

## 高动态范围表面自适应条纹投影测量方法

汪锦航, 卢荣胜\*, 刘端茂

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 相位测量轮廓术是获取物体表面三维形貌信息的最有效方法之一,但是对于表面反射率变化较大的物体,传统的条纹投影技术难以使高反射率和低反射率的区域都能实现高精度的形貌测量。针对这一问题,提出一种基于递归的自适应条纹投影方法。该算法能够分析采集图像中亮度饱和及亮度不足的像素点,并根据坐标映射关系自适应地调整投影图案的亮度,使各像素投影亮度经二分递归后趋近于最佳投影亮度,达到避免饱和及提高信噪比的目的。实验结果表明,所提方法能够准确实现投影亮度的调整,仅需少量的递归过程,就能纠正 99.3% 投影亮度不合理的像素点,在改善高动态范围表面的三维显示效果的同时提高了其三维形貌的测量精度。

**关键词** 测量; 相位测量; 高动态范围; 亮度饱和; 递归; 自适应调整

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1912001

## Adaptive Fringe Projection Measurement Method for High Dynamic Range Surface

Wang Jinhang, Lu Rongsheng\*, Liu Duanmao

School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

**Abstract** Phase-measuring profilometry is one of the most effective methods of obtaining the three-dimensional topography information of the object surface. However, in terms of objects with large changes in surface reflectivity, it is difficult for traditional fringe projection technology to achieve high-precision topography measurement in both high reflectivity and low reflectivity regions. To solve this problem, we propose a recursive adaptive fringe projection method. This method can analyze the pixels with saturated and insufficient brightness in the collected image and adjust the brightness of the projected pattern adaptively according to the coordinate mapping relationship. Then, the projection brightness of all the pixels would be recursively driven to approach the best projection brightness so as to avoid saturation and improve the signal-to-noise ratio. The experimental results show that the proposed method can accurately adjust the projection brightness. Only a small amount of recursion is required to correct 99.3% of pixels with unreasonable projection brightness. In addition to improving the three-dimensional display effect of the high dynamic range surface, this method has also enhanced the measurement accuracy of the three-dimensional topography.

**Key words** measurement; phase measurement; high dynamic range; brightness saturation; recursion; adaptive adjustment

**OCIS codes** 120.5050; 050.5080; 150.6910

## 1 引言

近年来,三维形貌测量技术获得了高速发展

并且应用广泛,在人脸识别、逆向工程、医疗科技等领域中都不乏三维测量技术的应用<sup>[1-5]</sup>。一般地,三维形貌测量技术被分为接触式测量技术和

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-04-12; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003801)、国家自然科学基金(51875164)

通信作者: \*rslu@hfut.edu.cn

非接触式测量技术,非接触式测量主要通过光学的方法来实现,典型的有飞行时间法、激光三角法、立体视觉测量法、结构光法等<sup>[6-8]</sup>,其中条纹投影轮廓术(FPP)以其测量精度高、测量速度快等优点被认为是恢复物体形状的最可靠技术之一。但是,对于表面反射率变化比较大的高动态范围(HDR)表面,传统条纹投影技术的应用十分有限。在实际应用中,为了使传统条纹投影技术适用于HDR表面,通常用白色粉末喷涂目标,这样的过程通常是费时费力的,这就极大地限制了高速结构光技术的应用。

国内外众多学者提出了多种 HDR 表面三维测量方法<sup>[9-16]</sup>。Zhang 等<sup>[17]</sup>通过改变相机曝光时间,寻找捕获的多重曝光图像中每个像素位置处不饱和且最大亮度的值作为最终值,以此获得融合图像来求取相位,得到物体的三维坐标。此方法虽易于实现,但具有一定的局限性:要想获得大部分像素位置处合适的曝光图像,需要设置大量的曝光时间,在操作上非常耗时,不适用于实时三维测量。Feng 等<sup>[18]</sup>提出双相机测量技术,将其与单目视觉技术相结合,通过标定获得相机与投影仪之间的转换关系,最后将双目视觉和多重曝光策略结合起来以纠正不正确的点。该方法中有可能出现两个相机中质量都不佳的点;另外,该方法在处理同时存在亮表面和暗表面的场景时趋于妥协,因为仅通过改变相机位置很难改善图像中暗区域的质量。Jiang 等<sup>[19]</sup>针对三步相移提出,通过投影倒置条纹,即相移为  $\pi$  的条纹,在原始条纹出现饱和时,将相应的倒置条纹代入不同的公式中进行计算。该方法的优点是不必改变曝光时间和投影亮度,只要不是原始条纹全部出现饱和,都能较为准确地算出相位,但是该方法的通用性较差。Li 等<sup>[20]</sup>提出了一种通过最大输入灰度级(MIGL)自适应调整投影条纹图案强度来避免物体表面测量时出现饱和的方法,通过将不同 MIGL 捕获的相移图像强度组合到一组合成的相移图像中,可以在保持高信噪比(SNR)的同时避免测量时出现饱和。

为了解决高动态表面的测量问题,本文提出一种自适应条纹投影技术,该方法能够根据捕获图案的亮度信息自适应地调整投影图案的亮度,降低饱和区域的投影亮度且增加暗区域的投影亮度,通过少量递归就能使投影亮度趋近于各像素位置处的最佳投影亮度,在避免饱和的同时提高信噪比,能够有效地提高动态表面的三维测量精度。

