

激光与光电子学进展

单目光栅投影系统的多频外差相位补偿

王新, 张晓青*, 郭阳宽

北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192

摘要 在通过单目光栅投影系统形成零件三维点云的过程中, 零件表面及边界的反光会造成部分点云突变, 使后续重建及测量过程出现误差。本文提出一种相位补偿方法, 结合物体轮廓信息和相位等级图的递增特性设计图像处理算法, 实现对连续相位图的补偿, 减小零件表面及边界反光导致的干扰。实验结果表明, 进行相位补偿后能使零件表面及边界点云突变的数量减少, 提高在零件表面及边界存在反光的情况下三维点云的重建效果。

关键词 遥感与传感器; 光栅投影; 外差相位补偿; 点云重建; 零件

中图分类号 TP391.4; TN911.73

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220918

Multifrequency Heterodyne Phase Compensation for Monocular Grating Projection System

Wang Xin, Zhang Xiaoqing*, Guo Yangkuan

School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

Abstract During the formation of a three-dimensional (3D) point cloud of parts using the monocular grating projection system, the reflections of the surfaces and boundaries of parts cause the mutation of part point clouds, making errors in the subsequent reconstruction and measurement process. In this paper, a phase compensation method is proposed. An image-processing algorithm is designed by combining the contour information of the object and the increasing characteristics of the phase-level graph to compensate for the continuous phase graph and reduce the interference caused by the reflections on the surfaces and boundaries of the parts. The experimental results show that phase compensation can reduce the number of point cloud mutations on the surface and boundary of parts. In addition, phase compensation can improve the reconstruction effect of the 3D point cloud in the case of reflections on the surfaces and boundaries of parts.

Key words remote sensing and sensors; grating projection; heterodyne phase compensation; point cloud reconstruction; parts

1 引言

目前,单目光栅投影系统通过获取被测物体的连续相位图进而得到物体三维信息的技术逐步应用在工业中。在获取机械零件三维信息时,为了提高抗干扰的能力,求解连续相位图的方法主要是多频外差法^[1-5]。在单目光栅投影系统中,零件表面及边界产生反光是常见现象,可以改变仪器参数设置和拍照角度等方式避免部分反光,没能避免反光的部分需要用相位补偿的方法,校正突变的相位值。在多频外差法求解被测物体三维信息的过程中,因被测物体表面及边界反光造成误差从而进行补偿的方法有:姜嫚妮

等^[6]通过对物体在多组不同曝光条件下的图片进行图像融合,并对采集的条纹图像序列进行重建的方法实现对反光造成的相位误差补偿,其结果减小了因反光造成相位误差的区域,但反光剧烈的地方仍会有相位值突变并且前期准备工作过多,耗时严重;郭媛等^[7]通过最小二乘法对全图进行误差补偿,其结果可以使边缘的突变变小,但还会存在相位跳变并且从全局进行误差补偿也改变了一些物体的特征信息,不利于后期的处理;Zuo等^[8]对特殊的样品进行相位数值补偿,但对多种多样的零件,该方法局限性较大且当局部相位值多次变化时,不易找取其中的真实值;程磊等^[9]提出一种校正高频条纹级次的相位补偿算法,

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-03-28; 录用日期: 2022-04-12; 网络首发日期: 2022-04-22

通信作者: *zhangxiaoqing@bistu.edu.cn

对表面及边缘变化较小的物体有很好的效果,但对有孔洞和边缘梯度变化较大的零件不太适用且低频条纹的误差也会影响连续相位的求解;Nguyen等^[10-11]采用深度学习的方法进行相位补偿,但神经网络需要大量数据集且在实际检测前需要时间对神经网络进行训练,准备工作时间过长,不利于在工业中进行应用。本文结合已有的研究成果,对多频外差法求解连续相位图的方法进行改进,结合相位等级图中每列等级值递

增特性和零件的轮廓信息进行相位等级图的误差修正,使连续相位图在零件表面及边缘反光剧烈的地方相位突变减小或者消除,从而提高零件点云的重建效果。

2 单目光栅投影系统相位解算原理

本文采取三频四步相移外差法求解连续相位,求解步骤如图 1 所示。

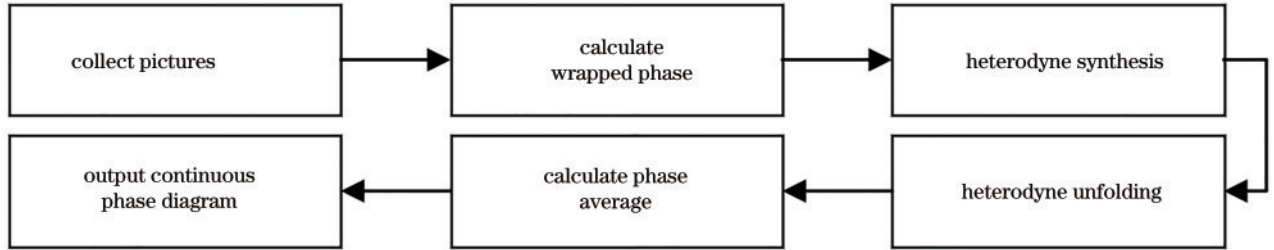


图 1 连续相位求解步骤

Fig. 1 Continuous phase solution step

光栅投影条纹图像的光强表达式 $I_n(x, y)$ 为

$$I_n(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(2\pi fx + \Delta\varphi_n), \quad (1)$$

