

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210710

基于局部光栅补全的反光物体三维重建^{*}曹毅¹ 陈星斌¹ 吴翔² 方翔²

(1.河南工业大学机电工程学院 郑州 450000; 2.河南工业大学电气工程学院 郑州 450000)

摘要: 针对结构光三维重建过程中,因表面强反光造成光栅形变而导致的相位误差、重建精度降低的问题,提出一种基于局部光栅补全的重建方法。首先对被测物体自身材料特性以及镜面反射角等引发三维重建点云模型缺失现象的反光因素进行分析。其次在相位展开前,引入局部光栅补全法,对反光区光栅丢失部分进行补全,以相移法加互补格雷码重建法为基础提高相位展开精度。最后,通过搭建单目结构光三维重建系统,对平面度误差在0.5 mm范围内的反光矩形铝合金板进行三维重建。实验表明,本文提出的改进方法可以有效补全因物体表面反光造成的重建缺失,其相位解码信息更加完备,重建率相较于传统方法提升了25%,平面度误差率降低了28.2%。

关键词: 相位误差;相移法;光栅补全;三维重建

中图分类号: TP399 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

3D reconstruction of reflective objects based on local grating completion

Cao Yi¹ Chen Xingsa¹ Wu Xiang² Fang Xiang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Aiming at the problems of phase error and reduced reconstruction accuracy caused by grating deformation caused by strong surface reflection in the process of structured light 3D reconstruction, a reconstruction method based on local grating completion is proposed. Firstly, the reflection factors that cause the missing phenomenon of the 3D reconstructed point cloud model, such as the material properties of the measured object and the angle of specular reflection, are analyzed. Secondly, before the phase unwrapping, the local grating complement method is introduced to complete the missing part of the grating in the reflective area, and the phase unwrapping accuracy is improved based on the phase shift method and the complementary Gray code reconstruction method. Finally, by building a monocular structured light 3D reconstruction system, the 3D reconstruction of the reflective rectangular aluminum alloy plate with a flatness error within 0.5 mm is carried out. Experiments show that the improved method proposed in this paper can effectively complement the reconstruction loss caused by the reflection on the surface of the object, and its phase decoding information is more complete. Compared with the traditional method, the reconstruction rate is increased by 25%, and the flatness error rate is reduced by 28.2%.

Keywords: phase error; phase shift method; grating complement; three-dimensional reconstruction

0 引言

三维重建根据是否主动发射信号可以大致分为两大类,即主动视觉三维重建和被动视觉三维重建。主动视觉三维重建又包括面结构光重建法和线结构光扫描重建法^[1]。被动视觉三维重建是首先利用相机采集真实场景中其的二维图像,然后根据其图像中分布的纹理信息等获得

其中的深度信息,从而实现三维重建。除此之外还有结构光三维重建与深度学习相融合^[2]实现更高精度的三维重建。

结构光三维重建作为非接触式、高精度、高速度重建测量技术,被广泛应用在工业、军事、医疗等领域。在工业的逆向工程中,可以通过结构光三维重建技术对未知且难以测量的零部件进行重建测量,从而获得相关尺寸参数,实现

收稿日期:2022-07-18

^{*} 基金项目:河南省教育厅自然科学基金(20A413004)、小麦和玉米深加工国家工程实验室项目(NL2016012)、河南省创新科技人员队伍建设项目(114100510015)资助

逆向研发^[5]。日常生活中可以通过结构光重建技术对人体以及雕像进行重建来获取其三维模型。而且结构光三维重建技术在医学领域也获得了很大进展。对于该技术而言,在三维重建时会遇到许多影响因素,其中最明显的因素就是物体表面的强反光。在获取光栅图象时,其强反光区域光栅条纹丢失将导致相位缺失^[1],从而导致重建点云模型在强反光区出现点云空洞,严重影响三维重建的精度。物体表面产生强反光的原因与物体自身材料特性、镜面反射等因素有关,如何克服由以上因素产生的强反光区对结构光三维重建来说至关重要,更是当前该领域的重要研究之一。

在三维重建时为了克服强反光影响,有相关研究人员提出了加装偏振滤光片的方法^[3-6],偏振滤光片将照明光晕降到最低程度,消除图像中的眩光。但是该方法降低了图像亮度,导致其重建细节上存在缺失。另外还有相关人员从被测材料方面入手,在物体的反光表面喷涂相关漫反射材料来消除强反光的影响。该方法可以有效消除反光对结构光三维重建的影响,但同时由于加上了喷涂材料以及喷涂不均匀等因素也将导致重建精度降低。此外有关人员从相位展开^[7-8]入手来降低或消除强反光对三维重建的影响,薛峰等^[9]利用相位融合的方法进行重建,虽然可以有效克服强反光问题,但也有其局限性。刘飞等^[10]提出利用投射格雷码图案寻找物体表面强反光区域,再进行区域过度补偿等处理来提高重建精度。但格雷码稳定性相对较低,且出现解码错误的几率较大。

