

条纹反射法中新的缺陷表征质量图

覃云说 朱勇建 秦国锋 王栋

New defect characterization mass map in fringe reflection method

QIN Yunshuo, ZHU Yongjian, QIN Guofeng, WANG Dong

引用本文:

覃云说, 朱勇建, 秦国锋, 等. 条纹反射法中新的缺陷表征质量图[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 614–620. DOI: 10.5768/JAO202344.0303006

QIN Yunshuo, ZHU Yongjian, QIN Guofeng, et al. New defect characterization mass map in fringe reflection method[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 614–620. DOI: 10.5768/JAO202344.0303006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0303006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于频域变换的MEMS声学薄膜缺陷检测算法

Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation

应用光学. 2021, 42(6): 1086–1091 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603005>

基于光学相干测振系统的微悬臂梁缺陷检测

Defect detection of micro-cantilever beams based on optical coherence vibrometer system

应用光学. 2021, 42(2): 304–309 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203003>

基于改进梯度幅值的包装缺陷检测算法研究及应用

Research and application of package defects detection algorithm based on improved GM

应用光学. 2019, 40(4): 644–651 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403003>

激光超声检测带过渡圆角平板表面缺陷的数值研究

Numerical study on surface defects detection of plate with transition fillet by laser ultrasound

应用光学. 2020, 41(1): 214–219 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107005>

基于规范化样本拆分的轴承缺陷检测

Bearing defects detection based on standardized sample split

应用光学. 2021, 42(2): 327–333 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203006>

基于深度神经网络的太阳能电池组件缺陷检测算法研究

Research on detection algorithm of solar cell component defects based on deep neural network

应用光学. 2020, 41(2): 327–336 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0614-07

条纹反射法中新的缺陷表征质量图

覃云说¹, 朱勇建², 秦国锋³, 王 栋²

(1. 广西师范大学 电子工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 上海应用技术大学 计算机科学与信息工程学院, 上海 201418;
3. 广西师范大学 职业技术师范学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: 使用相移法测量物体形貌时, 质量导引法在相位解包裹中起着重要作用。在检测高反光待测物表面缺陷时, 相移条纹调制法常用来识别表面缺陷。本文通过将 Sobel 梯度与条纹调制相结合, 提出了新的缺陷表征质量图, 即调制度-Sobel 梯度偏差质量图 (modulation-sobel gradient variance, MSGV)。将解包裹相位图和原始相位图的均方根误差、峰值信噪比、信噪比 3 个性能作数据对比, 对相位解包裹数据进行模拟测试。结果显示, MSGV 的平均峰值信噪比较调制度-相位梯度偏差质量图 (modulation-phase gradient variance, MPGV) 提升了约 1.97%, 均方根误差减小了约 2.91%。表明本文提出的 MSGV 算法相对于传统算法有一定优越性, 具有更高的抗噪性和更低的解包裹误差。将所提出的方法对鼓型滚子曲面进行缺陷检测与定位, 结果表明, MSGV 能更好地显示出缺陷的轮廓信息。

关键词: 相移条纹; 质量图; 调制度; 缺陷检测

中图分类号: TN206; TP391.4

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0303006

New defect characterization mass map in fringe reflection method

QIN Yunshuo¹, ZHU Yongjian², QIN Guofeng³, WANG Dong²

(1. School of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 2. School of Computer Science and Information Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 3. Teachers College for Vocational and Technical Education, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In the process of measuring the topography of objects by the phase-shift method, the mass-guided method plays an important role in the phase unwrapping. In the detection of surface defects of high-reflective object, the phase-shift fringe modulation is often used to identify surface defects. A new defect characterization mass map was proposed by combining Sobel gradients with fringe modulation, namely modulation-sobel gradient variance (MSGV) mass map. The root-mean-square error, peak signal-to-noise ratio, and signal-to-noise ratio of the unwrapped phase map and the original phase map were compared to simulate and test the phase unwrapped data. The results show that the average peak signal-to-noise ratio of MSGV is improved by about 1.97% compared to the modulation-phase gradient variance (MPGV) mass map, and the root-mean-square error is reduced by about 2.91%, which indicates that the proposed MSGV algorithm has certain advantages compared with the traditional algorithms, with higher noise immunity and lower unwrapping error. The proposed method was used to detect and locate the defects on the surface of the drum roller. The results

