

抑制大噪声的解包算法

徐富超^{1,2} 邢廷文¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 移相干涉技术是高精度面形检测的主要手段之一,但当图像中含有大噪声和大块无效区域时,解包却是一个难题。将噪声点分为残差点和不连续点,对残差点采用三点邻域的组合对其进行判定,对不连续点在解包前后进行两次标记,并在解包后利用邻域有效点的均值来复原噪声点,从而改进和完善了种子点解包算法。仿真结果表明,改进后的算法有较强的噪声抑制能力,有效解决了在大噪声、大块无效区域情况下图像的相位解包问题,且解包出来的图像中不再含有大的噪声,可用均值滤波进行平滑处理。

关键词 光学检测; 相位解包; 移相干涉; 噪声处理; 残差点

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.011001

Unwrapping Algorithm with High Noise Immunity

Xu Fuchao^{1,2} Xing Tingwen¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The phase shifting interference technology is one of the principal methods of high accuracy surface profile measurement. The phase unwrapping is a challenging problem when the pattern contains high level noises and bulk invalid regions. We improve seed-unwrapping algorithm through identifying the residues with combination of their three neighborhoods, marking discontinuities before unwrapping and after unwrapping, and recovering the residues and discontinuities with average value of their neighborhoods after unwrapping. The simulation indicates that it is robust for unwrapping of patterns with high noises and bulk invalid regions, and there are no high noisy points in the images unwrapped by the improved algorithm, and the unwrapped images can be well smoothed by average value filter.

Key words optical measurement; phase unwrapping; phase-shifting interferometry; noise processing; residues

OCIS codes 100.3008; 100.5088

1 引言

自1974年Bruning等^[1]提出移相干涉技术以来,移相技术中的各部分理论不断发展和完善,使从干涉图中高精度提取相位信息成为可能。移相干涉技术利用移相算法得到主值在 $[-\pi, \pi]$ 的不连续的包裹相位图,必须通过解包才能得到连续的相位分布图。但光源的光强不稳定、频率波动,CCD的热噪声、散弹噪声,光学元件材料的折射率分布不均及内部含有的不透明微颗粒,空气尘粒,CCD的暗点等因素造成干涉图像含有大量的噪声,光学表面的油渍,光学夹持器的遮挡,光瞳外区域等使得干涉图像含有大块无效区域,甚至使得有效区域不连通,这些因素使得解包困难。一般解决此问题有两种方法:一种是先对包裹相位图像进行滤波,然后再解包^[2~4],该方法的缺点是滤波会使图像的有效信息丢失;另一种是在解包中抑制噪声,解包后进行平滑处理^[5,6],该方法的缺点是当大噪声存在时解包很难正确进行。

种子点解包算法^[7]在解包时可以绕过噪声点和无效区域,当图像中含有大噪声和大块无效区域时依然适用,但前提是对噪声点和残差点进行准确标记,否则产生全局误差。本文对噪声点的性质进行了分析,将

收稿日期: 2010-07-23; **收到修改稿日期:** 2010-09-17

作者简介: 徐富超(1985—),女,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: xfc.happy@163.com

导师简介: 邢廷文(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事各种光学系统、光学镜头、光学仪器等方面的研究。E-mail: xingtww@ioe.ac.cn

其分为残差点和不连续点,并对这两类噪声点的标记和复原方法做了研究,改进和完善了种子点解包算法。

2 种子点解包算法理论

种子点解包算法是基于数字图象处理,它的原理就是通过识别一个种子点,然后向四周八邻域中的有效点扩展,再把这八个点作为第二批种子点,向各自的八邻域中的有效点扩展,如此反复下去,直到所有的有效信息点都被遍历,以实现整个图像的相位解包。

2.1 识别、屏蔽噪声

为确定包裹相位图中相邻点间的关系引入“绝对差值”的概念,用符号 Δ 表示为

$$\Delta = |\varphi(i, j) - \varphi(m, n)|, \quad (m, n) \in N_{i, j}^8 \quad (1)$$