针对上述处理强反光过程中的问题,本文将从反光因素处着手,目标是直接通过对反光导致光栅的缺失区进行修补,从而提出了局部光栅补全与四步相移法加互补格雷码相结合的三维重建方法。该方法通过对二值光栅图像进行修补来直接克服强反光因素,可以对表面平整形状规范的平板以及立方体等反光物体进行重建,其解码信息与重建模型较为完整,且经过实验可以获得较好的重建结果。

1 改进方法与模型

1.1 物体表面强反光对三维重建的影响

结构光三维重建时,若被测物体表面出现强反光,且被相机采集到时,反光区域的光栅条纹将会出现变形或缺失^[11],展开相位将产生很大误差,导致最后求解得到的三维点云模型出现空洞。采集图像出现强反光区域的原因有以下两个方面:首先是相机获取图象时的角度刚好对准了强光反射角度;其次与被测物体的材质及其表面粗糙度等因素相关。图 1 是物体表面的强反光导致重建点云模型出现缺损的模型示意图。

图 2 为镜面反射模型,B 为反射表面,R 为镜面反射方向,V 为相机拍摄方向。只有当相机拍摄方向集中在 R 反射方向周围(斜杠所示阴影范围)很近时才能采集到物体表面反射光区域。在结构光三维重建时由反光导致的重建模

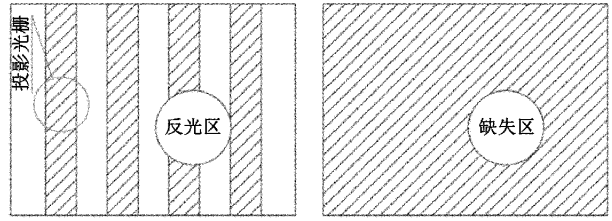


图 1 表面反光导致重建缺失示意图

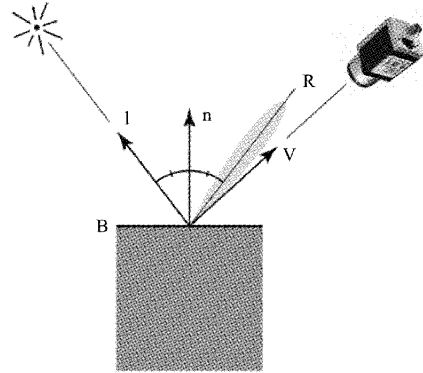


图 2 镜面反射模型

型严重缺失就是该原因。

1.2 改进方法

由于结构光三维重建模型缺失的直接原因是物体表面所投射光栅条纹的形变或丢失,那么将变形或者丢失部分的光栅条纹补全就可解决此问题。因此本文引入局部光栅条纹补全法来进行实验并验证,其改进原理结构如图 3 所示。

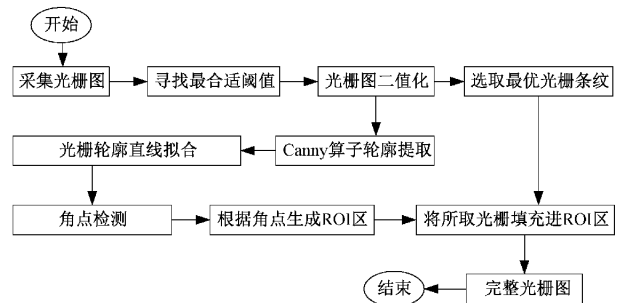


图 3 改进原理结构

为了对光栅条纹图像进行二值化^[12],需要确定重建解码时的最合适的灰度值,且以该阈值作为图像二值化的灰度值。重建解码时的二值化原则为:对于同一位置,其被亮条纹照射到的亮度总是高于其被暗条纹照射到的亮度。

对光栅图像中的像素点进行归一化处理:

$$I_n = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (1)$$

其中, I_{\max} 为最大灰度值, I_{\min} 为最小灰度值, I 为像素点在当前图像中的亮度, I_n 为亮度归一化后的像素灰度值。其中归一化后的灰度值 I_n 的大小范围在 $[0, 1]$ 之间。

将 I_n 与 0.5 相比较,当 $I_n \geq 0.5$ 时就确定是亮条纹,当 $I_n < 0.5$ 时就确定是暗条纹。

图 4(a)为投射光栅原图,图 4(b)为图 4(a)经过式(1)进行归一化处理确定阈值后的二值图像,图 4(a)、(b)中圆圈所示为强光反射后光栅所缺失的部分。图 4(b)图椭圆框中是最后要在光栅缺失区域填充的目标条纹。