## 2 基本原理和方法

### 2.1 相移法三维测量原理

三维单目测量系统包含一个相机、一个投影仪,以及图像处理系统。如图 1 所示,首先通过计算机得到相位编码条纹图案,将编码后的图案通过投影仪投影到物体表面,相机采集被物体高度调制的条纹图案,最后从中恢复物体的三维信息。

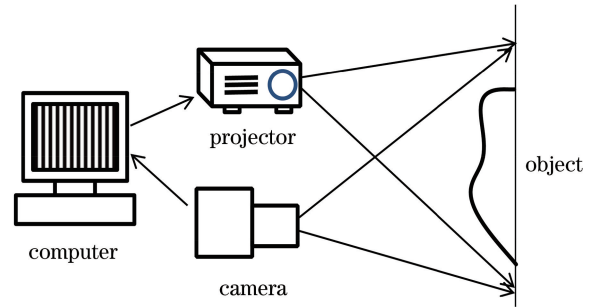


图 1 单目三维结构光测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of monocular three-dimensional structured light measurement system

相移测量一般选用正弦条纹, $N$ 步正弦条纹投影图案的数学表达式为

$$I_p(x_p, y_p) = a_p + b_p \cos \left[ \varphi(x_p, y_p) + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1, N, \quad (1)$$

式中: $(x_p, y_p)$ 表示像素在像素坐标系中的位置; $I_p(x_p, y_p)$ 表示 $(x_p, y_p)$ 位置处的图像灰度值; $\varphi(x_p, y_p)$ 表示该位置处的编码相位值; $N$ 表示相移步数; $n$ 为相移索引值;为了提高正弦条纹的调制度, $a_p$ 和 $b_p$ 一般设置为最大灰度值的一半,即127.5。相机捕获条纹的数学表达式为

$$I_c(x_c, y_c) = a(x_c, y_c) + b(x_c, y_c) \cos \left[ \varphi(x_c, y_c) + \frac{2\pi(n-1)}{N} \right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1, N, \quad (2)$$

式中: $(x_c, y_c)$ 表示像素在投影仪坐标系中的位置; $I_c(x_c, y_c)$ 表示 $(x_c, y_c)$ 位置处的图像灰度值; $a(x_c, y_c)$ 和 $b(x_c, y_c)$ 分别表示该位置处的平均强度和调制度信息。根据最小二乘原理,求解方程得出相位 $\varphi$ :

$$\varphi(x, y) = -\arctan \left[ \frac{\sum_{k=1}^N I_c(x, y) \sin(2k\pi/N)}{\sum_{k=1}^N I_c(x, y) \cos(2k\pi/N)} \right]. \quad (3)$$

求解出的相位值包裹在 $[-\pi, \pi]$ ,使用多频相位展开算法<sup>[21-22]</sup>可以得到绝对相位 $\varphi$ ,解出展开相

位后根据标定的相位与深度之间的关系<sup>[23]</sup>,就能恢复物体的三维信息。

## 2.2 自适应条纹投影算法

对于均匀的物体表面,能够很容易地实现单一曝光时间下的三维测量,但是对于高动态表面,如果采用比较长的曝光时间,高反射率区域会出现亮度饱和,而如果采用短的曝光时间,低反射率区域会出现信噪比较低的情况。无论出现上述哪种情况,都会影响最终的三维测量精度。为此,本课题组提出一种自适应条纹投影技术,在单一曝光下,根据采集图片中物体表面反射率的情况,自动地调整投影的亮度,通过增加强度较低区域的投影亮度来提高信噪比,减小强度饱和区域的投影亮度来避免饱和。

### 2.2.1 投影仪像素坐标系与相机图像坐标系的映射

为了能够根据相机采集图片来调整投射到对应位置的投影仪像素区域的投影亮度,需要建立相机像素与投影仪像素的映射关系。利用传统的投影仪标定技术<sup>[8]</sup>只能获得相机与投影仪之间的转换关系,在放上物体之后难以进行精确的坐标映射。本课题组提出的相位标定技术采用投影横竖双向条纹的方式,通过  $x$  和  $y$  两个方向的相位构成坐标  $(\varphi_v, \varphi_h)$  来求解两个坐标系的映射关系,即

$$\begin{cases} \text{Map}(x, y, 1) = \text{round} \left[ \frac{\phi_v(x, y) \times W_p}{2\pi f} \right] \\ \text{Map}(x, y, 2) = \text{round} \left[ \frac{\phi_h(x, y) \times H_p}{2\pi f} \right] \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $\text{Map}(x, y, 1)$  和  $\text{Map}(x, y, 2)$  分别表示  $x$  和  $y$  两个方向在相机像素  $(x, y)$  位置处与投影仪像素的映射关系,即  $[\text{Map}(x, y, 1), \text{Map}(x, y, 2)]$  为投影仪上与相机像素点  $(x, y)$  相对应的投影仪像素点;  $W_p$  和  $H_p$  分别为投影仪投影图案的宽和高;  $f$  为投影正弦条纹的频率;  $\text{round}(\cdot)$  表示四舍五入取整。使用(4)式进行映射时会存在一些问题,如图 2(a)所示,这是因为相机的像素大小和投影仪的像素大小不一致,导致二者无法完成一一映射,最终导致投影的亮度调整出现偏差。为此,本文提出一种改进的相位映射技术。该技术使得所有相机捕获图案的有效像素都能够在投影仪像素坐标系中找到对应的映射像素,从而使得每个投影亮度不合理的像素都能得到调整,如图 2(b)所示。该映射方法的数学表达式为

