

文章编号: 0253-2239(2010)03-0727-06

# 用于相位展开的调制度-罗伯特梯度幅值方差质量图

傅世强 廖文和 崔海华 戴宁 程筱胜

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 为了减少相位展开过程中噪音的影响并获得正确的相位展开结果,提出了一种新型的质量图。首先分析了传统的相位导数方差质量图和基于调制度信息质量图的缺陷。然后基于各向同性的梯度幅值,融合图像锐化方法和调制度信息,构造出一种新型的“调制度-罗伯特梯度幅值方差”质量图。最后通过计算机模拟图和模型实例图的相位展开,将提出的质量图与传统的相位导数方差和基于调制度信息的质量图进行了对比。实验结果表明,新的质量图更加可靠,有效地弥补了相位导数方差等传统质量图的部分缺陷。

**关键词** 图像处理;质量图;图像锐化;调制度;相位展开

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0727

## Modulation-Roberts Gradient Amplitude Variance Quality Map for Phase Unwrapping

Fu Shiqiang Liao Wenhe Cui Haihua Dai Ning Cheng Xiaosheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** In order to obtain a correct phase unwrapping (PhU) result, as well as to alleviate the effect of noise, a novel quality map is proposed. Firstly, some disadvantages of phase derivative variance (PDV) quality map and modulation map are analyzed. Then based on isotropic gradient amplitude, some methods about image sharpening and modulation are combined to construct a new quality map. The new map is named “Modulation-Roberts Gradient Amplitude Variance” quality map (MRGAV). In the applications, the computer simulated and the experimental data are offered. The comparison between the MRGAV quality map and the PDV quality map shows that the MRGAV quality map is not only more reliable, but also can overcome the drawbacks of the PDV and some other traditional quality maps successfully.

**Key words** image processing; quality map; image sharpening; modulation; phase unwrapping

## 1 引言

二维相位展开是干涉合成孔径雷达(InSAR)、自适应光学、医疗核磁共振成像(MRI)、X射线晶体学和光学微波干涉测量等领域的研究热点之一<sup>[1]</sup>。在这些领域的研究中,所提取的相位值被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 的范围内,将其恢复为绝对相位的过程就称为相位展开<sup>[2]</sup>。但是由于存在包裹相位不连续、

物体本身不连续、局部区域亚采样、局部信噪比高、噪声、阴影和调制度过低等问题<sup>[1,3,4]</sup>,相位展开常常得到错误的结果。近年来,出现了很多具有抗噪声干扰的相位展开方法,主要包括:Goldstein 枝切法、质量引导法、掩模截断法、Flynn 最小不连续路径法、非加权最小二乘法、加权最小二乘法和最小 $L^p$ 范数法等<sup>[1]</sup>。在这些算法中,质量图是一种经常

收稿日期: 2009-04-24; 收到修改稿日期: 2009-06-15

基金项目: 国家 863 计划(2005AA420240)和教育部博士点基金项目(20070287055)资助课题。

作者简介: 傅世强(1984—)男,硕士研究生,主要从事非接触三维几何测量技术、相位展开、图像处理等方面的研究。

E-mail: fisherking82@foxmail.com

导师简介: 廖文和(1965—)男,教授,博士生导师,主要从事 CAD/CAM 生物医学工程和图形图像技术等方面的研究。

E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

被采用的很重要的信息。在质量引导法<sup>[5]</sup>中直接利用相位质量图信息,从质量较高的点开始,按照相位质量由高到低的次序逐步对相位图进行路径积分;在掩模截断法<sup>[2]</sup>中利用质量图设置枝切线<sup>[6]</sup>,使枝切线尽可能地处于低质量区域,在枝切线以外的区域按任意路径进行相位展开,然后再展开标志为枝切线的像素点;最小不连续法可采用相位质量值作为权重来提高解包裹的准确度和可靠度;加权最小二乘方法以质量值作为权重来避开残差点和低质量区域,可以克服非加权算法的缺陷。目前,被广泛使用和验证过的质量图主要包括:相干系数、伪相干系数、包裹相位导数方差、最大包裹相位梯度、二阶差分 and 调制度等。也有学者利用这些传统质量图推导出其他更为可靠的质量图<sup>[7~9]</sup>,都取得了较好的结果。这些质量图算法各有其优点,但同时也有各自适用的局限性和缺点,没有一种算法能够解决相位展开过程中存在的所有问题<sup>[1]</sup>。D. C. Ghiglia