同时设定一个最大下限阈值 D_{\min} 和一个最小上限阈值 D_{\max} 。通过比较 Δ 与 D_{\min} 和 D_{\max} 的大小来判定两相邻数据间的关系。当 $\Delta \leq D_{\min}$ 时,判定两点之间为连续;当 $\Delta \geq D_{\max}$ 时,判定两点之间为跃变;当 Δ 介于 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 之间时,认为两点中存在噪声点,将其找出,并标为无效数据点。 D_{\min} 和 D_{\max} 既可以通过经验值设定,也可以通过直方图统计方法来搜寻这对阈值。

2.2 种子点的确定

任何未被遍历过的有效数据点都可以作为种子点。其中第一个种子点尤为重要,它必须是有效数据点,为了使解包速度最快,要求在此点的八点邻域都为有效数据点。

2.3 区域生长准则

区域生长的主要目的是通过判定,确定各有效数据点的干涉级次。一般是将第一个种子点的级次设为 0,然后将其八点邻域内的点依次与该点比较,若为连续关系,则将种子点的级次赋给八点邻域内的点;若为跃变关系,则将种子点的级次 ± 1 后赋给八点邻域(正跃变 -1 ,负跃变 $+1$),如此反复下去,直到所有的有效数据点都被遍历为止。

2.4 噪声点复原

区域生长结束后,为了最大限度地保持波面原有的信息,必须对被标记的噪声点进行复原。搜寻噪声邻域内的有效点,若噪声点的正负与邻域内有效点的正负相同,则将邻域内有效点的干涉级次赋给噪声点,并将噪声点修改为有效数据点。对多次不能复原的噪声点就认为是无效数据点,其干涉级次可以赋为 0。

3 种子点解包算法的改进

种子点解包算法理论在噪声较小的情况下可以取得很好的解包效果,但在有大的噪声点存在时,由于噪声点标记方法的不足,解包会产生全局误差,同时复原方法也存在缺陷。本文将 $\Delta > D_{\min}$ (而非自然跃变)的点都称为噪声点,并结合噪声点在种子点解包算法中的影响将其分为残差点和不连续点。

3.1 残差点标记

种子点解包的基本理论是基于路径的积分,因而要求从基点到达目标点的不同路径的积分值相同,即闭合路径的积分为 0,使得积分值不为 0 的点就是残差点。Huntley^[5] 在 1989 年提出了检查残差点存在的方法

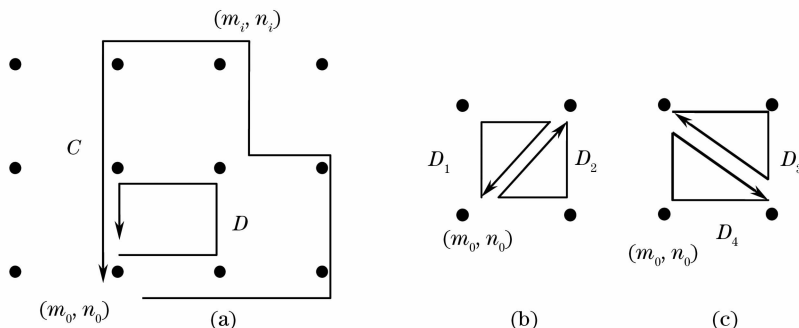


图 1 残差点判定图

Fig. 1 Identification of residues

法。如图 1(a)所示,取最小闭合路径 D ,将使得 $s(m,n) \neq 0$ 的点定义为残差点。

$$s(m,n) = \{[\varphi(m+1,n) - \varphi(m,n)]/(2\pi)\} + \{\varphi(m+1,n+1) - \varphi(m+1,n)]/(2\pi)\} + \{\varphi(m,n+1) - \varphi(m+1,n+1)]/(2\pi)\} + \{\varphi(m,n) - \varphi(m,n+1)]/(2\pi)\}, \quad (2)$$

