

文章编号: 0253-2239(2006)05-0663-5

数字散斑相位图去包裹新算法*

王 新 贾书海

(西安交通大学理学院光信息科学与技术系, 西安 710049)

摘要: 提出了一种新的数字散斑相位图去包裹算法, 主要针对检测对象为复杂非连续物体这一情况。物体在激光照明下, 采用光学相位反相相减图像的方法来检测并标识出相位间断区, 并利用改进了的行列去包裹算法。使去包裹过程只在相位有效区域进行, 从而准确快速地实现全场有效区域的相位去包裹。与已提出的相位去包裹方法相比, 该算法具有计算量小, 速度快, 并能有效地避开大面积的相位间断区的优点, 该方法使数字散斑技术可以方便地应用于工程实际中如复杂非连续构件的变形、振动等方面的定量分析。

关键词: 光学测量; 数字散斑干涉计量术; 相位去包裹; 间断区; 复杂形状物体

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Novel Phase Unwrapping Algorithm for Digital Speckle Pattern Interferometry

Wang Xin Jia Shuhai

(Department of Optical Information Science and Engineering, School of Science, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

Abstract: Novel phase unwrapping algorithm for digital speckle pattern interferometry (DSPI) is proposed, which is mainly for the complex and discontinuous structure under the illumination of laser, the discontinuous area of phase is detected and identified through the subtraction of two speckle pattern interferograms, with opposite optical phases. Then improved unwrapping process based on the traditional line scan method is conducted in the region where phase is available, and the phase unwrapping in the whole available area came out accurately and promptly. This algorithm is more efficient and simpler compared with others reported in the literature, and it can avoid the large phase discontinuous area effectively and conveniently. This novel phase unwrapping algorithm makes quantitative analysis in the actual engineering, such as distortion and vibration using DSPI very convenient.

Key words: optical measurement; digital speckle pattern interferometry; phase unwrapping; discontinuous area; complex structure

1 引 言

数字散斑干涉计量技术(Digital speckle pattern interferometry, DSPI)是一项综合了激光、电子及数字图像处理等现代技术的对物体的形变及振动进行测量的光测方法。具有精度高、灵敏度高、测量迅速简便、非接触及全场同时测量等优点。但通过数字散斑干涉计量术相移技术直接测得的结果即包裹相位图, 其值在 $[-\pi, \pi]$ 范围内, 并不能直接反映被测信息, 必须经过相位去包裹来得到真实的相位图。

迄今已提出了多种相位去包裹算法, 如较早的行列逐点算法^[1]、分割线算法^[2]、最小二乘算法^[3]、元胞自动控制算法^[4]等。针对噪声干扰的问题, 又提出了多种能去除噪声误差点^[5,6]或校正噪声误差^[7]的算法, 以及对相位间断区实行模板标识^[8]的算法, 基于时间序列的算法^[9]等。但在工程实际中, 常常遇到的存在大面积相位间断区的复杂非连续物体时, 这些算法还存在着相当的困难, 这极大地限制了数字散斑干涉计量术的应用。并且, 以上方法还存在着诸多缺点, 如算法复杂, 计算量大和去包裹耗

* 国家自然科学基金(50305028)、陕西省科技攻关计划(2004K05-G14)、教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0843)和西安市科技攻关计划(GG05042)资助课题。

作者简介: 王 新(1981~), 男, 陕西商洛人, 西安交通大学光学系硕士研究生, 主要从事光电检测技术的研究。

E-mail: xinwang_mail@sina.com

收稿日期: 2005-06-13; 收到修改稿日期: 2005-08-06

时过长等。

本文提出一种新的数字散斑干涉计量术相位去包裹算法。首先,把激光照明下的两幅光学相位彼此相反的散斑干涉图相减,得到一幅衬比度很高的图像,选取合适的阈值对其进行二值化处理,得到一个标识模板,从而有效地识别出物体表面存在的孔洞等非连续的间断区域。然后,对行列逐点去包裹算法进行了改进,采用正反两次行列逐点去包裹的方法,使去包裹过程绕过模板标识出的无效区域。同时,利用调制度分析法,在去包裹过程中把调制度低的噪声点去除,从而快速准确地实现了数字散斑干涉测量的复杂非连续物体的相位去包裹。与已有的方法相比,该算法简单、计算量小、去包裹可靠,在数字散斑干涉计量术的实际测量中效果良好。