式中: $n = 1, 2, 3, \dots, N$; x 为图像横坐标; y 为图像纵坐标; $a(x, y)$ 为图像灰度; $b(x, y)$ 为图像对比度; f 为频率; $\Delta\varphi_n$ 为相移量。

四步相移法需要生成相移量 $\Delta\varphi_n$ 分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 的四张条纹图像,由计算机生成的标准四步相移的光栅图像相位变化如图 2 所示。

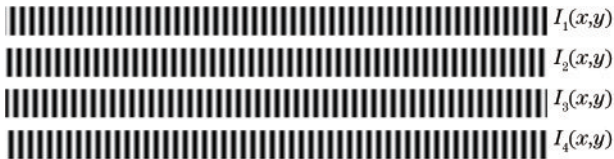


图 2 四步相移光栅图像相位变化

Fig. 2 Phase change of four-step phase shift raster image

对于每一种频率需要采集四幅相移图片,通过 $I_1(x, y), I_2(x, y), I_3(x, y), I_4(x, y)$ 四个条纹公式可以解得一个包裹相位 $\varphi(x, y)$,包裹相位的范围在 $[-\pi, \pi]$ 之间,其计算公式为

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]. \quad (2)$$

2.1 包裹相位外差合成

分别采集三种频率的相移图片,得到三种频率的包裹相位图。两个频率包裹相位外差合成的原理如图 3 所示。经过多次两两不同频率包裹相位的外差合成,将得到频率为 1 的连续相位。

图 3 中, $\varphi_1(x, y), \varphi_2(x, y)$ 为相位函数, λ_1, λ_2 为不同频率光栅图像一个周期的节距,两者的外差合成得

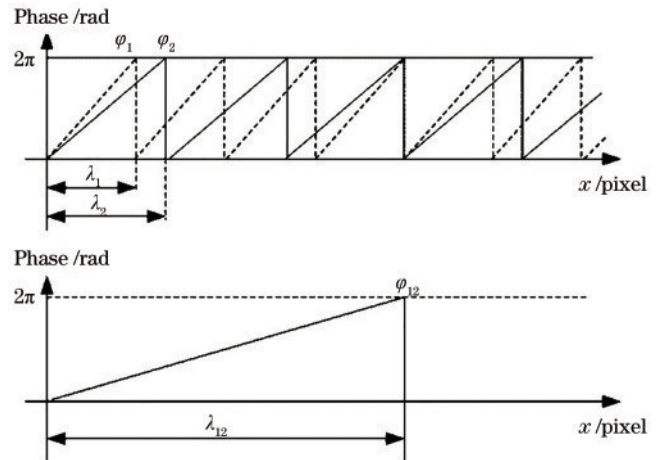


图 3 外差合成原理图

Fig. 3 Schematic diagram of heterodyne synthesis

到的节距 λ_{12} 公式为

$$\lambda_{12} = \left| \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right|, \quad (3)$$

两者的相位差函数 $\varphi_{12}(x, y)$ 公式为

$$\varphi_{12}(x, y) = \begin{cases} \varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y), & \varphi_1(x, y) > \varphi_2(x, y) \\ 2\pi - [\varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)], & \varphi_1(x, y) < \varphi_2(x, y) \end{cases}. \quad (4)$$

2.2 包裹相位外差展开

由 $\varphi_{12}(x, y)$ 和 $\varphi_{23}(x, y)$ 合成得到包裹相位图 $\varphi_{123}(x, y)$,其频率为 1 且一个周期包含整幅图像,整幅图像的相位值都是递增变化没有被截断,所以 $\varphi_{123}(x, y)$ 可以等价于连续相位图 $\phi_{123}(x, y)$ 。可用 $\phi_{123}(x, y)$ 进行逐级相位解包裹,将高频的包裹相位恢复成连续相位。相位解包裹公式为

$$\phi_h(x, y) = \varphi_h(x, y) + 2\pi \times \text{round}\left[\frac{\lambda_l/\lambda_h \times \phi_l(x, y) - \varphi_h(x, y)}{2\pi}\right], \quad (5)$$

式中： λ_l 为较低频率的波长； λ_h 为较高频率的波长； $\phi_h(x, y)$ 为 λ_h 的连续相位； $\varphi_h(x, y)$ 为 λ_h 的包裹相位； $\phi_l(x, y)$ 为 λ_l 的连续相位，round 表示对数值进行四舍五入操作。

三种频率的连续相位通过下式进行平均值计算，可以去除系统中的随机误差，得到最终的连续相位：

$$\phi(x, y) = \frac{\phi_0(x, y) + \phi_1(x, y) + \phi_2(x, y)}{N_{i0} + N_{i1} + N_{i2}}, \quad (6)$$