等<sup>[1]</sup>经过实验认为,当相干图不存在时,包裹相位导数方差质量图是最为可靠的方法。本文首先分析了相位导数方差质量图的缺陷,然后利用图像锐化和调制信息,提出一种新型的质量图,该质量图是基于各向同性的梯度幅值构造的,可以有效的克服相位梯度方差质量图各向异性且不包含原始干涉数据的缺陷。

## 2 相位质量图

质量图是描述包裹相位图每个像素数据质量好坏的二维数据阵列。以质量图为指导的相位展开算法中,质量图的好坏直接影响到相位展开的结果,因此如何能够得到可靠度更高的质量图是研究的重点。

### 2.1 相位导数方差质量图

相位导数方差质量图<sup>[10]</sup>用于描述包裹相位数据导数的统计变化特征,它是一种基于概率统计学的方法。包裹相位中 $(m, n)$ 点的相位导数方差定义为

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

其中

$$\Delta_{i,j}^x = W\{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j}\}, \quad i = 0, \dots, M-2, \quad j = 0, \dots, N-1 \quad (2)$$

$$\Delta_{i,j}^y = W\{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j}\}, \quad i = 0, \dots, M-1, \quad j = 0, \dots, N-2 \quad (3)$$

$W\{\cdot\}$ 表示相位包裹处理,即把原相位加或减 $2n\pi$ 使范围处于 $(-\pi, \pi]$ 之间。 $k$ 是相位处理的窗口尺寸, $M, N$ 为图片的尺寸, $\overline{\Delta_{m,n}^x}$ 和 $\overline{\Delta_{m,n}^y}$ 分别是 $k \times k$ 窗口内水平和垂直方向相位导数的均值。

将(1)式与统计方法中的方差比较可知,相位导数方差质量图实际上是将水平和垂直方向的差分分别做方差数据统计然后加和,它表示某点的差分与其数学期望的偏离程度。据此可知,当某点周围连续噪音区域大于 $k$ 窗口时,相位导数方差接近或等于0,则此点被认为是质量好的点,这样就产生了错误的质量估计。同时,因为它是对水平与垂直方向分别进行统计然后简单相加,所以得到的结果与相位导数的方向有关,而且由无关量的简单相加得到的方差幅值不是真正的幅值。

故相位导数方差质量图的缺点:1)水平与垂直方向导数直接相加,导致相位导数方差质量图有方向性,得到的幅值不是真正的幅值;2)某点周围有大面积噪音时会得到错误的质量评估结果;3)相位导数方差质量图只依赖于包裹相位数据<sup>[7,8]</sup>,而包裹

相位数据并不能完全体现原始干涉数据的质量,导致所展开的相位可靠度降低。

### 2.2 调制信息质量图

调制信息(即调制度)是表征干涉条纹图和散斑场质量的重要参量,它从原始干涉数据推导而来,因此能够反映原始干涉数据的质量<sup>[11~13]</sup>。两束干涉光叠加形成的合成光强分布为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \cdot$$

$$\{1 + \gamma(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \alpha_i]\} \quad (4)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$ ( $N$ 是自然数并且 $N \geq 3$ ), $I_i(x, y)$ 是 $(x, y)$ 点的光强, $I_0(x, y)$ 是背景光强, $\gamma(x, y)$ 是条纹调制度, $\varphi(x, y)$ 是包裹相位, $\alpha_i$ 是第 $i$ 幅条纹图增加的相位角。

在四步相移法中, $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi/2, \alpha_3 = \pi, \alpha_4 = 3\pi/2$ ,

$$\gamma(x, y)_{4\text{-step}} = 2 \times \frac{[(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2]^{1/2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}, \quad (5)$$

Su Xianyu 等<sup>[11,12]</sup>用调制信息指导积分路径的

选取,获得了较好的相位展开结果。虽然调制度可信度比较高,但因为阴影处或陡峭处调制度值很低,所以部分好的质量区域容易被质量差的点包围起来,这样就会得到错误的展开相位。同时,理论上调制度的值应该处于 0 到 1 之间,而且越接近 1 可靠度越高,但在实际应用的时候由于噪声等影响其范围往往会超过 1,这就导致调制信息所指导的像素点质量并不准确,可靠性变低。

