

基于结构光技术的高反射表面三维测量

冯建洋, 湛海云*, 石础, 刘高铭, 阎翔

西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500

摘要 基于条带边缘的结构光编码策略生成投影图案, 提出一种新的结构光技术, 用于减少相机捕获图案中的过度饱和区域。在一次测量中, 为避免图像饱和, 在高、低两种曝光时间下捕获结构光图像。高曝光是为获得黑暗区域的高质量图像, 低曝光是为获取饱和区域的高质量图像。此外, 在低曝光阶段, 通过拟合非线性函数来估计投影图像与捕获图像之间的强度关系, 进而自适应调整相机捕获图像中饱和像素对应于投影图像中像素点的强度。将两次曝光采集到的图像融合成一组信噪比较高的条纹图像, 并对新图像进行解码, 从而实现精确的三维测量。实验结果表明, 所提出的结构光技术对反射率变化范围较大的物体表面, 甚至对不锈钢表面, 具有较高的测量精度。

关键词 测量; 高反射表面; 结构光; 自适应调整

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.221202

Three-Dimensional Measurement of Highly-Reflective Surface Using Structured Light Technique

Feng Jianyang, Chen Haiyun*, Shi Chu, Liu Gaoming, Yan Xiang

School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

Abstract A novel structured light technique is proposed in which the strip-edge-based structured light coding strategy is used to generate the projection patterns for reducing the area of oversaturation in an image captured using a camera. The structured light images are captured using both long and short exposure time during a single measurement to avoid image saturation. The long exposure time is used to obtain high-quality images of dark areas, whereas the short exposure time is used to obtain high-quality images of saturated areas. Furthermore, in the short exposure stage, the intensity relation between the projected image and the captured image is estimated by fitting a nonlinear function, and the saturated pixels in the captured image are adaptively adjusted to correspond to the pixel intensities in the projected image. Subsequently, the short- and long-exposure images are combined to form a set of fringe images with a high signal-to-noise ratio, and new images are decoded to achieve accurate three-dimensional measurement. The experimental results denote that the proposed structured light technique exhibits high measurement accuracy for object surfaces denoting a large range of reflectivity variation, including stainless steel surfaces.

Key words measurement; highly-reflective surface; structured light; adaptive adjustment

OCIS codes 120.5700; 100.3010; 100.3020; 100.4994

1 引言

基于结构光的三维(3D)测量技术已广泛应用于工业测量与检测、3D打印、机器人等诸多领域。结构光具有精度高、工作距离长、材料适应性强等优点, 是目前应用最广泛的光学测量方法之一^[1]。时

间编码和空间编码是现有结构光编码方法的2种主要编码策略。虽然基于这些编码方案的结构光技术具有较高的测量精度, 但对于具有反射特性的非朗伯体, 对其表面反射区域图像饱和度较高, 导致条纹的灰度值或相位值计算误差较大, 其很难进行三维重建。

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(51705513)、广东省自然科学基金(2017A030310474)

* E-mail: 547549315@qq.com

实际上,在反光表面喷涂薄的白色粉末是解决高反射问题的常用方法。显然,这种繁琐的工序可能会带来腐蚀等影响,使其难以满足大批量生产和检测的需要,特别是对于表面精度要求较高的金属零部件、艺术品及网络商品等物体的三维重建,更不具备可行性。因此,如何对现有的结构光编解码算法进行改进,使其可以直接用于金属及其他非漫反射表面的高精度快速三维重建,进而在多个领域得到应用,已经成为目前结构光三维重建研究方向的重点和难点。因此,到目前为止,许多研究人员已经尝试改进结构光技术以实现光亮表面的3D测量,有4种主要技术,即改进的基于编码方案的技术^[2-6]、基于多重曝光技术^[7-14]、自适应条纹投影技术^[15-22]和硬件辅助技术^[23-28]。相比之下,基于多重曝光的技术和自适应条纹投影技术比基于编码方案的技术具有更高的测量精度,因为它们可以通过控制曝光时间或自适应调整高反射的投影强度来获取高信噪比的图案图像。而改进的基于编码方案的方法,只会降低表面互反射的影响。此外,基于多重曝光的技术比自适应条纹投影技术更耗时,因为它们需要在不同曝光下捕捉大量的结构化光图像。现有的自适应条纹投影技术在一次曝光下捕捉图像时,很难实现对反射率变化较大的表面进行三维测量。最后,硬件辅助技术大多仅适用于镜面的三维形状的获取。

