

结构光饱和区域分区投射优化补偿方法

刘飞¹, 何春桥¹, 申爱民², 李佳鑫¹, 赖俊霖¹

¹重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

²成都航空职业技术学院, 四川 成都 610100

摘要 结构光在三维形貌测量中应用十分广泛,但对于表面反射率较高的物体,对其投影一定强度的结构光,易在被测物表面形成局部亮度饱和,使得该区域在重建过程中出现较大误差甚至无法重建。为了提高表面高反射率物体的三维重建质量,提出了一种基于分区投射的结构光饱和区域主动补偿方法。首先通过投射区域格雷编码灰度图计算饱和区域在投影平面的位置。然后增加过渡补偿区域,平滑降低饱和区域的条纹光栅投射强度。最后,通过实验对饱和区域分区投射优化补偿方法进行了验证。结果表明,所提方法能够减少计算补偿区域所需投影图片的数量,实现饱和区域边界平滑过渡,提高计算效率,有效抑制亮度饱和引起的重建误差,提高三维重建精度。

关键词 测量; 表面测量; 结构光; 优化补偿; 亮度饱和

中图分类号 TN206

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0612001

Optimized Compensation Method of Divisional Projection for Saturated Region of Structured Light

Liu Fei¹, He Chunqiao¹, Shen Aimin², Li Jiaxin¹, Lai Junlin¹

¹State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu, Sichuan 610100, China

Abstract The structured light is widely used in 3D surface shape measurement. However, it is likely to cause the intensity saturation when projecting certain intensity structured light to the surface with high reflection. The intensity saturation always causes the reconstructed surface with large errors and even hard to be reconstructed. In order to improve the quality of 3D reconstruction of high reflective objects, an active compensation method base on light intensity divisional projection is proposed. Firstly, the position of the saturated region in the projection plane is calculated by the Gray code grayscales in the projection area. Then, the transition compensation region is proposed to reduce the projection intensity of the fringe pattern in the saturated region smoothly. Finally, the divisional projection optimized compensation method for saturated region is verified by the experiments. The experimental results show that the proposed method can reduce the number of projected images needed to calculate the compensation region, achieve a smooth transition of the saturated region boundary, improve the computational efficiency, effectively suppress the reconstruction error caused by the saturation, and improve the accuracy of the 3D reconstruction.

Key words measurement; surface measurement; structured light; optimized compensation; luminance saturation

OCIS codes 120.6650; 150.6910; 120.5050; 100.3010;

1 引 言

基于面结构光的三维形貌测量方法,因具有高精度、非接触、测量效率高等优点已经成为一种

重要的三维测量方式。在面结构光测量过程中,需要向被测物体投影一定光强的编码图案^[1]。当被测表面粗糙、反射率较低时,三维重建的表面质量和精度都较高;但当被测物体表面反射率较高

收稿日期: 2017-12-06; 收到修改稿日期: 2018-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51605059)、科技部重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0113600)、中央高校基本科研业务费项目(106112017CDJPT280006)

作者简介: 刘飞(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事机器视觉、机器人及其自动化等方面的研究。

