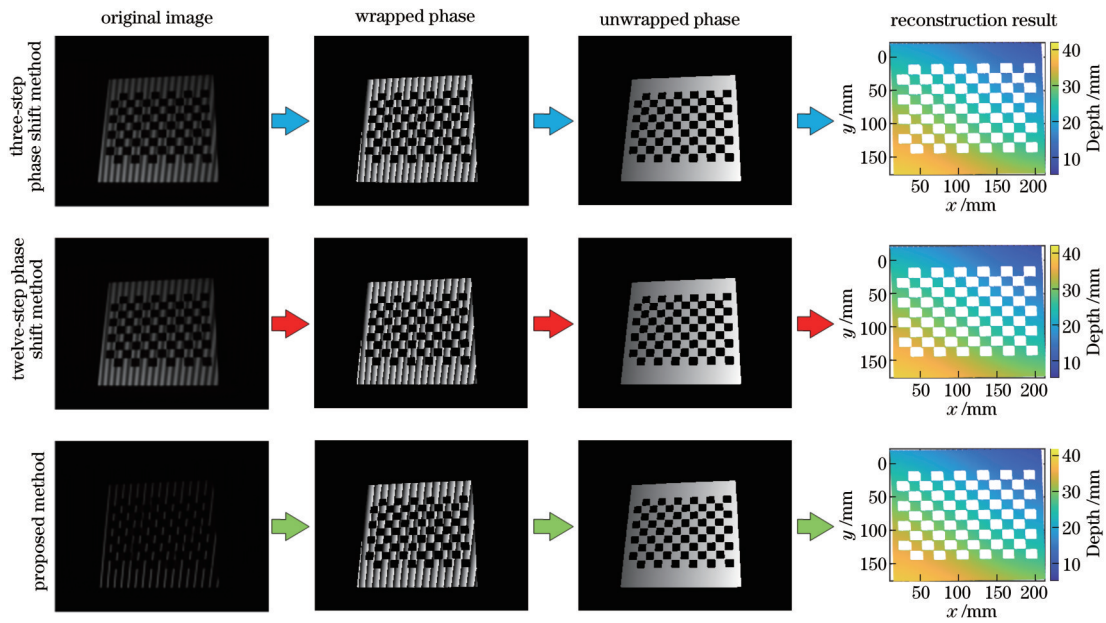


图 9 标定板实验重建结果

Fig. 9 Experimental reconstruction results of calibration plate

表 2 标定板直线拟合误差分析结果

Table 2 Analysis results of linear fitting error of calibration plate unit: mm

Method	RMSE	SSE
Three-step phase shift	0.106	4.456
Twelve-step phase shift	0.083	2.755
Proposed	0.085	2.895

影响,重建的物体表面上出现了水波纹样式的重建错误。然而,所提方法能够正确地重建出物体的三维形貌,证明该方法能够较好地避免非线性的影响。同时,所提方法的重建结果与精度非常高的十二步相移方法接近,但离焦时所提出方法将会降低测量的景深。由于全程聚焦测量,故所提方法对于测量深度基本无

影响。

5 结 论

针对离焦测量时条纹对比度和测量景深降低的问题,提出了一种聚焦投影二值编码的三维测量方法。对二值条纹进行特殊编码使其在处理后能够生成用于实际测量的正弦条纹图像。在整个三维测量过程中,投影仪始终处于聚焦状态。与传统离焦二值条纹图像生成正弦图的方法相比,所提方法生成的正弦条纹对条纹对比度的影响较小,对测量深度基本无影响,能够在投影仪全程聚焦的情况下,实现较高精度的测量。相对于传统相移方法,所提方法的图像投影速度更快,且能够避免非线性的影响。实验结果还表明,对于不同的测量距离,所提方法较传统相移方法对于投影光

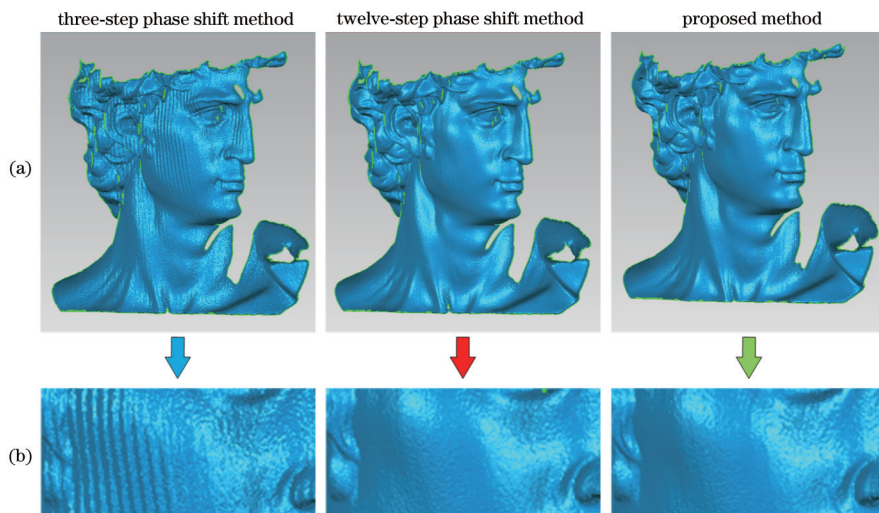


图 10 石膏头像重建结果。(a)整体结果;(b)局部放大结果

Fig. 10 Reconstruction results of plaster head. (a) Overall results; (b) local magnification results

照的鲁棒性更好。同时,所提方法复用生成正弦条纹图像时构造的各列白色条纹可构成所需的平面图像,进而减少了一幅平面图像的投影,改善了所提方法的速度性能。然而,相对于二值离焦方法,所提方法需增加投影图像,故后续需对所提方法进行分析和完善,以改善方法的综合性能,进一步提高三维测量的速度和精度。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] 汪锦航, 卢荣胜, 刘端茂. 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1912001.
Wang J H, Lu R S, Liu D M. Adaptive fringe projection measurement method for high dynamic range surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1912001.
- [3] 杨超智, 曹益平. 基于单帧四灰阶条纹投影的实时相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1812003.
Yang C Z, Cao Y P. Real-time phase measuring profilometry based on single-shot four-grayscale fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1812003.
- [4] Kakunai S, Sakamoto T, Iwata K. Profile measurement taken with liquid-crystal gratings[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(13): 2824-2828.
- [5] Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [6] Guo H W, He H T, Chen M Y. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2906-2914.
- [7] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [8] Ayubi G A, Ayubi J A, di Martino J M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [9] Xian T, Su X. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(8): 1201-1206.
- [10] Lohry W, Zhang S. 3D shape measurement with 2D area modulated binary patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(7): 917-921.
- [11] Xu Y, Ekstrand L, Dai J F, et al. Phase error compensation for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2572-2581.
- [12] Memer L, Wang Y J, Zhang S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 514-519.
- [13] Zhang S, Yau S T. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(11): 113603.
- [14] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105.
- [15] 师力力, 刘卫国, 田爱玲, 等. 时间相位解包裹算法的抗噪性能对比研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1212006.
Shi L L, Liu W G, Tian A L, et al. Comparison on noise resistance of temporal phase unwrapping algorithms [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1212006.
- [16] Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary Gray-code light [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 574-579.