基于多曝光技术和自适应条纹投影技术,本文提出一种新的结构光技术。基于条带边缘的结构化光编码策略来生成投影图案,通过自适应调整投影

图案的强度使相机能够拍到一组高信噪比条纹图像,并对新的条纹图像进行解码完成三维重建。本研究的开展,将提供一种更加稳健的结构光三维重建方法和技术手段,实现金属等非漫反射表面的高精度直接三维重建,进一步提高现有结构光三维扫描技术的自动化程度,以及为快速发展的3D打印技术提供一种可靠的前端3D数字化手段,因而具有重要的研究意义和广阔的应用前景。

2 提出的结构光方法

2.1 基于条带边缘的结构光方法

编码和解码是结构光系统的两个主要问题,因为它们会影响测量性能的准确性、效率和分辨率。格雷码与相移和多频相移相结合的技术已广泛应用于漫反射目标的测量^[29]。与正弦移相编码方案相比,二值(即黑白)条纹编码方案对高反射面具有更高的稳健性。因此,本研究采用二值条带移位编码策略来产生结构光图案。如图1所示,首先,按照时间顺序投射 n 幅格雷码编码图案,将投影范围分为 2^n 个不同区域并形成 2^n 个编码值。之后,将宽度为4个像素的二进制条带移动8次,生成4幅正线移图案和4个负线移图案^[2]。解码公式为

$$\begin{cases} P = G + S \\ G \in \{0, 1, 2, \dots, (2^n - 1)\}, \\ S \in \{0, 1, 2, \dots, (m - 1)\} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P 为绝对相位值, G 为格雷码解码值, S 为线移解码值, n 为格雷码编码图案数, m 为线移图像移动次数。

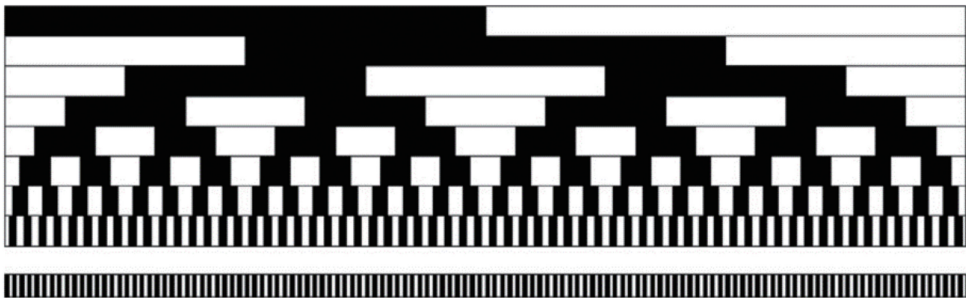


图1 基于条带边缘的结构光图案

Fig. 1 Strip-edge-based structured light pattern

条带边缘检测是编码策略的一个重要步骤,因为它会直接影响测量精度。图像表面的反射特性使得图像中的条带图案变得模糊,进而提取条带边缘变得困难。在不考虑表面反射的情况下,可以将正投影与负投影的交点作为投影条纹边缘,通常采用过零法^[30]来检测条带边缘的位置。然而,由于高反

射、环境光的照射和表面互反射等原因,图像中出现饱和和区导致条纹边缘检测失败。因此,本文采用改进的过零法来精确提取条带边缘^[2]。

2.2 估计投影图像与相机捕获图像之间的强度关系

由于相机捕获图像的成像质量不仅与光照、曝

光时间有关,而且也会受到投影条纹强度的影响,因此,当被测物体的表面存在较大反射率时,有必要根据被测表面的局部反射率来调整基于条带边缘的结构光图案中每个像素的强度。该方法的核心思想是提高相机捕获图像的信噪比。具体来讲,本文方法可以根据投影图案强度与相机捕获图案的强度,预测投影条纹图案在像素级的不同最佳投影强度,从而获得高信噪比图像。由于结构光系统的伽马畸变,投影图案与捕获图案之间的强度关系呈非线性关系。因此,有必要对图像中每个像素的投影图案与捕获图像之间的强度关系进行估计。根据参考文献[31]中的定义,假设测量场景为静态,并且忽略照明变化,则摄像机捕获图像中每个像素点的强度值 $I^{(c)}$ 可表示为

$$I^{(c)} = f(Et), \quad (2)$$

式中, f 是成像系统函数, E 是辐照度, t 是曝光时间。假设 f 单调可逆,令 $g = \ln f^{-1}$, 则(2)式可以写为

$$g[I^{(c)}] = \ln E + \ln t. \quad (3)$$

在结构光系统中,由于每个像素的辐照度 E 主要来自于投影强度 $I^{(p)}$, 则(3)式可以写为

$$g[I^{(c)}] = \ln I^{(p)} + \ln t. \quad (4)$$

因为曝光时间 t 由低曝光时间给出,它是已知参数,所以在(4)式中只有相机响应函数 g 未知。为估计投影图案与相机捕获图像之间的强度关系,函数 g 应该已知。由于相机捕获图像中像素点灰度值 $I^{(c)}$ 的数值有限,因此函数 g 也是有限的。因此,本文通过投影一系列均匀的灰度图像至被测物体表面并由相机捕获,利用最小二乘法拟合求解出每个像素点对应的函数 g , 则投影图案强度关于相机捕获图像强度的关系式表示为