$$\begin{cases} \text{Map}(x, y, 1) = \text{floor} \left[ \frac{\phi_v(x, y) \times W_p}{2\pi f} \right] \\ \text{Map}(x, y, 2) = \text{floor} \left[ \frac{\phi_h(x, y) \times H_p}{2\pi f} \right] \\ \text{Map}(x, y, 3) = \text{ceil} \left[ \frac{\phi_v(x, y) \times W_p}{2\pi f} \right] \\ \text{Map}(x, y, 4) = \text{ceil} \left[ \frac{\phi_h(x, y) \times H_p}{2\pi f} \right] \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $\text{floor}(\cdot)$  表示向下取整;  $\text{ceil}(\cdot)$  表示向上取整。通过改进方法获得映射关系,在相邻的 4 个像素上同时进行亮度调整,使得调整的范围包含了所有待调整的像素点。

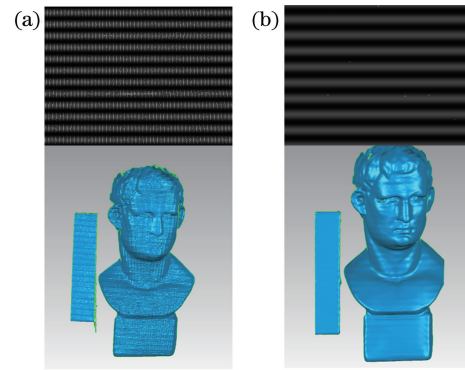


图 2 使用不同方法映射后的自适应条纹图及三维显示结果。  
(a)使用(4)式映射;(b)使用(5)式映射

Fig. 2 3D display results and adaptive fringe patterns after mapping using different methods. (a) Using formula (4); (b) using formula (5)

使用饱和后的图像求解相位时存在误差,导致相位映射时会出现偏差,因此需要在低曝光条件下采集图片,使用不存在饱和像素的图像进行初始相位映射关系的计算。虽然在低曝光下采集的图片存在一定的相位误差,但是这种由信噪比低引起的误差较小,不足以影响相位映射的精度。因为在进行相位映射的过程中,使用 64 频的正弦条纹时相邻两像素间的相位差约为 0.5,而低曝光下的相位误差不超过 0.3,使用(5)式进行相位映射时,若相位误差不超过相邻两像素间的相位差,则不影响坐标映射的精度。为了验证低曝光下坐标映射的精度,使用文献<sup>[17]</sup>的方法进行不同曝光条件下的图片融合,融合后的图片不包含饱和像素并且保持较高的信噪比。将使用融合图片的相位映射与低曝光下的相位映射进行对比,结果如图 3 所示,黑色的点为存在映射偏差的区域,可以看出两者的相位映射存在偏差的像素数目较少,即低曝光下使用本文方法也能实现较为精确的相位映射。

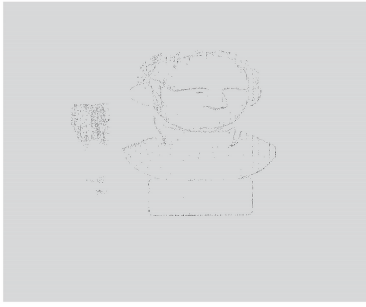


图 3 相位映射偏差图

Fig. 3 Deviation chart of phase mapping

### 2.2.2 生成自适应投影条纹

由于图像中存在一些无效的区域,如背景和阴影部分,为了减小计算量,可以利用调制度将感兴趣的区域(ROI)提取出来,调制度的计算公式<sup>[24]</sup>为

$$M(x, y) = \frac{2}{N} \times \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin \frac{2\pi n}{N}\right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos \frac{2\pi n}{N}\right)^2} \quad (6)$$

物体相较于背景和阴影有更高的调制度,设置合适的阈值  $T$  来剔除无效的像素点,在本实验中将

阈值  $T$  设置为 300,因此设置掩模  $f_{IM}$  在  $(x, y)$  位置的值为

$$f_{IM}(x, y) = \begin{cases} 1, & M(x, y) \geq T \\ 0, & M(x, y) < T \end{cases} \quad (7)$$

