

文章编号 1004-924X(2024)08-1130-10

Tsallis 相对熵引导的包裹相位修补

康乐谦¹, 杨鹏程^{1*}, 吕秋娟², 连力平^{1,3}, 朱新栋⁴

(1. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 火箭军工程大学 基础部, 陕西 西安 710025;

3. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400040;

4. 西安交通大学 物理学院物质非平衡合成与调控教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 齿轮齿面形貌激光干涉测量中, 由于容易受到多种噪声干扰, 采集到的包裹相位图中会存在相位质量差的区域, 解包路径经过这些区域会造成解包裹错误, 降低测量精度。针对这一问题, 根据干涉条纹图像的概率分布特点, 本文提出一种基于 Tsallis 相对熵质量评价的包裹相位修补方法。该方法先利用高斯分布拟合阈值处理后的图像, 再由 Tsallis 相对熵评价相位质量, 最后修补质量较差的区域以提高相位解包裹质量。设计对比实验验证本方法的有效性, 实验结果表明, 该方法可以减少 40% 的相位残差点, 并且有效提高了相位质量。该方法使用简单, 准确率高, 同样适用于其他移相光学领域。

关键词: 干涉测量; 包裹相位图; Tsallis 相对熵; 图像修补; 相位解包裹

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243208.1130

Wrapping phase repair method based on Tsallis Relative Entropy evaluation

KANG Leqian¹, YANG Pengcheng^{1*}, LÜ Qiujuan², LIAN Liping^{1,3}, ZHU Xindong⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University,
Xi'an 710048, China;

2. Department of Basic, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

3. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University,
Chongqing 400040, China;

4. Ministry of Education Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of
Condensed Matter, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: yangpengcheng@xpu.edu.cn

Abstract: In the laser interferometric measurement of gear tooth flank topography, the collected wrapped phase map can be influenced by various sources of noise. These areas of poor phase quality in the wrapped phase map can lead to unwrapping errors and reduces measurement accuracy. This paper proposed a wrapped-phase repair method to address the problem. It utilized Tsallis relative entropy as an evaluation criterion, based on the probability distribution characteristics of the interference fringe image. The method

收稿日期: 2023-09-14; 修订日期: 2023-11-10.

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No. 51905412); 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划-面上项目(No. 2022JM-219)

first fitted the thresholded image using Gaussian distribution, then evaluated the phase quality by Tsallis relative entropy, finally patched the poor quality regions to improve the quality of phase unwrapped. The experimental results show that the method can reduce the phase residue points by 40% and effectively improve the phase quality. The proposed method is user-friendly and highly accurate. It can be applied to other fields related to phase-shifting optics.

Key words: interferometry; wrapped phase map; Tsallis relative entropy; image repair; phase unwrapping

1 引言

干涉测量因其非接触和高精度的优点广泛应用于精密零件的表面形貌测量。干涉条纹图像处理是获得目标表面的形貌信息的必要步骤^[1-3],特别是相位解包裹,包裹相位质量差会造成解包裹质量差,所以对于包裹相位图质量的评价是保证解包裹质量的重要手段。

传统的干涉测量方法在进行解包裹时的主要问题体现在包裹相位图存在相位质量差的区域。解包裹路径经过这些区域时会造成解包裹错误,影响测量精度。为了提高干涉测量的精度,需要提高包裹相位的质量。如调制度与相位导数方差(Phase Derivative Variance, PDV)^[4-5]。对于调制度来说,被测表面存在划痕等因素会使在暗条纹中存在过亮的点,或在亮条纹中存在过暗的点,造成对一个条纹周期的误判,引起调制度数据不准确。在需要快速获取相位信息,并且要求鲁棒性和准确性的应用中,PDV方法是一种有效和可靠的选择。但是对条纹错位,粘连等问题作用很小。

近些年来,随着深度学习的快速发展,其在解包裹领域也有很多的成果。深度学习通过大量的数据训练,学习包裹相位与解包裹相位之间的映射关系实现解包裹^[6]。其中Zhang等人利用深度学习预测了单个干涉图像的任意移相的多个干涉图^[7],并且完成了测量,达到很高的精度。Huang等人提出了一种基于深度学习的相位展开方法^[8],对抗噪声与大相位变化范围方面比较有效,具有不连续的相位图有一定的解包裹能力。Tai等人提出了一种新的分支切断连接准则^[9],让其为深度学习提供样本,可以有效阻止相位展开过程中的误差传播。但是这些方法都需

要大量的训练来提高解包裹精度。

对于图像修补方法来说,基于结构的图像修补方法能够在一定程度上保持图像的结构完整性^[10],处理各种复杂的缺失区域,并具有良好的自适应性和可控性。但是修补方法无法准确确定修补区域。而基于物体像的干涉条纹图像中散斑噪声的识别方法可以有效识别图像中的散斑噪声^[11],经过处理后可以提高图像相位质量。但是该方法利用了物体图像参与测量,可能会引入干涉图像与物体像之间的对应误差。

Tsallis相对熵是一种用来比较两个概率分布之间差异的度量指标^[12],在统计物理学、信息论和机器学习等领域有广泛的应用,能够帮助分析和比较概率分布之间的差异。使用Tsallis相对熵对干涉图像进行相位质量评价的优势在于不需要计算单个像素点的移相平均值,因此不会产生对条纹周期的误判。此外,Tsallis相对熵不关注相位的平滑性、连续性和引入物体像来评价相位质量,因此能够解决条纹错位和粘连的问题并且不引入物体像与干涉像的对应误差。所以,本文尝试利用Tsallis相对熵直接对干涉条纹图像进行待修补区域评价,再利用样本块图像修补法修补^[13],以达到提高相位质量的目的。