$$I^{(p)} = \exp\{g[I^{(c)}] - \ln t\}. \quad (5)$$

因此,当设置相机捕获强度 $I^{(c)}$ 为理想强度 $I_{\text{ideal}}^{(c)}$ 时,根据(5)式就可计算出最佳投影强度 $I_{\text{opt}}^{(p)}$, 以避免图像饱和。

2.3 编码图像校正区域估计

相机响应函数功能仅能计算出投影仪投影强度的大小,却无法算出最佳的投影强度应该位于何处。为计算投影图案中的调整区域,需要获得投影机像平面与摄像机像平面之间的坐标映射关系。投影仪最高灰度级(对于8位投影仪)输入为255,此外,为确保物体表面暗区的成像条纹能够得到最强调制,因此选择最大灰度级为255的灰度图像来执行饱和像素的识别和聚类。考虑到相机传感器噪声,故保

留一些灰度级空间以避免噪声导致相机传感器饱和,因此将阈值调整为248。这意味着,投影灰度级为255的灰度图像在相机捕获投影图像中,如果某像素灰度值达到248,则该像素被识别为饱和像素,同时生成相机掩模图像 $M^{(c)}[u^{(c)}, v^{(c)}]$, 其中 $u^{(c)}$ 、 $v^{(c)}$ 分别表示相机掩模图像中像素点的横、纵坐标。

在相机掩模图像中,各个区域的饱和像素通常聚在一起,通过跟踪区域边界可以找到饱和像素簇的外部边界。由于饱和像素簇的每个轮廓上的点都不饱和,并且具有自己的编码信息,因此利用多频相移技术来获得投影仪平面与相机图像平面之间的对应关系。具体来讲,利用投影仪向被测物体表面投射垂直和水平的正弦相移条纹图案,利用微相测量轮廓技术^[5]计算垂直和水平方向的绝对相位 φ_{ver} 和 φ_{hor} 。对于相机平面中的点 $M^{(c)}[u^{(c)}, v^{(c)}]$, 其绝对相位值可以通过沿垂直和水平方向的线性插值来计算,分别表示为 $\varphi_{\text{ver}}(x, y)$ 和 $\varphi_{\text{hor}}(x, y)$, 其中 x 、 y 分别表示横、纵坐标。至此,投影仪图像平面中其对应点 $M^{(p)}[u^{(p)}, v^{(p)}]$ 为

$$\begin{cases} u^{(p)} = \frac{V \cdot \varphi_{\text{ver}}(u^{(c)}, v^{(c)})}{2\pi T} + \frac{V}{2} \\ v^{(p)} = \frac{H \cdot \varphi_{\text{hor}}(u^{(c)}, v^{(c)})}{2\pi T} + \frac{H}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

式中, V 、 H 表示投影图案的宽度和高度, T 表示条纹周期的最大整数。因此,在确定相机掩模图像 $M^{(c)}[u^{(c)}, v^{(c)}]$ 之后,可以根据对应关系生成投影仪掩模图像 $M^{(p)}[u^{(p)}, v^{(p)}]$, 且用投影仪掩模图像中的匹配饱和像素簇来指示所有条纹图案中最佳投影强度的定位。

2.4 图像融合

由于物体表面的暗区在相机中的成像效果较差,该区域编码条纹图案的解码容易出现错误。为此,可选择在两个不同曝光时间下捕获结构光图像,将图像融合成具有较高信噪比的一组条纹图像。常见的融合方法是在相机捕获图像中的每个像素处选择最亮的不饱和强度,即将低曝光时间下暗区的曝光像素值由相同位置的高曝光时间下的像素值代替,这种融合方法经常用于相移条纹图像。然而,对于具有明确条带边缘的结构光图像,可能会在条纹边缘处出现边缘检测误差。因此,本文的融合方法是计算两个不同曝光时间下捕获条纹图像的平均强度,计算过程为

$$I_{\text{mean}}^{(c)}(u, v) = \frac{I_{\text{high}}^{(c)}(u, v) + I_{\text{low}}^{(c)}(u, v)}{2}, \quad (7)$$

