

一种基于散斑相关理论测量变形相位的新方法

赵冉 孙平

山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014

摘要 提出了一种提取两幅条纹图像间离面变形相位的新方法。由数字散斑相关方法(DSCM)测得两帧连续图像间的运动场,根据光流基本等式,运用初始图像的条纹频率与该运动场计算全场变形相位分布。介绍了基于DSCM变形相位方法的原理,对周边固定、中心加载圆盘的变形相位测量进行了实验和计算机模拟,验证了该方法的有效性。模拟结果和实验结果表明,该算法能够将直观的面内运动场和离面变形相位的提取联系起来,能够解调出物体全场离面变形相位信息。该方法优点是操作过程简单方便,既不需要将条纹图像转换到频域,也不需要相位解包络运算,且在条纹越密集处提取的变形相位信息更准确。该方法为计算物体全场变形相位分布和动态测量物体形变提供了新的途径。

关键词 测量; 数字散斑相关方法; 条纹分析; 动态形变测量; 窗口傅里叶变换

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0612004

A New Method for Deformation Phase Measurement by Speckle Correlation Theory

Zhao Ran Sun Ping

School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China

Abstract A novel algorithm is proposed to extract the out-of-plane component of deformation-phase from two continuous fringe patterns. The velocity field between two consecutive frames is estimated by digital speckle correlation method (DSCM). According to the optical flow constrained equation, the whole-field deformation-phase map is obtained by the estimations of the velocity field and the fringe frequency of the original image. The principle of measuring deformation-phase method is introduced based on DSCM. The experiment and computer simulation are done on the deformation-phase measurement of disk center loading and fixed around. The effectiveness of this method is verified. Simulation and experimental results show that the proposed method can connect the visible in-plane velocity field and the extraction of out-of-plane deformation-phase and demodulate the out-of-plane component of deformation-phase from the whole-field. The proposed method has advantages in the operation process as easy and convenient, and it neither need conversion of fringe image to frequency domain, also do not need phase envelope operation. The deformation-phase information extracted from denser fringe place is more accuracy. The proposed algorithm provides a new approach for whole-field deformation-phase measurement and dynamic object deformation measurement.

Key words measurement; digital speckle correlation method; fringe analysis; dynamic deformation measurement; windowed Fourier transform

OCIS codes 120.5050; 120.6165; 300.6300; 100.2650

1 引 言

光学干涉测量方法因其独特的优势在物体的三维形貌和变形测量中占有十分重要的地位,如电子散斑干涉^[1-2]、全息干涉^[3-5]、云纹干涉法^[6]等。在这些方法中需要解调出条纹图中每一点的相位信息才可以实现

收稿日期: 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-02

作者简介: 赵冉(1988—),男,博士研究生,主要从事图像处理、光学测量等方面的研究。

E-mail: zhaoran276@sina.com

导师简介: 孙平(1964—),男,博士,教授,主要从事散斑、云纹等光干涉测量技术等方面的研究。

E-mail: sunpingmail@163.com(通信联系人)

变形测量,而解调相位的方法主要分为时间相位测量法和空间相位测量法。时间相位测量法,如时间相移法(TPM)^[7-9]等具有位移测量精度高、结构简单等优点,但是该类方法需要多幅条纹图才能完成测量,且耗时较长,一般只适用于静态测量;空间相位测量法是通过在空间上获取更多信息来提取相位的,如空间相移法(SPM)^[10]和傅里叶变换法(FTM)^[11]等,可实现对动态过程相位的测量。但是,前者的光路较为复杂,且精度较低;后者的处理过程比较繁琐,很难实现条纹处理的自动化。同时,以上方法在测量位移场时均没有考虑到时间参量,因而对动态场的定量测量就无法获得满意的结果。针对此问题,有研究工作者提出了时间序列相位法(TSPM)^[12],将时间参量引入散斑干涉当中,成功地提取出了相位信息,能适应大变形、时变测量。然而该方法在位移方向性上无法给出确定值,故只能用于单调的时变场中。除此之外,以上方法都需要进行相位解包络操作,这无疑增加了相位提取的运算量和误差。同时,由于在条纹稠密区域无法判断每个条纹的细节,故在条纹密集处解调的相位误差都比较大。