2 复杂非连续物体的相位去包裹算法

2.1 相位去包裹有效区标识模板和噪声误差点标识模板

对于规则形状物体的无误差的包裹相位图采用逐行逐列去包裹这一方法是比较容易的^[1]。但在散斑干涉测量实际应用中,经常碰到的是包含了很多孔洞的复杂形状被测物体,这时在包裹相位图中出现大面积的相位无效区域,现有的逐行逐列相位去包裹将无法对其进行正确的相位去包裹。要想正确地去包裹,必须首先检测并标识出这些孔洞区相位无效区域,使去包裹绕过这些无效区域进行。

最初有人提出了一种用四个相邻像素点构造一个 2×2 的闭合回路,然后按顺时针或逆时针方向计算相位差,通过这个相位差来判断无效区域的方法^[2]。这种方法对孤立的点或很小的无效区域是有效的,但无法应用于大面积孔洞的判别。

在进行数字散斑干涉计量术振动测量研究中发现,在激光照明下,当物体未加载时,将光学相位相反的两幅散斑干涉图相减,会得到一幅有效待测区域和无效区域间衬比度很高的图像^[10],对其进行二值化处理,就可以构造出间断区的标识模板。相位去包裹过程就可以通过这个标识模板,来绕过孔洞等无效区域进行,得到正确的去包裹结果。

一幅光学干涉图可以表示为

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) + I_0(x, y)m(x, y)\cos\phi(x, y), \quad (1)$$

其中 $I_0(x, y)$ 为背景光强, $m(x, y)$ 为衬比度, $\phi(x, y)$ 为相位。通过光学相移器,引入 π 的相移,得到另外一幅光学相位反相的干涉图:

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) + I_0(x, y)m(x, y)\cos[\phi(x, y) + \pi], \quad (2)$$

(1)式、(2)式相减得

$$I(x, y) = I_1(x, y) - I_2(x, y) = 2I_0(x, y)m(x, y)\cos\phi(x, y). \quad (3)$$

在物体的孔洞等不连续区域,干涉图的衬比度 $m(x, y)$ 很小,趋近于0,在(3)式所表示的图像中对应了很暗的区域。而在物体的有效待测区域, $m(x, y)$ 较大,在(3)式所表示的图像中对应了较亮的区域。这样,(3)式所对应的图像将在有效区域和无效区域间具有很高的衬比度,可以很容易通过设置适当的阈值,进行二值化处理,将其转换成一个二元标识模板,这个模板正确地标识出了去包裹的有效和无效区域。

数字散斑干涉计量术测量中由于散斑噪声的存在,使其条纹质量明显低于叠栅、全息等方法得到的条纹,即使在有效的测量区也会有许多散斑噪声引起的相位误差点,相位去包裹过程同样要避免这些噪声误差点。通过在相移过程中计算各点的调制度,利用调制度同样可以构造一个标识相位误差点的模板,从而避开调制度低的那些噪声点。

利用这两个模板,使相位去包裹过程避开孔洞区域和相位误差点,就可以正确实现数字散斑干涉计量术复杂形状物体的相位去包裹。

2.2 正反两次行列逐点相位去包裹

行列逐点相位去包裹具有算法简单、计算量小、速度快的优点,但是这种方法无法对存在相位间断区的包裹相位图进行正确的去包裹,因为在现有的行列逐点去包裹算法中,后一点的相位值总是在前一点的基础上计算的,即这种算法不能“绕过”相位间断区进行,从而不能完整地对所有有效像素点进行去包裹^[1]。

本文对行列逐点去包裹算法提出一种改进方法,使其可以很容易地绕过相位间断区,从而实现数字散斑干涉计量术测量的复杂非连续体去包裹。

设 $\varphi(x, y)$ 为某点的包裹相位值, $\phi(x, y)$ 是该点的真实相位,二者关系可以表示为

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2n(x, y)\pi, \quad (4)$$

相位去包裹的目的是确定式(4)中 $n(x, y)$ 的值,从而得到某点的真实相位值 $\phi(x, y)$ 。

传统的行列逐点去包裹算法通过选取一个基准点,并以该基准点为起始点,沿着一行或一列逐点比较相邻点相位差来进行去包裹,对某一点进行去包裹时(如果是按行进行的话),仅仅是以该点所在行