2 包裹相位质量的Tsallis相对熵评价

2.1 常用的质量评价模型

对包裹相位图质量评价的方法有PDV和调制度等。其中PDV计算了包裹相位在 x 方向上和 y 方向上的偏导数,并算出在固定窗口内的导数方差,其理论模型如式(1)所示:

$$V(m, n) = \sqrt{\sum_{i=(m-k)/2}^{(m+k)/2} \sum_{j=(n-k)/2}^{(n+k)/2} (\Delta_{i,j}^x - \overline{\Delta_{i,j}^x})^2} + \sqrt{\sum_{i=(m-k)/2}^{(m+k)/2} \sum_{j=(n-k)/2}^{(n+k)/2} (\Delta_{i,j}^y - \overline{\Delta_{i,j}^y})^2} \quad (1)$$

其中: $\Delta_{i,j}^x$ 为包裹相位在 x 方向上的偏导数; $\Delta_{i,j}^y$ 为包裹相位在 y 方向上的偏导数; $\overline{\Delta_{i,j}^x}$ 为 $\Delta_{i,j}^x$ 在 $k \times k$ 窗口内的平均值, $\overline{\Delta_{i,j}^y}$ 同理。若图像中存在相位的快速变化, 就会导致相位导数出现异常值或不连续, 则相位导数偏差计算可能会产生较大的误差, 以至于无法准确评估图像相位的质量。

调制度计算了每幅移相干涉图像的同一像素点的移相值的统计量, 如式(2)所示:

$$M(x, y) = \frac{2}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \sin \delta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N I_i(x, y) \cos \delta_i \right)^2} \quad (2)$$

其中: N 为移相步数; $I_i(x, y)$ 为第 i 幅干涉条纹图的灰度分布; δ_i 为第 i 幅图的移相值。调制度计算的是每幅图中同一像素点的移相值的统计量, 但是由于干涉图像中的噪声, 会使得明暗条纹中出现过亮或过暗的像素点, 造成明暗条纹之间的周期误判。

2.2 Tsallis 相对熵

Tsallis 相对熵是一种用于不同信息系统一致性测试的工具, 两系统的一致性越高, Tsallis 相对熵的值越小, 其表达式如(3)所示:

$$D(A|B) = \frac{1}{q-1} \left[\sum_{i=1}^n b_i (a_i/b_i)^q - 1 \right], \quad (3)$$

其中: q 为 Tsallis 相对熵的非广延指数, 满足 $q > 0$ 且 $q \neq 1$; $A = \{a_1 a_2 a_3 \cdots a_i\}$, $B = \{b_1 b_2 b_3 \cdots b_i\}$ 且 $\sum a_i = \sum b_i = 1$ 。由式(3)可以看出, 若 a_i 与 b_i 越相似, 则 $D(A|B)$ 的值越小。在应用 Tsallis 相对熵对两个系统进行一致性评价时, 调节 q 可以更好的刻画系统之间的信息差异性。

分析式(3)与式(1)、式(2)之间的不同, Tsallis 相对熵的处理对象是两个系统, 而 PDV 和调制度的处理对象分别为包裹相位图和移相干涉条纹图, 所以 Tsallis 相对熵的计算过程可以避免 PDV 和调制度的缺陷。

2.3 相位质量较差区域评价方法

由于系统中可能存在由测量环境、测量系统及被测物体本身等因素引入的非线性、非随机性

或非高斯噪声源, 或干扰源的特性和强度可能不同等, 所以噪声并不服从高斯分布^[14]。同时, 齿面干涉图像的噪声主要体现在灰度分布上, 存在形式主要为散斑噪声。

在处理过程中, 首先将待评价图像认为成一个像素灰度级的概率分布系统, 以 Tsallis 相对熵为评价准则, 找到一个评价后的灰度级概率分布。利用 Tsallis 相对熵对两个概率分布系统进行一致性评价, 根据 Tsallis 相对熵的特点, 一致性越高其值越小。找到使 Tsallis 相对熵取最小值的灰度级作为阈值, 此时, 两系统的一致性最高, 丢失的信息最少, 评价准确性最高, 具体的方法如下:

首先, 设阈值 t 将图像分成两部分, 背景类: $C_B = \{0, 1, 2, \cdots, t\}$; 目标类: $C_0 = \{t+1, t+2, t+3, \cdots, L-1\}$, 再由高斯分布拟合处理后的图像^[15], 如式(4)所示:

$$R = \left\{ r_i | r_i = \frac{P_B \cdot p_B^i + P_O \cdot p_O^i}{\sum_{j=0}^{L-1} (P_B \cdot p_B^j + P_O \cdot p_O^j)}, \right. \\ \left. i = 0, 1, \cdots, L-1 \right\}, \quad (4)$$

其中: i 为图像灰度级; P_B 和 P_O 为 C_B 和 C_0 的类概率; p_B^i 和 p_O^i 为灰度级 i 关于 C_B 和 C_0 的类概率。