收稿日期: 2022-07-30; 修回日期: 2022-11-09

基金项目: 上海市自然科学基金资助 (20ZR1455600); 上海应用技术大学协同创新基金项目资助 (XTCX2022-20); 上海应用技术大学科研启动基金 (YJ2022-40)

作者简介: 覃云说 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事机器视觉和三维测量研究。E-mail: qys_0103@163.com

通信作者: 朱勇建 (1979—), 男, 博士后, 教授, 主要从事机器视觉+AI 检测、3D 感知算法、智能网联汽车等研究。

E-mail: zguyongjian_hn@126.com

show that the MSGV can better display the contour information of defects.

Key words: phase-shift fringes; mass map; modulation degree; defect detection

引言

基于条纹反射法的缺陷检测技术是一种高灵敏、非相干的光学全场测量技术^[1]。条纹反射适用于高反光物体的表面缺陷检测,通过分析受物面调制的投影条纹的变形情况获取空间信息^[2],可以检测出物体表面的缺陷信息。常见的条纹反射法有单幅条纹傅里叶变换法^[3]和相移条纹法^[4]。相移条纹法通过多步相移条纹得到的解包裹相位和调制度信息能达到更好的稳定性,其更适用于缺陷检测。

相移条纹法提取的不连续相位被包裹在 $[-\pi, +\pi]$ 中,需要对相位进行展开^[5-7]。由于在实际的图像采集过程中存在噪声、无效区域等问题,使解出来的包裹相位误差大、待测物实际的相位信息准确性低。目前常见的解包裹算法有路径跟踪算法^[8,9]和最小二乘算法^[10]。枝切法^[8,9]、质量图引导法^[11]、掩模截断法^[12]以及最小不连续法^[13]都是最常见的路径跟踪算法。质量图引导法是利用质量图来表征包裹相位阶段的质量,以引导相位展开路径^[11]。该方法从相位图中最高质量的像素开始,在包裹的相位图上^[11]、在从高相位质量到低相位质量的方向上逐步作路径积分运算,使用质量映射作为权重来评估相位数据,并执行相位展开。可以将相位展开误差限制在一定的范围内,从而克服误差的积累和扩散。三种常用的质量图:相位梯度偏差质量图^[14]、调制度梯度偏差质量图^[15-16]、调制度-相位梯度偏差质量图^[16]。调制度-相位梯度偏差虽能标识缺陷和引导解包裹,但是其只考虑水平和垂直方向上四邻域的调制度,交叉方向上的信息未考虑到,其质量图不够鲁棒。

本研究对相移条纹反射图像运用四步相移法^[17],获得被测物体的包裹相位,然后结合 Sobel 梯度和条纹调制振幅,提出了一种新的质量图引导法,即调制度-Sobel 导数偏差质量图(modulation-sobel gradient variance, MSGV),从而引导相位解包裹过程。Sobel 梯度算子是八邻域算子,不仅能考虑到水平和垂直方向上的相位信息,交叉方向上的信息也能考虑到,因此引入 Sobel 梯度算子。此外,本文针对鼓型滚子曲面缺陷检测,搭建新的实验检测平台,运用本文所提的新质量图对其进行缺陷定

位检测。结果表明,MSGV 能更好地显示出缺陷的轮廓信息。

1 检测原理

相移条纹通过计算机编码生成,将生成的 N 步相移条纹依次投射到高反光被测物的表面,工业相机采集经被测物表面反射的含有表面调制信息和相位信息的形变条纹。

将正弦条纹投影到待测物上,其光强分布的灰度值可以表示为

$$I_i = I_0(x, y) + A(x, y) \times \cos(\theta + \phi_i) \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, N$ (i 为第 i 次相移); ϕ_i 为相移量; I_i 为第 i 步相移的合成光强度灰度值; $I_0(x, y)$ 为背景光强度; $A(x, y)$ 为调制度强度; θ 是相位像素值,这些代表了空间位置函数中的3个未知参数。因此,为了得到条纹调制度,解出像素的相位值,至少需要3个相移条纹图案的投影。本文采用四步相移法,如图1所示,其每一步相移增量为 $\pi/2$,方程式如下:

$$I_1 = I_0(x, y) + A(x, y) \times \cos \theta \quad (2)$$

$$I_2 = I_0(x, y) + A(x, y) \times \cos(\theta + \pi/2) \quad (3)$$

$$I_3 = I_0(x, y) + A(x, y) \times \cos(\theta + \pi) \quad (4)$$

$$I_4 = I_0(x, y) + A(x, y) \times \cos(\theta + 3\pi/2) \quad (5)$$

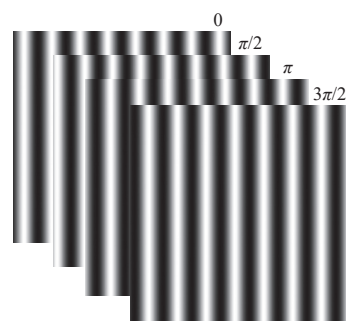


图1 四步相移灰度图像

Fig. 1 Four-step phase shift gray image

1.1 计算相移条纹调制度和包裹相位

四步相移每一步相移量对称、计算简单,可以有效地消除相移所产生的校正误差和其他误差的影响。相移条纹的条纹调制 $M(x, y)$ 为

$$M(x, y) = \sqrt{\left[\sum_{i=0}^{L-1} I_i(x, y) \sin(2n\pi/L) \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{L-1} I_i(x, y) \cos(2n\pi/L) \right]^2} \quad (6)$$

式中: $I_i(x, y)$ 为第 i 步相移的合成光强度; L 为条纹投影次数。即 $M(x, y)$ 只与 $I_i(x, y)$ 有关, 与 $I_0(x, y)$ 无关。条纹调制反映了条纹数据的质量, 在四步相移条纹法中, 条纹调制可以表示为

$$M(x, y) = 2 \times \frac{\sqrt{(I_3 - I_1)^2 + (I_4 - I_2)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (7)$$

四步相移包裹相位的值如下:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right) \quad (8)$$

模拟干涉条纹, 则其函数表达式为 $Z=20 \times \text{peaks}(N)+0.1 \times x+0.01y$ ($N=256$), 生成图片为 256 像素×256 像素的相移干涉条纹。使用四步相移法得出模拟的干涉图如图 2(a) 所示, 包裹相位如图 2(b) 所示。

1.2 质量图导引法解包裹相位

在相位解包裹过程中, 常基于质量导引法解包裹。在进行相位展开时, 当条纹相位值存在残差

$$q_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2}}{k \times k} \quad (9)$$

式中: k 是以像素点 (m, n) 为中心的正方形窗口大小; $\bar{\Delta}_{m,n}^x$ 和 $\bar{\Delta}_{m,n}^y$ 是在中心为 $k \times k$ 的正方形窗口中的梯度平均值; $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为包裹相位的偏导数。其中:

$$\begin{aligned} \Delta_{i,j}^x &= W\{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i,j}\} \\ \Delta_{i,j}^y &= W\{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j}\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: W 是将相位值包裹到 $[0, 2\pi]$ 的包裹算子; $\varphi_{i,j}$ 为包裹相位。

$$M_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^x - \bar{\Delta} M_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^y - \bar{\Delta} M_{m,n}^y)^2}}{k \times k} \quad (12)$$

式中: $\bar{\Delta} M_{m,n}^x$ 和 $\bar{\Delta} M_{m,n}^y$ 是在中心为 $k \times k$ 的正方形窗口中的调制度梯度平均值。

$$\begin{aligned} Q_{m,n} = M_{m,n} \times q_{m,n} &= \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^x - \bar{\Delta} M_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^y - \bar{\Delta} M_{m,n}^y)^2}}{k \times k} \times \\ &\quad \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^x - \bar{\Delta}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j}^y - \bar{\Delta}_{m,n}^y)^2}}{k \times k} \end{aligned} \quad (13)$$