数字散斑相关方法(DSCM)是在 20 世纪 80 年代由 Peters 等^[13-14]提出的,是一种对物体表面变形前后的图像进行相关计算处理而得到物体变形场的测量方法。该技术具有光路简单、精度较高、测量环境要求低、全场测量等优点,在实验力学、现场实时测量、微尺度变形场测量等众多应用领域都展示了其实用性和优越性^[15-17]。随着近年来科研对测量精度要求的不断提高,应用亚像素搜索算法获得精确的亚像素位移成为了研究 DSCM 的学者们重要的研究方向,常见的亚像素算法主要有牛顿-拉夫逊(N-R)迭代法^[18]、基于梯度的方法^[19]等。然而,DSCM 对离面位移的测量并不敏感,因此一般只适用于测量面内位移。2003 年,Fricke-Begemann^[20]提出了基于 DSCM 测量离面位移的算法,但是该方法受到很多实验条件的限制,并没有运用到实践当中。

本文基于 DSCM 提出了一种由两幅条纹图之间的面内位移来提取全场离面变形相位的新方法。该算法将时间参量引入光干涉计量当中,运用 DSCM 中基于梯度的亚像素相关算法获得两幅连续图像之间的面内位移场(运动矢量场),根据光流场理论的基本假设使面内位移与离面变形相位建立关系,用该面内位移场与窗口傅里叶变换法提取的第一帧图像的条纹频率进行计算,进而获得两帧图像之间全场的离面变形相位信息。这种方法只需在空间域中用两幅条纹图就可以完成变形相位的提取,无需转换到频域和进行相位解包络操作,适用于动态测量,且在条纹越密集的区域提取相位的效果越好,克服了现有相位解调方法中条纹过密时解调误差较大的缺点,过程简单、方便,该方法也为光干涉动态测量提供了新的途径。

2 基本原理

2.1 DSCM 测量两图像运动场原理

DSCM 的基本原理为物体变形前后,其表面上几何点的移动产生了面内位移,由于其变形前后的散斑图是相关的,故可通过相关算法,确定物体变形前后对应的几何点,即可直接得到面内变形场。最常用的计算相关公式为^[19,21]

$$C(u, v) = \frac{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中 $f(x, y)$ 为变形前的图像, $g(x, y)$ 为变形后的图像。 u 与 v 为图像上每点在 x 方向和 y 方向上的整像素位移。 \bar{f} 和 \bar{g} 为图像子区域灰度平均值。(1) 式表示在变形前后的图像上各取大小为 $m \times m$ 的子区域来计算相关系数 C , 能使 C 取最大值的 u 和 v 即为子区域中心的位移。通过上述方法,可以确定两幅图像的整像素位移值。然而,实际的位移值不一定恰为整数。为了提高测量精度,需要在整像素结果的基础上进一步进行亚像素位移的计算。在基于梯度的亚像素相关算法中所选取的相关系数计算公式为^[19,22]

$$C(u, v) = \frac{\left\{ \sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}][g(x_i + u + u', y_j + v + v') - \bar{g}] \right\}^2}{\sum_i^m \sum_j^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \sum_i^m \sum_j^m [g(x_i + u + u', y_j + v + v') - \bar{g}]^2}, \quad (2)$$

式中 u', v' 为对应于整像元位移结果的亚像元位移。将 $g(x_i + u + u', y_i + v + v') - \bar{g}$ 泰勒展开, 取一级近似, 并令 $\frac{\partial C}{\partial u'} = 0, \frac{\partial C}{\partial v'} = 0$, 可得