式中： $\phi(x, y)$ 为最终连续相位； $\phi_i(x, y)$ 为第 i 个频率的连续相位； N_{i} 是第 i 个频率的条纹数。

相位解算全过程如图 4 所示，图中被测零件实物照片如图 5 所示。

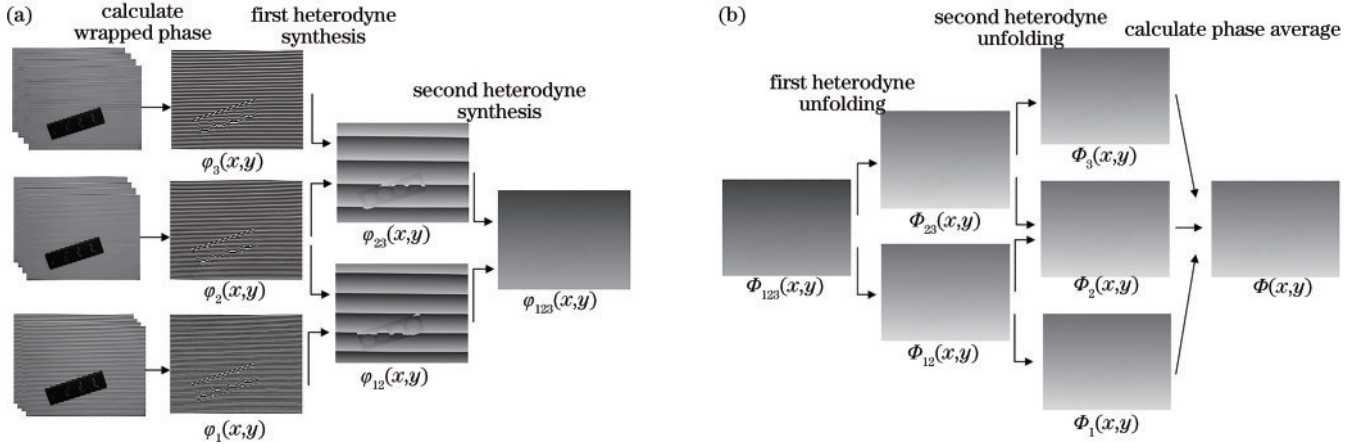


图 4 连续相位图求解过程。(a) 相位外差合成过程；(b) 相位外差展开过程

Fig. 4 Calculating process of continuous phase diagram. (a) Phase heterodyne synthesis process; (b) phase heterodyne unfolding process



图 5 零件实物图

Fig. 5 Physical drawing of parts



图 6 连续相位图的 ROI

Fig. 6 Region of interest (ROI) of continuous phase diagram

3 相位误差产生的原因和分析

3.1 连续相位图分析

在相机取图的过程中会存在反光现象，原因有以下几种：1) 相机拍摄角度和投影仪摆放角度；2) 实验系统周围环境光的干扰；3) 零件材料；4) 零件制造时表面打磨的方式。反光现象导致在外差展开过程中发生相位的跳变。通过多频外差法得到连续相位图，提取出零件所在位置的感兴趣区域 (ROI) 如图 6 所示，零件连续相位图在部分边界和表面的地方存在突变，相位值的变化不连续。

3.2 相位等级图分析

相位跳变可以通过在外差展开过程中的相位等级图进行分析。相位等级图中每个像素值表示包裹相位同一位置需要叠加的 2π 的倍数，

$$T(x, y) = \text{round}\left[\frac{\lambda_l/\lambda_h \times \phi_l(x, y) - \varphi_h(x, y)}{2\pi}\right], \quad (7)$$

式中： λ_l 为较低频率的波长； λ_h 为较高频率的波长； $\varphi_h(x, y)$ 为 λ_h 的包裹相位； $\phi_l(x, y)$ 为 λ_l 的连续相位。由相位等级图可以看出零件边界和表面等级值的变化规律，由此分析零件表面及边缘反光对连续相位造成的影响。

以零件在求解 $\phi_1(x, y)$ 过程中生成的相位等级图 $T_1(x, y)$ 为例，如图 7 所示，相位等级图在零件边界处有突变，会使相位展开时叠加 2π 的倍数出现问题。使用边界和表面存在错误的等级图进行连续相位图求解，造成连续相位图在有反光位置的相位值产生突变。

因此，对多频外差法求解的连续相位图进行相位



图 7 相位等级图 $T_1(x, y)$
Fig. 7 Phase class diagram $T_1(x, y)$

补偿,对存在反光情况下提高零件三维点云重建效果具有重要的意义。

4 相位补偿算法

相位补偿算法的步骤如图 8 所示。

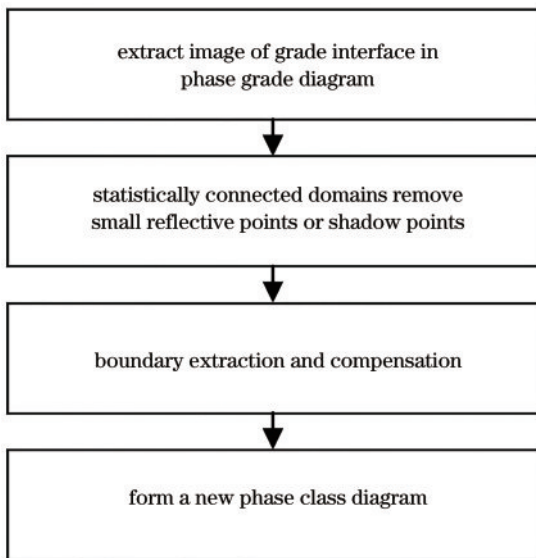


图 8 相位等级图补偿算法步骤
Fig. 8 Steps of phase class diagram compensation algorithm

对整幅图像进行处理,会消耗过多的时间,为此对边界 ROI 图像进行提取,提高效率。由条纹图像的频率和图像的分辨率可以计算每个相位等级所占的行数,通过遍历第一列的像素值,记录等级变换的位置,结合每个等级所占的行数,提取等级变换的边界 ROI 图像。

