

文章编号:1002-2082(2018)04-0522-06

基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法

邱磊,钱斌,伏燕军,钟可君

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,江西 南昌 330063)

摘要:在现有的针对复杂物体表面形貌的三维测量方法中,为了完成绝对相位的测量,通常需要处理至少6幅条纹图像,限制了测量速度。提出了采用2幅正弦条纹和2幅三角波条纹图来获得物体三维形貌的方法。利用两步相移正弦条纹和两步相移三角条纹得到截断相位,再利用两步相移三角波条纹得到条纹级次,减少了投影条纹幅数,提高测量速度。在得到条纹级次时,计算三角波条纹强度调制和强度对比度,与计算相位相比,可以减少数据处理的时间,进一步提高测量速度,同时能减小物体表面反射率的影响,提高了测量精度。测量最大高度为39 mm的阶梯状标准块,得到的最大绝对误差和最大的RMS误差分别为0.045 mm和0.041 mm。验证了该方法的有效性和实用性,在高速实时的复杂形貌三维测量中有广泛的应用前景。

关键词:三维测量;相移法;三角波条纹;相位测量;

中图分类号:TN206; TP391.4

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0403002

Three-dimensional shape measurement method based on sinusoidal and triangular fringe projection

Qiu Lei, Qian Bin, Fu Yanjun, Zhong Kejun

(Key Laboratory of Nondestructive Testing (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In the existing three-dimensional measurement method for the surface topography of complex objects, in order to complete absolute phase measurement, it is usually necessary to process at least 6 fringe images, which limits the measurement speed. A method for obtaining three-dimensional shape of object by using two sinusoidal fringes and two triangle wave fringe patterns was proposed. The two-step phase-shifting sinusoidal fringe and two-step phase-shifting triangular wave fringe were calculated to obtain the wrapped phase, then the two-step phase-shifting triangular wave fringe was used to determine fringe order. Due to the decrease in number of projection images, the speed of measurement increased. In order to obtain the fringe order, the triangular wave fringe intensity modulation and intensity ratio were calculated. Compared with the calculation of the phase, the data processing time can be reduced, and the measurement speed can be further increased. At the same time, the influence on the surface reflectance can be reduced, and the measurement accuracy can be improved. For measuring the stepped standard block with maximum height of 39 mm, the maximum absolute error and the maximum root-mean-square (RMS) error are 0.045 mm and 0.041 mm, respectively. Experimental results demonstrate that the proposed method is effective and practical, the benefits are seen in the high-speed, real-time 3-D shape measurement of complex objects.

收稿日期:2018-01-15; 修回日期:2018-04-03

基金项目:国家自然科学基金(61661034);江西省重点研发计划(2017BBE50012)

作者简介:邱磊(1989—),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事光学三维测量技术研究工作。E-mail:1576020068@qq.com。

Key words: 3D shape measurement; phase-shifting; triangular wave fringe; phase measurement

引言

条纹投影轮廓术中,提高三维形貌测量速度的方法主要有,提高投影速度、减少投影条纹的数量和缩短数据处理时间。相对于传统条纹投影轮廓术,提出了基于相位和强度比的三维测量方法,傅里叶变换轮廓术和相移法是基于相位计算的方法。傅里叶变换轮廓术只需要一帧图像来计算连续相位。格雷码加相移^[1]是实现复杂形状物体测量的典型方法。然而,为了辅助高频条纹相位展开,需要投影多个格雷码条纹,限制了测量速度。文献[2]提出了一种快速三步相移的方法来实现高精度的实时三维测量。文献[3]提出了一种彩色条纹编码方法,以加快测量速度,但是,颜色串扰问题将降低测量精度。文献[4]提出了一种2+1相移算法,用2幅相移 $\pi/2$ 的正弦条纹和一幅单强度条纹来得到物体三维形貌,可以减少因物体运动而引起的误差。文献[5]提出了一种阶梯相位编码条纹加相移方法,利用四步相移条纹得到包裹相位,利用相位编码条纹计算条纹阶。然而,这些方法大多需要复杂的计算,如傅里叶变换轮廓术和相移法需要计算反正切函数,傅里叶变换轮廓术还需计算傅里叶变换,这些计算均比基于强度比的四则运算更复杂。因此,为了提高数据处理的速度,提出了一种基于强度比的三维测量方法。Miyasaka T 和 carrihill B^[6]提出了一种基于强度比的深度传感方法,只需要投影2幅图,一幅线性的灰度图和一幅白板图,计算每2个相邻像素之间的强度比,通过强度比得到物体的三维信息,这种方法测量速度快,但测量精度低。基于此,文献[7]提出了投影锯齿波条纹和三角波条纹的方法,可以减少图像噪声对测量精度的影响。弗洛雷斯^[8]提出了一种消除由投影仪伽马效应导致三角波条纹失真的方法。文献[9]提出了一种基于计算强度比的梯形相移的方法,该方法能减小离焦对测量精度的影响。文献[10]提出了一种基于计算强度比的两步相移三角波条纹方法,只需投影2帧条纹就可以得到绝对相位。在他们方法的基础上,文献[11]提出了用2幅正弦条纹和2幅强度呈线性变化的单周期条纹来求得包裹相位和条纹级次,可以测量复杂物体表面形貌。Hyun