式 $\{\}$ 为取整符号。在种子点解包算法中通过正确的标记残差点,然后在种子点选择时,绕过残差点,就可以使不同路径的积分值相同,避免全局误差。然而种子点法在向八点邻域扩展的过程中,四领域法中的 D 路径不再为最小闭合路径,通过 $s(m,n) \neq 0$ 来判断残差点的方式不能满足要求,会产生全局误差。结合种子点法向八点邻域扩展的特点和跃变点的判断阈值 D_{\max} ,取图 1(b),(c)中所示的 $D_i (i=1,2,3,4)$ 作为最小路径,将使

$$\sum_{i=1}^{N_{D_1}} d_{D_1}(i) = 0, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{D_2}} d_{D_2}(i) = 0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{D_3}} d_{D_3}(i) = 0, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{D_4}} d_{D_4}(i) = 0, \quad (6)$$

不能同时成立的点定义为残差点。标记残差点步骤如下:

1) 结合种子点解包算法中跃变的判断阈值 D_{\max} ,对 $d(i)$ 进行如下定义:

当 $\varphi(i) - \varphi(i+1) \geq D_{\max}$ 时, $d(i) = 1$; 当 $\varphi(i) - \varphi(i+1) \leq -D_{\max}$ 时, $d(i) = -1$; 当 $-D_{\max} < \varphi(i) - \varphi(i+1) < D_{\max}$ 时, $d(i) = 0$ 。其中 $i=1,2,\dots,N$, 是闭合路径上的点,点的总数是 N ,且 $\varphi(N+1) = \varphi(1)$ 。

2) 判断是否含有残差点。如图 1(b),(c)所示,遍历有效点,若四个三领域中,跃变和不全为 0,即若 (3)~(6) 式不能同时成立,表明这 4 个点中存在残差点。

3) 标记残差点。若 (3) 式成立, (4) 式不成立,则 $(m_0, n_0 + 1)$ 为残差点; 若 (4) 式成立, (3) 式不成立,则 $(m_0 - 1, n_0)$ 为残差点; 若 (3), (4) 式同时不成立,则路径 D_1, D_2 所经过的 4 个点中含有一个或是两个残差点,且 4 个点都有可能为残差点,因此将这 4 个点都标记为残差点(适当的扩大标记不影响解包精度,因为后面解包后还将对残差点进行复原处理); 若 (5) 式成立, (6) 式不成立,则 (m_0, n_0) 为残差点; 若 (6) 式成立, (5) 式不成立,则 $(m_0 - 1, n_0 + 1)$ 为残差点; 同理若 (5), (6) 式都不成立就将 D_3, D_4 所经过的 4 个点都标记为残差点。

3.2 不连续点标记

将 $\Delta > D_{\min}$, 而非残差点, 也非自然跃变的点都称为不连续点, 并在解包前后进行两次标记。

1) 不连续点的解包前标记。就是标记出包裹图像中使得 Δ 介于 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 的点。遍历各有效点, 若某点与其八点邻域中有效点的绝对差值 Δ 介于 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 中的个数大于等于 2, 则认为该点是不连续点, 并标记为无效点。这样标记后还有由于噪声点间的相互影响造成与其八点邻域中有效点的 Δ 介于 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 中的个数为 1 的不连续点被遗漏, 为此再次遍历各有效点, 将其标出。在各有效点都被遍历完后, 噪声点第一次标记完成。此时, 图像中任意相邻的两有效点间, $\Delta < D_{\min}$ 或是 $\Delta > D_{\max}$ 。