式中, $I_{\text{high}}^{(c)}(u, v)$ 、 $I_{\text{low}}^{(c)}(u, v)$ 分别为相机在高、低两种不同曝光时间下的捕获强度, $I_{\text{mean}}^{(c)}(u, v)$ 为两种曝光进行融合的平均强度, u 、 v 为相机捕获图像中像素点横、纵坐标。由于融合图像中饱和和像素轮廓处的强度梯度很小, 因此可获得具有高信噪比的一组新条纹图像, 并且可以通过对新条纹图像进行解码来获得对应关系。

3 实验和结果

本次实验搭建的结构光系统由像素分辨率为 1280×1024 的 CCD 摄像机和像素分辨率为 1280×720 的 DLP 投影仪组成。该系统的工作距离约为 600 mm。在该结构光系统进行标定之后, 由计算机控制 DLP 投影仪, 将基于条带边缘的结构光图案

投影到被测物体表面, 由摄像机捕获并进一步传输到计算机。计算机处理图像以确定对应关系, 并利用三角测距原理, 将对应关系进一步转换为三维信息。

为测试该方法的性能, 实验中选取 3 个具有高反射特性的物体, 如图 2 所示。基于条带边缘的结构光图案投射到物体表面, 在高、低两种曝光时间下由相机捕获, 如图 3 所示。可以看出, 当在高曝光时间下拍摄结构光图像时, 3 个被测表面的图像饱和度非常明显, 且饱和区域没有条纹, 而非饱和区域, 甚至在黑暗区域, 条纹都是清晰的。相比之下, 当在低曝光时间下拍摄结构光图像时, 饱和区域大大减少, 而黑暗区域的条带变得模糊。实验结果表明, 提出的双曝光策略在捕捉结构光图像时具有很强的互补性。



图 2 三个具有高反射特性的实验物体。(a)金属块;(b)不锈钢表面 1;(c)不锈钢表面 2

Fig. 2 Three experimental objects with highly-reflective property. (a) Metal block; (b) stainless steel surface 1; (c) stainless steel surface 2

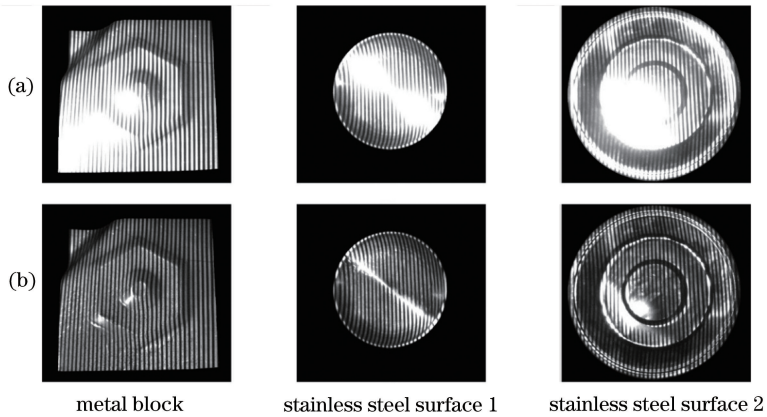


图 3 三个测量表面在高曝光和低曝光时间拍摄的条纹图像。(a)高曝光时拍摄的条纹图像;(b)低曝光时拍摄的条纹图像
Fig. 3 Fringe images captured in long and short exposure time for three measured surfaces. (a) Fringe images captured in long exposure time; (b) fringe images captured in short exposure time

采用均匀强度投影的方法估计低曝光下捕获图像中的饱和区域, 并用微相位测量轮廓术计算其在投影模式中的映射区域, 且根据(5)式计算出最佳投影强度, 生成掩模图像如图 4 所示。此外, 根据投影图像与拍摄图像之间的强度关系调整投影图像的强

度, 在由相机捕捉调整后的图像后, 将高曝光时间和低曝光时间的图像融合成一组高信噪比的条纹图像, 如图 5 所示。在高曝光时间和低曝光时间下, 融合条纹图像中的条纹明显比图 5 中相机捕获条纹图像中的条纹清晰。