E-mail: fei_liu@cqu.edu.cn

时,容易形成局部亮度饱和,结构光解相困难,导致三维重建精度降低,甚至无法完成三维重建。目前解决亮度饱和问题的方法主要有多相机或多视角拍摄法、表面喷涂显像剂法、动态范围成像法和主动补偿法等。其中多相机或多视角拍摄法是通过安装多个相机或调整拍摄位姿^[2-4]来获得不同角度的图像,因此对应的亮度饱和区位置也不相同,通过不同角度的三维重建数据相互补偿,可以减小亮度饱和引起的误差。但采用多相机或多视角拍摄方法时,相机数量、数据采集和处理的规模都相应增加。表面喷涂显像剂法简单方便,而且可以较好地解决表面反光问题,但是在高精度的三维测量中,涂层的厚度及喷涂的不均匀性都将直接影响测量的精度。如果待测物体本身或测量环境具有高洁净度要求,则表面喷涂显像剂的方法将受到限制。动态范围成像法^[5-7]通过控制相机的曝光时间或镜头光圈大小来获取不同光强条件下的图像,对每个区域筛选出有效的光强图像,从而获得满足三维重建条件的有效数据,该方法在一定程度上解决了局部亮度饱和的问题。但是获取不同光强的图像,则需要不同参数条件进行拍摄,数据量庞大。基于数字微镜器件(DMD)动态补偿的三维测量方法^[8]通过在 CCD 相机前加入 DMD 进行投影光的调制,达到抑制亮度饱和的作用;但该方法适用于二进制脉冲宽调制,对于多频外差原理的结构光则不适用。主动补偿法通过主动调节投影仪输出光强,达到抑制亮度饱和的目的,其中包括动态调节^[9-12]和局部补偿。动态调节类似于动态调整相机曝光时间,通过动态调节投影仪的输出光栅强度,得到各区域有效条纹光栅数据,改善局部亮度饱和的问题。局部补偿则是解算出亮度饱和区域在投影平面中的局部补偿位置,再降低该区域的光栅强度,使得亮度饱和区域减小。Li 等^[13]提出适应条纹投影(AFPP)法,该方法采用多频外差原理的结构光,通过二值化图像求出亮度饱和区域及其边缘像素,然后由边缘像素解算出投影平面的亮度饱和区域边缘,最终确定亮度饱和区域在投影平面的局部补偿位置。然而该方法对饱和区域边缘像素坐标解算时,需要对其进行水平和垂直方向的相位解相,而亮度饱和区的边缘像素点易出现相位信息缺失,导致计算结果错误。此外该方法使得补偿后的条纹光栅灰度值跳变,饱和区域边界出现阶跃误差,导致补偿区域边缘的三维重建误差增大。

本文基于以上问题提出一种饱和区域分区投射优化补偿方法。首先将投影平面进行区域划分和格雷编码,并对采集的图像进行区域解码;然后通过解码出现的异码值确定亮度饱和区域,选取饱和区域周边区域作为邻近区域,解算出两类区域在投影仪平面的位置;最后采用优化条纹光栅,增加过渡补偿区域,平滑降低亮度饱和区域的投影光栅强度,减小饱和区域边界的三维重建误差。本文提出的饱和区域分区投射优化补偿方法,能有效避免亮度饱和对三维重建的影响,提高重建精度。

2 亮度饱和区域及其定位

2.1 亮度饱和

研究采用多频外差相移原理的结构光进行三维重建^[14-15],所采用的三种四步相移法频率分别为 $1/70$ 、 $1/64$ 、 $1/59$,相位差为 $\pi/2$,其测量原理如图 1 所示。计算机输出条纹光栅至投影仪,通过相机采集得到光栅信息后,再由计算机进行相位解算,最终完成三维重建。采用 8 位相机拍摄时,其灰度响应等级为 $0\sim 255$,如果被测物体表面反射较强,当某一区域灰度值达到 255 时,则该区域出现如图 2(a)所示的亮度饱和。此时如果在被测物体表面投射条纹光栅,则条纹光栅也会在该区域出现亮度饱和,如图 2(b)所示。图 2(c)为图 2(b)中红线部分对应的条纹光栅强度分布,从图 2(c)可知,饱和区域的条纹光栅灰度值达到 255,出现了截断现象,不再满足正弦规律,因此该区域的条纹光栅包含的相位信息丢失,从而影响解相位的准确性,导致三维重建误差增大,甚至造成表面重建缺陷,如图 2(d)所示。