等人^[12]提出了一种超快绝对相位恢复方法,投影3幅二进制离焦条纹和2幅相位编码条纹,利用测量系统的几何约束条件校正条纹级次,实现了精确的相位解包裹。为了进一步提高测量精度,本文提出一种基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法。相较于传统正弦条纹投影的三维测量方法,该方法只需分别投影2幅正弦条纹和2幅三角波条纹,就可以实现复杂物体的快速测量。同时,计算三角波条纹强度调制和强度对比度,与计算相位相比,可以减少数据处理的时间,进一步提高测量速度,在高速、实时的三维测量上有广泛的应用前景。本方法利用相移分别为 $\pi/2$ 的2幅正弦条纹和2幅三角波条纹求得截断相位,通过两步相移的三角波条纹求得条纹级次,通过求三角波条纹的强度对比来求得条纹级次能减小物体表面反射率的影响。

1 测量原理

1.1 三维测量系统原理

图1是三维测量系统原理图,由投影仪、CCD相机、计算机、参考平面等组成。投影仪依次投射正弦条纹和三角波条纹,CCD相机在另一方位拍摄被物体表面形貌调制的变形条纹。

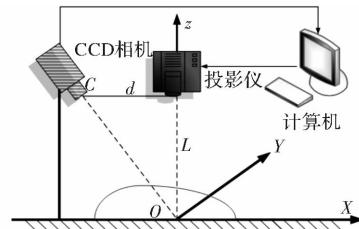


图1 三维测量系统原理

Fig. 1 Principle of 3D measurement system

投影仪与CCD相机的光轴相交于参考平面上的O点。投影仪和CCD相机为同一高度,它们之间距离为d。投影仪光轴与参考平面垂直,它们之间距离为L。通过分析采集的图像计算出相位分布,再根据相位与高度关系可以重建出待测物体高度,计算公式为

$$h = \frac{L \Delta \varphi}{2\pi f d + \Delta \varphi} \quad (1)$$

式中:f为参考平面上的条纹频率; $\Delta \varphi$ 为物体表面图像和参考平面图像对应点的连续相位差。

1.2 正弦条纹和三角波条纹编码原理

1) 两步相移正弦条纹,相位相隔 90° ,其强度按如下表达式编程:

$$I_1(x, y) = 255[1 + \cos(2\pi x/p)]/2 \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = 255[1 + \cos(2\pi x/p - \pi/2)]/2 \quad (3)$$

式中: x 为投影仪水平方向的像素; y 为投影仪竖直方向的像素; p 为设定的条纹间距(即每个条纹周期的像素数)。

2) 两步相移三角波条纹,在同一个周期内生成有半个周期相移的 2 组三角波,其每组三角波中各段像素的分配如下:

$$I(1, y) = \begin{cases} p1 = p/2 \\ p2 = p1 \\ p3 = p1 + p2 \\ p4 = p \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为三角波的像素; p 为一个三角波周期总像素数。 $p1, p2, p3, p4$ 各段分布情况如图 2 所示。