在残差点和不连续点解包前标记完成后, 按区域增长准则进行解包, 在增长过程中绕过残差点和已标记出的不连续点。

2) 不连续点的解包后标记。如图 2 所示, 解包后的 E 点与相邻点之间的绝对差值 $\Delta \geq D_{\min}$, 原因是由于 E 点受噪声的影响, 使得它在解包前与邻域点的绝对差值 $\Delta > D_{\max}$, 但却不是自然跃变, 本文将其称之为非跃变区的跃变。这些点虽不引起全局误差, 但对解包后的噪声点的复原和平滑滤波都有重大影响, 因此在解包后标记出。解包后遍历各有效点, 若 $\Delta \geq D_{\min}$, 则标记出来, 标记

-2.11	-2.16	-2.13		4.16	4.11	4.14
-2.25	E 2.86	-1.98	unwrapping →	4.02	E 2.86	4.29
-1.76	-2.09	-1.77		4.51	4.18	4.52

图 2 非跃变区的跃变点

Fig. 2 Jumping point in not-jumping regions

方法同解包前标记。

经过两次噪声点标记后,解包结果中任意相邻有效点之间的绝对差值 $\Delta < D_{\min}$,不存在大的噪声点。

3.3 噪声点复原

文献[7]中的噪声点在复原时,虽对噪声点进行了复原,但未对噪声进行抑制,且如果噪声点与邻域有效点的符号都不相同,噪声点将永远不能被复原。本文对复原方式进行了改进,方法如下:遍历图像中的各点,若某点为待复原的点,且该点八邻域中的有效点的个数大于等于4,则将这些有效点的均值赋给噪声点,并将该点的属性修改为有效点。如此重复直到所有噪声都被复原为止。

3.4 滤波

通过对残差点、不连续点的标记和复原,使得图像被正确解包,且解包后图像中相邻点间的绝对差值较小,即图像中不存在大的噪声。因此解包后选择均值滤波即可以消除小的随机噪声,取得很好的平滑效果。

4 仿真实验

首先对带噪声的直条纹的解包进行了仿真,经过五步移相算法得到的含噪声的包裹相位图如图3(a)所示,其像素为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ 。与理想的包裹相位图相比,含有白噪声,其噪声的均方根为 1.685 rad ,噪声的峰值为 $2\pi \text{ rad}$;图3(b)为噪声图(a)的“绝对差值”的直方图分布,由分布图可见在残差点的判定和噪声标记时取 $D_{\min} = 2$, $D_{\max} = 4$ 最佳。如果 D_{\min} 过小会造成噪声点过多,复原后局部失真, D_{\max} 过大会导致跃变点不能被正确判断出。此仿真中 $D_{\min} \in (1, 3)$, $D_{\max} \in (2, 5)$ 都可使其正确解包,降低了阈值选取的难度。图3(c)为过图3(a)中心 y 方向的一维包裹图像与理想图像的对比曲线。