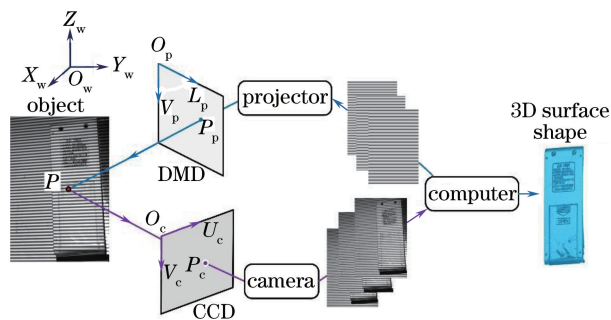


图 1 相移法结构光三维重建原理

Fig. 1 Schematic of 3D reconstruction based on phase shifting structured light

2.2 分区投射及定位

饱和区域分区投射优化补偿为局部主动补偿方法,因此该方法关键是解算出亮度饱和区域在投影平面的局部补偿位置。首先将投影平面进行区域划

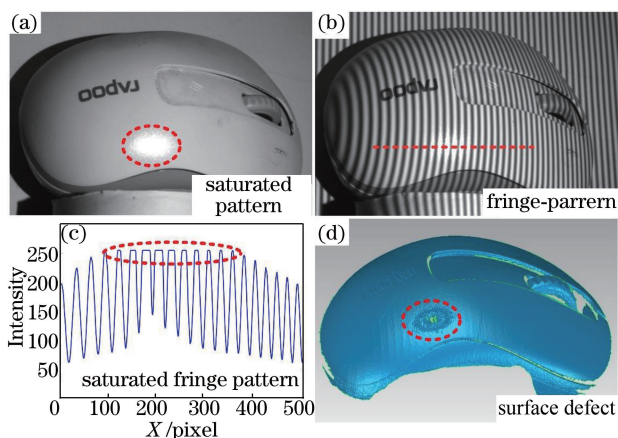


图 2 (a)亮度饱和区域图像；(b)投影条纹光栅；
(c)饱和区域条纹光栅强度；(d)三维重建表面缺陷

Fig. 2 (a) Luminance saturated region image; (b) projection fringe pattern; (c) intensity of fringe pattern in saturated region; (d) 3D reconstruction of surface defect

分,确定其每个像素所在区域位置。对每个区域采用二进制编号,然后进行格雷编码生成编码灰度图。如区域划分个数为 m , 则格雷编码的条件需满足:

$$n^2 \geq m + 2, n \in 2, 3, 4, \dots, N, \quad (1)$$

式中 n 为生成投影格雷编码灰度图的数量,也等于区域二进制编码序列的位数。

投影格雷编码灰度图的数量根据实际测量物体形成饱和区域的特性和分布进行选择,在被测物体型面结构比较简单、饱和区域较大或分布集中的情况下,选择较少的区域划分数量,从而减少投影图片数量。当被测物体表面复杂,饱和区域分布离散或较小时,可以适当增大区域划分的数量,使得饱和区域检测更加精细。研究根据实际待测物体饱和区域特性,首先将投影平面划分为 10×12 个编码区域,对划分的区域从左至右依次编号, $m = 1, 2, 3, \dots, 84, 86, \dots, 120, 121$ 。由于 7 位二进制全为 1 时对应的格雷编码值为 85,因此编号 85 在编码时跳过。将每个编号生成对应的 7 位二进制格雷码,即 7 张编码图。在每张编码图中,当区域中对应的二进制为 0 时,则将该区域中所有像素灰度值置为最小输入灰度值 I_{\min} ;若该区域对应的二进制为 1,则将该区域所有像素灰度值置为最大输入灰度值 I_{\max} ,其中 I_{\min} 和 I_{\max} 通过投影仪伽马校正得到^[16-19]。最终生成 7 张格雷编码灰度图如图 3(a)~(g)所示。解码过程即为编码的逆过程。将相机采集得到的 7 张编码图依次进行二值化处理,可以得到图像中每个像素点的 7 位二进制序列。将每个像素点对应的二进制序列进行解格雷码,即可得到对应的编号 n ,相

同编号的像素的集合即为投影平面划分的对应区域。对图 3(a)~(g)的 7 张编码图进行区域解码,效果如图 3(h)所示。当某一像素点出现亮度饱和时,则对应的 7 位二进制序列全为 1。通过确定所有饱和像素点的连通域,即可得到亮度饱和区域在投影平面的位置。