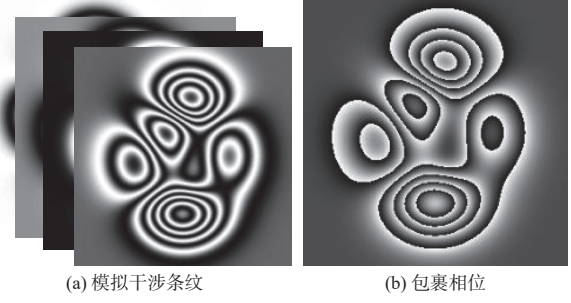


图2 模拟干涉条纹图和包裹相位图

Fig. 2 Simulated interference fringe pattern and wrapped phase image

点时, 该处的质量图数值较低; 否则, 该相位的质量图数值较高。所以可从高质量的相位像素点开始, 依次选取高质量点的相位进行解包裹, 直到整个相位被展开, 这样可以很好地将解包裹过程产生的误差降到最小。本文主要将以下 4 个质量图进行性能数据对比。

1) 相位梯度偏差质量图 (phase derivative variance, PDV)

相位导数偏差质量图在像素 (m, n) 处的质量值 $q_{m,n}$ 为

2) 调制度梯度偏差质量图 (modulation gradient variance, MGv)

x, y 方向的调制度梯度 $\Delta M_{i,j}^x$ 和 $\Delta M_{i,j}^y$ 可分别表示为

$$\begin{aligned} \Delta M_{i,j}^x &= M_{i+1,j} - M_{i,j} \\ \Delta M_{i,j}^y &= M_{i,j+1} - M_{i,j} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $M_{i,j}$ 为点 (i, j) 处的调制度值。调制度梯度偏差表达式为

4) 调制度-Sobel 梯度偏差质量图 (MSGV)

本文改进了一种基于调制度梯度和 Sobel 方差的质量图, 用于表征包裹相位质量的好坏和引导相位解包裹。其改进原理是, 若待测物体表面区域存在缺陷, 即该处是不光滑不连续区域, 将使得该区域的相移条纹出现形变, 其对应的调制度值发生改变, 调制度梯度偏差值亦发生变化, 它便具备了一定的标识待测物缺陷和

引导解包裹绕过缺陷区域的能力。调制度-相位梯度偏差虽能标识缺陷和引导解包裹, 但是其只考虑水平和垂直方向上四邻域的数据, 交叉方向上的信息未考虑到, 其质量图不够鲁棒。而 Sobel 梯度算子是八邻域算子, 不仅能考虑到水平和垂直方向上的数据, 交叉方向上的信息也能考虑到, 因此引入 Sobel 梯度算子。Sobel 梯度算子表达式为

$$\Delta\Psi_{m,n} = \sqrt{\frac{(\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j-1})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j+1})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i,j-1})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i,j+1})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i+1,j-1})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i+1,j})^2 + (\Psi_{i,j} - \Psi_{i+1,j+1})^2}{k \times k}} \quad (14)$$

式中: $\Psi_{i,j}$ 为点 (i, j) 处的相位数据。

参照相位梯度偏差质量图和调制度偏差质量图, Sobel 偏差质量图用梯度方差表示为

$$R_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta\Psi_{i,j} - \bar{\Delta\Psi}_{m,n})^2}}{k \times k} \quad (15)$$

式中: k 是以 (m, n) 像素为中心的正方形窗口的大小; $\Delta\Psi_{i,j}$ 是式 (15) 中的 Sobel 梯度; $\bar{\Delta\Psi}_{m,n}$ 是在 $k \times k$ 的方形窗口中的平均 Sobel 梯度。