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B & C \\ E & H \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$\begin{cases} A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2 \\ B = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \\ C = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \\ D = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G^2 \\ E = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_x - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_x G_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \\ F(x_i, y_j) = f(x_i, y_j) - \bar{f} \\ G(x_i, y_j) = g(x_i + u, y_j + v) - \bar{g} \\ H = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG_y \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m GG_y - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m G_y^2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m FG \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $G_x = g_x - \bar{g}_x, G_y = g_y - \bar{g}_y$, 以 x, y 为下标的量表示对 x, y 求偏导数。对(3)式中的微分进行计算时, 选用的是 Barron 梯度算子, 其计算方法为

$$\begin{cases} \frac{\partial I(i, j)}{\partial x} = \frac{1}{12}I(i-2, j) - \frac{8}{12}I(i-1, j) + \frac{8}{12}I(i+1, j) - \frac{1}{12}I(i+2, j) \\ \frac{\partial I(i, j)}{\partial y} = \frac{1}{12}I(i, j-2) - \frac{8}{12}I(i, j-1) + \frac{8}{12}I(i, j+1) - \frac{1}{12}I(i, j+2) \end{cases}. \quad (4)$$

梯度法在模拟实验中, 0.001~0.01 亚像元位移精度可达 0.001 pixel, 0.01~0.1 亚像元位移绝对误差小于 0.005 pixel, 0.1~1.0 pixel 范围内的相对误差可以控制在 2%。根据以上公式即可求得所需的两幅连续图像间的运动场 $\Delta u = u + u'$ 和 $\Delta v = v + v'$ 。

2.2 提取物体变形相位原理

设在 t 时刻像元点 (x, y) 处灰度值为 $I(x, y, t)$, 在 $(t + \Delta t)$ 时刻该点运动到新的位置 $(x + \Delta x, y + \Delta y)$, 灰度值记为 $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ 。将 $I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ 用泰勒公式展开并忽略二阶以上的高次项, 有

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t, \quad (5)$$

同时根据图像一致性假设, 即 $I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$, 可以得到

$$I_x \Delta u + I_y \Delta v + I_t = 0, \quad (6)$$

式中 $\Delta u = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \Delta v = \frac{\Delta y}{\Delta t}, I_x, I_y$ 和 I_t 分别为图像 I 对于 x, y, t 的偏导数。(6)式即为光流基本等式^[23-24]。而干涉条纹图一般可以表示为^[9]

$$I = a(x, y, t) + b(x, y, t) \cos \varphi(x, y, t), \quad (7)$$

式中 $a(x, y, t)$ 是背景光强, $b(x, y, t)$ 是条纹图的幅值, $\varphi(x, y, t)$ 为条纹图的相位信息。将函数 $I(x, y, t)$ 在点 (x_0, y_0) 做泰勒级数展开, 取一级近似可得

$$I(x, y, t) = a(x, y, t) + b(x, y, t) \left\{ \left[\cos \varphi(x_0, y_0, t) - \sin \varphi(x_0, y_0, t) \cdot \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial x} \Delta x - \sin \varphi(x_0, y_0, t) \cdot \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial y} \Delta y \right] - \sin \varphi(x_0, y_0, t) \cdot \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial t} \Delta t \right\}. \quad (8)$$

一般地,认为 a 和 b 为常数。故光流场基本等式可表示为

$$\frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial x} \cdot \Delta u + \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial y} \cdot \Delta v + \frac{\Delta \varphi(x_0, y_0, t)}{\Delta t} = 0, \quad (9)$$

式中 $\Delta \varphi$ 为点 (x_0, y_0) 在 Δt 时间内相位的改变量。由于 $\frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial x} = 2\pi f_{x_0} \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial x} = 2\pi f_{x_0}$,