在 ROI 区域,将参考掩模  $f_{RM}$  和调整掩模  $f_{AM}$  分别初始化为相机采集图片大小的单位矩阵。将投影掩模  $f_{PM}$  初始化为投影图片大小的单位矩阵,参考掩模用于记录上一次递归像素的状态,调整掩模用于记录上一次递归像素的调整幅度,投影掩模决定最终投影图案的各像素的亮度调整幅度。将各像素的状态设定如下

$$f_{RM,i}(x, y) = \begin{cases} 1, & i > 0 \text{ and } I(x, y) > 250 \\ 2, & i > 0 \text{ and } I(x, y) < 150 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i$  表示递归次数; $i=0$  表示初始状态; $I(x, y)$  表示图像强度。根据参考掩模和采集图片各像素的强度,在所有强度过低或者过高的像素位置处,投影亮度都将被调整。为了保持较高的调制度,将最低强度阈值设置为 150,考虑到环境噪声的影响,将判定饱和的强度阈值设置为 250,在确定各像素的状态之后,调整掩模可以确定为

$$f_{AM,i}(x, y) = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ f_{AM,i-1}(x, y)/2, & I(x, y) > 250 \text{ and } (i = 1 \text{ or } f_{RM,i-1}(x, y) = 1) \\ f_{AM,i-1}(x, y) \times (1 - 2^{1-i}), & I(x, y) > 250 \text{ and } f_{RM,i-1}(x, y) = 2 \\ 2, & I(x, y) < 150 \text{ and } (i = 1 \text{ or } f_{RM,i-1}(x, y) = 2) \\ f_{AM,i-1}(x, y) \times (1 + 2^{1-i}), & I(x, y) < 150 \text{ and } f_{RM,i-1}(x, y) = 1 \end{cases} \quad (9)$$

调整掩模根据各像素位置处此刻的亮度大小以及上一次递归确定的参考掩模来判定上一次的调整是否合理,如果存在调整过度,则适当减小调整过度像素的调整幅度,对于调整幅度不够的像素,继续加大调整幅度。根据映射关系(5)式和调整掩模中各像素的调整幅度,可以计算出决定新图案亮度的投影掩模:

$$\begin{cases} f_{PM,i}[\text{Map}(x, y, 1), \text{Map}(x, y, 2)] = f_{AM,i}(x, y) \\ f_{PM,i}[\text{Map}(x, y, 1), \text{Map}(x, y, 4)] = f_{AM,i}(x, y) \\ f_{PM,i}[\text{Map}(x, y, 3), \text{Map}(x, y, 2)] = f_{AM,i}(x, y) \\ f_{PM,i}[\text{Map}(x, y, 3), \text{Map}(x, y, 4)] = f_{AM,i}(x, y) \end{cases} \quad (10)$$

将投影掩模与原始图案逐像素卷积,得到调整后的条纹图案为

$$P_{cur,i} = P_{origin} \times f_{PM,i}, \quad (11)$$

式中: $P_{origin}$  是投影的原始图案; $P_{cur,i}$  表示递归  $i$  次后生成的新投影图案。将生成的新条纹图案再次投影到物体表面,整个递归过程的流程如图 4 所示。自适应条纹生成算法的步骤如下:

Step 1 根据(6)式和(7)式设置阈值将 ROI 提取出来;

Step 2 投影原始条纹图片,初始化参考掩模和投影掩模;

Step 3 对于采集图片 ROI 的每个像素  $(x, y)$ ,根据(8)式和(9)式重新计算参考掩模和投影掩模;

Step 4 根据(10)式和(11)式调整原始投影图案亮度;

Step 5 更新参考掩模和投影掩模;

Step 6 投影新生成的自适应图案,重复 step 3、step 4 和 step 5 直到待调整的像素数量占 ROI 像素数量的 1% 以下;

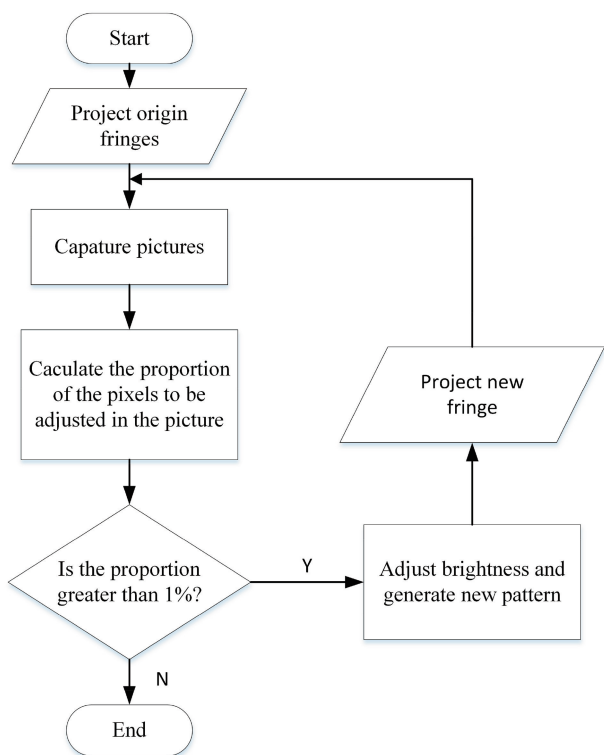


图 4 自适应条纹生成流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive fringe generation