由 Tsallis 相对熵的对称版本评价处理前后图像的一致性^[15], 如式(5)所示:

$$J_q(H|R) = \frac{1}{q-1} \left\{ \sum_{i=0}^{L-1} \left[h_i (r_i/h_i)^q + r_i (h_i/r_i)^q \right] - 2 \right\}, \quad (5)$$

其中: q 为 Tsallis 相对熵的非广延指数; h_i 代表灰度级 i 在图像 I 中的出现频率; H 为图像灰度级直方图, 可表示为 $H = \{h_i | i = 0, 1, 2, \cdots, L-1\}$ 。应用 Tsallis 相对熵对两个系统之间的信息量作一致性检测时, 其值越小代表两个系统一致性越高。如果能找到一个使式(5)取得最小值的灰度级 t , 则 t 为最佳阈值。遍历所有的灰度级所对应的 Tsallis 相对熵值, 可由式(6)得到最佳阈值 t^* :

$$t^* = \min_{t \in G} [J_q(H|R)]. \quad (6)$$

Tsallis 相对熵评价相位质量的方法流程如图 1 所示,首先对经过阈值处理后的图像进行高斯拟合,之后用 Tsallis 相对熵对原图和拟合后的图像进行一致性评价,遍历所有灰度级,令 Tsallis 相对熵最小的值所对应灰度级为阈值,用所选阈值进行相位质量评价。评价完成之后,将相位质量差的区域进行图像修补。用 t^* 处理图像的方法如式(7):

$$I(x, y) = \begin{cases} 0, & I(x, y) < t^* \\ 255, & I(x, y) \geq t^* \end{cases} \quad (7)$$

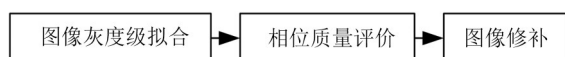


图1 Tsallis 相对熵相位评价方法流程

Fig. 1 Tsallis Relative Entropy phase evaluation method flow

3 实验与讨论

为了验证 Tsallis 相对熵的有效性,利用斜入式激光干涉系统获取被测物的移相干涉图像^[16],移相步数为 4,步距为 $\pi/2$,如图 2 所示。

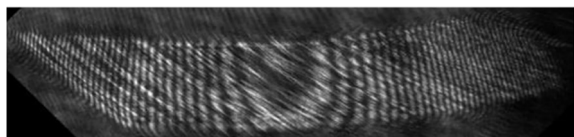


图2 移相干涉图像

Fig. 2 Phase-shifting interferogram

测量对象为精密齿轮,精度等级 ISO 标准 1-2 级,在制造时会经过磨齿工艺提高齿面精度,而在实际工况中,齿轮表面大多会出现划痕等情况,所以,若是存在大于一个 π 的相位跳变就可以认为是噪声干扰。分别将 Tsallis 相对熵与调制度、PDV 处理结果进行对比。实验流程如图 1 所示。

根据四步移相法提取出包裹相位^[17]:

$$\varphi(i, j) = -\arctan \frac{I_2(i, j) - I_4(i, j)}{I_1(i, j) - I_3(i, j)} \quad (8)$$

式(8)中 $I(i, j)$ 为图像中 (i, j) 的灰度值,提取出的包裹相位如图 3 所示。从图中可以看出,纯灰色部分为背景区域,其余部分为测量区域。

干涉图像中提取出来的相位被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 之间^[18],图中的白色所代表的相位为 π ,黑色代表的相位为 $-\pi$,其余如图 3 色标所示(彩图见期刊电子版)。

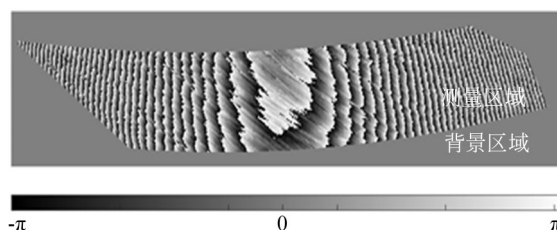


图3 包裹相位图

Fig. 3 Wrapped phase map

提取出测量区域后^[19],下一步要对包裹相位图进行相位质量评价,并且将 Tsallis 相对熵与原图、调制度和 PDV 进行结果对比。调制度和 PDV 的使用方法都由文献[5]所得,各方法所使用的参数除 Tsallis 相对熵中的 q 以外均由算法自动得出,如表 1 所示,处理结果如图 4 所示。

表1 各方法使用参数

Tab. 1 Parameters used by each method

方法名称	参数选取
PDV	$T_{PDV} = 1.3$
调制度	$T_M = 0.2$
Tsallis 相对熵	$q = 0.8 \quad T_{Tsallis} = 86$

图 4 测量区域中的白色区域为各种方法评价的相位质量好的区域,黑色区域为较差区域。可以看到在图 4(a) PDV 的评价结果中,由于 PDV 对于条纹错位和粘连的评价效果并不如调制度和 Tsallis 相对熵,所以相位质量差的区域相较于其他两种方法表现得非常离散。图 4(b) 中计算得出相位变化不均匀的条纹之间会相互连接,所以经调制度评价后的图像显示出长条状。图 4(c) 中经过 Tsallis 相对熵评价之后会呈现出独立的块状是因为相位质量差的区域概率分布呈现出明显的差异。仅仅观察评价结果并不能说明评价的准确与否,还需要用最终的修复结果并解包裹来说明 Tsallis 相对熵的准确性。