$\frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial y} = 2\pi f_{y_0}$, 其中 f_{x_0} 和 f_{y_0} 代表了点 (x_0, y_0) 处的横向和纵向条纹频率。故(9)式又可写为

$$-\frac{\Delta \varphi(x_0, y_0, t)}{\Delta t} = \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial x} \cdot \Delta u + \frac{\partial \varphi(x_0, y_0, t)}{\partial y} \cdot \Delta v = 2\pi f_{x_0} \Delta u + 2\pi f_{y_0} \Delta v, \quad (10)$$

化简(10)式可得

$$\Delta \varphi(x_0, y_0, t) = -(2\pi f_{x_0} \Delta u + 2\pi f_{y_0} \Delta v) \Delta t. \quad (11)$$

当两幅干涉条纹图之间的相位变化 $\Delta \varphi < \pi$ 时,它们是相关的且符合图像一致性假设^[20-24],图中所选取每个子区域的运动可近似看作刚体平移,故两幅连续图像的面内运动场 Δu 和 Δv 可根据散斑相关算法求得。同时,(11)式将面内位移场和离面变形相位结合了起来,若得到条纹横向和纵向频率 f_{x_0} 和 f_{y_0} ,即可求得干涉条纹图的离面位移相位的变化量 $\Delta \varphi$ 。采用窗口傅里叶变化的方法来获得条纹横向和纵向频率 f_{x_0} 和 f_{y_0} ,进而求解相位的信息。

2.3 窗口傅里叶变换

为提取条纹频率,引入窗口傅里叶运算^[25-26],

$$S_f(x_0, y_0; \xi, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) h(x - x_0, y - y_0) \exp(-j\xi x - j\eta y) dx dy, \quad (12)$$

式中 (ξ, η) 为空间一点 (x, y) 对应的频域坐标, $S_f(\mu, \nu; \xi, \eta)$ 是 $I(x, y)$ 经过窗口傅里叶变换后对应频域的结果。 $h(x, y)$ 为窗口函数,一般取高斯函数 $h(x, y) = \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma_x\sigma_y}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$, σ_x 和 σ_y 为高斯分布的标准差,它们决定了窗口的大小。由文献[25]的分析可知

$$(f_{x_0}, f_{y_0}) = \arg \max_{\xi, \eta} [|S_f(x, y, \xi, \eta)|], \quad (13)$$

式中 (f_{x_0}, f_{y_0}) 为使 $|S_f(x, y, \xi, \eta)|$ 取最大值的 (ξ, η) ,同时也是干涉条纹图中每一点的横向与纵向条纹频率。故条纹频率 f_{x_0} 和 f_{y_0} 的提取方法可以表述为^[27]要将条纹图的条纹频率 (ξ, η) 在其取值范围内均匀离散化,把这些值分别代入 $|S_f(x, y, \xi, \eta)|$,其中能使 $|S_f(x, y, \xi, \eta)|$ 取最大值的点 (f_{x_0}, f_{y_0}) 即为(13)式的解,也就是条纹频率。将求得的条纹频率代入(11)式即可求得离面的变形相位。

3 模拟和实验结果及分析

3.1 模拟结果及分析

根据(7)式,采用 Matlab 软件生成一幅干涉条纹图作为原始图像,大小为 203 pixel \times 203 pixel,如图 1(a)所示,其中 $a=0, b=1$,相位分布为

$$\varphi_0(x, y) = (x^2 + y^2) \times 0.0005 \times 2\pi. \quad (14)$$

根据采样定理,一幅图像所能表达的最大条纹频率不超过 0.5 ^[25-28],故将频率 (ξ, η) 均匀离散化的范围设定为 $[-0.5, 0.5]$,抽样间隔取 $\Delta f = 0.01$ 。积分窗口的 σ_x 和 σ_y 均取 10 pixel。在提取完模拟图的条纹频率 (f_{x_0}, f_{y_0}) 后,对条纹图分别加入 $\Delta \varphi_1 = 1$ rad 的固定相位和 $\Delta \varphi_2 = 0.01 \times \varphi_0$ 的变形相位。之所以选择变形相位的大小为 $\Delta \varphi_2 = 0.01 \times \varphi_0$,是因为当两幅图像中某点的变形相位值大于 π 时,该点会出现黑白条纹的突变现象,从而导致所估算的运动矢量 \mathbf{u}, \mathbf{v} 以及最后所求的相位的值为零。故在本文方法所能测得的变形