将一个三角波进行列复制,复制 n 次,形成周期为 n 的一组三角波,其强度为

$$I_i(1, y) = \text{repmat}(I(1, y/n), 1, n) \quad (i=3, 4) \quad (5)$$

为了使 $p1, p2, p3, p4$ 各段像素分布情况看得更清楚,图 2 中三角波条纹周期为 1。

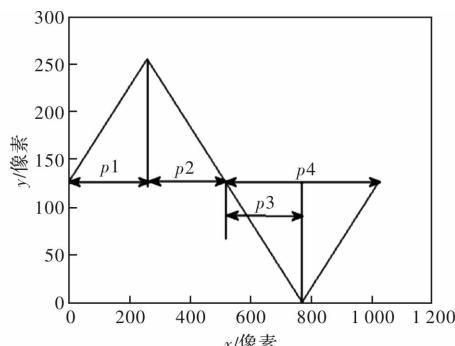


图 2 三角波条纹像素分布图

Fig. 2 Distribution of triangle wave fringe pixel

1.3 4 幅条纹图像的相位求解和解包裹原理

相移法求解相位时,有三步相移法和四步相移法,三步相移法相比四步相移法,减小了图像采集耗时,但对系统非线性响应所引起的相位误差的抑制性比较差,四步相移法具有易消除图像固有噪声的优点,但是易引入随机噪声。本文采用 4 幅条纹图像求解相位。

利用计算机生成 4 幅条纹,2 幅相移 90° 的正弦条纹和两幅相移 90° 的三角条纹。摄像机采集

被测物体表面信息调制的正弦条纹 $Ic1(x, y)$ 、 $Ic2(x, y)$ 和三角波条纹 $Ic3(x, y)$ 、 $Ic4(x, y)$ 。

1) 得到包裹相位 $\phi(x, y)$,其表达式如下:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} [((2Ic1(x, y) - Ic3(x, y) - Ic4(x, y))/(2Ic2(x, y) - Ic3(x, y) - Ic4(x, y))] \quad (6)$$

在这里, $\phi(x, y)$ 的取值范围是 $[-\pi, \pi]$,如图 3 实线所示(在这里以 16 个周期为例)。

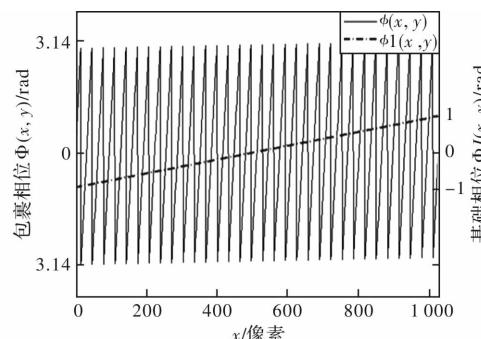


图 3 包裹相位与基础相位

Fig. 3 Wrapped phase and basic phase

2) 利用两步相移三角波条纹得到三角波条纹 $Ic3(x, y)$ 、 $Ic4(x, y)$ 所包含的所谓基础相位 $\phi_1(x, y)$,其步骤如下:

首先,求出三角波条纹强度比 $r_0(x, y)$:

$$r_0(x, y) = |I_3(x, y) - I_4(x, y)|/I_m(x, y) \quad (7)$$

式中: $I_m(x, y) = I_{\max}(x, y) - I_{\min}(x, y)$; $I_{\max}(x, y)$ 和 $I_{\min}(x, y)$ 分别表示 2 个相移三角波条纹强度最大值与最小值。 $r_0(x, y)$ 具有三角波的波形,并且取值范围是 $[0, 1]$ 。

其次,根据求出的三角波条纹强度比 $r_0(x, y)$,得到 $r(x, y)$:

$$r(x, y) = 2 * \text{round}(R - 1/2) + (-1)^{R+1} \times r_0(x, y), R = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