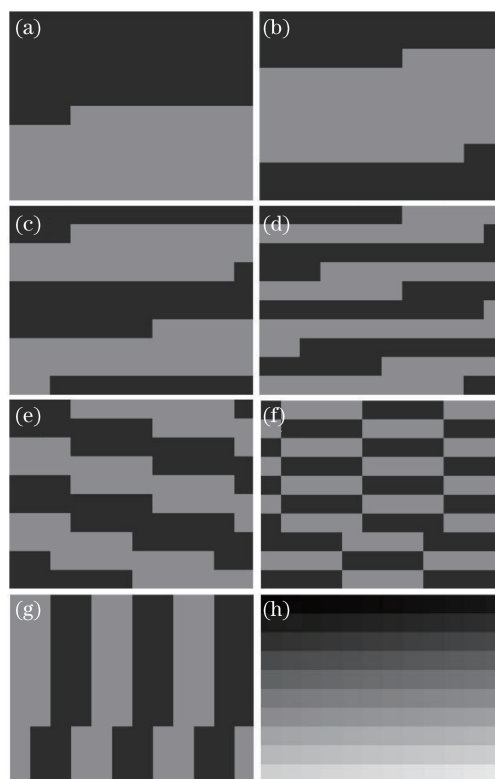


图 3 (a)~(g)格雷编码灰度图；(h)正常解码效果图

Fig. 3 (a)~(g) Gray code grayscales;
(h) diagram of normal decoding

分区投射确定的饱和区域的示意图如图 4 所示,图中网格为投影平面分区示意,其中亮度饱和区域如图 4 中黄色椭圆所示。将亮度饱和区域周边区域定义为邻近区域,如图 4 中红色矩形区域所示。不同型面的物体形成饱和区域的形状有所不同,通常呈现出椭圆形或者长条形,且饱和区域发散,没有明显的饱和区域边界。与 AFPP 法中需准确得到饱和区域坐标不同,研究采用过渡补偿方法,只需确定出饱和区域的大致形状即可。在实际补偿中,采用最小包围椭圆对饱和区域进行圈定,首先得到解码后亮度饱和区域连通域的边界像素,按比例计算出边界像素点在邻近区域的相对位置,得到投影平面中饱和区域边缘像素点坐标。利用边缘像素坐标拟合最小外接椭圆,即可得到投影平面中的最小包围椭圆参数:最小包围椭圆的长短半轴 a 和 b 以及中心坐标 (C_x, C_y) 。大量实验测试表明,采用最小

包围椭圆方法对绝大部分形状的亮度饱和区域都能得到良好的补偿效果。

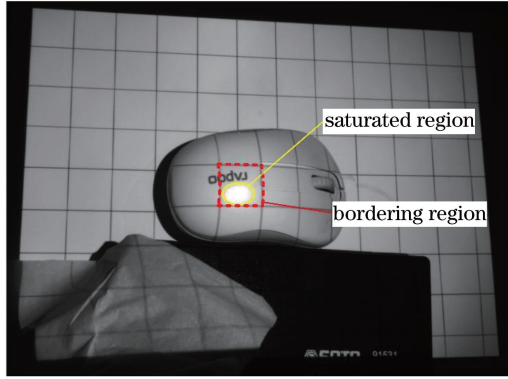


图 4 最小椭圆圈定饱和区域示意图

Fig. 4 Schematic of the smallest ellipse surrounding the saturated region

3 饱和区域优化补偿

3.1 补偿值计算

伽马校正使得投影仪输出和相机采集光强保持线性关系,得到最大输入值 I_{\max} 、最小输入值 I_{\min} ,及伽马校正系数 γ 。条纹光栅强度 I 应满足: $I_{\min} < I < I_{\max}$ 。分区投射优化方法最重要的是确定饱和区域中心的最大输入值 $I_{\sigma\text{-max}}$ 。通过最大输入灰度值法(MIGL)^[20]计算亮度饱和区域中心的最大输入值 $I_{\sigma\text{-max}}$:

$$I_{\sigma\text{-max}}(x, y) = \max[I_i^{(k)}(x, y) | I_i(x, y) < I_{\max} \forall i],$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N, k = I_{\max}, I_{\max} - S, I_{\max} - 2S, \dots, 0,$$
(2)

式中 i 表示第 i 个饱和区域; k 表示步数,即迭代次数; S 表示进行 MIGL 计算的固定步长。采用 MIGL 计算 $I_{\sigma\text{-max}}$ 时,首先利用伽马校正得到的 I_{\max} 和 I_{\min} 生成条纹光栅进行投射并采集。若中心区域出现亮度值饱和,则将最大输入值 I_{\max} 减少 S 个灰度值,然后继续投射并采集,直到原本饱和区域中心未发生亮度饱和现象为止,此时得到中心区域最大输入值 $I_{\sigma\text{-max}}$ 。步长 S 值越小,则计算得到的 $I_{\sigma\text{-max}}$ 越准确,但过小的步长会增加计算的复杂度,实际计算过程中取步长 S 为 10 个灰度值。