相位的取值范围为 $[0, \pi]$ 。当变形相位 $\Delta\varphi_2=0.01\times\varphi_0$ 时,其变化的范围约为 $(0, 2\pi/5)$,符合本文方法的条件限制要求。附加相位 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 后所得到的条纹图分别为图 2(a)和图 2(b)所示。

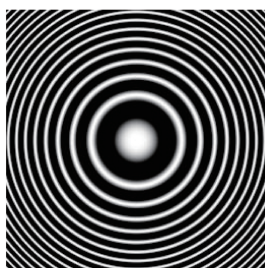


图 1 原始干涉条纹模拟图

Fig. 1 Simulated diagram of original interference fringe

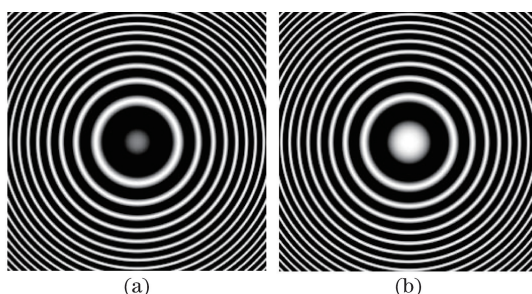


图 2 附加相位后的条纹模拟图。(a) 附加相位 $\Delta\varphi_1=1$ rad; (b) 附加相位 $\Delta\varphi_2=0.01\times\varphi_0$

Fig. 2 Simulated diagram of fringe with additive phase. (a) Additive phase $\Delta\varphi_1=1$ rad; (b) additive phase $\Delta\varphi_2=0.01\times\varphi_0$

运用 DSCM 中基于梯度的亚像元相关算法分别对图 1 与图 2(a)、(b)进行两幅图之间运动场的测量,子区域窗口大小取 $50 \text{ pixel}\times 50 \text{ pixel}$,其中图 1 与图 2(a),即附加了相位 $\Delta\varphi_1=1$ rad 后所估算的 x 方向运动场在 $y=127$ 处截面图如图 3 所示。令两幅图像之间的时间变化量 $\Delta t=1$,最后根据(11)式得到附加的相位,即变形相位信息,其理论和模拟的归一化结果对比如图 4、图 5(a)、(b)所示。

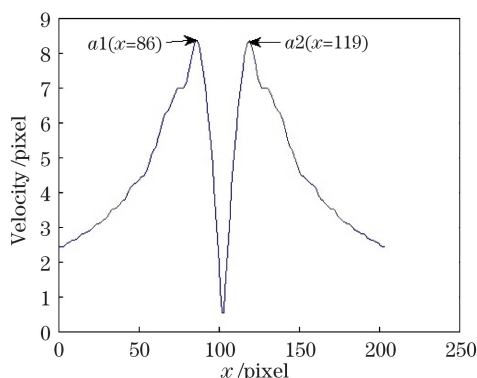


图 3 当 $\Delta\varphi_1=1$ rad 时,在 $y=127$ 处 x 方向光流场横截面图

Fig. 3 Cross section data of the optical flow field in x direction at $y=127$, when $\Delta\varphi_1=1$ rad