式中: R 表示区域值; $r(x, y)$ 是具有斜坡轮廓的三角波条纹强度比。如图 4 线条所示。

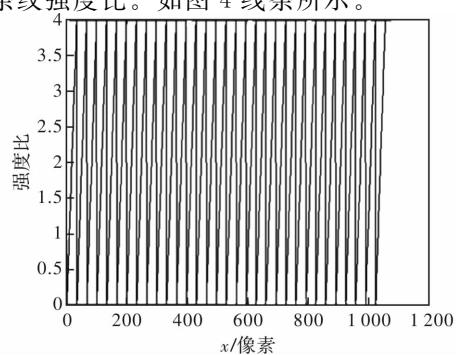


图 4 分段强度比

Fig. 4 Segment intensity ratio

再次,为了得到最后的基础相位,需要将分段的强度比连接起来。

第一步,生成一个相反的分段强度比 $r_{01}(x, y)$:

$$r_{01}(x, y) = 4 - r(x, y) \quad (9)$$

为了更清楚地表示,我们这里以 4 个周期为例,相反的强度比 $r_{01}(x, y)$ 如图 5 中粗线所示。

第二步,找到分段强度比的跳变点:

$$r_{01}(x, y) - r(x, y) = 4 \quad (10)$$

当 2 个强度比满足上面的公式(10),将跳变点的像素值保存至跳变点矩阵 $[a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N-1}]_{x \times (N-1)}$ 中,如图 5 所示。

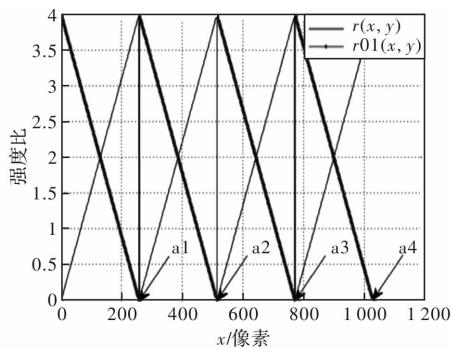


图 5 连接分段强度比

Fig. 5 Connecting segment intensity ratio

第三步,将分段的强度比连接成连续的强度比 $r_1(x, y)$:

$$\begin{cases} r_1(x, 1 : a_1) = r(x, 1 : a_1) \\ r_1(x, a_1 + 1 : b) = r(x, a_1 + 1 : a_2) + 4 \times 1 \\ r_1(x, a_2 + 1 : c) = r(x, a_2 + 1 : a_3) + 4 \times 2 \\ \dots \\ r_1(x, a_{N-1} + 1 : s) = r(x, a_{N-1} + 1 : s) + 4 \times N \end{cases} \quad (11)$$

式中 s 表示每一行总的像素数, $s = 1024$ 。

最后,根据求出的连续强度比,从而求出基础相位 $\phi_1(x, y) = r_1(x, y) / (2 * N) - 1$, $\phi_1(x, y)$ 的取值范围是 $[-1, 1]$,如图 3 实线所示。

根据求得的包裹相位和基础相位,我们可以得到条纹级次 $k(x, y)$:

$$k(x, y) = \text{round}\left(\frac{N * \pi * \phi_1(x, y) - \phi(x, y)}{2 * \pi}\right) \quad (12)$$

式中: N 是正弦条纹周期数; round 表示四舍五入取整函数,离其最近的整数。如图 6 所示红色线条表示。

通过解相公式:

$$\varphi(x, y) = \phi(x, y) + 2 * k(x, y) * \pi \quad (13)$$

进行相位解包裹,得到连续相位值。

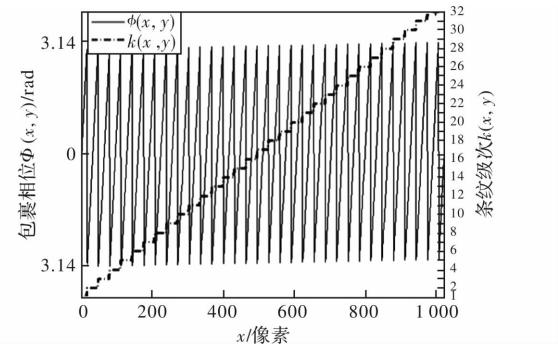


图 6 包裹相位与条纹级次

Fig. 6 Wrapped phase and streak level

2 实验

测量系统由三星 DLP 投影仪(分辨率为 1 024 * 768),搭载焦距为 8 mm 的 AFT 镜头和主频为 2.8 GHz 的双核联想笔记本组成。经标定后得到的系统参数: $L = 82.120$ cm, $d = 27.630$ cm。