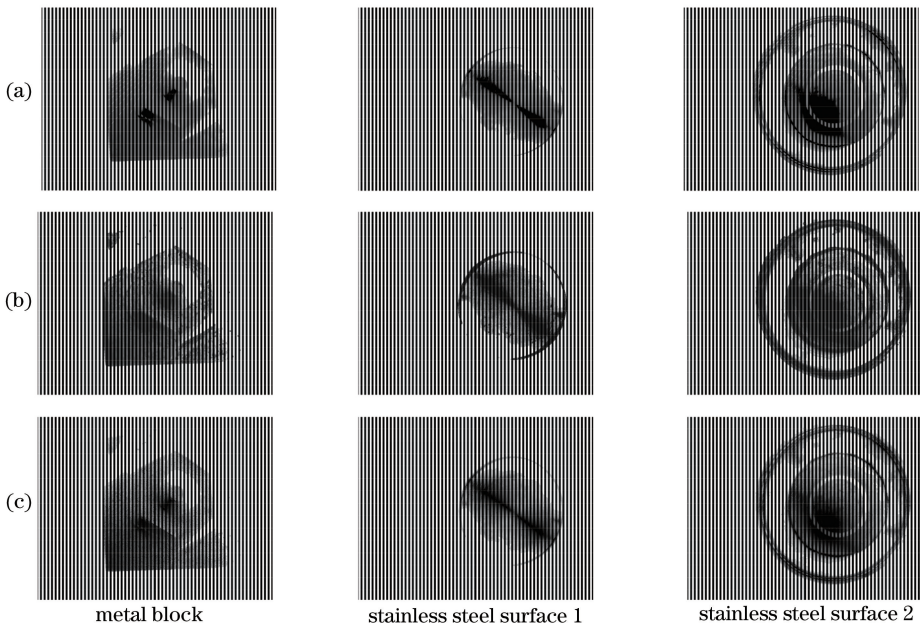


图 4 编码条纹调整结果。(a)文献[17]的方法;(b)文献[16]的方法;(c)本文方法

Fig. 4 Results of coded fringe adjustment. (a) Method in Ref. [17]; (b) method in Ref. [16]; (c) proposed method

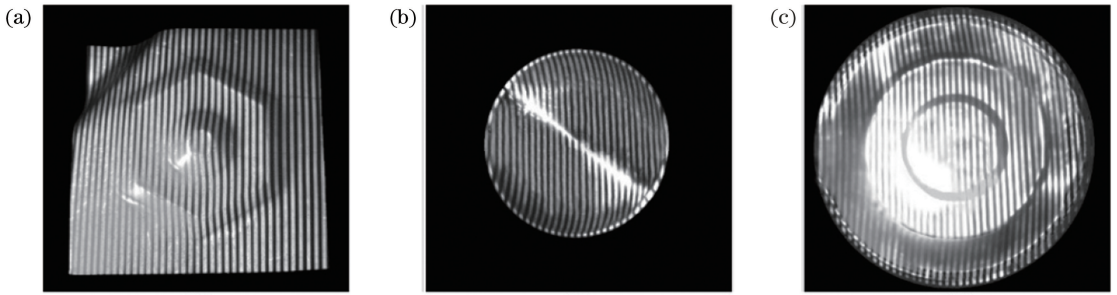


图 5 三个被测表面的融合条纹图像。(a)金属块;(b)不锈钢表面 1;(c)不锈钢表面 2

Fig. 5 Combined fringe images for three measured surfaces. (a) Metal block; (b) stainless steel surface 1; (c) stainless steel surface 2

对融合后的条纹图像进行解码,可得到三个被测表面的对应关系。为证明本文方法的优越性,对 Song 等^[2]、Zhang 等^[16]和 Lin 等^[17]的 3 种方法进行比较,所有比较的方法与本文方法都在相同的低曝光时间下获得结构光图像。这三个表面的四种不同方法的对应关系分别如图 6(a)~(d)所示。通过比较这 4 种方法得到的被测物体的对应性,可以发现相对于其他 3 种方法,本文方法的对应关系的个数更多。此外,Zhang 和 Lin 的方法得到的结果基本相同,Song 的方法得到的结果相对较差。其主要原因是本文方法是通过高曝光和低曝光及低曝光阶段的自适应投影强度调整来获得高信噪比的图像,而其他 3 种方法只是在低曝光时间下捕获结构光图像,且 Song 的方法未对投影图像进行调整。

为准确评估这几种不同方法的性能,使用时空

分析法^[32]获取所有测量表面的基准数据,提供标准对应关系,如图 6(e)所示,其中,对应关系是指相机捕获图像中的二维像素点对应于投影条纹图像中的编码值。将每个被测表面在不同方法时的所有点的对应关系的集合表示为 $O = \{(u_1, v_1, s_1), (u_2, v_2, s_2), \dots, (u_N, v_N, s_N)\}$, 其中 u_i, v_i 分别表示第 i 个像素点的横纵坐标,像素点的序号 $i = 1, 2, \dots, N, s_i$ 表示对应性, N 表示点的数量。基于标准数据,定义距离准则 d_c ($d_c = 2$ pixel) 以判断对应关系是否正确。如果满足

$$u = u_i, v = v_i, |s - s_i| \leq d_c, \quad (8)$$

则第 i 个像素点的对应关系 (u_i, v_i, s_i) 正确。其中 s 表示对应性的数据标准。该准则可用于计算每种方法的正确对应性的数量。引入一个指标,即正确率,来描述每种方法的性能,其定义为