由图 1 和图 2 可知,所有干涉条纹图的中央均为一个较大的圆斑,并且越靠近中心部分条纹越稀疏,其条纹频率也就越低。由于在条纹越密集处运动矢量越小,故在两幅图像之间所估计的运动场的大小应是由中心向两边单调递减的。但是如图 3 所示,本文算法在条纹频率较低处估算的运动场会产生较大的误差,尤其是在圆斑中心处所估算的运动场为 0,所以在点 $a_1(x=86)$ 和 $a_2(x=119)$ 之间所估算的运动场会有较大的起伏,而在 $x<86$ 和 $x>119$ 处所估算的运动场较为准确。由于上述误差的存在,故在两模拟图的中央会出现一个坑状的凹陷,如图 4 和图 5(b)所示。经数据分析, a_1 和 a_2 处所对应的条纹频率绝对值为 0.13,即在 $50 \text{ pixel}\times 50 \text{ pixel}$ 的子区域窗口下,在条纹频率的绝对值大于 0.13 时,所估算的运动场较为理想。在图 4 中条纹频率绝对值大于 0.13 处所提取的相位趋于一个平面,即附加的相位 $\Delta\varphi_1$ 为一个常量,这与理论值

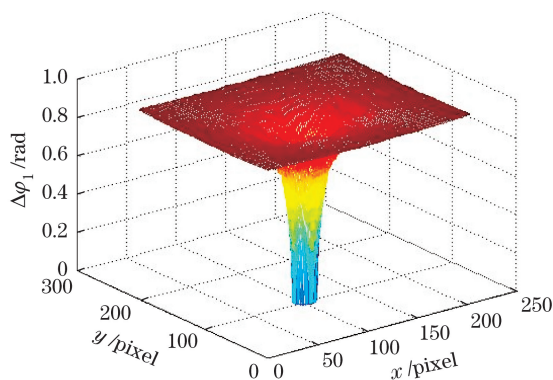


图 4 对附加相位 $\Delta\varphi_1$ 提取的归一化模拟结果

Fig. 4 Normalized simulation result of the additive phase $\Delta\varphi_1$

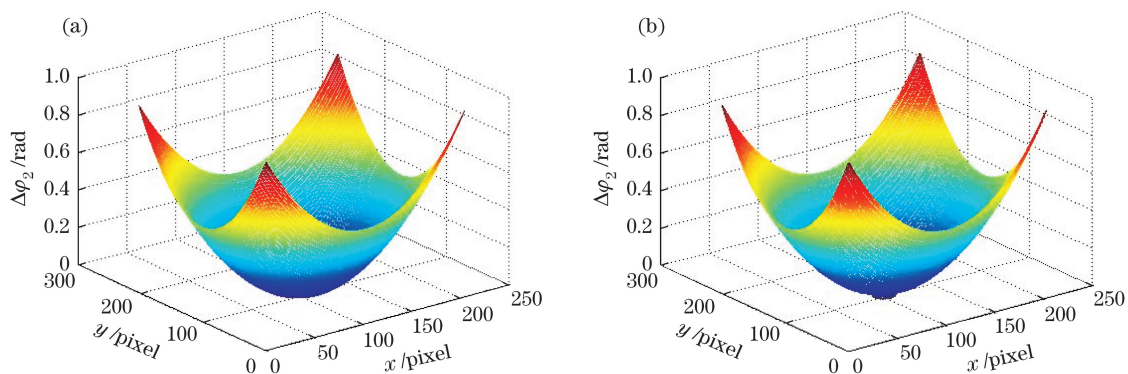


图 5 对附加相位 $\Delta\varphi_2$ 提取的归一化理论结果和模拟结果。(a) 理论值；(b) 模拟值

Fig. 5 Normalized theoretical and simulation results with additive phase $\Delta\varphi_2$. (a) Theoretical value; (b) simulation value

是相符的。同时,根据图 5 在条纹频率绝对值大于 0.13 处的理论与模拟结果对比可以看出,该方法提取的相位是准确的。

3.2 实验数据处理结果及分析

采用迈克耳孙干涉获取干涉条纹,由 CCD 采集初始图像,图像大小为 459 pixel×459 pixel,如图 6(a)所示用压电陶瓷相移器对周边固定的圆盘进行中心加载形变,获得的条纹图如图 6(b)所示。取 $\Delta t = 1$,运用 (11)式得到的实验结果如图 7 所示。