的前一个像素点为基准进行的,这样将无法“绕过”相位间断区。

其实,包裹相位图中每个像素点都有四个相邻的像素点(以四连通区域为例,八连通区域与此类似),这一点的相位去包裹可以用其相邻点中的任何一个有效点为基准进行。为此,在本文的改进算法中,沿着行列去包裹时,总是把某一点周围的四个相邻像素点都去包裹,而不是仅仅只对它所在行列的后一个点进行。并且和现有的行列逐点去包裹算法仅在正方向进行去包裹不同,在本文的改进算法中,

去包裹分为正反两个过程。这样,当去包裹过程遇到已被模板标识出的相位间断区(孔洞或相位误差点)时,就可以“绕过”这些间断区进行,从而完成全部有效相位点的去包裹,具体如下:

首先,选取包裹相位图中的某一有效像素点 $P(i, j)$ 为基准点,然后逐行逐列递增行列值,进行相位去包裹。去包裹时不仅对当前点的行方向的下一点去包裹,同时也对当前点的列方向的下一点去包裹,即

$$n(x_i, y_{j+1}) = \begin{cases} n(x_i, y_j) & |\phi(x_i, y_{j+1}) - \phi(x_i, y_j)| < h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) - 1 & \phi(x_i, y_{j+1}) - \phi(x_i, y_j) \geq h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) + 1 & \phi(x_i, y_{j+1}) - \phi(x_i, y_j) \leq -h \cdot 2\pi \end{cases} \quad \begin{matrix} i = i \sim N_x \\ j = j \sim N_y \end{matrix} \quad (5)$$

当点 (x_i, y_{j+1}) 同时位于 2.1 节的两个模板的有效相位区域时;

$$n(x_{i+1}, y_j) = \begin{cases} n(x_i, y_j) & |\phi(x_{i+1}, y_j) - \phi(x_i, y_j)| < h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) - 1 & \phi(x_{i+1}, y_j) - \phi(x_i, y_j) \geq h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) + 1 & \phi(x_{i+1}, y_j) - \phi(x_i, y_j) \leq -h \cdot 2\pi \end{cases} \quad \begin{matrix} i = i \sim N_x \\ j = j \sim N_y \end{matrix} \quad (6)$$

当点 (x_{i+1}, y_j) 同时位于 2.1 节的两个模板的有效相位区域时;

其中 N_x 和 N_y 为待去包裹区域内的行列数目, h 为去包裹系数,一般取为 $0.5 \sim 0.9$ 。

(5) 式、(6) 式表示了沿行列的正方向进行去包裹。对于形状复杂的待测物体,由于相位间断区的遮挡,仅有正方向的去包裹会遗漏某些有效像素点,需要再沿反方向对遗漏的点进行去包裹。与正方向类似,反方向去包裹表示如下:

$$n(x_i, y_{j-1}) = \begin{cases} n(x_i, y_j) & |\phi(x_i, y_{j-1}) - \phi(x_i, y_j)| < h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) - 1 & \phi(x_i, y_{j-1}) - \phi(x_i, y_j) \geq h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) + 1 & \phi(x_i, y_{j-1}) - \phi(x_i, y_j) \leq -h \cdot 2\pi \end{cases} \quad \begin{matrix} i = N_x \sim 0 \\ j = N_y \sim 0 \end{matrix} \quad (7)$$

当点 (x_i, y_{j-1}) 同时位于 2.1 节的两个模板的有效相位区域时;

$$n(x_{i-1}, y_j) = \begin{cases} n(x_i, y_j) & |\phi(x_{i-1}, y_j) - \phi(x_i, y_j)| < h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) - 1 & \phi(x_{i-1}, y_j) - \phi(x_i, y_j) \geq h \cdot 2\pi \\ n(x_i, y_j) + 1 & \phi(x_{i-1}, y_j) - \phi(x_i, y_j) \leq -h \cdot 2\pi \end{cases} \quad \begin{matrix} i = N_x \sim 0 \\ j = N_y \sim 0 \end{matrix} \quad (8)$$