2.1 长条板测量实验

进行长条板对比实验以验证所提出方法的可行性。长条板距离投影仪中心的距离是 1 000 mm。正弦条纹和三角波条纹的周期数都是 32,如图 7(a)和 7(b)所示。长条板三维重建结果如图 8 所示。图 8(a)所示为所提出方法三维测量结果图,图 8(b)所示为文献[12]的方法三维测量结果图。与文献[12]的方法相比,用三角波条纹代替呈线性变化的单周期条纹,如图 8(b)和 8(d)所示。

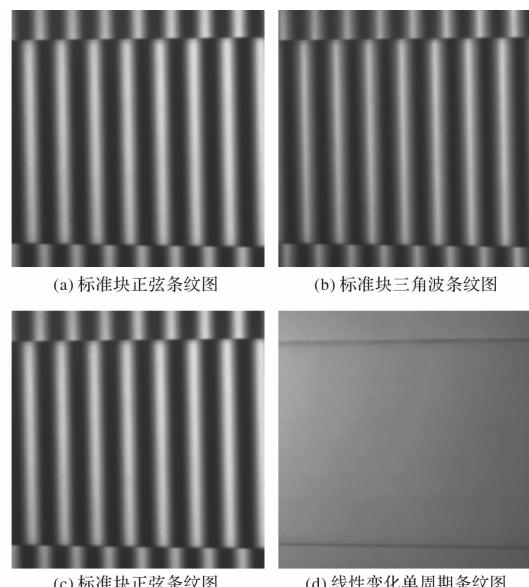


图 7 被物体调制的条纹:(a)和(b) 本文提出的方法;(c)和(d)文献[12]的方法

Fig. 7 Fringe patterns modulated by the object: (a)-(b) proposed method; (c)-(d) Zuo's method