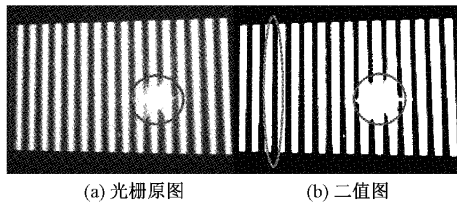


图 4 光栅缺失图

对图 4(b)进行 Canny 轮廓检测^[13],并对轮廓进行直线拟合(Hough transform)以及角点检测(这里只展示光栅缺失部分)。

图 5(b)是经过霍夫直线检测拟合之后的图像,在对直线拟合之后的图像进行角点检测获得角点分别为点 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l、m、n。

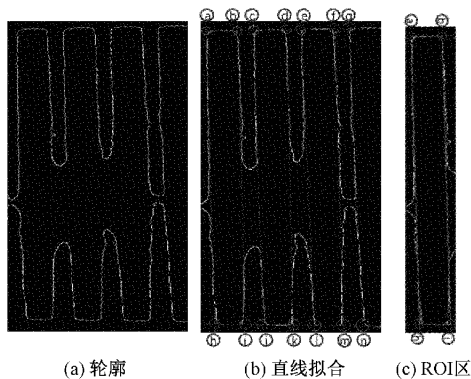


图 5 光栅轮廓与 ROI 区域图

通过图像中 4 个角点坐标在二值图像(图 5(b))中确定 ROI 区域。如由 P_a 、 P_b 、 P_h 、 P_i 4 个坐标点确定图 5(c)中 ROI 区域。

将图 4(b)椭圆框中光栅条纹填充到图 5 ROI 区域中。经过图像补全后的光栅二值化图像如图 6 所示。

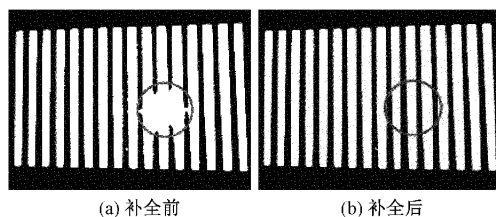


图 6 二值光栅补全图

由图 6(a)、(b)两图对比可直观看出缺失光栅条纹得到有效补全。

1.3 光栅补全法与四步相移加格雷码法结合

单目编码结构^[14]光测量模型如图 7 所示,系统模型由光栅投射器(投影仪)、工业相机、被测物体以及参考平面组成。其中投影仪镜头中心到相机镜头中心的距离是图示距离 d ,且平行于参考平面。投影仪投出结构光到物体上 P 点位置,其延长线与参考平面相交于 A 点。放上物体调制后 A 点偏移到 C 点。物体上 P 点到参考平面的高度 $PB = h$,相机镜头中心点到参考平面距离是 L 。

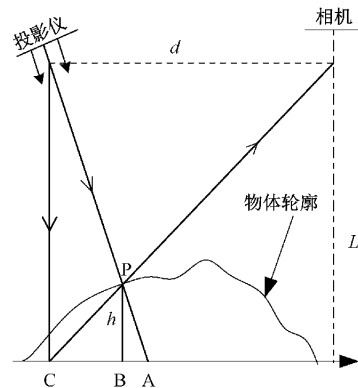


图 7 数字光栅投影系统原理模型

正弦光栅条纹^[15]打在三维物体上,相机记录到的条纹由于受到三维物体高度的调制而发生扭曲,扭曲的条纹(deformed fringe)实质上为原始条纹在物体具有高度存在的位置有了附加相位,各点的相位表现为由相机图像采集获得的被调制的条纹数字图像的灰度值。通过扭曲条纹和原始条纹对比计算得出相位变化值。又已知投影仪、相机和物体的具体位置和之间的距离,利用数学关系可求出对应点的高度值,实现 3D 重建。

依据上图模型所提供参数,结合三角原理^[16],且引入系统投影编码结构光的周期 T ,设 AC 之间的相位差为 $\Delta\varphi$ 。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi AC}{T} \quad (2)$$

以上三式相联合可得被测物体 P 点的高度为:

$$h = \frac{LT\Delta\varphi}{2\pi d + T\Delta\varphi} \quad (3)$$

四步相移法解相位是利用 4 组投射的编码结构光,从而达到相机内每一像素点的相位求解,该点相位与投影仪的像素点有一一映射关系。

四步相移法中投影仪所投射正弦编码光光强的函数为:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos\varphi(x, y) \quad (4)$$

式中: $A(x, y)$ 是背景强度, $B(x, y)/A(x, y)$ 表示的是光栅条纹的对比度。 $\varphi(x, y)$ 是相位值。

以上公式引入了多个外参,使用四步相移法分别记录 4 次初相不同的正弦条纹和被调制的条纹(每个相差 $\pi/2$)。整个周期是 2π ,四步相移,即每次相移量为 $1/4$ 周期,即