4.1 统计连通域去除小反光点或阴影点

根据边界前后的等级值对边界 ROI 图像进行二值化运算,可以得到等级值边界处零件的轮廓信息,结果如图 9 所示。在理想条件下,零件等级相位图中各等级都是单一的连通域,而图 9 中零件的边界处存在白色小连通区域或者黑色小连通区域,这些区域是由零件边界或表面反光造成的干扰。

对图像进行连通域大小统计,计算每个区域的像素个数,滤除掉像素个数小的区域,得到清晰的边



图 9 ROI 二值化
Fig. 9 ROI binarization

界。边界 ROI 图像进行滤除干扰后的结果如图 10 所示。



图 10 滤除反光结果图
Fig. 10 Reflection filtering result diagram

4.2 边界提取及补偿

在边界 ROI 图像进行二值化处理后,记录每列从下等级到上等级变换的边界像素位置。此时记录的真实边界位置形成的线段是间断的,缺失是由以下两种原因造成:1)采集的图片因周围环境光影响,导致边界周边像素值有很小的波动,此时原相位等级图边界位置是真实的,根据原有的相位等级图的边界位置进行缺失补充;2)因零件高度信息造成线段是间断的,先找到边界有高度缺失的端点,再进行缺失补充。

由下等级到上等级寻找真实的边界位置时边界处存在两种情况:1)因拍摄角度和零件的高度造成下边缘遮盖上边缘的情况如图 11 所示。

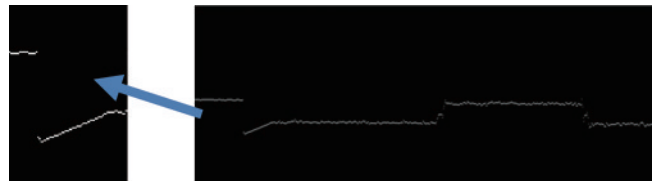


图 11 第一种边界情况
Fig. 11 First boundary case

在出现这种情况时,找到此时位置两条线段的端点,将下等级遮盖上级级的地方按照原相位等级图的边界位置进行补全。补全结果如图 12 所示。

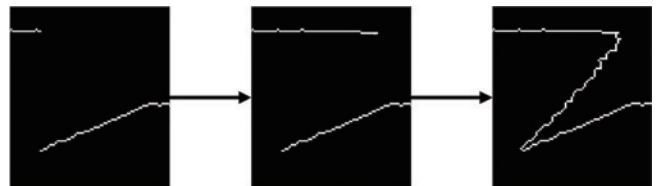


图 12 第一种边界情况的处理方法
Fig. 12 Processing method for first boundary case

针对这种情况,边界进行补偿之后的结果图如图 13 所示。

2)零件边缘反光或者零件高度造成的阴影导致求解的相位等级值远大于或者远小于当前上下的等级,

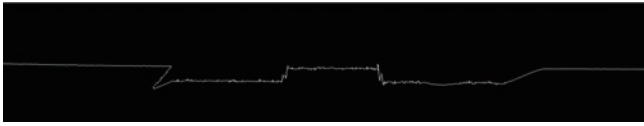


图 13 第一种边界情况处理结果

Fig. 13 Processing result of first boundary case

此时等级值是干扰值,在统计连通域时被去掉造成缺失的情况,如图 14 所示。



图 14 第二种边界情况

Fig. 14 Second boundary case

在出现这种情况时,需要找到此时位置两条线段的端点,按照原相位等级图进行端点补足,此时补足之后会有高度差。在理想条件下,零件等级交界线在因零件高度变化的地方是斜线段,所以对端点进行连线,处理方法如图 15 所示。

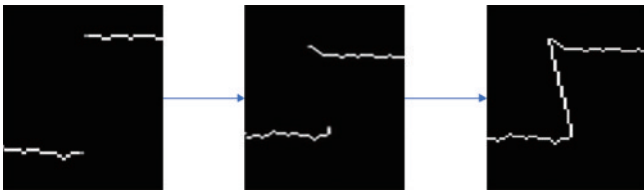


图 15 第二种边界情况的处理方法

Fig. 15 Processing method for second boundary case

针对第二种情况,对边界进行补偿之后的结果图如图 16 所示。



图 16 第二种边界情况的处理结果

Fig. 16 Processing result of second boundary case

4.3 形成新的相位等级图

将补充完整的边界代替原来相位等级图边界的位置,对图像进行漫水填充。通过条件判断,将填充区域的等级值进行矫正。依次将各个等级进行矫正,形成新的相位等级图,再进行连续相位的求解。新相位等级图形成流程图如图 17 所示。