$$A_{cc} = \frac{C_{or}}{T_{ot}}, \quad (9)$$

式中, A_{cc} 表示正确率, C_{or} 和 T_{ot} 分别表示正确对应性的数量和基准数据中总的对应性数量。

基于(8)、(9)式, 可以计算出所有测量表面在采用4种方法时的正确率, 如图7所示, 其中MB表示金属块, SS1表示不锈钢表面1, SS2表示不锈钢表面2。可以看出, 对于所有测量表面, 在利用本文方法进行实际测量时获得的正确率要高于其他3种方法, 这是由于本文方法不仅可以通过双曝光策略获得高质量的结构光图像, 而且可以在低曝光阶段进一步调整

投影条纹图案的强度, 因此所得到的测量结果是合理的。根据对应关系, 利用标定参数和三角测距原理, 可以得到被测物体的三维点云数据, 因此, 可以重构出被测物体在不同测量方法中的形状, 如图8所示。可以看出, 对于所有的测量表面, 利用本文方法重建得到的形状面积比其他3种方法都要大。由于被测物体表面存在反射率特别高的区域, 即使将灰度值为0的条纹图像投至其表面, 也会丢失编码信息, 因此在利用所有方法进行重建的结果中, 仍然均存在一些未重建的区域。尽管如此, 实验结果也足以证明本文方法要比其他方法具有更高的测量准确度。