当点 (x_{i-1}, y_j) 同时位于 2.1 节的两个模板的有效相位区域时。

图 1 为正反两次去包裹示意图:图 1(a)为包裹相位图,中间的黑色区域为去包裹需要避免的无效

区域;图 1(b)为选取包裹图的左下点为基准点,以向右向上为正方向进行行列去包裹的结果,图中间

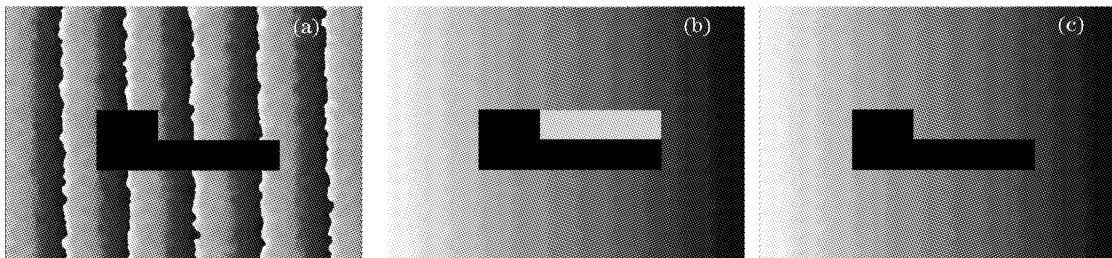


图 1 正反两次去包裹示意图。(a)包裹相位图,(b)正方向去包裹结果,(c)正反两次去包裹结果

Fig. 1 Unwrapping in the positive and negative directions. (a) Wrapped phase map, (b) unwrapping result in the positive direction, (c) unwrapping result in the positive and negative directions

的白色部分为漏掉的有效区域,可见,只进行一次正方向的去包裹并不能去掉所有的有效区域;图 1(c)为进行正方向去包裹后,再选取包裹图的右上点为基准点,沿向左向下(相对于第一次的去包裹方向为反方向)再进行行列去包裹(对已经去包裹的点除外)的结果,这一次便把上次漏掉的有效区域也进行了去包裹,得到了完整的去包裹结果。

经过这样正反两次去包裹后,由于沿正反两个方向都进行了去包裹,故可以把除相位间断区外的所有区域都进行去包裹,这样便可得到复杂非连续物体的完整的去包裹相位图,并且相位去包裹过程规避了噪声误差点,避免了去包裹误差的扩展。

对于未去包裹的噪声误差点,可以在去包裹后通过适当窗口大小的中值滤波来消除,或采用插值的办法得到噪声误差点处的去包裹相位值。

3 实验结果

实验中对一个含有多个大面积孔洞的钢板进行了变形检测。实验结果如图 2 所示。其中图 2(a)是数字散斑干涉图;图 2(b)是在激光照明下,取两幅相位相反的干涉图相减得到的高衬比度的图像;图 2(c)是设置一定的阈值对图 2(b)进行二值化的结果,即去包裹有效区标识模板,可以看出它正确地标识出了相位去包裹的有效区域(图中白色部分)和无效区域(图中黑色部分);图 2(d)是调制度模板图;图 2(e)是用数字散斑干涉计量术相移技术得到的包裹相位图;图 2(f)是在图 2(e)和图 2(d)两个标识模板的控制下,利用本文提出的正反两次行列逐点相位去包裹算法得到的去包裹相位图。图 3 为钢板变形的三维显示图。