5 实验验证

本实验采用单目光栅检测系统,其中相机是

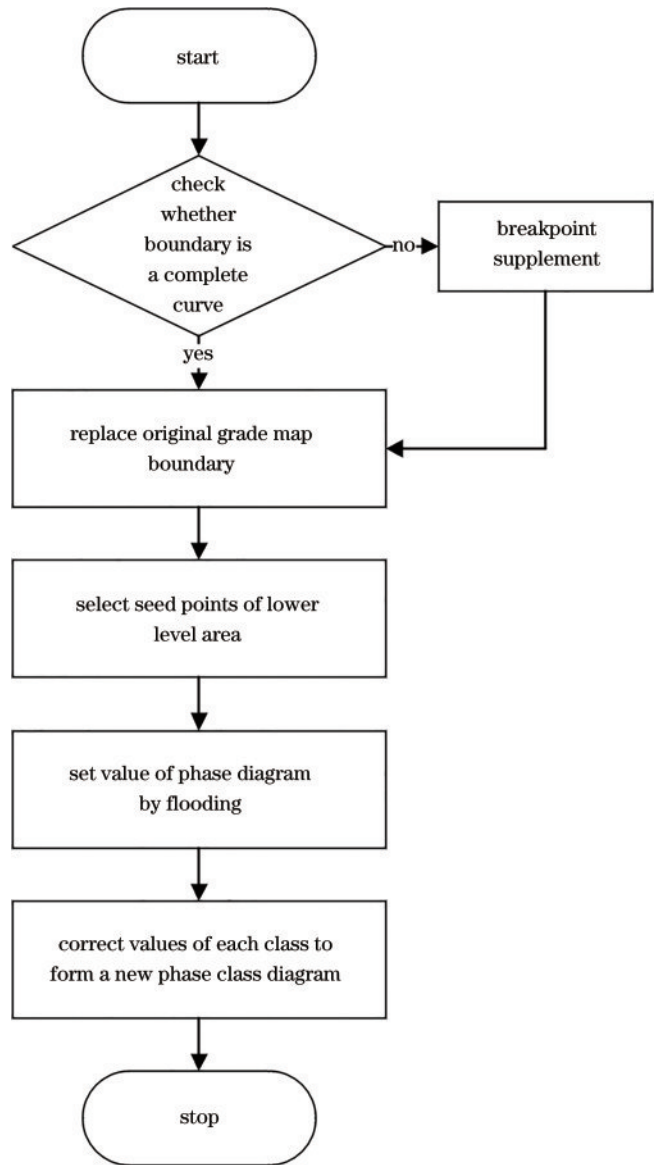


图 17 新相位等级图形成流程图

Fig. 17 Flow chart of new phase class diagram forming

Basler-aca2500-14gm,分辨率为 2592 pixel×1944 pixel,投影仪型号是 DLP4500。系统的软件功能主要包括条纹图像采集和图像处理两个部分,用程序构建频率分别为 70、64、59 Hz 的 12 张四步相移模板图,条纹图像采集通过对相机 SDK 开发包的函数调用以及二次开发来完成,图像处理通过 VS 平台以及调用 Opencv 部分相关函数进行 C++ 程序编写来实现。

5.1 相位等级图的对比

在用多频外差法进行连续相位图求解时,以相位补偿前后在外差展开过程中形成的相位等级图 $T_{12}(x, y)$ 为例进行对比。相位补偿前求解的相位等级图 $T_{12}(x, y)$ 在零件的边界处和圆孔的边界处出现等级值突变的错误,结果偏离实际,如图 18(a)所示。相位补偿后对相位等级图 $T_{12}(x, y)$ 进行求解,零件的边缘和圆孔的边界突变的等级值得到了矫正,保留了零