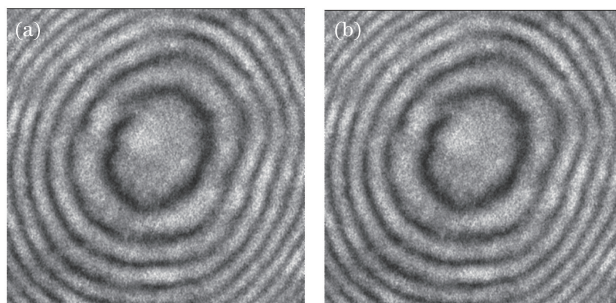


图 6 实验获取的干涉条纹图。(a) 初始条纹图；(b) 加载形变后的条纹图

Fig. 6 Fringe patterns obtained in experiment. (a) Original fringe pattern; (b) fringe pattern after deformation

由图 7 可知,实验所测得的数据结果较好,表明此算法可行。通过模拟和实验结果可以证明,该方法在条纹越密集处获得的相位越准确,完全克服了现有的相位解调方法中条纹越密误差越大的缺陷。此外,若处理的图像为数幅连续变化的图像,只需令每两帧图像之间的时间变化量 Δt 取两帧图像之间的时间间隔即可完成干涉条纹图相位差的动态定量提取。同时,该方法若与其他动态测量面内位移的算法相结合即可实现物体形变的三维动态测量。

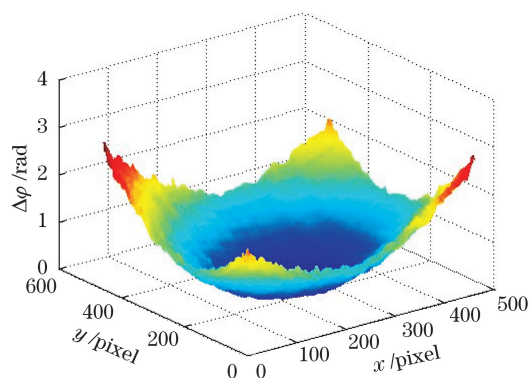


图 7 实验结果图

Fig. 7 Experimental result

4 结 论

提出了一种由两幅条纹图之间的面内位移来提取全场离面变形相位的新方法,该方法根据 DSCM 中基于梯度的亚像元相关算法获取两幅图像之间的运动场,根据光流基本方程使面内运动场与离面变形相位建立关系,由初始图像条纹频率对该运动场进行计算求出离面变形相位。这种算法只需在空间域当中用两幅条纹图就可以完成离面变形相位的提取,免去了转换到频域和相位解包络操作,过程简单、方便,并且在条纹越密集的区域提取的相位信息越准确。模拟和实验结果表明,由于当两幅连续图像间的相位变化量大于 π 时会导致图像不再具有相关关系并且不再满足图像一致性假设,故该变形相位计算方法的测量范围为 $0 \sim \pi$ 。此外,只要得知在视频序列中两帧图像间的时间间隔即可完成光干涉动态测量离面变形相位的提取。同时,该方法若与其他动态测量面内位移的算法相结合即可实现物体形变的三维动态测量,从而为光干涉动态测量提供了新的途径。