本方法结合调制度偏差质量图, 在不同的质量区域对应不同的对比度和调制度的特点, 和 Sobel 算子兼顾到的八邻域特点, 提出了调制度-Sobel 梯度偏差质量图:

$$Q_{m,n} = M_{m,n} \times R_{m,n} = \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^x - \bar{\Delta M}_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta M_{i,j}^y - \bar{\Delta M}_{m,n}^y)^2}}{k \times k} \times \frac{\sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta\Psi_{i,j} - \bar{\Delta\Psi}_{m,n})^2}}{k \times k} \quad (16)$$

2 计算机仿真结果对比与分析

因残差分布在低质量区域, 但实际上, 还有其他一些像素的质量低于残差。所以为了可以将残差的质量重新分配到最低的一个, 并保持其他的质量不变。然后我们选择 MSGV 的质量值作为等式中的权重, 分别测试加入了噪声和无效区域的模拟包裹相位。将本文提出的新质量图与经典的 PDV、MGV 和 MPG V 从解包裹相位中进行性能比较。

现将本文提出的 MSGV 与式 (9) PDV、式 (12) MGV 和式 (13) MPG V 进行对比, 目的是为了证明在不同质量引导算法下, 本文提出的算法具有一定优势和较好准确度。因在实际测量中会存在一定量噪声的情况, 所以本文在图 2(b) 的基础上, 添加了 20 像素×20 像素, 将噪声密度为 0.1 的椒盐噪声进行解包裹实验对比。图 3 为添加噪声前后的包裹相位及其局部放大效果图。

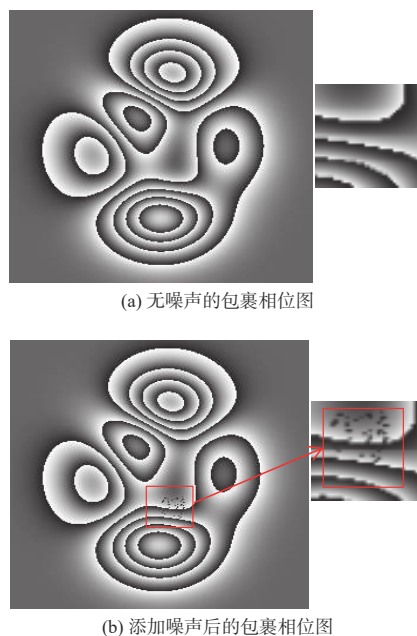


图 3 添加噪声前后的包裹相位图

Fig. 3 Wrapped phase images before and after adding noises

从图4的解包裹相位图可以看出,在原包裹相位的噪声区域中,PDV、MGV的解包裹效果相差不大,MGV在噪声附近的非噪声区域处出现一定的相位误解。本文提出的质量引导算法在解包裹效果中具有更高的相位质量和相位连续性。

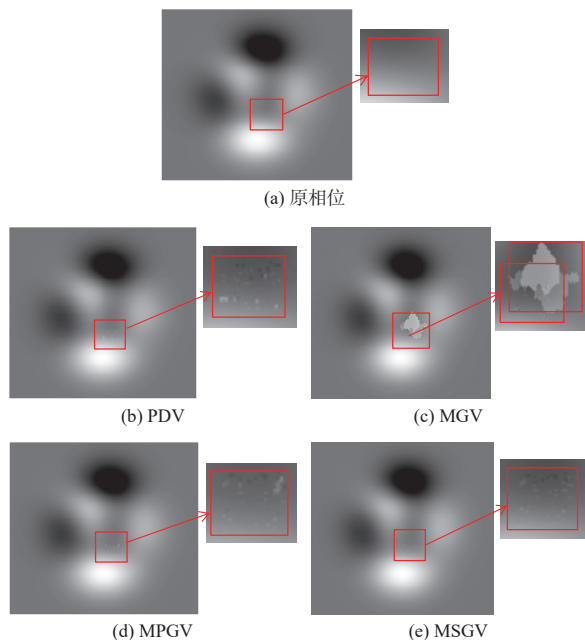


图4 解包裹相位图

Fig. 4 Unwrapped phase images

表1为通过已解包裹相位图和原始相位图的均方根误差(root-mean-square error, RMSE)、峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)、信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)作为算法性能参数,对相位解包裹数据进行模拟测试。从表1能更直观地看出各质量引导法的性能效果。与传统的解包裹算法相比,本文所提的MSGV算法在解包裹阶段的RMSE较小(较小为较好),而PSNR(较大为较好)和RMSE(较大为较好)较大。本文提出的新质量图MSGV的PSNR比MPGV提升了约1.97%,RMSE减小了约2.91%。表明本文提出的算法相对于传统的质量图引导法有一定优越性,MSGV算法具有更高的抗噪性和更低的解包裹误差。