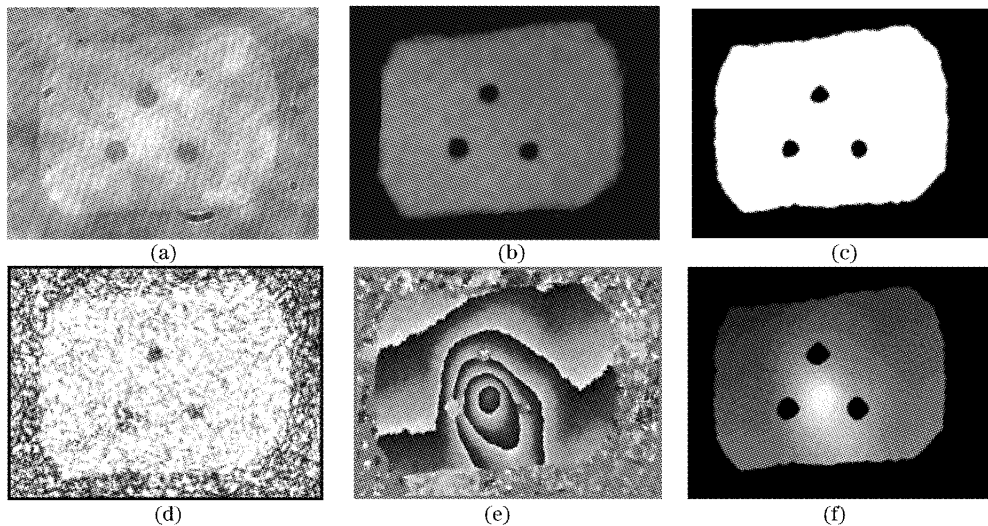


图 2 有孔钢板形变的测量结果。(a)散斑干涉图,(b)光学反相相减获得的高衬比度图像,(c)去包裹二元标识模板,(d)调制度模板,(e)包裹相位图,(f)去包裹结果

Fig. 2 Unwrapping result of steel plate with holes. (a) Speckle pattern interferogram, (b) object image with high contrast through the subtraction of speckle pattern interferogram with opposite phases, (c) binary mask of test object, (d) modulation intensity mask, (e) wrapped phase map of test object, (f) unwrapping result

可以看出,物体中存在的几个大面积孔洞丝毫没有影响最终的去包裹结果,它们在去包裹时都被

“绕过”去了,并且图像中的噪声相位误差点对最终的相位去包裹结果也没有产生不良的影响。

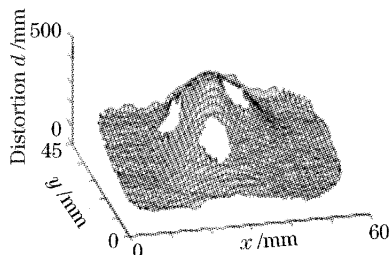


图 3 形变的三维显示图

Fig. 3 Three-dimensional display of the distortion

4 结 论

利用本文提出的数字散斑干涉计量术相位去包裹新算法,可以使数字散斑干涉计量术方便地应用于工程中最常见的复杂非连续构件。并且由于去包裹过程可以有效地规避噪声相位误差点,这将提高数字散斑干涉计量术测量的抗环境干扰能力。与已有的去包裹方法相比,本文提出的方法更加行之有效,并且具有算法简单、计算量小、耗时短等优点,这

将推动数字散斑干涉计量术在工程实际中得到更加广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe - pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 2 Tian Feng, Zhao Hong, Chen Wenyi *et al.*. A novel unwrapping method for three-dimensional profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(9): 814~818. (in Chinese)
田 丰,赵 宏,陈文艺等. 一种用于三维面形测量的新的去包裹方法[J]. *光子学报*, 1996, **25**(9): 814~818
- 3 Ghiglia D C, Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 107~117
- 4 Ghiglia D. C., Mastin G. A., Romerok L. A.. Cellular-automation method for phase unwrapping[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(1): 267~280
- 5 Hui Mei, Deng Nianmao, Wang Dongsheng *et al.*. Phase unwrapping method based on jumping order estimation[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2003, **14**(7): 745~748 (in Chinese)
惠 梅,邓年茂,王东生等. 基于跳变线估测的相位包裹去除法[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(7): 745~748
- 6 Liu Xiaojun, Zhang Ming, Gao Yongsheng *et al.*. Novel functional phase unwrapping algorithm basing on image analysising[J]. *Optical Technique*, 2000, **26**(4): 358~360 (in Chinese)
刘晓军,章 明,高永生等. 基于图像分析技术的实用相位恢复去包裹技术[J]. *光学技术*, 2000, **26**(4): 358~360
- 7 Jia Shuhai, Jiang Hong, Yue Kaiduan *et al.*. An unwrapping error-correcting method and its application in ESPI [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(1): 20~23 (in Chinese)
贾书海,姜 虹,乐开端等. 一种去包裹误差校正法及其在 ESPI 中的应用[J]. *半导体光电*, 2000, **21**(1): 20~23
- 8 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C.. 3-D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1444~1447 (in Chinese)
康 新,何小元,Quan C.. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1444~1447
- 9 Tao Gang, Li Xide. Phase map retrieve with temporal speckle pattern interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1203~1207 (in Chinese)
陶 刚,李喜德. 时间序列散斑干涉场中相位函数的计算[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1203~1207
- 10 Jia Shuhai, Yue Kaiduan, Tan Yushan. Phase continuous scan DSPI technique for measuring vibration mode[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3783**: 222~227