$\pi/2$ 。4 次相移量分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ，联立之后即可得到真实相位值。对应表达式如下：

$$\begin{cases} I_0(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos\varphi(x, y) \\ I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos\varphi(x, y) \\ I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos\varphi(x, y) \\ I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos\varphi(x, y) \end{cases} \quad (5)$$

以上 4 个方程式联立可得出相位值为：

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_3(x, y) - I_1(x, y)}{I_0(x, y) - I_2(x, y)} \quad (6)$$

相位求解式(6)求得的相位值是在周期 $(-\pi, \pi)$ 上，这样的相位是被折叠的，不是真实的连续的相位。相位包裹表现为相位在主值区间内增加到超过主值区间的上限的时候，即超过 π 时，将发生跳变，继续增加相位值会跳变到 $-\pi$ 。在整体提取的图像中沿着相位增加的方向表现为上下跳变的形状，如图 8 所示。

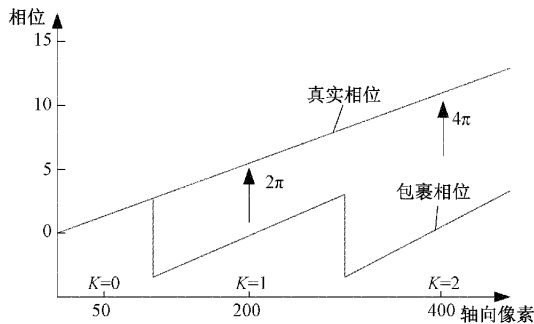


图 8 相位展开示意图

理想条件下格雷码跳跃级次与包裹相位周期跳变位置相同，但在实际情况下，结构光受到外界因素影响，使得他们之间不能严格对齐，解得的相位值图像出现跳变不平滑现象。

四步相移法加补偿格雷码相位展开^[17]时，在传统格雷码图案上多投影一幅格雷码图案，使用 $N+1$ 位格雷码编码来辅助展开相位，避免了展开的连续相位在截断相位处因格雷码边界解码错误导致的错误出现。其基本原理是使格雷码的最小周期与光栅条纹的周期保持一致，这样可以使格雷码总是在相位截断处产生级次改变，从而在相位展开时将截断的不连续的相位展开成连续的相位。

生成 $N+1$ 位格雷码图案以及相移图案，其中，相移条纹周期与 N 位格雷码最小周期相等。

N 位格雷码图案来求解级次 k_1 ， $N+1$ 位格雷码图案来求解级次 k_2 ，相位展开公式为：

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \varphi(x, y) + 2k_2\pi, & \varphi(x, y) \leq -\frac{\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2k_1\pi, & -\frac{\pi}{2} < \varphi(x, y) < \frac{\pi}{2} \\ \varphi(x, y) + 2k_2\pi - 2\pi, & \varphi(x, y) \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (7)$$

相位展开时要对相位进行误差校正，在上述利用补偿格雷码的基础上加入中值滤波算法^[18]得到最终的绝对相位值。

传统解码时边界不可避免的出现个别像素解码错误。

本文提出的方法与四步相移加互补格雷码相结合形成本文改进法，其算法原理结构图如图 9 所示。

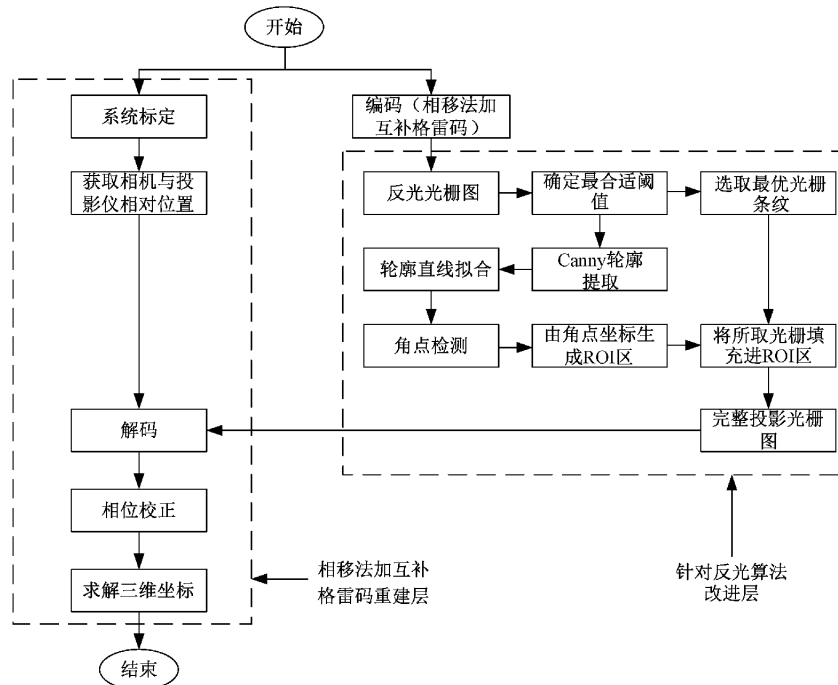


图 9 改进法算法流程

首先系统标定利用 MATLAB 和棋盘格获得相机和投影仪的相对位置;其次是利用四步相移法加格雷码生成编码图像,将之通过投影仪投射到目标物体上;然后利用相机采取图像,经过本文改进法解码得到最终绝对相位值;最后求解目标物体的三维坐标信息。