参 考 文 献

- 1 Rastogi P K. Digital speckle pattern interferometry and related techniques[M]. New York: Wiley, 2001.
- 2 Schajer G S, Zhang Y, Melamed. In-plane ESPI using an achromatic interferometer with low-coherence laser source[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 116-121.
- 3 Vest C M. Holographic interferometry[M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- 4 Kulkarni R, Rastogi P. Multiple phase estimation in digital holographic interferometry using product cubic phase function [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(10): 1168-1172.
- 5 Chen Baoxin, Tian Yongzhi, Zhao Nannan, *et al.*. Optimization of two-step phase-shifting digital hologram algorithm and experimental verification[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080903.
陈宝鑫, 田勇志, 赵楠楠, 等. 两步相移数字全息算法的优化及实验验证[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080903.
- 6 Zhou S, Hu S, Fu Y, *et al.*. Moiré interferometry with high alignment resolution in proximity lithographic process[J]. Applied Optics, 2014, 53(5): 951-959.
- 7 Mohammadalizadeh D, Manohohar M P, Sivakumar N, *et al.*. New temporal phase-shifting technique utilizing stroboscopy for static characterization of microstructures[J]. Measurement, 2010, 43(1): 135-143.
- 8 Muravsky L I, Ostash O P, Voronyak T I, *et al.*. Two-frame phase-shifting interferometry for retrieval of smooth surface and its displacements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(3): 305-312.
- 9 Liu F, Wu Y, Wu F. Phase shifting interferometry from two normalized interferograms with random tilt phase-shift[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19932-19946.
- 10 Wolfling S, Lanzmann E, Israeli M, *et al.*. Spatial phase-shift interferometry—a wavefront analysis technique for three-dimensional topometry[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(11): 2498-2509.
- 11 Ferrari J A, Frins E M. Multiple phase-shifted interferograms obtained from a single interferogram with linear carrier[J]. Optics Communications, 2007, 271(1): 59-64.
- 12 Li X, Tao G, Yang Y. Continual deformation analysis with scanning phase method and time sequence phase method in

- temporal speckle pattern interferometry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(1): 53-59.
- 13 Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3): 213427-213431.
- 14 Chu T C, Ranson W F, Sutton M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics[J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25(3): 232-244.
- 15 Sun Mingyong, Cai Kang, Yang Deyu, *et al.*. Three-dimensional deformation measurement with the combination of DSCM and ESPI[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111201.
孙明勇, 蔡 康, 杨德宇, 等. 数字散斑相关法和电子散斑干涉术相结合的三维变形测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111201.
- 16 Mei Xiao, Xie Dongping, Qiao Zhen. Error correction of optical axis at an angle shooting in two-dimensional digital speckle correlation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(5): 051101.
梅 潇, 解东平, 乔 榛. 二维数字散斑相关技术测量中斜光轴拍摄的误差修正[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(5): 051101.
- 17 Shao Xinxing, Dai Yuntong, He Xiaoyuan, *et al.*. Real time digital image correlation for quasi-static test in civil engineering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1012003.
邵新星, 戴云彤, 何小元, 等. 实时数字图像相关用于土木准静态实验测量[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1012003.
- 18 Pan B, Li K. A fast digital image correlation method for deformation measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 841-847.
- 19 Pan B, Qian K, Xie H, *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- 20 Fricke-Begemann T. Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34): 6783-6796.
- 21 Zhou Y, Pan B, Chen Y. Large deformation measurement using digital image correlation: A fully automated approach [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7674-7683.
- 22 Pan B, Wang Z, Lu Z. Genuine full-field deformation measurement of an object with complex shape using reliability-guided digital image correlation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1011-1023.
- 23 Vargas J, Quiroga J A, Sorzano C O S, *et al.*. Two-step interferometry by a regularized optical flow algorithm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3485-3487.
- 24 Zeng F, Tan Q, Gu H, *et al.*. Phase extraction from interferograms with unknown tilt phase shifts based on a regularized optical flow method[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17234-17248.
- 25 Qian K. Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: A review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 66: 67-73.
- 26 Zhao R, Li X, Sun P. An improved windowed Fourier transform filter algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 74: 103-107.
- 27 Li Kai, Zhang Qingchuan. Phase extraction from a single speckle fringe pattern guided by frequencies[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 3: 491-498.
李 凯, 张青川. 频率向导的单幅散斑条纹图位相提取方法[J]. *力学学报*, 2010, 3: 491-498.
- 28 Qian K. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695-2702.