Step 7 将最终的投影图案的各像素处的亮度作为最大灰度值生成正弦条纹。

### 3 实验结果

本实验系统主要包括一台分辨率为  $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$  的 Genie Nano Series M800 摄像机, 一台分辨率为  $1140 \text{ pixel} \times 912 \text{ pixel}$  的 TI PRO4500 DLP 投影仪, 以及一台控制投影和采集的计算机, 如图 5(a) 所示。为了验证本文算法的有效性, 使用石膏雕像表面和工件表面构成高动态表面场景, 如图 5(b) 所示。雕塑表面反射率较高, 工件表面反射率较低, 图 6(a)、(b) 所示分别为此场景在曝光时间  $5000 \mu\text{s}$  和  $40000 \mu\text{s}$  下的相机采集图片, 图 6(a)、(b) 右侧图片分别为两个曝光时间下第 407 列和第 135 列的图像强度。可以看出, 高曝光时间下雕塑表面已经出现饱和, 而低曝光条件下工件表面的条纹调制度较低。

图 7 所示为整个自适应条纹的调整过程, 其中, 图 7(a) 所示为投影的原始条纹及采集的图像, 图 7(b)~(d) 所示为三次调整过程生成的自适应条纹及对应的采集图片, 可以看出采集图片中的饱和像素逐渐减少。

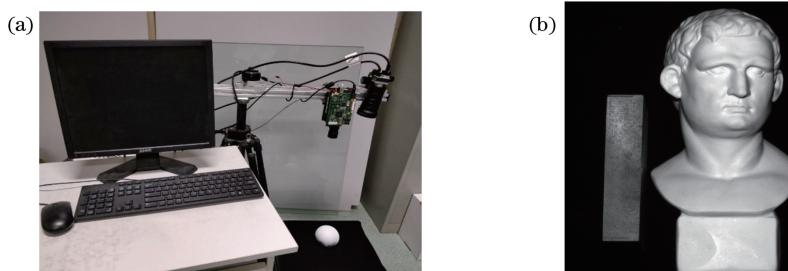


图 5 实验装置与场景图。(a)测量系统;(b)高动态场景图

Fig. 5 Experimental device and scene image. (a) Measurement system; (b) high dynamic scene diagram

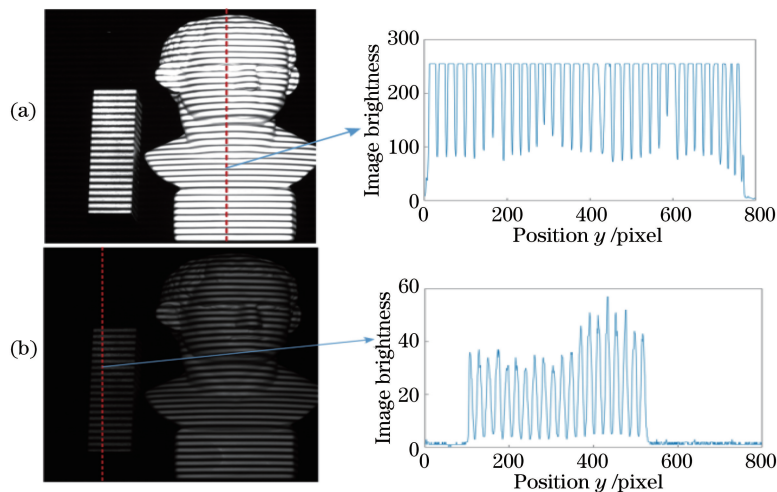


图 6 采集图片及强度图。(a)高曝光条件下采集图片;(b)低曝光条件下采集图片

Fig. 6 Captured pictures and intensity pictures. (a) Images captured under high exposure; (b) images captured under low exposure

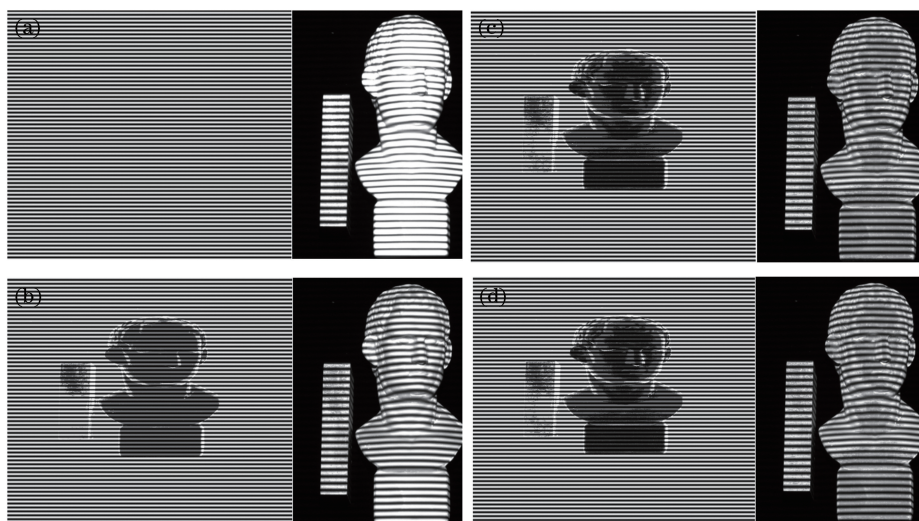


图 7 自适应条纹图片和对应的采集图片。(a)投影的原始条纹及对应的采集图片；  
(b)~(d)三次递归过程生成的自适应条纹及对应的采集图片

Fig. 7 Adaptive fringe patterns and corresponding captured pictures. (a) Projected original fringes and corresponding captured image; (b)–(d) adaptive fringes generated by three recursive processes and corresponding captured images