表1 四种相位展开算法的性能参数对比

Table 1 Comparison of performance parameters of four phase-unwrapping algorithms

	PDV	MGV	MPGV	MSGV
SNR	6.4643	6.0755	37.2173	38.2827
PSNR	23.2293	22.8405	53.9823	55.0476
RMSE	3.0913	3.3809	0.2095	0.2034

在缺陷检测过程中,当高反光待测物表面无缺陷时,将该处设置为1,即显示为白色。如果待测物表面存在缺陷,该处的质量数值较低,则将该处设置为0,即显示为黑色。如图5(b)所示,为模拟缺陷位置,在图5(a)的基础上添加了20像素×20像素的无效区域。进行解包裹实验对比,并以质量图表示出来。图6(e)~图6(h)为添加无效区域后的质量图。如图6(e)所示,因PDV只源于包裹相位,部分缺陷信息在相位跃变的地方被掩盖,且只考虑 x 、 y 方向四邻域的数据,所以并不能真实反映相位质量。PDV没有全部定位出无效区域的边界,在相位从0跃变为 2π 处也没有很好地标识出,还引起了相位突变,导致其质量图没有反映出图像实际的不连续相位,而从图6(f)中看出MGV的无效区域与背景区对比度不高。结合上述质量图的特点,本文提出了新的质量图。本文提出的MSGV由于调制度的补偿,再加上Sobel梯度算法考虑到 x 、 y 周围八邻域的数据,更能识别出图像中的噪音点和边界线,如图6(h)所示,能更好地提供图像的相位质量。

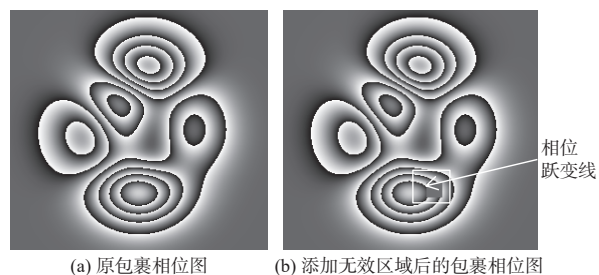


图5 添加无效区域前后的包裹相位图

Fig. 5 Wrapped phase images before and after adding invalid regions

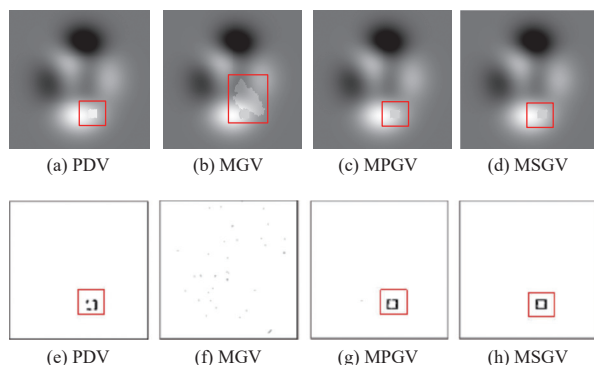


图6 解包裹效果图及对应的质量图

Fig. 6 Unwrapped effect images and corresponding mass maps

3 MSGV 在缺陷检测中的应用

3.1 测量装置组成

为了确定本文所提的新质量图的可行性, 本文首先针对待测物鼓型滚子曲面搭建出光学实验平台, 实验装置如图 7 所示。本文选用的待测物为直径 18 mm、高 16 mm 的轴承鼓型滚子, 采用 500 W 大恒彩色相机, 程控液晶条纹光源。对鼓型滚子的滚动面进行凹坑、锈迹、划伤和擦伤这四种伤型检测, 并对相机的高度和位置, 以及相机的焦距和曝光进行调整, 确保待测物在相机的视野范围, 能够获得清晰的条纹图。当物体的表面有缺陷时, 入射光的反射方向会偏转, 一部分光不会进入 CCD 相机, 这将使缺陷区域的对比度和调制低于周围的正常区域。