3.2 饱和区域边界过渡补偿

直接降低局部补偿区域的条纹光栅光强,会导致饱和区域边界灰度值跳变,增大补偿区域边界的重建误差,因此研究采用饱和区域边界过渡补偿。通过在局部饱和区域周围增加过渡补偿区,逐渐降低补偿值,减小饱和区域边界的重建误差。饱和区域最大输入值为 $I_{\sigma\text{-max}}$,邻近区域的最大输入值为 I_{\max} 。将最小包围椭圆周边增加过渡区,若取过渡补偿区长度为 d 个像素,饱和区域最小包围椭圆在投影平面坐标系中的长短半轴分别为 a 和 b ,椭圆中心坐标为 (C_x, C_y) ,则过渡补偿算法为:

$$I_{\sigma\text{-max}}(x, y) = \begin{cases} I_{\max}(x, y), & \frac{(x - C_x)^2}{a^2} + \frac{(y - C_y)^2}{b^2} > 1 + \sigma \\ \text{round}\{I_{\max}(x, y) - [I_{\max}(x, y) - I_{\sigma\text{-max}}(x, y)] \cdot t/d\}, & \frac{(x - C_x)^2}{(a - t)^2} + \frac{(y - C_y)^2}{(b - t)^2} \leq 1, 1 \leq t \leq d, \\ I_{\sigma\text{-max}}(x, y), & \frac{(x - C_x)^2}{(a - d)^2} + \frac{(y - C_y)^2}{(b - d)^2} \leq 1 + \sigma \end{cases}$$
(3)

式中 round 表示四舍五入取整, t 为步长, σ 为过渡补偿因子,用于补偿过渡区中离散数据中的不完整性,通常 σ 取 0.1~0.2。

补偿后得到每个像素点最大输入值 $I_{\sigma\text{-max}}$,则补偿后的生成条纹光栅为:

$$I(x, y) = \{A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos[\phi(x, y) + \delta_i]\}^\gamma + I_0, \quad (4)$$

式中 $\phi(x, y)$ 表示相位主值; δ_i 表示相移, $\delta_i = 2\pi i/N$, $i = 1, 2, \dots, N$; I_0 表示环境光强; $A(x, y) = [I_{\sigma\text{-max}}(x, y) + I_{\min}(x, y)]/2$; $B(x, y) = [I_{\sigma\text{-max}}(x, y) - I_{\min}(x, y)]/2$ 。

饱和区域过渡优化补偿效果如图 5(a) 所示,补偿后并经过伽马校正生成的条纹光栅如图 5(b) 所示,优化补偿光栅条纹曲线如图 5(c) 所示,其中蓝色曲线表示未补偿的条纹光栅强度,红色曲线表示饱和区域的条纹光栅强度,绿色曲线表示过渡区域的条纹光栅强度。

4 实 验

实验平台如图 6 所示,采用 BenqMX305 投影仪和 AVT Manta505B 工业相机,其分辨率分别为 1024 pixel × 768 pixel 和 2452 pixel × 2056 pixel。

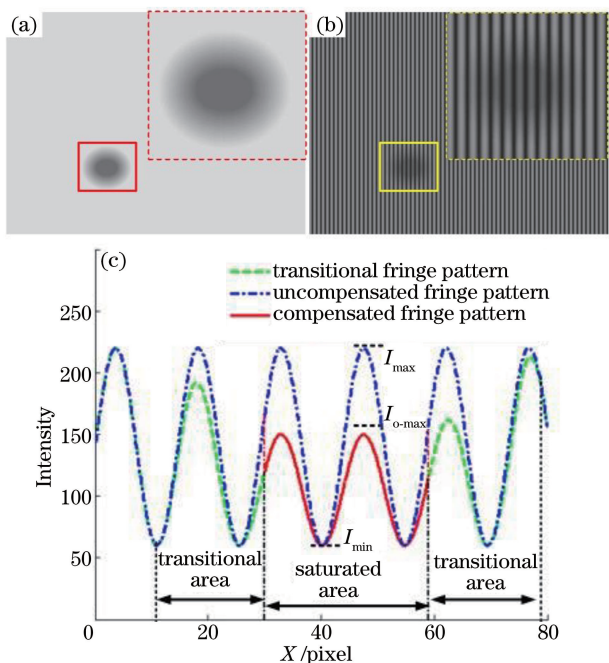


图 5 (a)饱和区域补偿灰度图; (b)补偿并经过伽马校正的条纹光栅; (c)补偿后的光栅强度

Fig. 5 (a) Compensation grayscale of saturated region; (b) fringe pattern after compensation and Gamma correction; (c) pattern intensity after compensation