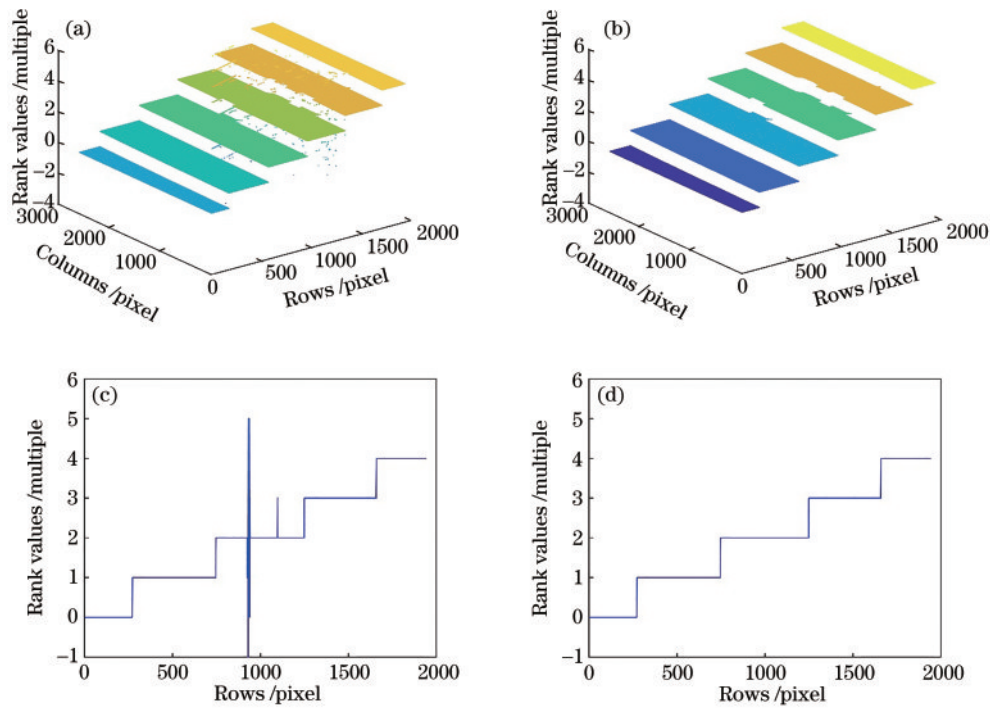


图 18 相位补偿前后低频相位等级图对比。(a)相位补偿前 $T_{12}(x, y)$; (b)相位补偿后 $T_{12}(x, y)$; (c)相位补偿前 $T_{12}(x, y)$ 曲线图; (d)相位补偿后 $T_{12}(x, y)$ 曲线图

Fig. 18 Comparison of low frequency phase class diagram before and after phase compensation. (a) $T_{12}(x, y)$ before phase compensation; (b) $T_{12}(x, y)$ after phase compensation; (c) $T_{12}(x, y)$ curve before phase compensation; (d) $T_{12}(x, y)$ curve after phase compensation

件边缘的特征,如图 18(b)所示。以相位等级图 $T_{12}(x, y)$ 中第 1743 列的等级值为列坐标,所在行数为

在逐级相位展开时,频率越高,等级值区间越小,采用相位补偿的方法也可以对突变的等级值进行矫正。以相位补偿前后求解在外差展开过程中形成的相位等级图 $T_1(x, y)$ 为例进行对比,如图 19(a)、19(b)所示。在相位等级图 $T_1(x, y)$ 中取第 1743 列的等级值为列坐标,所在行数为行坐标画曲线进行对比,突变的等级值矫正得到正确的等级值,结果如图 19(c)、19(d)所示。用本文相位补偿的方法求解相位等级图再用式(2)~(5)进行相位解包裹不会造成 2π 的叠加错误。

5.2 连续相位图的对比

相位补偿前后得到的连续相位图如图 20(a)、20(b)所示。在图 20(a)中,未矫正的连续相位图在零件边界及表面存在相位值变化不连续,不符合理论上的连续递增变化。在图 20(b)中,经过矫正的连续相位图在零件边缘和圆孔处不存在相位值跳变,符合零件轮廓的连续递增变化。取连续相位图中第 1743 列的相位值为列坐标,所在行数为行坐标画曲线进行对比,零件连续相位图在边缘处的突变被矫正,并保证其余正确的相位值没有改变且保留了零件的高度信息,如图 20(c)、20(d)所示。

行坐标画曲线进行对比,突变的等级值矫正得到正确的等级值,结果如图 18(c)、18(d)所示。

5.3 点云的对比

通过对投影仪和相机进行标定,得到相位值与三维坐标之间的映射关系,将被测物体连续相位图的相位值通过映射关系转化成三维坐标^[12-15],得到被测物体的三维点云。

用光栅投影系统对圆形零件求解的连续相位图进行相位补偿前后得到的三维点云进行对比如图 21 所示,在图 21(a)中,三维点云在零件表面及边界存在三维点求解错误的情况。在图 21(b)中,三维点云对求解错误的三维点进行了矫正,点云在表面和边界处没有点云突变,符合零件形貌特征。对连续相位图进行相位补偿后求解零件三维点云,对零件表面及边界造成反光的情况,有很好的矫正效果,使零件点云突变的数量大幅减少且突变的幅值也大为降低。

用单目光栅投影系统在 $30\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 量块上放上反光条的情况下,对其相位补偿前后的连续相位图进行三维重建,对比两次重建的结果如图 22 所示。相位补偿前进行三维重建在放上反光条的部分位置存在三维点求解错误,导致平面点云缺失。相位补偿后进行三维重建对求解错误的三维点进行了矫正,恢复了量块表面的平面。