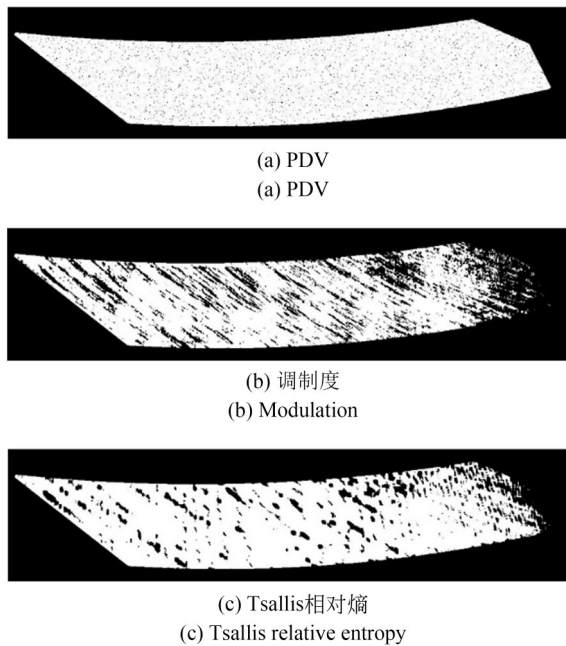


图4 相位质量评价结果

Fig. 4 Phase quality evaluation results

对图4中所有的评价结果进行图像修补,样本块图像修补法可以有效修补具有纹理特征的图像,因此采用样本块的方法进行修补,修补窗口为 9×9 ,修补结果如图5所示。

在图5(c)和(d)中,图像右侧会有一些修补结果比较差的区域,这是因为调制度和Tsallis相对熵在对应区域评价出比较大面积的相位质量较差的区域。选择相同的区域对比,分别选取图5中四幅图的(704,80)像素点作为左上角坐标,大小为 136×136 ,图5中的红色矩形框,局部放大图如图6所示。在图6红色椭圆形框内,原图出现了相位的错位,但是PDV并没有将这一区

域修复,而调制度和Tsallis相对熵就有较好的效果。同样的,在图6蓝色圆形框内的相位截断被三种方法不同程度的修复,从视觉上看Tsallis相对熵修复的结果更好一些,而在绿色椭圆形框内的相位错误只被Tsallis相对熵较好的修复(彩图见期刊电子版)。

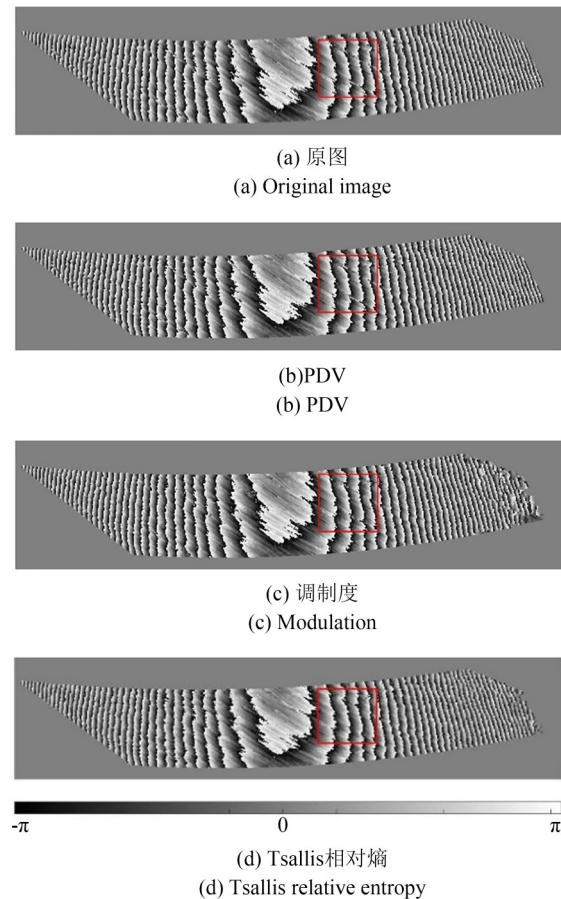


图5 不同算法评价相位质量后的修补结果

Fig. 5 Repair results after evaluating phase quality by different algorithms

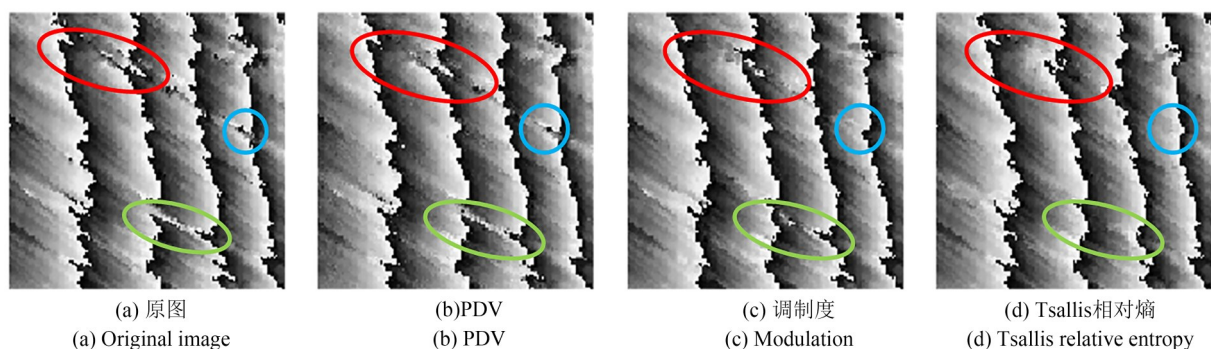


图6 图5局部放大图

Fig. 6 Figure 5 Partial Enlarged View

对处理完成后的相位质量作整体分析,统计相位接包裹后的残差点数与残差点减小数占有残差点数的百分比作为整体的评价指标。解包裹方法采用枝切法^[20],减少残差点数占有总残差点数的百分比 μ 由公式(9)计算^[20]:

$$\mu = \frac{r_b - r_a}{p} \times 100\%, \quad (9)$$

其中: r_b 为处理前残差点数; r_a 为处理后残差点数; p 为总残差点数。实验中所使用的所有图像大小为 $1\,315 \times 435$,总残差点数为475,则处理前后的图像各相关数值如表2所示。

表2 整体数值对比

Tab. 2 Comparison of overall values

方法	残差点数	减少残差点数占比
原图	475	
PDV	472	0.42%
调制度	380	19.83%
Tsallis相对熵	238	49.79%

从表2中可以清晰地看出经过各方法处理后的整体效果。原图中残差点数为474,PDV仅仅降到了472,下降比为0.42%,说明PDV并不适用于移相干涉图像。虽然调制度可以将残差点数下降19.83%,但与Tsallis相对熵相比就显得有些不足。为了进一步验证Tsallis相对熵的有效性,对图5中的四幅包裹相位图进行解包后,分别对比第165行、240行、330行的相位值。

红色曲线为Tsallis相对熵处理后的图像相位曲线,蓝色为PDV,紫色为调制度,绿色是原图。图7中,在横坐标106处经PDV处理后存在

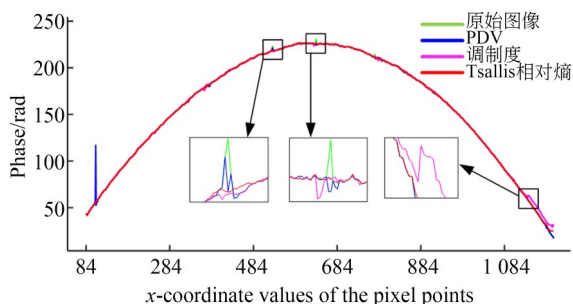


图7 第165行像素点相位对比

Fig. 7 Phase comparison of pixels in line 165

明显的相位跳变,其跳变量达到了 17π ,但是其他曲线包括原图都没有出现相位跳变的情况,这表明,在横坐标106处PDV出现误判导致修补后此点相位与原本相位趋势不符。而在横坐标529,633处均有存在相位跳变被消除的现象,跳变量大概为 1π 。另外,在633处原图中出现相位跳变,处理后,除了本文提出的方法外,其他方法都或多或少与原本的相位曲线趋势不一样。在横坐标1139处调制度出现了误判,并且连带后面的解包出现问题。

图8为第240行像素点相位对比。在横坐标799处相位曲线变化较大。其中,代表原图的绿色曲线在此处出现相位跳变,并连带地将此坐标点之后的相位解包出错,而PDV并没有找出在这一点相位出现错误,在图中表现为蓝色曲线的趋势与绿色曲线一致。在同样的位置,Tsallis相对熵与调制度都将此处跳变识别出,修补后可以看见红色曲线没有出现相位跳变并保持了原有趋势(彩图见期刊电子版)。

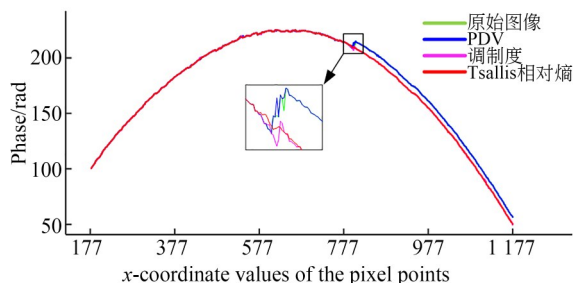


图8 第240行像素点相位对比

Fig. 8 Phase comparison of pixels in line 240

对比图9第330行的相位曲线,可以很明显的看到在横坐标422处经调制度处理后出现 24π 的相位跳变,但是原图曲线并没有出现相位跳变,说明调制度在此坐标处出现了误判。