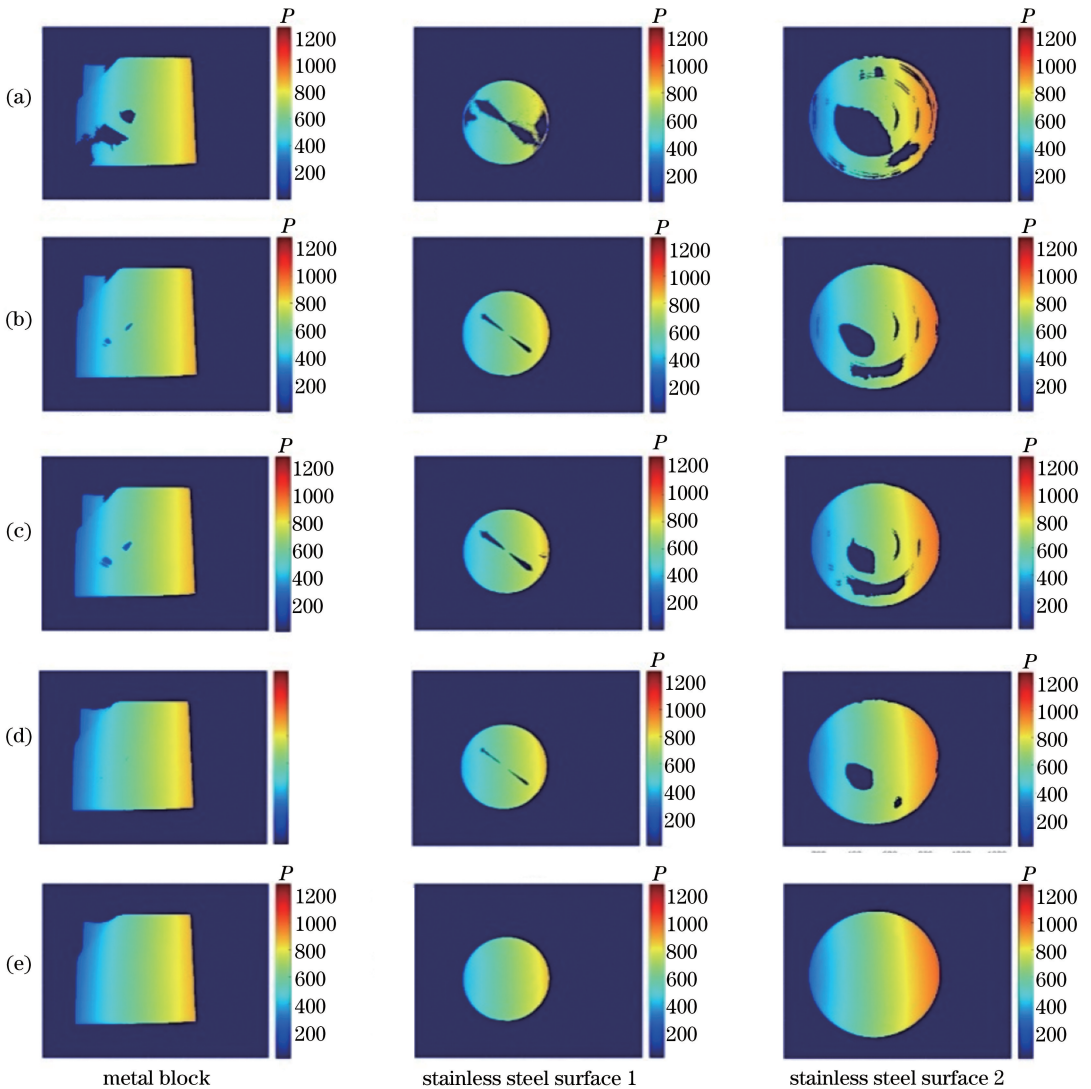


图6 三种不同被测物体在不同三维重建方法中的对应性。(a)文献[2]的方法;(b)文献[16]的方法;(c)文献[17]的方法;(d)本文方法;(e)时空分析法

Fig. 6 Correspondences of three measured surfaces in different 3D reconstruction methods. (a) Method in Ref. [2]; (b) method in Ref. [16]; (c) method in Ref. [17]; (d) proposed method; (e) spatiotemporal analysis method

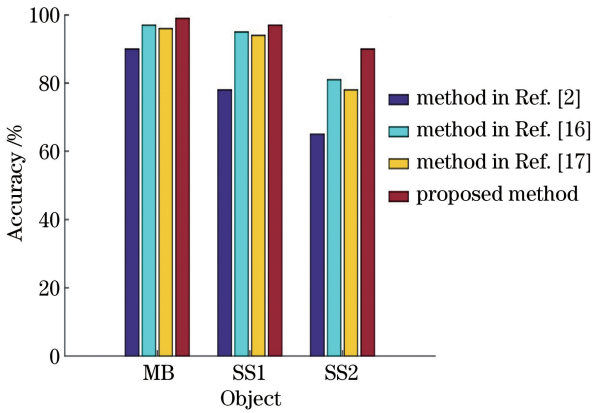


图7 被测物体在不同三维重建方法中的准确度

Fig. 7 Accuracies of different 3D reconstruction methods for measured surfaces

4 结 论

对高反射面的三维测量是现有结构光测量技术面临的一大挑战。为此,提出一种新的结构光技术,该方法采用基于条带边缘的结构光编码策略来生成投影图案。为避免过度曝光和曝光不足,在一次测量期间,相机在高、低两种曝光时间下捕获条纹图像。高曝光是为了获得高质量的暗区图像,而低曝光是为了获得高质量的高反射区图像;另外,在低曝光阶段自适应调整饱和像素对应的投影图案的像素强度。将两次曝光后的图像融合成一组高信噪比的条纹图像,对新的条纹图像进行解码,最终完成被测物体的三维测量。实验结果验证了本套系统及算法的准确性、有效性及稳健性。

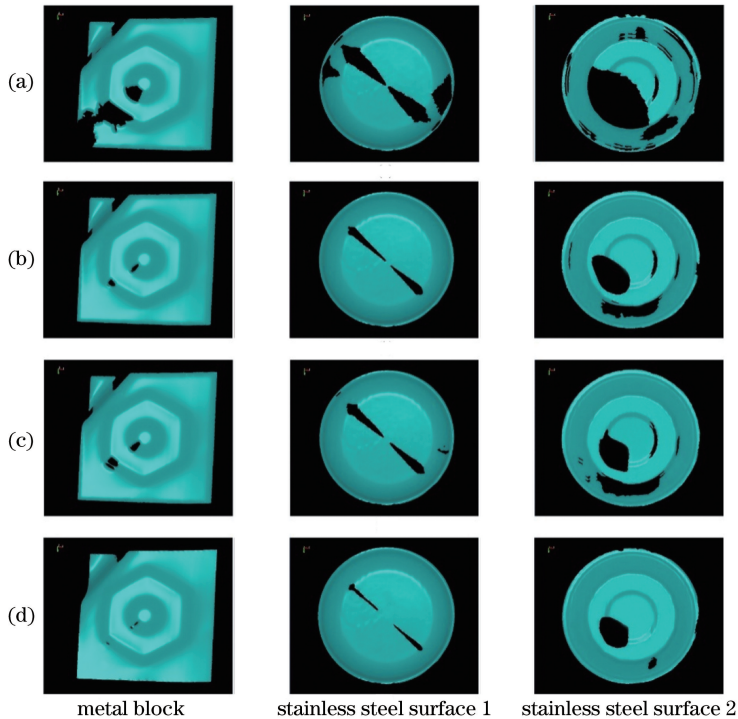


图8 三种测量表面的重构形状。(a)文献[2]的重建结果;(b)文献[16]的重建结果;
(c)文献[17]的重建结果;(d)本文方法的重建结果

Fig. 8 Reconstructed shapes for three measured surfaces. (a) Reconstructed shapes by method in Ref. [2]; (b) reconstructed shapes by method in Ref. [16]; (c) reconstructed shapes by method in Ref. [17]; (d) reconstructed shapes by proposed method

参 考 文 献

[1] Salvi J, Fernandez S, Pribanic T, *et al.* A state of the art in structured light patterns for surface profilometry[J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(8): 2666-2680.