2 实验与结果分析

2.1 系统组成与实验环境搭建

为了验证上述算法的优越性与可靠性,搭建了一套编码结构光三维重建系统。该系统主要由计算机、工业相机、投影仪组成,其详细参数如表 1 所示。

表 1 系统设备参数表

名称	用途	型号(参数)	数量
笔记本	系统标定; 解码重建等	红米 G(RTX1650、 10代 I5)	1
工业相机	获取被测物体 图像	UI-1540LE-M-GL; 1 280×1 024	1
投影仪	投射光栅条纹	WP45F1A; 1 280×800	1

图 10 是结构光三维重建系统示意图。

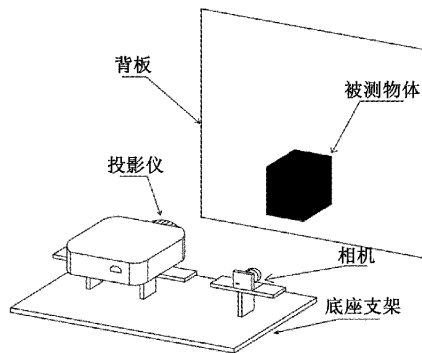


图 10 系统装置图(CAD 示意图)

2.2 表面反光物体重建

1) 四步相移法加互补格雷码重建实验

文章首先以矩形铝合金板为实验对象,且利用四步相移法加互补格雷码法(后称传统法)对其进行三维重建。

图 11 中铝合金平板表面较为光滑,且其材质决定了其具有反光特性。

首先对系统进行标定。该系统的标定设备由以下几部分组成:软件采用 MATLAB 2019,标定板为 10×7 棋盘格,其他相机等设备如表 1 所示。

标定硬件环境搭建:

(1) 将投影仪光轴垂直于参考平面放置;

(2) 保持相机光心与投影仪光心连线与参考平面平行:

① 相机内参如下:

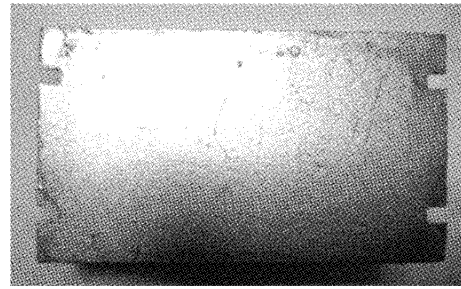


图 11 被测物体铝合金板

$$KK = \begin{pmatrix} 2\ 313.59 & 0 & 711.51 \\ 0 & 2\ 314.9 & 564.21 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

② 投影仪内参获得如下:

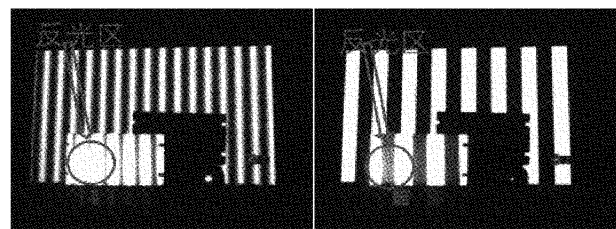
$$KK = \begin{pmatrix} 5\ 838.49 & 0 & 878.19 \\ 0 & 5\ 416.74 & 1\ 137.14 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

③ 投影仪相对于相机的旋转矩阵(R)、平移矩阵(T)如下:

$$R = \begin{pmatrix} 0.997\ 5 & 0.003\ 3 & -0.070\ 1 \\ -0.003\ 3 & 0.999\ 9 & 0.000\ 8 \\ 0.070\ 1 & -0.000\ 6 & 0.997\ 5 \end{pmatrix} \quad (10)$$

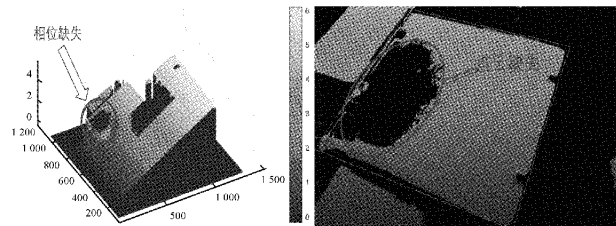
$$T = \begin{pmatrix} 218.329 \\ -65.868 \\ 1.141 \end{pmatrix} \quad (11)$$