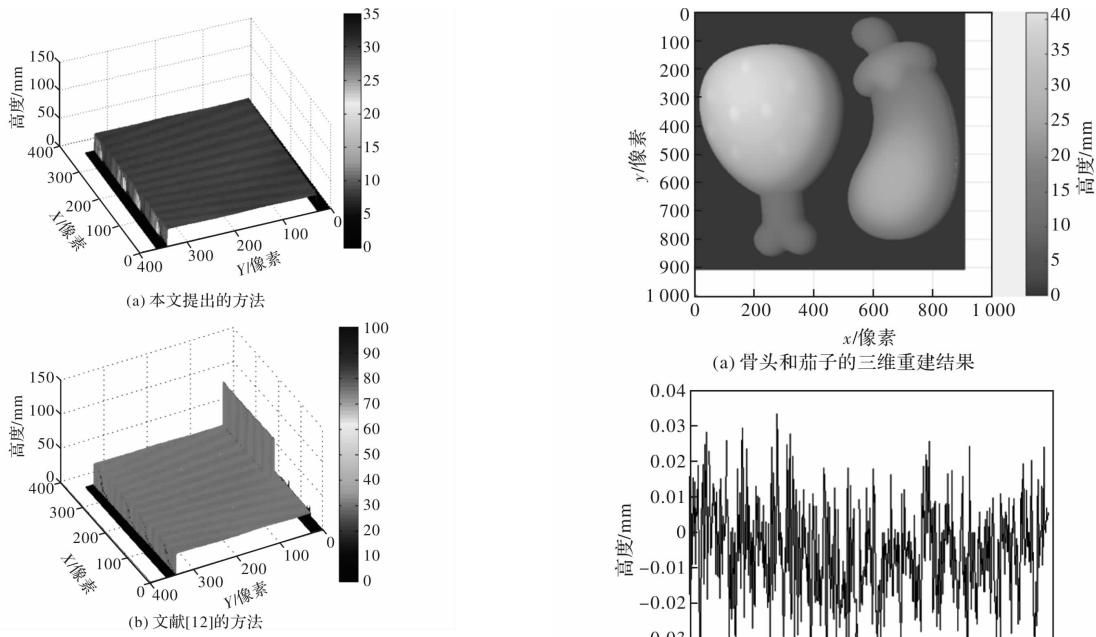


图 8 物体的三维重建结果

Fig. 8 Reconstructed 3D results of object

2.2 骨头和茄子测量实验

测量骨头和茄子组成的孤立物体。正弦条纹和三角波条纹的周期数都是 32, 如图 9(a) 和 (b) 所示。骨头和茄子的三维重建结果如图 10(a) 所示, 图 10(b) 所示为某一行的测量误差分布, 从误差分布可以看出, 最大测量误差是 0.04 mm, 实验结果验证了本方法可以测量复杂表面的孤立物体。

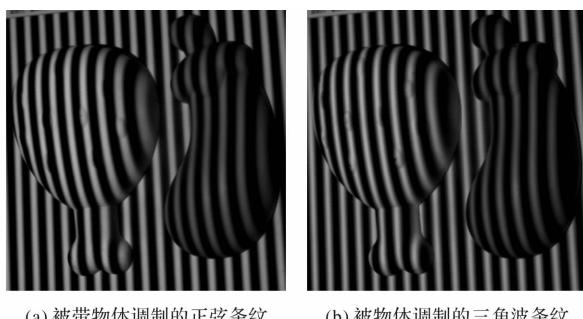


图 9 带物体的正弦条纹和三角条纹图

Fig. 9 Sinusoidal fringe and triangular fringe with objects

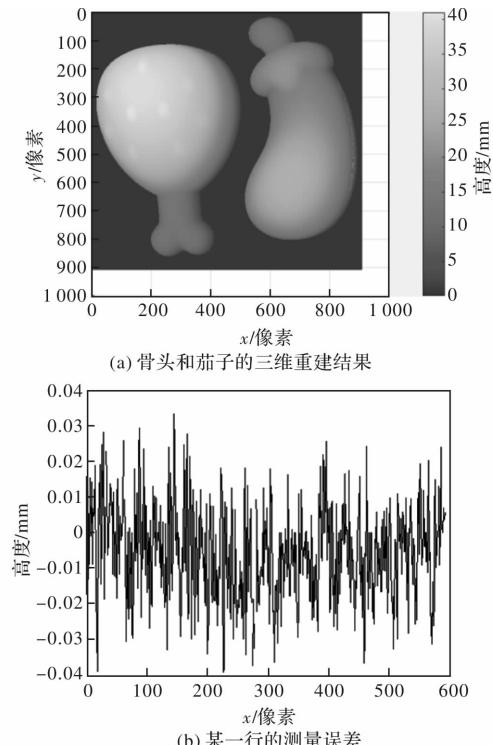


图 10 骨头和茄子的三维重建结果和误差分析

Fig. 10 Dimensional reconstructed results of bone and eggplant and error analysis diagram

2.3 阶梯标准块测量实验

为了分析正弦和三角波条纹投影的三维测量方法的测量精度, 进行了阶梯标准块测量实验。图 11(a) 和 (b) 为测量的阶梯标准块的条纹图。图 11(c) 为进行误差补偿的阶梯标准块的三维重建结果图。表 1 所示为不同高度阶梯标准块的绝对误差和 RMS 误差, 从表中可以看出, 最大的绝对误差和最大的 RMS 误差为 0.045 mm 和 0.041 mm。误差的主要来源: 1) 投影仪的 gamma 非线性; 2) 测量过程中的相位噪声; 3) 标准块真实值的不确定性。从 2 个实验结果可以看出, 本文方法可以测量阶梯标准块, 测量精度也很高。