图 8(a)~(c)所示为本文算法在三次递归过程中的三维显示结果。可以看出,随着递归次数的增加,三维显示的效果不是逐渐变好,这是因为第二次递归时在调整过程中存在调整过度的点,但是经过第三次递归之后,调整过度的点被准确地识别出来

并进行了更加精确的调整,获得了更好的显示效果。实际上,三次递归之后,待调整的像素数量由最初的 219855 减少到 1502,说明信噪比较低的像素和饱和像素数量减少了 99.3%。

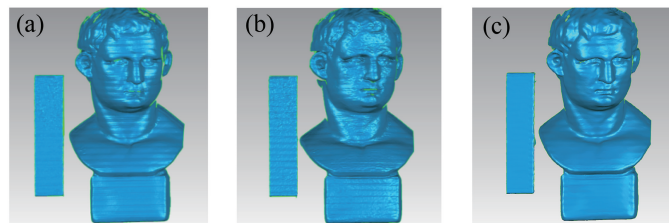


图 8 本文算法在三次递归过程中的三维显示结果。(a)第一次递归;(b)第二次递归;(c)第三次递归

Fig. 8 Three-dimensional display results by proposed method in three recursive procedures. (a) The first recursion; (b) the second recursion; (c) the third recursion

图 9 所示为高动态场景 ROI 的第 300 列相位误差,由于多步相移具有抑制各种误差的作用,因此将 20 步相移解包裹的相位图作为真实相位用于误差计算,绿色实线是未处理的原始误差,红色点虚线是投影均匀条纹方法<sup>[25]</sup>产生的误差,蓝色虚线是本文方法的误差。可以看出,使用本文方法可以明显减小相位误差。

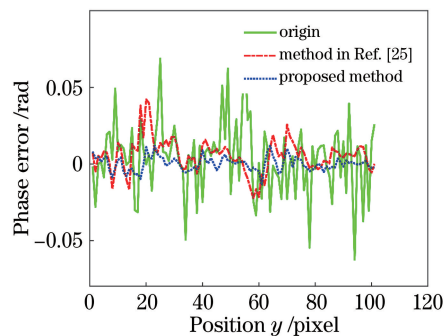


图 9 ROI 第 300 列的相位误差

Fig. 9 The phase error of the 300th column in the ROI 导致表面出现了很多破洞,这是由比较大的测量误差导致的。文献[25]的方法中投影的是均匀图

图 10(a)所示为低曝光时间下的三维显示结果,可以看出显示的效果比较不理想,由于信噪比较低,物体表面受噪声影响较大,出现了很多不光滑的区域,在反射率低的工件表面表现得更加明显。图 10(b)所示为高曝光时间下的三维显示结果,在反射率较高的雕塑的部分区域,严重的饱和

片,未考虑投影仪各像素之间的亮度影响关系,仍有一小部分区域的显示效果不佳,如图 10(c)所示。使用本文算法的显示效果如图 10(d)所示,由于相位误差明显减小,在各个区域都获得了良好的显示效果。在饱和情况下,由于亮度、照度较高,物体的信噪比也会相应变高,故在饱和现象不

太明显的区域,得益于更高的信噪比,会出现较好的显示效果,但是在饱和误差较大的区域[如图 10(b)的三维显示出现孔洞的区域]显示效果非常糟糕。本文方法虽然在部分区域的显示效果不如饱和时的显示效果,但是它使得整体的精度有了比较大的提升。

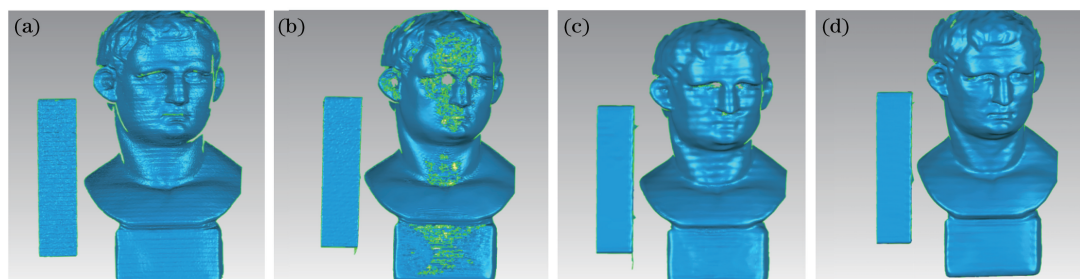


图 10 三维显示结果。(a)低曝光条件下显示结果;(b)高曝光条件下显示结果;  
(c)文献[25]的方法显示结果;(d)本文方法显示结果

Fig. 10 Three-dimensional display results. (a) Display result under low exposure; (b) display result under high exposure;  
(c) display result using method in Ref. [25]; (d) display result using proposed method

为了进一步验证本文方法在漫反射表面以外的表面测量改进的有效性,对反射率比较高、极易产生饱和的金属物体表面进行抑制饱和的实验,结果如图 11 所示。在不使用高动态测量方法之前,采集图像的表面出现了大范围的饱和,使用本文方法仅通