实验采集图像如图 12(a)、(b)所示。



(a) 反光区

(b) 反光区



(c) 相位缺失

(d) 点云缺失

图 12 传统法重建实验图

图 12(a)是相移条纹图,(b)是互补格雷码光栅图,且两幅图中反光部分的光栅条纹出现了不同程度的丢失与变形。

对采集的被测物体光栅图通过式(6)、(7)进行解码,其解码的相位展开图如图 12(c)。铝合金板相位展开后,其相位图在光栅图对应的反光位置的相位产生缺失,其缺

失部分已在图 12(c)中用圆圈标出。由此可见,当被测物体表面所投影光栅因反光导致缺失时,其缺失部分的相位也将丢失,最终引起重建的三维模型在该反光位置的点云出现丢失,模型产生空洞。

图 12(d)是在通过式(8)~(11)进行三维重建后的点云模型,其中矩形框为铝合金板的模型边界。从中可以直观看出其三维点云模型在其反光位置出现点云丢失,图 12(d)中圆圈所示为点云丢失的空洞区。

由上述实验结果可知,在结构光三维重建中,当被测物体表面的光栅条纹因强光反射出现断裂丢失时,则对应的重建点云模型将出现点云缺失。

2) 本文改进法结合四步相移法加互补格雷码重建实验

对于传统的结构光重建实验,物体反光区域重建后的点云模型将产生空洞。为此特将本文提出的光栅补全的改进法与四步相移法加互补格雷码重建法进行结合(后称改进法),再对同一反光物体在同一实验环境下进行三维重建。

本章节所用图像依然是上一章节实验中所采集的图像。图 13 中(a)是由式(1)二值化处理后的图像,其圆圈标示了因反光光栅条纹缺失部分。

通过本文的改进法对光栅图进行补全,如图 13(b)所示。

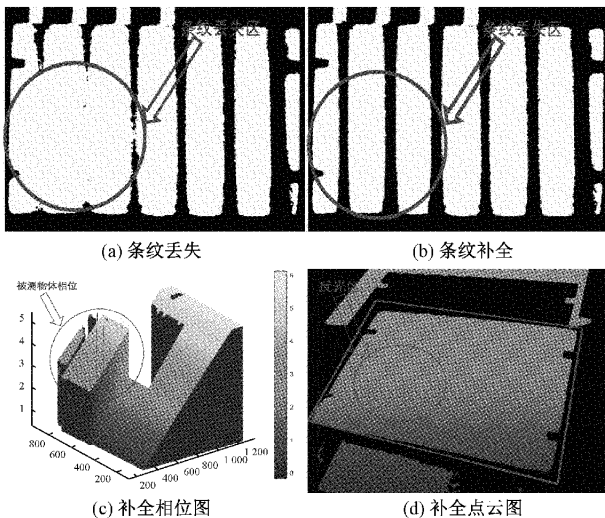


图 13 改进法重建实验图

图 13(a)为因反光导致的光栅缺失图,图 13(b)为补全之后的光栅图像。图中光栅缺失部分已得到充分补全。

对补全后的光栅图像解码展开并重建,得到铝合金板相位图与点云图,如图 13(c)、(d)所示。

由图 13(c)可直观看出,求解出的相位信息没有丢失,被测物体相位十分完整,物体边界相位解析信息十分清晰。

对被测物体进行重建,其三维点云模型如图 13(d)所

示,其中矩形框中为被测物体三维模型,圆圈中为反光区点云模型。经本文改进法进行三维重建,首先补全了反光区丢失的光栅条纹,其次被测物体的相位信息十分完整,最后重建的三维点云模型补全了因反光导致的模型空洞。

3) 无反光下的四步相移法加互补格雷码重建实验

在无反光条件下对被测物体投射光栅条纹,并采集图像如图 14 所示。

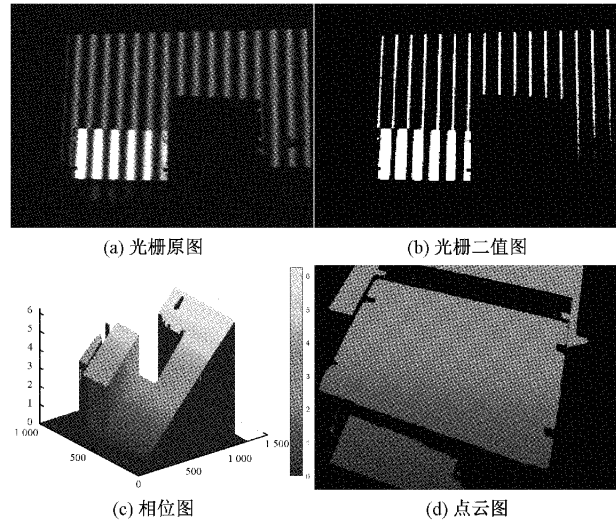


图 14 无反光下重建实验图

对图 14(a) 投射光栅原图进行二值化处理得到图 14(b)。

对所采集图像进行解码展开,其解出相位图如图 14(c)所示,由解出的相位与标定数据进行三维重建如图 14(d)所示。在无反光下重建后的点云模型边界清晰,模型十分完整。