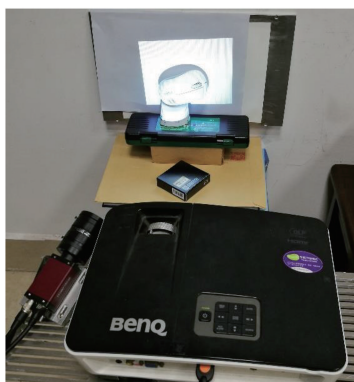


图 6 实验平台

Fig. 6 Experimental platform

实验选取白色鼠标为被测物,其表面反射率较高,投影过程中易形成亮度饱和。整个实验系统已完成参数标定^[21-22]和投影仪的伽马校正,并参考 MIGL 方法确定饱和区域中心最大输入值 $I_{\sigma-max}$ 。

根据形成饱和区域的特性,实验中选取 $n = 7$ 的区域投影格雷编码图,区域网格划分数量为 10×12 ,其中一幅格雷编码图投影后,采集的图像如图 7(a)所示;对所有编码图像解码,得到亮度饱和区域如图 7(b)所示。分别采用未补偿条纹光栅、AFPP 法^[13]补偿条纹光栅和所提出的分区投射优化补偿条纹光栅对鼠标表面进行投影,对亮度饱和

区域采集的图像分别放大,如图 7(c)~(e)所示。

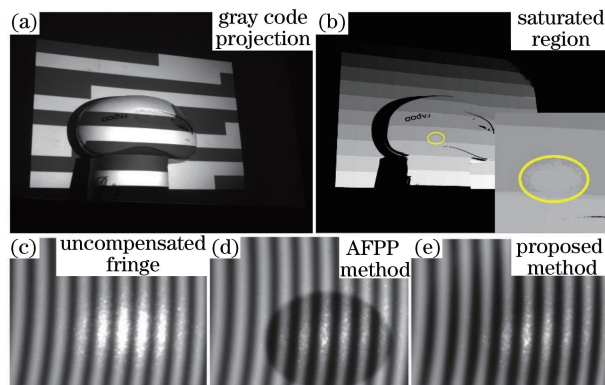


图 7 (a)投影仪分区编码投影; (b)解码图及饱和区; (c)未经补偿的饱和区条纹图案; (d)采用 AFPP 法补偿的饱和区条纹图案; (e)采用所提方法补偿的饱和区条纹图案

Fig. 7 (a) Coding projection of the projector regions; (b) decoding map and saturated region; (c) uncompensated saturated region fringe pattern; (d) saturated region fringe pattern compensated by AFPP method; (e) saturated region fringe pattern compensated by proposed method

三种条纹光栅投影得到的饱和区域光栅强度分布如图 8 所示,蓝色曲线表示未补偿的条纹光栅强度,红色曲线表示采用 AFPP 法补偿的条纹光栅强度,绿色曲线表示优化补偿的条纹光栅强度。未经补偿的条纹光栅在中心区域出现光栅截断现象,即出现亮度饱和,其包含的相位信息丢失。而 AFPP 法补偿和分区投射优化补偿后的条纹并未出现亮度饱和,但是 AFPP 法补偿条纹光栅在补偿边缘出现跳变。优化补偿的条纹光栅满足光强正弦连续变化的要求,且饱和区域补偿效果与 AFPP 法补偿效果一致。

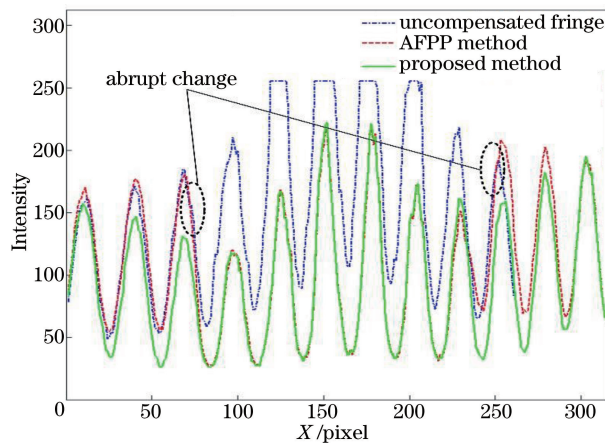


图 8 饱和区域三种条纹光栅强度分布

Fig. 8 Intensity of three fringe patterns in saturated region

采用三种条纹光栅进行三维重建,得到的三维重建效果如图 9 所示。图 9(a)~(c)分别表示采用

未补偿的光栅、AFPP 法补偿的条纹光栅和分区投射优化补偿得到的条纹光栅进行投影得到的最终重建效果,图 9(d)~(f)分别表示三种重建效果对应的饱和区域局部放大图。