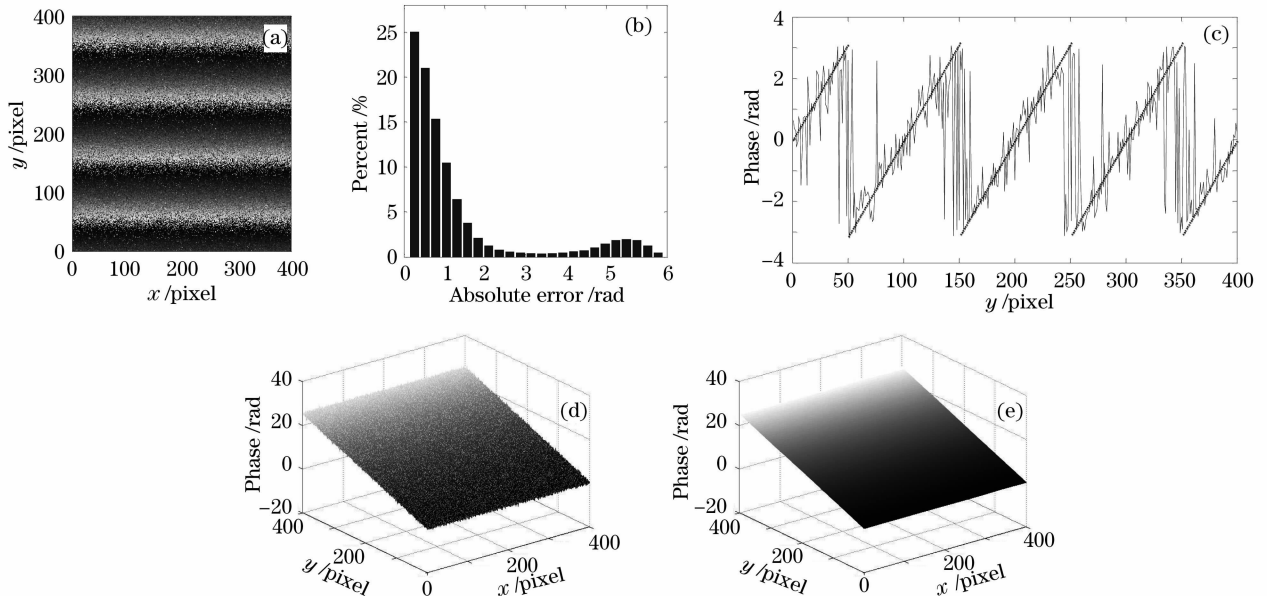


图3 带噪声的直条纹的解包仿真。(a)带噪声的包裹图像,(b)绝对差值的直方图分布,(c)过(a)中心 y 方向的一维包裹图像与理想图像的对比曲线,细线是带噪声的包裹曲线,粗线是理想包裹曲线,(d) (a)的解包面形,(e)滤波后的面形

Fig. 3 Wrapped straight-fringe phase map with noise. (a) noisy wrapped phase map, (b) histogram distribution of absolute error, (c) comparison of the central column of (a) (thin line) and ideal wrapped phase (thick line), (d) unwrapped phase map of (a), (e) filtered phase map

取 $D_{\min} = 2$, $D_{\max} = 4$ 进行解包,并进行噪声点复原,得到的如图3(d)所示的三维面形图,与原理想斜面的差值,其均方根为 0.485 rad 。由此图3(d)可见,图3(a)被正确解包,没产生全局误差。图3(e)为对图3(d)采用10次 5×5 的均值滤波后面形图,与原理想斜面相比,误差均方根为 0.040 rad 。

其次对带噪声的圆条纹的解包进行了仿真,结果如图4所示。图4(a)为带白噪声的圆条纹包裹相位图,与理想包裹相位图相比其噪声的均方根为 1.652 rad ,峰值为 $2\pi \text{ rad}$ 。图4(b)为取 $D_{\min} = 2$, $D_{\max} = 4$ 进行解包,并进行10次 5×5 的均值滤波后得到的三维面形图,与原理想二次曲面相比,其误差的均方根为

0.053 rad,比直条纹的均方根大,这是由于圆条纹密度大和滤波算法造成的。

最后对带大噪声和大块无效区域的图像的解包进行了仿真,结果如图5所示。图5(a)示意的是图3(a)由于遮挡产生了大块无效区域,原图像已不连通。本文通过基于样本块匹配的图像修复方法^[8]将其修补为如图5(b)所示的连通图像,然后再用本文的种子解包算法进行解包,得到的结果如图5(c)所示。由此可见此解包算法对噪声的容忍能力很强,即使包裹图像在进行局部图像修复过程中有较大误差,也能被正确解包,而不产生全局误差。

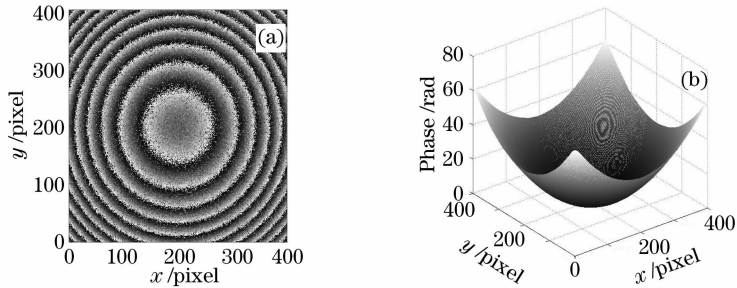


图4 带噪声的圆条纹的解包仿真。(a)带噪声的包裹图像,(b)解包并进行滤波后的面形

Fig. 4 Unwrapping of a simulated wrapped round-fringe phase image with noise. (a) noisy wrapped phase map, (b) unwrapped and filtered phase map