过三次递归就实现了对 99.29% 的饱和像素的抑制,结果如图 12 所示。最后,对表面更加复杂的螺纹表面进行了测量,最终的三维显示效果如图 13 所示。可以看出,本文算法在高反射率及低反射率表面都获得了良好的显示效果。

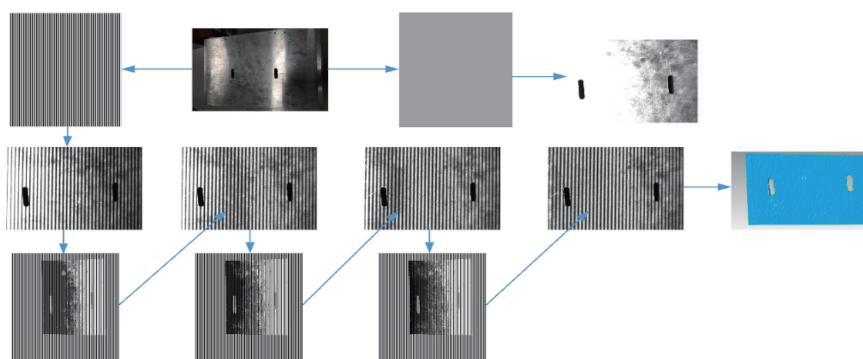


图 11 金属物体表面递归调整过程

Fig. 11 Recursive adjustment process in the metal object surface

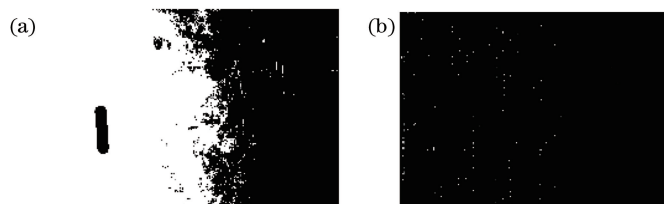


图 12 饱和区域掩模。(a)饱和补偿前;(b)饱和补偿后

Fig. 12 Mask of saturation area. (a) Before saturation compensation; (b) after saturation compensation

为了证明本方法不仅改善了三维显示效果,也带来了精度上的提升,对高度差为 6 mm 的金属阶梯进行了测量,结果如图 14(a)所示。除了一个表

面为金属高反射面,其余表面均喷涂了显像粉,以获得反射率变化较大的表面,测量的结果如图 14(b)所示。图 14(c)所示为高反射表面的平面拟合结

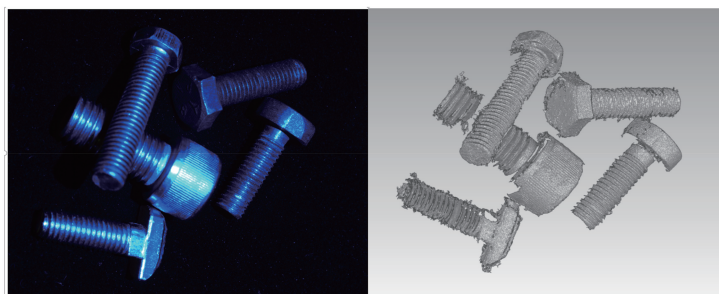


图 13 复杂表面及三维显示效果

Fig. 13 Complex surface and three-dimensional display effect

果,大部分三维点的平面拟合误差在 0.1 mm 以内。图 14(d)所示为漫反射阶梯平面与高反射阶梯平面的高度差测量结果。使用不同方法测量高反射表面与漫反射表面的高度差结果如表 1 所示。使用高动态方法测量之前,在低曝光和高曝光条件下测量结

果的偏差比较大。在各种高动态测量方法中,大步相移测量方法和 Zhang 等<sup>[17]</sup>的高动态融合方法以及本文方法精度较高,但是本文方法使用的投影图片数量更少,证明了本文方法在测量高动态表面的有效性,在测量效率和精度上也具有一定的优势。

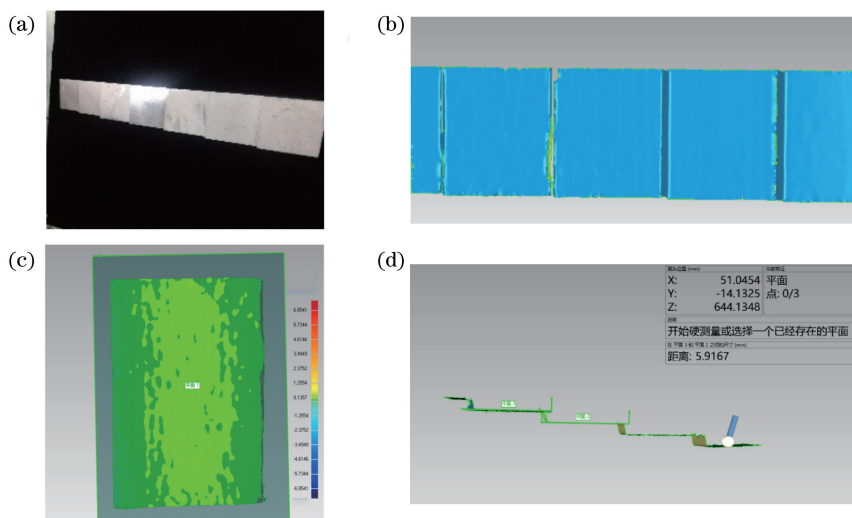


图 14 阶梯测量结果。(a)阶梯实物图;(b)阶梯三维显示效果;(c)高反射面的平面拟合结果;(d)高度差的测量结果

Fig. 14 Ladder measurement results. (a) Physical map of ladder; (b) three-dimensional display of ladder; (c) fitting result of high reverse plane; (d) measurement result of height difference between diffuse reflection plane and high reverse plane