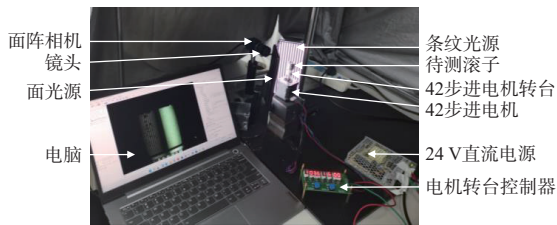


图 7 鼓型滚子缺陷检测装置图

Fig. 7 Device for defects detection of drum roller

3.2 质量导引解包裹算法实验对比与分析

基于四步相移法, 将条纹光源的条纹密度设置为 32 像素/周期, 并垂直投影到鼓型滚子滚动面, 如图 8(a)所示; 经滚动面反射, 获得含表面缺陷信

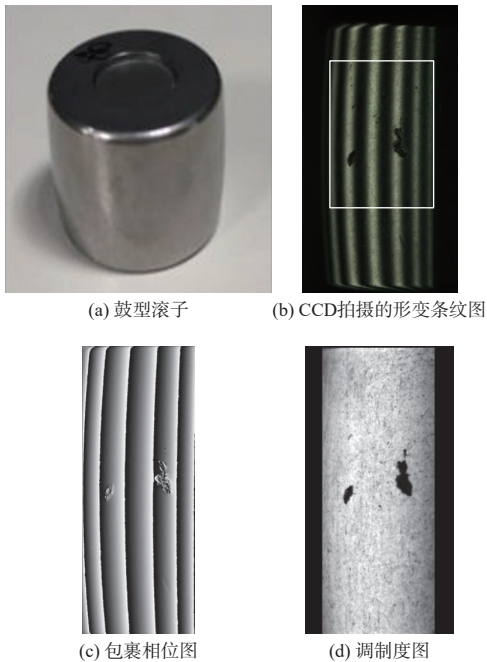


图 8 鼓型滚子及其调制度图

Fig. 8 Drum roller and its degree of modulation

息的形变条纹, 如图 8(b)所示; 将所获得的实验图进行掩膜处理, 然后将感兴趣的有效区域裁剪出来, 得到图 8(c)包裹相位和图 8(d)调制度图。

基于不同的质量图进行滚子滚动面缺陷定位对比, 如图 9 所示。在图 9(a)中, PDV 显示了滚动面凹坑等大缺陷, 但轻微划伤和锈斑未能显示出来; 图 9(b)中 MGv 能将凹坑、轻微划伤、锈斑显示出来, 但同时也显示了若干个非缺陷部分, 并且缺陷区域与背景对比度不高, 不易区分开; 图 9(c)中 MPGv 效果明显比前两个质量图好, 能显示出大部分缺陷, 但未能显示出轻微划伤; 图 9(d)中本文提出的新质量图 MSGV 较前 3 个质量图能显示出凹坑、轻微划伤、锈斑, 且缺陷轮廓信息较前 3 个质量图更清楚。