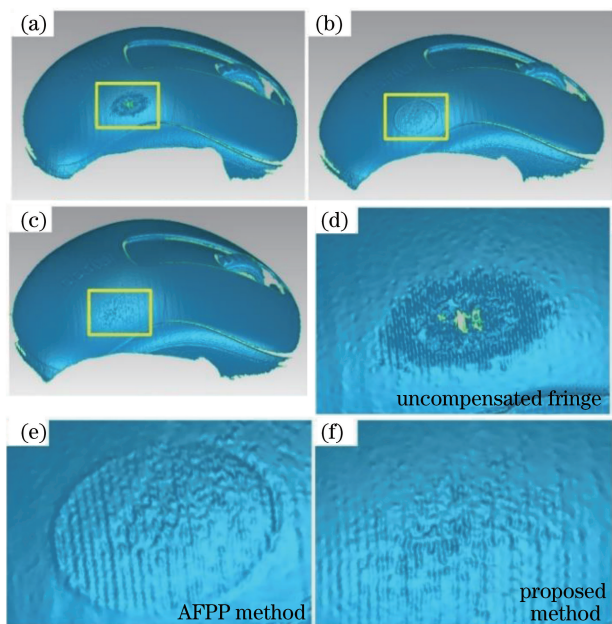


图 9 (a) 未补偿条纹光栅三维重建效果; (b) AFPP 法补偿条纹光栅三维重建效果; (c) 所提方法补偿条纹光栅三维重建效果; (d)、(e)、(f) 分别为(a)、(b)、(c)局部放大图
Fig. 9 (a) 3D reconstruction of uncompensated fringe pattern; (b) 3D reconstruction of the fringe pattern compensated by AFPP method; (c) 3D reconstruction of the fringe pattern compensated by proposed method; figure (d), (e) and (f) is the partial enlargement images of figure (a), (b) and (c)

利用 Geomagic 软件对三种条纹光栅投影下的鼠标三维重建表面进行偏差分析,结果如图 10 所示,偏差统计结果如表 1 所示。从偏差分析数据可以得出,采用未经过补偿的条纹光栅进行测量,饱和区域三维表面最大绝对误差为 0.591 mm,平均误差达到 0.051 mm,标准差(SD)和均方根(RMS)为 0.084 mm;而采用 APFF 方法补偿后,饱和区域最大绝对误差降至 0.152 mm,平均误差降至 0.023 mm,SD 和 RMS 降至 0.030 mm,其最大误差主要集中在补偿区域的边界;采用所提出的优化补偿方法得到的饱和区域重建精度,其最大绝对误差为 0.113 mm,平均误差为 0.016 mm,SD 和 RMS 为 0.020 mm。

通过实际重建效果和重建精度分析,采用未经补偿的条纹光栅进行三维测量,由于亮度饱和的影响,其三维重建在饱和区域出现明显缺陷,重建精度最低;而采用 AFPP 方法补偿虽然对饱和区域抑制

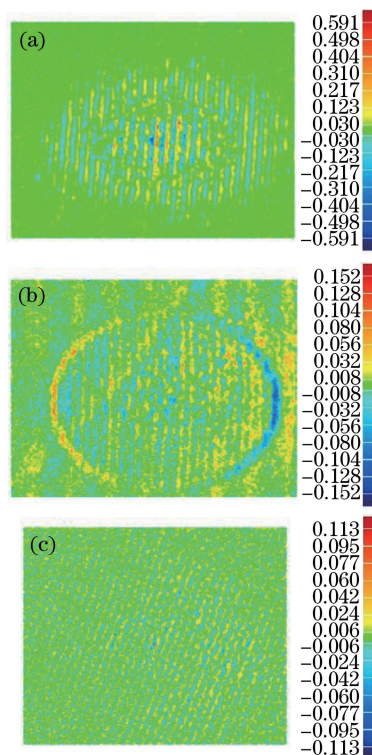


图 10 (a) 未补偿表面偏差分析; (b) AFPP 法补偿表面偏差分析; (c) 所提方法补偿表面偏差分析
Fig. 10 (a) Uncompensated surface deviation analysis; (b) surface deviation analysis compensated by AFPP method; (c) surface deviation analysis compensated by proposed method

表 1 三维重建偏差统计

Table 1 Statistics of 3D reconstruction deviation mm

3D deviation	Uncompensated	AFPP	Proposed method
Max	+0.591/ -0.560	+0.136/ -0.152	+0.099/ -0.113
Average	+0.046/ -0.051	+0.023/ -0.023	+0.016/ -0.016
SD	0.084	0.030	0.020
RMS	0.084	0.030	0.020