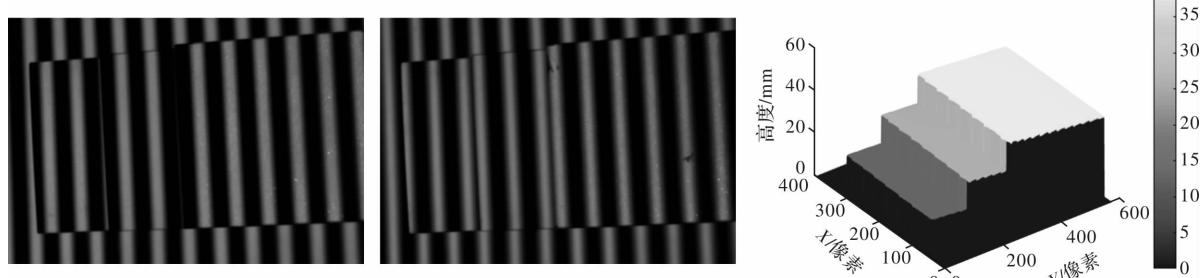


图 11 3 个标准块的三维重建实验

Fig. 11 Reconstructed 3-D experiment of three standard gauge blocks

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results mm

序号	实际高度	测量高度	绝对误差	均方根误差
1	13	13.021	0.021	0.020
2	26	26.031	0.031	0.029
3	39	39.045	0.045	0.041

3 结论

本文提出了一种基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法,利用2幅正弦条纹和2幅三角波条纹求得截断相位,利用2幅三角波条纹求得条纹级次,从而实现精确相位解包裹。与传统的正弦条纹投影的三维测量方法相比,本文方法只需分别投影2幅正弦条纹和2幅三角波条纹,提高了三维测量速度,能测量复杂物体的三维形貌。与[12]的方法相比,用三角波条纹代替呈线性变化的单周期条纹,在一定程度上减少了相位噪声,提高测量精度。该方法减少了投影条纹幅数,提高了测量速度,计算三角波条纹强度调制和强度对比度与计算相位相比,可以减少数据处理时间,进一步提高测量速度,在高速实时的复杂物体三维测量中有广泛的应用前景。在后续研究工作中,将要解决投影仪gamma效应及系统非线性对该方法的影响。

参考文献:

- [1] ZHANG Yujia, YILMAZ A. Structured light based 3d scanning for specular surface by the combination of gray code and phase shifting. ISPRS-international archives of the photogrammetry[J]. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B3: 137-142.
- [2] HUANG P, ZHANG S. Fast three-step phase-shifting algorithm [J]. Appl. Opt., 2006, 45 (21): 5086-5091.
- [3] ZHOU Canlin, LIU Tongchuan, SI Shuchun, et al. An improved phase unwrapping method based on stair phase encoding[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013,24(12):2377-2382.
- [4] 周灿林, 刘同川, 司书春, 等. 改进的阶梯相位去包裹算法研究[J]. 光电子·激光, 2013, 24 (12): 2377-2382.
- [5] ZHANG S, YAU S. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. Opt. Eng., 2007;46(11): 113603-113603-6.
- [6] ZENG Zhuohuan, LI Biao, FU Yanjun, et al. Stair phase-coding fringe plus phase-shifting used in 3D measuring profilometry[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2016, 12(1): 9.
- [7] MIYASAKA T, ARAKI K. Development of real-time 3D measurement system using intensity ratio method. Proc[J]. ISPRS Commission Photogrammetric Computer Vision,2002,34(3/B): 181-185.
- [8] FANG Qiang, ZHENG Sunde. Linearly coded profilometry[J]. Appl. Opt., 1997,36(11): 2401-2407.
- [9] FLORES J L, TORALES G, FERRARI J A, et al. Binary coded triangular fringes for 3-D surface-shape measurement [J]. Appl. Opt., 2013,52(15): 3576-3582.
- [10] SHAN Lina, YU Xiaoyang, FU Xiao, et al. 3D measurement technology based on gray coding light by combining gray code with trapezoidal phase shift[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30 (6): 24-28.
- [11] JIA Peirong, KOFMAN J, ENGLISH C E. Two-step triangular-pattern phase-shifting method for three-dimensional object-shape measurement [J]. Opt. Eng., 2007,46(8): 083201-083201-9.
- [12] ZUO Chao, CHEN Qian, GU Guohua, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. Opt. Express, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [13] HYUN J S, ZHANG S. Superfast 3D absolute shape measurement using five binary patterns[J]. Opt. Lasers Eng., 2017, 90: 217-224.