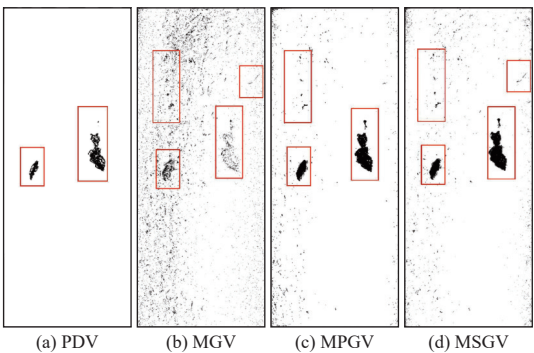


图 9 鼓型滚子质量图

Fig. 9 Mass maps of drum roller

4 结论

本文以条纹反射为基础, 提出一种调制度-Sobel 偏差质量图缺陷检测方法。该方法将调制度测量轮廓术和 Sobel 偏差算子进行结合, 其在解包裹阶段的均方根误差(RMSE)较小, 而信噪比(SNR)和峰值信噪比(PSNR)较大。本文提出的新质量图的 PSNR 比较 MPGv 提升了约 1.97%, RMSE 减小了约 2.91%。此外, 本文搭建了一套基于条纹反射的缺陷检测实验装置, 对工业轴承滚子的滚动面进行缺陷定位。从实验数据得出, 本文提出的新的 MSGV 质量图较传统质量图更能显示缺陷的轮廓信息, 以及轻微划伤、凹坑、锈斑等缺陷。实验验证了算法的可行性, 表明本文提出的算法相对于传统的质量图导引法有一定优越性, 具有更高的抗噪性和更低的解包裹误差。

参考文献:

[1] 宋一平. 基于条纹反射的手机玻璃盖板三维面形检测

- 方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- SONG Yiping. Research on three dimensional shape measurement method of mobile phone glass panel based on fringe reflection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [2] 岳慧敏. 基于时间相位展开的三维轮廓测量研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- YUE Huimin. Research on three-dimensional profilometry based on temporal phase unwrapping[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [3] 苏显渝, 苏礼坤, 李万松. 基于傅里叶变换的调制度测量轮廓术[J]. 激光与光电子学进展, 1999, 36(增刊1): 128-131.
- SU Xianyu, SU Likun, LI Wansong. Modulation measurement profilometry based on Fourier transform[J]. Laser and Optronics Progress, 1999, 36(S1): 128-131.
- [4] 宋雷. 基于条纹投影和条纹反射的三维形貌测量[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- SONG Lei. Three-dimensional shape measurement based on fringe projection and fringe reflection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [5] FLYNN T J. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[C]//IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS). Lincolnshire: IEEE, 2002: 2057-2059.
- [6] JUDGE T R, BRYANSTON-CROSS P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199-239.
- [7] 王霖, 韩旭, 伏燕军, 等. 用于三维测量的快速相位解包裹算法[J]. 应用光学, 2019, 40(2): 271-277.
- WANG Lin, HAN Xu, FU Yanjun, et al. Fast phase unwrapping algorithm for 3D measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 271-277.
- [8] ZHENG D L, DA F P. A novel algorithm for branch cut phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(5): 609-617.
- [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [10] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(1): 107-117.
- [11] 刘景峰, 李艳秋, 刘克. 一种新的质量图导引路径积分相位展开算法[J]. 光电工程, 2007, 34(12): 104-107.
- LIU Jingfeng, LI Yanqiu, LIU Ke. New path-following phase unwrapping algorithm based on quality-guided[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(12): 104-107.
- [12] GAO D P, YIN F L. Mask cut optimization in two-dimensional phase unwrapping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 338-342.
- [13] ZHONG H P, TANG J S, ZHANG Sen, et al. A quality-guided and local minimum discontinuity based phase unwrapping algorithm for InSAR/InSAS interferograms[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 215-219.
- [14] GHIGLIA D, PRITT M D. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *JOSA A*, 1994, 11(1): 107-117.
- [15] HE Y T, ZHU Y J, QIN G F, et al. New quality weight used for phase unwrapping in color fringe reflection method[J]. *Measurement*, 2021, 176: 109187.
- [16] 朱勇建, 刘立人, 栾竹, 等. 相位解包裹算法中基于调制度的新质量图[J]. 中国激光, 2006, 33(5): 667-672.
- ZHU Yongjian, LIU Liren, LUAN Zhu, et al. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(5): 667-672.
- [17] 王吉元, 田爱玲, 王红军. 四步相移干涉测量的相位补偿及仿真[J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(1): 23-27.
- WANG Jiyuan, TIAN Ailing, WANG Hongjun. Phase error compensation algorithm and simulation four-step phase shifting interferometry[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2005, 25(1): 23-27.