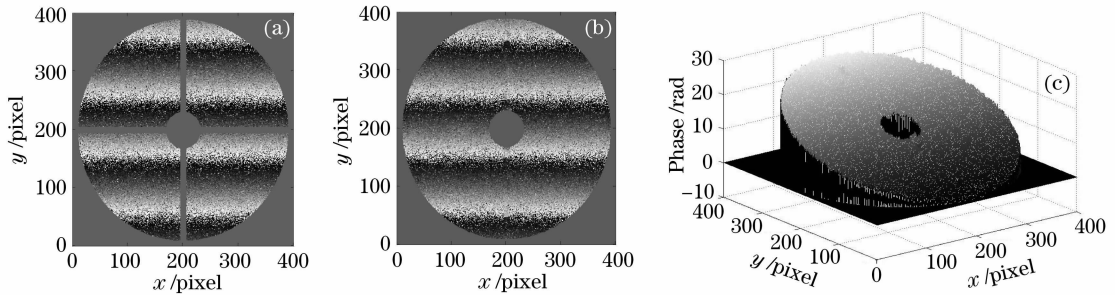


图5 带大噪声和大块无效区域的包裹图像解包仿真。(a)包裹图像,(b)修补的包裹图像,(c)解包后的图像

Fig. 5 Unwrapping of a simulated wrapped phase image with noise and bulk invalid regions. (a) wrapped phase map, (b) reconstructive phase map, (c) unwrapped phase map

5 结 论

对 Huntley^[5]提出的四领域残差点判定方法进行了改进,结合种子点解包算法向八点邻域伸展的特点和跃变判断的阈值,采用三点邻域的组合来对残差点进行标记,避免解包中产生全局误差;详细叙述了不连续点在解包前标记、解包后补标记的方法,使得解包后相邻有效点的绝对差值 $\Delta \leq D_{\min}$,同时对阈值 D_{\min} 和 D_{\max} 的选取也放宽了要求;用邻域内有效点的均值来复原残差点和不连续点,有效抑制了噪声点的影响。改进后的种子点解包算法有较强的噪声抑制能力,适用于处理含有大噪声和大块无效区域图像的相位解包。

参 考 文 献

- 1 J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 2 A. Capanni, L. Pezzati, D. Bertani *et al.*. Phase-shifting speckle interferometry; a noise reduction filter for phase unwrapping[J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(9): 2466~2472
- 3 H. A. Aebischer, S. Waldner. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4-6): 205~210
- 4 K. Qian, S. H. Soon, A. Asundi. A simple phase unwrapping approach based on filtering by windowed Fourier transform [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2005, **37**(6): 458~462
- 5 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(16): 4830~4838

- 6 Y. Lu, X. Wang, X. Zhang. Weighted least-squares phase unwrapping algorithm based on derivative variance correlation map[J]. *Optik*, 2007, **118**(2): 62~66
- 7 He Yong, Zhu Rihong, Chen Lei. Research of wave unwrapping algorithm based on the region growing theory [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(4): 594~597
何 勇,朱日宏,陈 磊. 基于区域生长理论的波面解包算法研究[J]. 光学技术, 2006, **32**(4): 594~597
- 8 Su Junhong, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. Interferogram region spreading technology based on exemplar matching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 82~85
苏俊宏,朱日宏,陈 磊 等. 基于样本匹配的干涉图延拓技术研究[J]. 红外与激光工程, 2007, **36**(1): 82~85