图7~图9中出现相位跳变的数量不一样是因为散斑噪声的分布不均匀,散斑噪声多的区域造成的相位跳变的数量也就越多。

为了证明本文方法具有一定的通用性,将换一组实验对象进行展示。内容与第一组实验相似,所以第二组实与第一组实验相似的地方不做描述。

首先,第二组移相干涉图如图10所示,包裹

相位图如图 11,包裹相位图中各颜色代表值如图 3 色标所示(彩图见期刊电子版)。

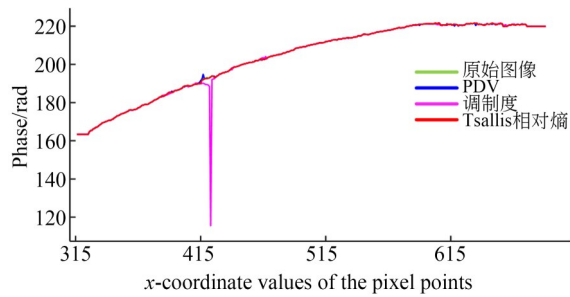


图 9 第 330 行像素点相位对比
Fig. 9 Phase comparison of pixels in line 330

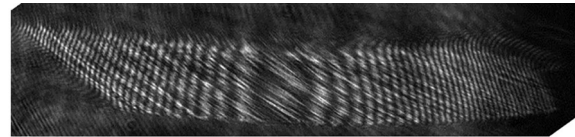


图 10 移相干涉图
Fig. 10 Phase-shifting interferogram

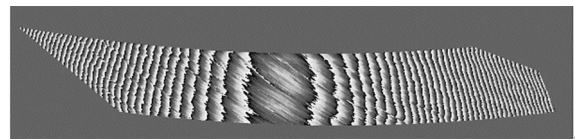


图 11 包裹相位图
Fig. 11 Wrapped phase map

表 3 为在第二组实验中各方法所采用的参数,来源与表 1 相同。结果如图 12 所示。

表 3 第二组实验使用参数

Tab. 3 The second set of experiments used parameters

方法名称	参数选取
PDV	$T_{PDV} = 1.2$
调制度	$T_M = 0.2$
Tsallis 相对熵	$q = 0.8 \quad T_{Tsallis} = 112$

相位质量评价完成后,对质量较差区域进行修补,修补方法与第一组实验相同,结果如图 13 所示。可以看到在图 13(c)右侧处出现了修补差的区域,这是由于在相位质量评价阶段出现了大面积的相位质量较差区域。为了更详细的展示各方法修补结果,对比红色方框区域内的图像相位质量。左上角坐标为(432, 135),大小为 $136 \times$

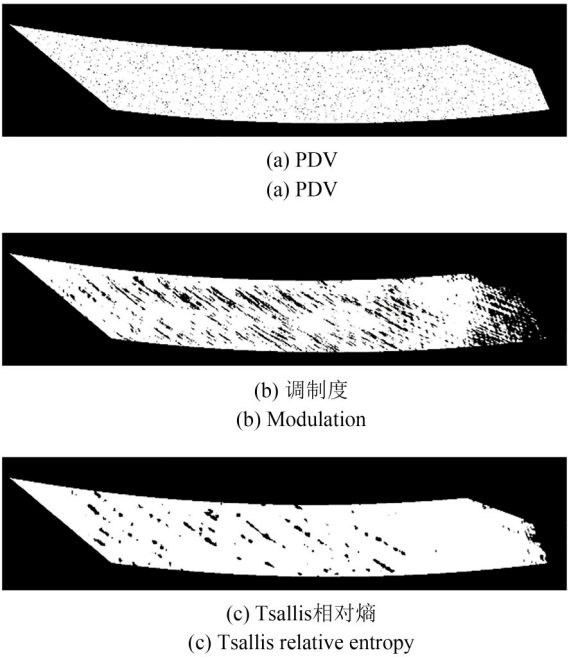


图 12 相位质量评价结果
Fig. 12 Phase quality evaluation results

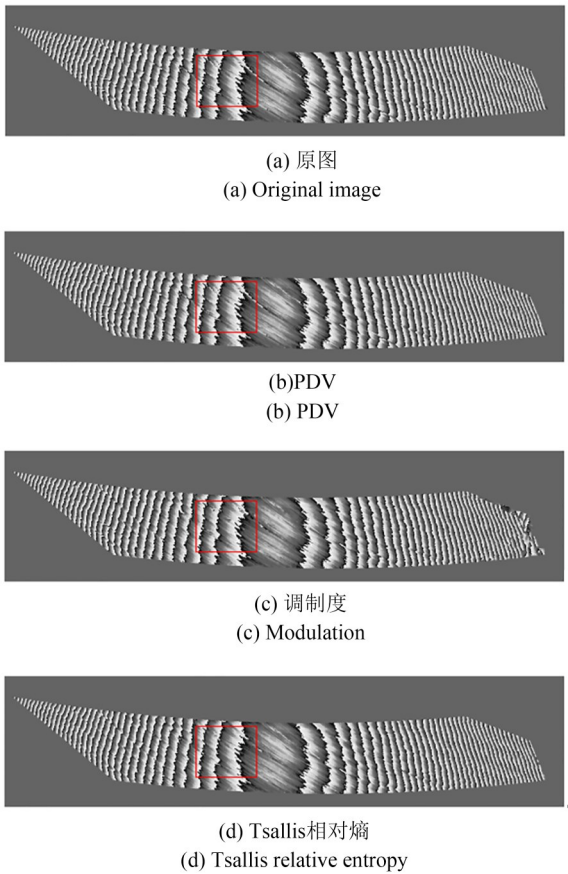


图 13 不同算法评价相位质量后的修补结果
Fig. 13 Repair results after evaluating phase quality using different algorithms

136,如图14所示。在图14(a)和14(b)中,PDV并没将图中所圈出的区域进行修补,说明PDV并没有将该相位质量较差的区域识别。同时,图14(c)和14(d)中,三个区域内都有一定程度的修

复,说明调制度与Tsallis相对熵都可以识别这些错误,并且有较好的修补效果,但是在红色和蓝色区域内,调制度的修补效果并不如Tsallis相对熵(彩图见期刊电子版)。