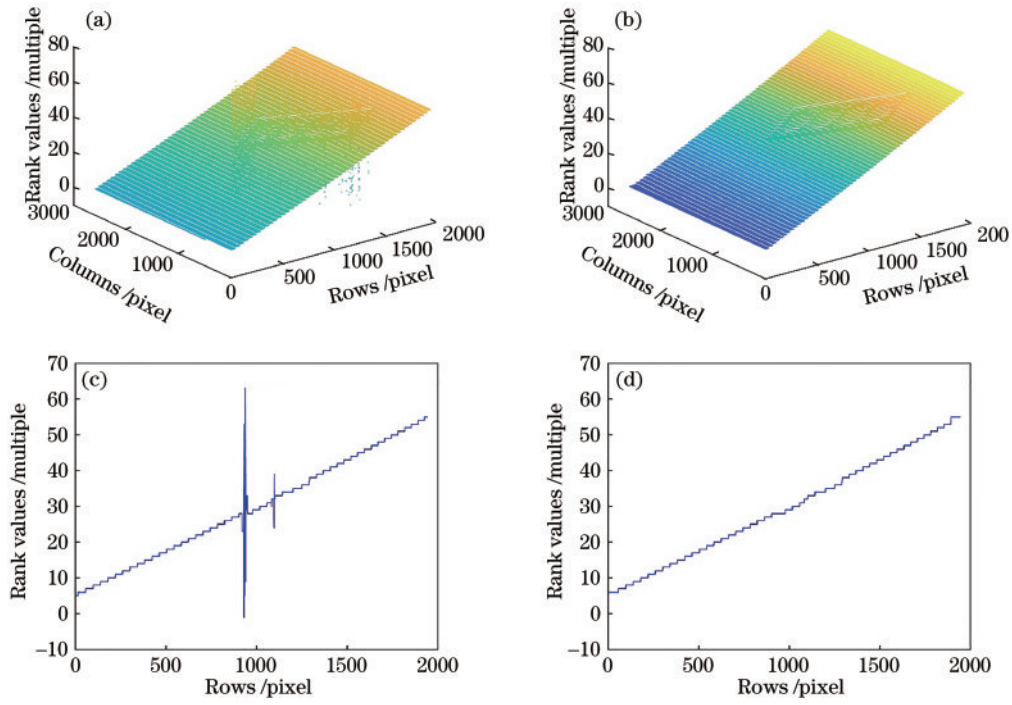


图 19 相位补偿前后高频相位等级图对比。(a)相位补偿前 $T_1(x,y)$; (b)相位补偿后 $T_1(x,y)$; (c)相位补偿前 $T_1(x,y)$ 曲线图; (d) 相位补偿后 $T_1(x,y)$ 曲线图

Fig. 19 Comparison of high frequency phase class diagram before and after phase compensation. (a) $T_1(x,y)$ before phase compensation; (b) $T_1(x,y)$ after phase compensation; (c) $T_1(x,y)$ curve before phase compensation; (d) $T_1(x,y)$ curve after phase compensation

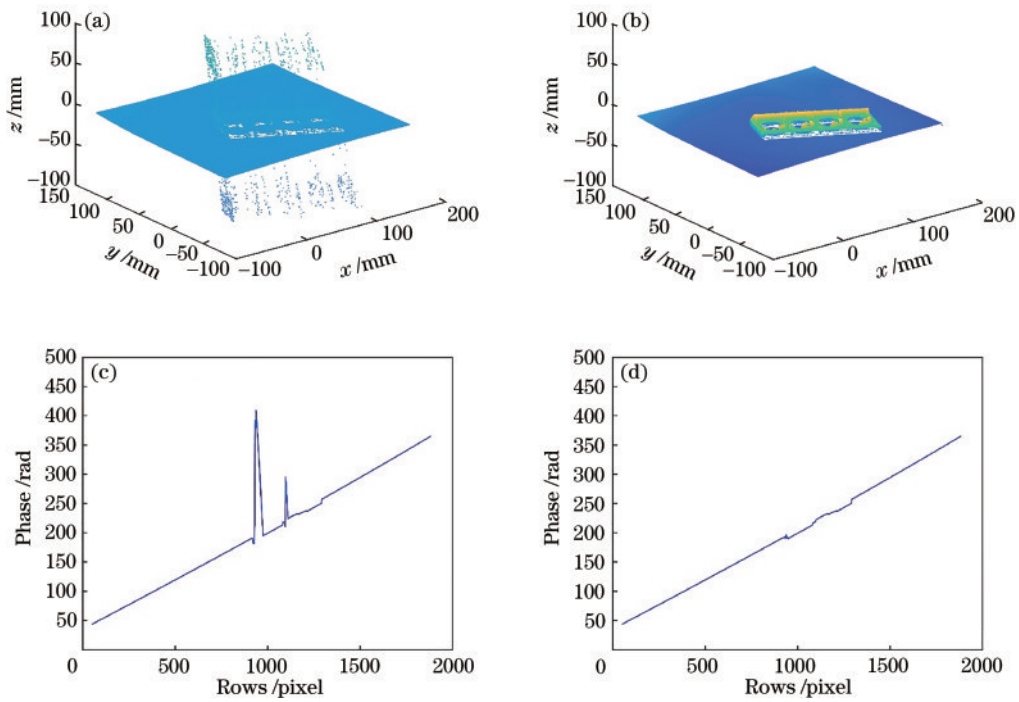


图 20 相位补偿前后连续相位图对比。(a) 未矫正的连续相位图; (b) 矫正后的连续相位图; (c) 未矫正的连续相位图曲线图; (d) 矫正后的连续相位图曲线图

Fig. 20 Continuous phase diagram comparison before and after phase compensation. (a) Uncorrected continuous phase diagram; (b) corrected continuous phase diagram; (c) curve of uncorrected continuous phase diagram; (d) curve of corrected continuous phase diagram

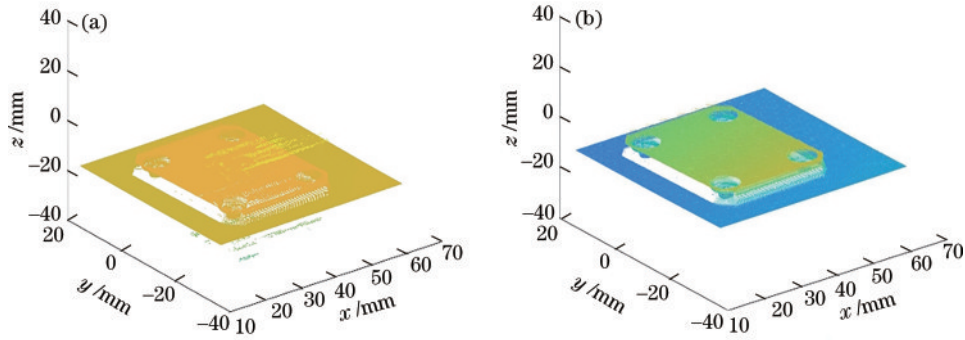


图 21 相位补偿前后零件三维点云对比。(a) 相位补偿前零件三维点云;(b) 相位补偿后零件三维点云

Fig. 21 3D point cloud comparison of parts before and after phase compensation. (a) 3D point cloud of parts before phase compensation; (b) 3D point cloud of parts after phase compensation