4) 实验结果对比分析

传统重建法与本文改进重建法实验结果分析对比如下:

根据图 12(c)、13(c)两图对比,同一反光位置,本文改进法解码的相位补全了相位缺失部分,传统法的相位在反光区出现了相位缺失。

图 12(d)与图 13(d)分别是传统法与本文改进法的三维重建点云模型,其中传统法重建的点云模型在反光区产生点云缺失,而本文改进法对物体重建的点云模型补全了反光区的点云缺失部分,重建模型十分完整。

(1) 首先为了更加直观分析本文改进法相较于传统法三维重建的改进提升精度,特在 MATLAB 中对两种实验结果的模型面积进行统计。

$$B = \frac{S_1}{S} \times 100\% \quad (12)$$

其中, S_1 为重建的点云模型面积, S 为实际的物体表面面积, B 为重建率(即重建点云模型面积与实际物体表面积之比)。

由表2可知,本文改进法对反光物体进行重建的点云模型重建率更高,相对于传统法提高了25%。

表2 铝合金板三维重建点云模型面积 mm^2

重建方法	S	S_1	B/%
传统有反光	9 900	7 354	74.3
改进有反光	9 900	9 885	99.8
传统无反光	9 900	9 891	99.9
反光下提升	/	2 531	22.5

(2) 其次对重建后的铝合金板点云模型进行平面度检测。平面度即平整度,是工业产品几何规范中常见的四项形状公差之一,也是用于评定产品表面质量的关键指标之一。其平面度公差示意图如图15所示。

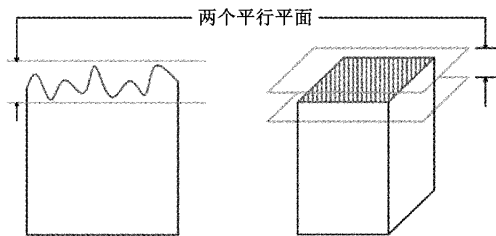
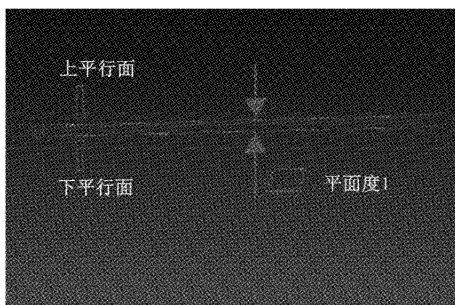


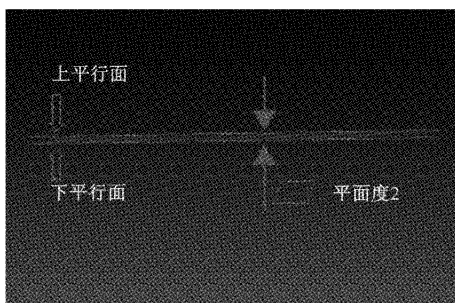
图15 平面度公差示意图

对上述3种重建实验点云模型结果进行平面度的测量如图16所示。

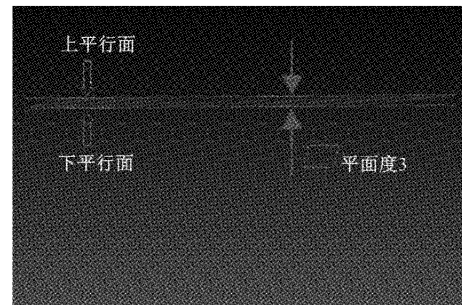
以上被测点云模型经过Mashlab进行修剪,只对铝合金板点云模型进行检测。常规条件下,当无反光时,传统法对物体重建点云模型表面的平面度比有反光干扰条件时重建点云模型的平面度更加接近于真实物体表面的平



(a) 反光下传统法点云模型平面度测量



(b) 反光下改进法点云模型平面度测量



(c) 无反光传统法点云模型平面度测量

图16 平面度测量图

面度。因此以无反光因素下的传统法重建点云模型的平面度为基准,且设立以下公式对以上3种方法重建出的点云模型进行平面度测量对比。

$$\varphi = \frac{|T_x - T_0|}{T_0} \times 100\% \quad (13)$$

其中, T_x 为反光条件下传统法与改进法所重建点云模型的平面度, T_0 为无反光条件下传统法重建点云模型的平面度。将反光条件下传统法与改进法重建点云模型的平面度分别与无反光条件下传统法重建点云模型的平面度进行对比,其中 φ 为误差率(反光下重建点云平面度与无反光传统法重建点云的平面度之差再与无反光传统法重建点云的平面度的比值)。通过Halcon库对点云模型平面度进行测量,其结果如表3所示。