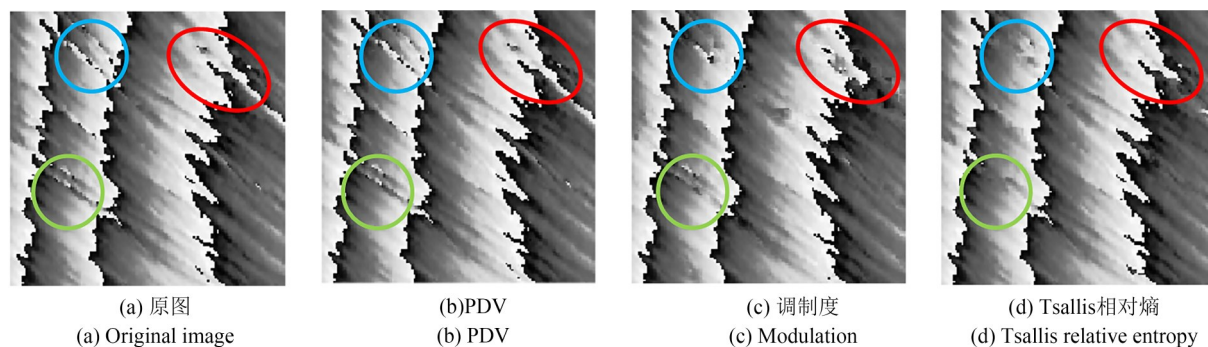


图14 图13局部放大图

Fig. 14 Figure 13 Partial Enlarged View

同样的,对这组实验的相位质量作整体分析,结果如表4所示。第二组实验所用图像大小为 1260×350 ,总残差点数为340。

表4 整体数值对比

Tab. 4 Comparison of overall values		
方法	残差点数	减少残差点数占比
原图	340	
PDV	340	0.00%
调制度	350	-2.94%
Tsallis相对熵	209	38.53%

结果表明,PDV并没有减少残差点数,这个结果与图14表现一致。经调制度处理后残差点比原图多出了2.94%,但是与第一组实验和图14相结合分析,并不是调制度无法识别相位质量较差区域,造成残差点数增加的原因是其图像右侧评价出大面积的相位质量差的区域,以致导致修补方法无法有效的修补该区域而引起残差点数增加。

图15~图17分别为第150行、205行、285行的像素点相位对比。分析图15,可以发现在横坐标460出PDV出现了32个 π 的相位跳变,并且连带后续解包裹错误。同时,由于原图像的曲线被PDV遮住,所以原图像在460处也出现了同样的错误,但是调制度与Tsallis相对熵都将该区域识

别出来并且修补有效,后续解包裹也保持了原有的趋势。在横坐标的1113处,调制度在这里出现了24个 π 的相位跳变,但是原图并没有在这里出错,说明调制度在这里出现了错误。

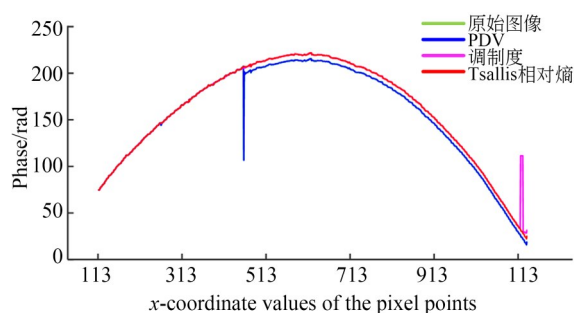


图15 第150行像素点相位对比

Fig. 15 Phase comparison of pixels in line 150

图16中的557横坐标出也出现了解包裹错误,PDV与原图像都在这里出了错并且连带后续的接包裹也出现了问题,但是调制度与Tsallis相对熵都识别出了错误并且进行了修补。这里再一次说明了调制度虽然增加了残差点数,但是也有评价相位质量的能力,残差点数增加的原因是图像右侧大面积质量差的区域修补效果较差而造成的。

在图17的横坐标294处除了Tsallis相对熵其余都出现了大致20个 π 的相位跳变,说明只有Tsallis相对熵对这个区域有效果。在横坐标851

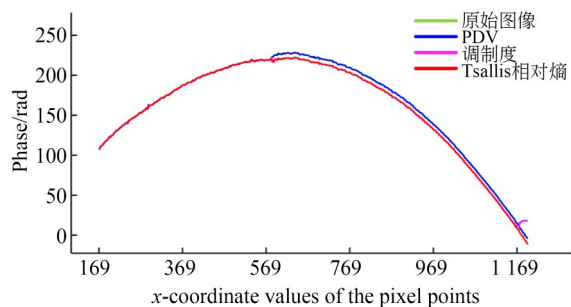


图 16 第 205 行像素点相位对比

Fig. 16 Phase comparison of pixels in line 205

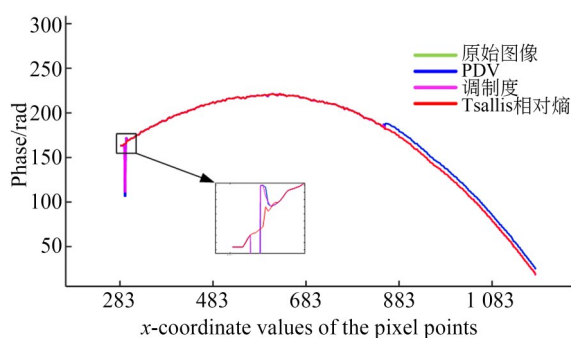


图 17 第 285 行像素点相位对比

Fig. 17 Phase comparison of pixels in line 285

处也出现了相位跳变,并且出现了后续连带的解包裹错误,经修补后,相位曲线恢复了原有的曲线。

Tsallis 相对熵可以有效评价图像中相位质量差的区域,并且在修补后不改变原有相位曲线的趋势,再进行解包裹可以提高解包裹质量,通过两组实验对象说明了 Tsallis 相对熵相位质量评价方法有一定的通用性。