[2] Song Z, Chung R, Zhang X T. An accurate and robust strip-edgebased structured light means for

shiny surface micro-measurement in 3D [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 1023-1032.

[3] Gupta M, Agrawal A, Veeraraghavan A, *et al.* Structured light 3D scanning in the presence of global illumination [C] // *CVPR 2011*, June 20-25, 2011, Colorado Springs, CO, USA. New York: IEEE, 2011: 713-720.

- [4] Gupta M, Nayar S K. Micro phase shifting [C] // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, RI, USA. New York: IEEE, 2012: 813-819.
- [5] Tang S M, Zhang X, Tu D W. Micro-phase measuring profilometry: its sensitivity analysis and phase unwrapping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 72: 47-57.
- [6] 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.
- [7] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48 (3): 033604.
- [8] Jiang H Z, Zhao H J, Li X D. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(10): 1484-1493.
- [9] Song Z, Jiang H L, Lin H B, *et al.* A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 95: 8-16.
- [10] Ekstrand L, Zhang S. Autoexposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 123603.
- [11] Rao L, Da F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.
- [12] Suresh V, Wang Y J, Li B W. High-dynamic-range 3D shape measurement utilizing the transitioning state of digital micromirror device [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 176-181.
- [13] Zhao H J, Liang X Y, Diao X C, *et al.* Rapid *in situ* 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 170-174.
- [14] Ri S E, Fujigaki M, Morimoto Y. Intensity range extension method for three-dimensional shape measurement in phase-measuring profilometry using a digital micromirror device camera [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29): 5400-5407.
- [15] Waddington C, Kofman J. Saturation avoidance by adaptive fringe projection in phase-shifting 3D surface-shape measurement [C] // 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies, October 25-27, 2010, Toronto, ON, Canada. New York: IEEE, 2010: 11747004.
- [16] Zhang C, Xu J, Xi N, *et al.* A robust surface coding method for optically challenging objects using structured light [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(3): 775-788.
- [17] 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.
- [18] Babaie G, Abolbashari M, Farahi F. Dynamics range enhancement in digital fringe projection technique [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 243-251.
- [19] 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.
- [20] Li S X, Da F P, Rao L. Adaptive fringe projection technique for high-dynamic range three-dimensional shape measurement using binary search [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 094111.
- [21] Chen S L, Xia R B, Zhao J B, *et al.* Analysis and reduction of phase errors caused by nonuniform surface reflectivity in a phase-shifting measurement system [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56 (3): 033102.
- [22] Chen C, Gao N, Wang X J, *et al.* Adaptive projection intensity adjustment for avoiding saturation in three-dimensional shape measurement [J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 694-702.
- [23] Salahieh B, Chen Z Y, Rodriguez J J, *et al.* Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (8): 10064-10071.
- [24] Jeong J, Hong D, Cho H. Measurement of partially specular objects by controlling imaging range [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6718: 671808.
- [25] Jeong J, Kim M Y. Adaptive imaging system with spatial light modulator for robust shape measurement of partially specular objects [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27787-27801.
- [26] Nayar S K, Mitsunaga T. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures [C] // Proceedings IEEE Conference on Computer Vision

- and Pattern Recognition. CVPR 2000 (Cat. No. PR00662), June 15-15, 2000, Hilton Head Island, SC, USA. New York: IEEE, 2000: 6651672.
- [27] Yang Z D, Wang P, Li X H, *et al.* 3D laser scanner system using high dynamic range imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 31-41.
- [28] Nayar S K, Gupta M. Diffuse structured light[C] // 2012 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), April 28-29, 2012, Seattle, WA, USA. New York: IEEE, 2012: 12804039.
- [29] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C] // Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques-SIGGRAPH '97, August 3-8, 1997. New York: Association for Computing Machinery, 1997.
- [30] Ziou D, Tabbone S. Edge detection techniques-an overview[J]. *Pattern Recognition and Image Analysis C/C of Raspoznavaniye Obrazov I Analiz Izobrazhenii*, 1998, 8(4): 537-559.
- [31] Bergmann D. New approach for automatic surface reconstruction with coded light [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 2-9.
- [32] Zhang X, Zhu L M, Chu L W. Evaluation of coded structured light methods using ground truth[C] // 2011 IEEE 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS), September 17-19, 2011, Qingdao, China. New York: IEEE, 2011: 117-123.