表3 铝合金板三维重建点云模型平面度 mm

重建方法	平面度	误差率/%
传统无反光(基准)	3.2	0
传统有反光	2.2	31.3
改进有反光	3.1	3.1
提升	/	28.2

表3中作为对比基准的无反光因素下传统法重建点云模型平面度为3.2 mm,反光条件下传统法重建点云模型的平面度为2.2 mm,改进法重建点云模型的平面度为3.1 mm。其中反光条件下传统法重建模型的平面度与基准平面度相差最大,其原因是反光导致重建模型平面的最高处点云缺失。而本文改进法下的模型的平面度与基准平面度相差最小为0.1 mm。由此可见,在反光因素下本文改进法在重建模型平面度上的误差相对于传统法的平面度误差更小。

经过实验结果对比分析,本文提出的改进方法可以有效地解决在结构光三维重建中由物体表面反光所导致的重建点云模型缺失问题,且在实验数据上改进法相较于传统法重建率提升了25%,平面度误差率降低了28.2%。

3 结 论

本文通过对具有较好光滑性且反光较强的矩形铝合

金板进行结构光三维重建实验,且为该实验搭建了单目结构光三维重建系统。以无反光条件下传统法重建实验结果为对比基准,对采集的同一实验环境下的同一组图像数据进行两组不同的重建实验,进而验证本文改进法在结构光在三维重建中的解码精度与重建完整性。

经过实验结果对比分析,本文改进法相较于传统重建法,可以有效补全因物体表面反光造成的重建缺失。其相位解码信息更加完备,且重建点云模型在完整性上得到极大提升,重建率相较于传统方法提升了 25%,平面度误差率降低了 28.2%。由此可得,本文的改进方法可以有效解决重建时物体表面的反光问题,且重建效果较好。

参考文献

- [1] 李云梦,关丽敏,王会峰,等. 旋转扫描结构光的三维检测系统及其标定[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7):66-73.
- [2] 李哲,卢健,杨腾飞. 基于深度学习的三维点云重建方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3):1-5.
- [3] 张振凯,胡正发,张伟,等. 基于机器视觉的实体模型逆向重建系统[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1):57-60,65.
- [4] 陈华臻,高健. 面向反光工件点云缺陷的点云增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(7): 1258-1266.
- [5] 张宗华,于瑾,高楠,等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3):104-116.
- [6] 高鹰. 漫反射偏振三维成像关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [7] LIANG J, ZHANG J, SHAO J, et al. Deep convolutional neural network phase unwrapping for fringe projection 3D imaging [J]. Sensors, 2020, 20(13): 3691.
- [8] YANG F, PHAM T A, BRANDENBERG N, et al. Robust phase unwrapping via deep image prior for quantitative phase imaging[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30: 7025-7037.
- [9] 薛峰,陈龙,张峰峰. 基于结构光的强反射表面三维重建方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(5): 18-24.
- [10] 刘飞,何春桥,申爱民,等. 结构光饱和和区域分区投射优化补偿方法[J]. 光学学报, 2018, 38(6):168-175.
- [11] 李娜,牛帅. PMP 技术中检测饱和及校正相位的算法研究[J]. 山西电子技术, 2021(1):84-86.
- [12] MOLCHANOVA V, MIRONENKO D. Two-stage method for adaptive binarization of raster engineering drawings[C]. CMIS, 2019: 640-650.
- [13] ZHAO L, ZHU R. Research on image contour edge analysis based on canny edge detector[J]. Academic Journal of Computing & Information Science, 5(1): 70-75.
- [14] 李茂月,马康盛,许勇浩,等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 19-31.
- [15] 吴泓欣,王拥军. 基于正弦光栅相位调制的三维测量[J]. 软件, 2017, 38(1):111-114.
- [16] 赵成星,杨宇,张晓玲. 光栅四步相移法的三维重建[J]. 激光杂志, 2020, 41(10):34-38.
- [17] WANG Y, LIU L, WU J, et al. Dynamic three-dimensional shape measurement with a complementary phase-coding method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127: 105982.
- [18] TANG J, WANG Y, CAO W, et al. Improved adaptive median filtering for structured light image denoising[C]. 2019 7th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), IEEE, 2019: 146-149.

作者简介

曹毅,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为机器人控制技术和智能检测技术。

E-mail: caoyioffice@163.com

陈星飒,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉、智能机器人等。

E-mail: 2483562870@qq.com

吴翔(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为计算机视觉、智能机器人、先进控制技术等。

E-mail: xiangw@haut.edu.cn

方翔,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉、人机交互等。

E-mail:971735737@qq.com