表 1 利用不同方法测量的阶梯高反射表面与漫反射表面的高度差的误差比较

Table 1 Error comparison of height difference between diffuse reflection plane and high reverse plane measured by different methods

Method or condition	Height difference /mm	Absolute error /mm	RMS /mm	Number of project images
Low exposure	5.8135	0.1865	0.1530	16
High exposure	6.5027	0.5027	0.4433	16
Method in Ref. [25]	5.8702	0.1298	0.1007	83
Large-step phase-shifting	5.9203	0.0797	0.0607	80
Method in Ref. [17]	5.9010	0.0990	0.0736	96
Proposed method	5.9167	0.0833	0.0645	60

## 4 结 论

提出一种应用于高动态表面测量的算法,该算法首先确定了图片的有效区域,然后通过采集到的

条纹图片分析像素的状态来决定各像素的调整幅度,根据构建的相机与投影仪像素间的映射关系自适应地生成新的条纹,再将新的条纹投影到物体表面。通过递归地进行上述操作来减少饱和像素和低



信噪比像素的数量,当待调整的像素数量低于一定比例时停止递归。通过多个实验验证了本文算法的效果,典型的高动态场景经过三次递归就可使待调整的像素数量减少 99.3%,最终的三维显示效果体现了本文算法的有效性。对标准阶梯高度测量的实验也验证了本文算法的精度。该算法只需少量的额外投影图案就能实现较高的测量精度,在大幅提高精度的同时保证了三维测量的效率。

### 参 考 文 献

- [1] Babaei A, Saadatseresht M, Kofman J. Exponential fringe pattern projection approach to gamma-independent phase computation without calibration for gamma nonlinearity in 3D optical metrology[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24927-24938.
- [2] Liu K, Wang S J, Lau D L, et al. Nonlinearity calibrating algorithm for structured light illumination [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 050501.
- [3] Liu X R, Kofman J. Background and amplitude encoded fringe patterns for 3D surface-shape measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 94: 63-69.
- [4] Zhang W, Yu L D, Li W S, et al. Black-box phase error compensation for digital phase-shifting profilometry[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(10): 2755-2761.
- [5] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [6] Liu Y, Huang S J, Zhang Z H, et al. Full-field 3D shape measurement of discontinuous specular objects by direct phase measuring deflectometry [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 10293.
- [7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [8] Zhang W, Li W S, Yu L D, et al. Sub-pixel projector calibration method for fringe projection profilometry [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19158-19169.
- [9] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Adaptive pixel-to-pixel projection intensity adjustment for measuring a shiny surface using orthogonal color fringe pattern projection[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(5): 055203.
- [10] Ekstrand L. Autoexposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 123603.
- [11] Feng S J, Zhang L, Zuo C, et al. High dynamic range 3D measurements with fringe projection profilometry: a review[J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, 29(12): 122001.
- [12] Zheng H B, Ho Y S, Liu K. Three-dimensional imaging method of high-reflective objects based on structured light [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051202.  
郑宏博, Ho Yo-Sung, 刘凯. 高反光对象表面的结构光三维成像方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051202.
- [13] Feng W, Tang S J, Zhao X D, et al. Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0512003.  
冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0512003.
- [14] Wang J H, Yang Y X. High-speed three-dimensional measurement technique for object surface with a large range of reflectivity variations [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 9172-9182.
- [15] Wang M M, Du G L, Zhou C L, et al. Enhanced high dynamic range 3D shape measurement based on generalized phase-shifting algorithm [J]. *Optics Communications*, 2017, 385: 43-53.
- [16] Yan Q S, Zhu Y, Zhou Y L, et al. Enhancing image visibility by multi-exposure fusion [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2019, 127: 66-75.
- [17] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [18] Feng S J, Chen Q, Zuo C, et al. Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 18-27.
- [19] Jiang C F, Bell T, Zhang S. High dynamic range real-time 3D shape measurement [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7337-7346.
- [20] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9887-9901.
- [21] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 85: 84-103.
- [22] Han Y, Zhang Q C, Wu Y S. Performance comparison of three basic phase unwrapping

- algorithms and their hybrid algorithms [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815006.
- 韩宇, 张启灿, 吴应山. 三种基本相位展开算法及其融合算法的性能比较[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815006.
- [23] Li W G, Fang S P, Duan S J. 3D shape measurement based on structured light projection applying polynomial interpolation technique[J]. Optik, 2013, 124(1): 20-27.
- [24] Wang H X, Kema Q, Soon S H. Valid point detection in fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7535-7549.
- [25] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Three-dimensional shape measurement technique for shiny surfaces by adaptive pixel-wise projection intensity adjustment [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 91: 206-215.