效果比较好,重建精度相应提高,但由于补偿区域边界的光栅强度发生跳变,造成补偿边界三维重建误差增大。采用所提方法补偿后,边界区域条纹光栅强度未出现跳变,三维重建后生成的表面纹理平滑,重建后的精度相较于前者更高,因此所提方法能有效减小亮度饱和引起的三维重建的误差。

5 结 论

针对表面反射率高的物体容易形成局部亮度饱和,从而影响结构光三维重建精度的问题,提出了分区投射优化补偿方法。对亮度饱和区域造成重建误

差问题进行分析,提出亮度饱和区域定位算法及过渡条纹光栅补偿方法。相较于现有的局部主动补偿法中依赖解相得到饱和区域位置,本研究将投影平面进行区域划分,通过区域格雷编码生成编码灰度图并投影,再通过解码得到饱和区域及其邻近区域,最终确定亮度饱和区域在投影平面的位置,避免了饱和区域定位时边缘像素点解相错误的问题,并且使得求解亮度饱和区域所需的投影图片数量减少,计算效率提高。采用优化补偿条纹光栅,增加过渡补偿区域,解决了直接对亮度饱和区域降低投影光强引起的条纹光栅强度跳变和补偿边缘三维重建误差增大的问题。通过实验对比三种条纹光栅的三维重建效果,发现所提方法对局部亮度饱和区域造成的三维重建误差的抑制作用更好,其三维重建精度更高。

参 考 文 献

- [1] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- [2] Chen S L, Xia R B, Zhao J, *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.
- [3] Liu G H, Liu X Y, Feng Q Y. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity [J]. Applied Optics, 2011, 50 (23): 4557-4565.
- [4] 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.
- [5] Kowarschik R, Kühmstedt P, Geber J, *et al.* Adaptive optical three-dimensional measurement with structured light [J]. Optical Engineering, 2000, 39 (1): 150-158.
- [6] Lin H, Song Z. 3D reconstruction of specular surface via a novel structured light approach [C]. IEEE International Conference on Information and Automation, 2015: 530-534.
- [7] 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.
- [8] Xing W, Zhang F M, Feng W, *et al.* Three-dimensional measurement method of objects with specular surface based on digital micromirror device [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1212002.
邢威, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1212002.
- [9] Waddington C, Kofman J. Saturation avoidance by adaptive fringe projection in phase-shifting 3D surface-shape measurement [C]. IEEE International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2010 (38): 1-4.
- [10] Waddington C, Kofman J. Camera-independent saturation avoidance in measuring high-reflectivity-variation surfaces using pixel-wise composed images from projected patterns of different maximum gray level[J]. Optics Communications, 2014, 333: 32-37.
- [11] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, *et al.* General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 59: 56-71.
- [12] Waddington C, Kofman J. Modified sinusoidal fringe-pattern projection for variable illuminance in phase-shifting three-dimensional surface-shape metrology [J]. Optical Engineering, 2014, 53 (8): 084109.
- [13] 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.
- [14] Zuo C, Huang L, Zhang M, *et al.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- [15] Chen S L, Zhao J B, Xia R B. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0412004.
陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0412004.
- [16] Liu K, Wang Y, Lau D L, *et al.* Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(3): 553-562.
- [17] Zheng D L, Da F P. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0512003.
郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术 [J]. 光学学报, 2011, 31(5):

- 0512003.
- [18] Zhang X, Zhu L M. Phase error model from Gamma distortion and Gamma calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412006.
张旭, 朱利民. Gamma 畸变的相位误差模型与 Gamma 标定技术 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412006.
- [19] Cui Y J, Zhang W F, Li J X, *et al.* A method of Gamma correction in fringe projection measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的 Gamma 畸变校正方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112002.
- [20] Waddington C, Kofman J. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 251-256.
- [21] Li Z W, Shi Y S, Zhong K, *et al.* Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3061-3065.
李中伟, 史玉升, 钟凯, 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(11): 3061-3065.
- [22] Xie Z X, Chi S K, Wang X M, *et al.* Calibration method for structure-light auto-scanning measurement system based on coplanarity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0308003.
解则晓, 迟书凯, 王晓敏, 等. 基于共面法的结构光自扫描测量系统参数标定方法 [J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0308003.