4 结 论

针对激光干涉测量中得到的包裹相位图出现相位质量差的区域,根据干涉图像噪声分布特点,提出一种基于 Tsallis 相对熵评价的包裹相位修补方法。该方法先是利用高斯分布拟合经阈值处理后的图像,再用 Tsallis 相对熵对图像包裹相位进行一致性评价,得到相位质量差的区域,最后再修补以提高包裹相位质量。实验验证,该法相比于传统方法更为有效,经过修补后,可以将残差点减少 40% 左右,可以提高解包裹质量。该方法也可用于其他移相光学领域,如光学显微镜、光学相机、光学成像等。

参考文献:

- [1] FANG S P, YANG P C, ZHU X D, *et al.* Form deviation measurement of helical gear tooth flank using phase-shifting laser interferometry[J]. *Lasers in Engineering*, 2014, 29: 9-22.
- [2] 雷经发,陈志强,张森,等. 双频投影条纹相位展开方法的改进[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(6): 1337-1345.
LEI J F, CHEN Z Q, ZHANG M, *et al.* Improvement of phase unwrapping method for dual-frequency projection fringe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(6): 1337-1345. (in Chinese)
- [3] 谈宜东,徐欣,张书练. 激光干涉精密测量与应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1504001.
TAN Y D, XU X, ZHANG S L. Precision measurement and applications of laser interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48 (15): 1504001. (in Chinese)
- [4] SU X Y, CHEN W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 245-261.
- [5] GHIGLIA D C, PRITT M D. *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*[M]. New York: Wiley, 1998
- [6] WANG K, KEMAO Q, DI J, *et al.* Deep learning spatial phase unwrapping: a comparative review[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2022, 1(1): 014001.
- [7] ZHANG Q N, LU S Y, LI J S, *et al.* Deep Phase Shifter for Quantitative Phase Imaging [EB/OL]. 2020: *arXiv*: 2003.03027. <http://arxiv.org/abs/2003.03027>
- [8] HUANG W, MEI X, WANG Y, *et al.* Two-dimensional phase unwrapping by a high-resolution deep learning network [J]. *Measurement*, 2022, Vol. 200: 111566.
- [9] TAI M L, LI W G, LIU T, *et al.* Branch-cut phase unwrapping method based on deep learning [J]. *Optik*, 2023, 295: 171510.
- [10] ESEDOGLU S, SHEN J H. Digital inpainting based on the Mumford-Shah-Euler image model [J]. *European Journal of Applied Mathematics*, 2002, 13(4): 353-370.
- [11] 杨鹏程,刘洋,朱新栋,等. 基于物体像的干涉条纹图像中散斑噪声的识别方法[J]. *应用光学*,

- 2017, 38(2): 221.
- YANG P C, LIU Y, ZHU X D, *et al.* Recognition method of speckle noise in interference fringe images based on object[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(2): 221. (in Chinese)
- [12] TSALLIS C. Generalized entropy-based criterion for consistent testing [J]. *Physical Review E*, 1998, 58(2): 1442-1445.
- [13] CRIMINISI A, PÉREZ P, TOYAMA K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(9): 1200-1212.
- [14] GOODMAN J W. 光学中的散斑现象理论和应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- GOODMAN J W. *Speckle Theory and Application in Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [15] 聂方彦, 李建奇, 张平凤, 等. 一种基于Tsallis相对熵的图像分割阈值选取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071002.
- NIE F Y, LI J Q, ZHANG P F, *et al.* A threshold selection method for image segmentation based on Tsallis relative entropy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071002. (in Chinese)
- nese)
- [16] FANG S P, WANG L J, YANG P C, *et al.* Object-image-based method to construct an unweighted quality map for phase extraction and phase unwrapping [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(10): 1482-1487.
- [17] SCHREIBER H, BRUNING J H. Phase shifting interferometry [J]. *Optical Shop Testing, Third Edition*, 2006: 547-666.
- [18] 李梦霞, 曹博, 卢佳玮, 等. 数学形态学区域分割的快速相位解包裹算法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(11): 2724-2733.
- LI M X, CAO B, LU J W, *et al.* Fast phase unwrapping algorithm based on region segmenting with mathematical morphology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(11): 2724-2733. (in Chinese)
- [19] YU Z J, YANG P C, ZHU X D, *et al.* Valid measurement region segmentation method for the interferogram based on local fringe distribution features [J]. *Optics Communications*, 2023, 540: 129503.
- [20] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.

作者简介:



康乐谦(1999—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2021年于西安工程大学获得学士学位,主要从事激光干涉测量及数字图像处理方面的研究。E-mail: 220221100@stu.xpu.edu.cn

通讯作者:



杨鹏程(1985—),男,河南南阳人,副教授,2013年获得西安交通大学工学博士学位,主要从事激光干涉测量、三维数据精确建模、数字图像处理方面的研究。E-mail: yangpengcheng@xpu.edu.cn