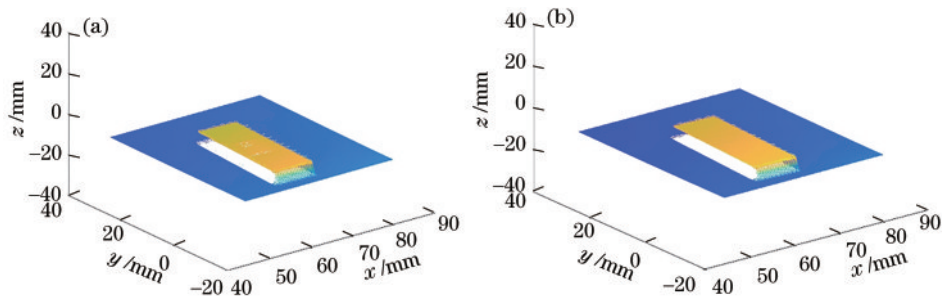


图 22 相位补偿前后量块点云对比。(a) 相位补偿前的量块点云;(b) 相位补偿后的量块点云

Fig. 22 Block point cloud comparison before and after phase compensation. (a) Block point cloud before phase compensation; (b) block point cloud after phase compensation

6 结 论

通过单目光栅投影系统使用多频外差法对零件的连续相位图进行获取,分析出零件反光情况对相位等级图、连续相位图造成干扰,使形成的三维点云存在跳变的影响。通过结合物体轮廓和相位等级图的递增特性设计图像处理算法,对相位解包裹中的相位等级图进行矫正,使连续相位图中相位值跳变减小,并降低零件边界及表面点云的突变。实验结果表明,该相位补偿方法提高了零件表面和边界在有反光情况时三维点云重建的效果,且使用起来具有稳定性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 吕深圳. 基于数字光栅投影技术的三维面型测量研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
Lü S Z. Research on 3D shape measurement based on digital fringe projection technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [2] 魏鹏轩. 基于数字光栅投影的叶片轮廓三维测量关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Wei P X. Research on key technologies of blade profile 3D measurement based on digital grating projection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [3] 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.
- [4] 毛翠丽, 卢荣胜. 提高多频条纹投影相位提取精度的反向误差补偿法[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0412005.
Mao C L, Lu R S. Inverse error compensation method for improvement of phase recovery accuracy of multi-frequency fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0412005.
- [5] 李中伟, 王从军, 史玉升, 等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, 28(8): 1527-1532.
Li Z W, Wang C J, Shi Y S, et al. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1527-1532.
- [6] 姜媿妮. 强反射表面的光栅投影三维测量方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Jiang M N. Research on 3D measurement method of grating projection for highly reflective surface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [7] 郭媛, 陈小天. 基于最小二乘相位解包裹改进算法的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508005.
Guo Y, Chen X T. Study of improved phase unwrapping algorithm based on least squares[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0508005.
- [8] Zuo C, Chen Q, Qu W J, et al. Phase aberration

- compensation in digital holographic microscopy based on principal component analysis[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(10): 1724-1726.
- [9] 程磊, 潘艳娟, 奚冬冬, 等. 双频相移条纹相位展开校正算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(12): 1210017.
Cheng L, Pan Y J, Xi D D, et al. Phase unwrapping correction method for dual-frequency fringe projection profilometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(12): 1210017.
- [10] Nguyen T, Bui V, Lam V, et al. Automatic phase aberration compensation for digital holographic microscopy based on deep learning background detection [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15043-15057.
- [11] 李文健, 盖绍彦, 俞健, 等. 基于卷积神经网络的单帧复合图像绝对相位恢复[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2312001.
Li W J, Gai S Y, Yu J, et al. Absolute phase recovery of single frame composite image based on convolutional neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2312001.
- [12] 周舵, 王鹏, 孙长库, 等. 投影仪和双相机组成的三目立体视觉系统标定方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1115001.
Zhou D, Wang P, Sun C K, et al. Calibration method for trinocular stereovision system comprising projector and dual cameras[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1115001.
- [13] 唐栋梁, 何卫锋, 欧阳祥波. 一种面结构光投影仪的标定方法[J]. *包装工程*, 2020, 41(19): 217-222.
Tang D L, He W F, Ouyang X B. Calibration method of surface structured light projector[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(19): 217-222.
- [14] Yu J, Gao N, Meng Z Z, et al. High-accuracy projector calibration method for fringe projection profilometry considering perspective transformation[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15053-15066.
- [15] Yu J, Zhang Y Q, Cai Z W, et al. An improved projector calibration method for structured-light 3D measurement systems[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(7): 075011.