### 2.3 调制度-罗伯特梯度幅值方差(MRGAV)质量图

图像锐化处理的目的是使边缘和轮廓线模糊的图像细节变得清晰,但图像锐化时需要注意:其图像必须要求有较高的信噪比,否则图像锐化后信噪比

更低,因为锐化会使噪声受到比信号还强的增强<sup>[14]</sup>。本文正是基于图像锐化可以增强噪声这一特点来构造新质量图的。

为了要使图像中间任何方向伸展的轮廓线和噪声区域都能得到增强,图像的某种导数运算必须是各向同性的。偏导数平方和(即梯度幅值)的运算就是各向同性的

$$G[f(x,y)] = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (6)$$

可见梯度的数值就是  $f(x,y)$  在其最大变化率方向上的单位距离所增加的量。对于数字图像,(6)式可改为

$$G[f(x,y)] = \sqrt{[f(i,j) - f(i+1,j)]^2 + [f(i,j) - f(i,j+1)]^2}, \quad (7)$$

进而可以改写为罗伯特(Roberts)梯度

$$G[f(x,y)] = \sqrt{[f(i,j) - f(i+1,j+1)]^2 + [f(i+1,j) - f(i,j+1)]^2}. \quad (8)$$

其中(7)式与(8)式在数字图像中可分别表示如图 1(a)和图 1(b)所示。

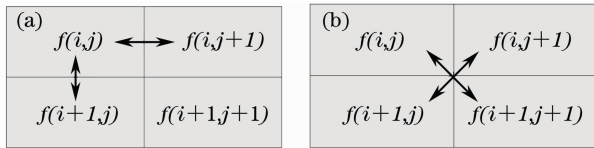


图 1 数字图像的梯度表示。(a)梯度;(b)罗伯特梯度

Fig. 1 Gradient of the digital picture. (a) gradient; (b) Roberts gradient

利用具有旋转不变性的罗伯特梯度,结合概率统计中的方差,提出质量评估公式

$$z_{m,n} = \frac{1}{k^2} \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} (\Delta_{i,j} - \bar{\Delta}_{m,n})^2}, \quad (9)$$

称为“罗伯特梯度幅值方差”质量图。其中  $\Delta_{i,j} = \sqrt{(W\{\psi_{i+1,j} - \psi_{i,j+1}\})^2 + (W\{\psi_{i+1,j+1} - \psi_{i,j}\})^2}$ ,  $i = 0, \dots, M-2, j = 0, \dots, N-1$ ;  $\bar{\Delta}_{m,n}$  是  $k \times k$  窗口内罗伯特梯度的均值。

(9)式虽然是基于各向同性的梯度幅值构造的,但仍然只考虑到包裹相位数据而未体现原始干涉数据。因此,将调制信息作为权因子,定义新的相位质量图为“调制度-罗伯特梯度幅值方差”质量图。

$$z_{m,n} = \frac{1}{k^2} \sqrt{\sum_{i=m-k/2}^{m+k/2} \sum_{j=n-k/2}^{n+k/2} \gamma_{i,j} (\Delta_{i,j} - \bar{\Delta}_{m,n})^2}, \quad (10)$$

其中  $\gamma_{i,j}$  表示窗口内各个像素点的调制度信息,其它参数意义同(9)式。若(10)式中取  $\gamma_{i,j} = 1$ ,则表示无调制信息的包裹相位质量图,此时(10)式等价于(9)式。

由(8)式可知,在计算一幅图像的罗伯特梯度时因右边界和下边界越界,罗伯特梯度无法计算。因此,在实际应用时做如图 2 所示的处理:黑色粗边框内像素点假设是一幅 5 pixel  $\times$  5 pixel 的图像,其中颜色最深像素点表示的是右边界和下边界。在计算 5 pixel  $\times$  5 pixel 图像的罗伯特梯度时,把黑点所在像素点的灰度值映射到箭头所在像素点,将原图像扩大为 6 pixel  $\times$  6 pixel 图像。这样就可以计算原 5 pixel  $\times$  5 pixel 图像的罗伯特梯度了。

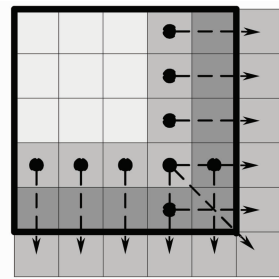


图 2 计算罗伯特梯度时边界处理

Fig. 2 Deal the border when compute the Roberts gradient

## 3 验证与分析

为了验证 MRGAV 的可靠性,采用洪水质量引导相位展开算法<sup>[1]</sup>进行了计算机模拟仿真和牙模实例验证。

### 3.1 模拟实验

图 3(a)是用计算机模拟生成的一幅 257 pixel  $\times$  257 pixel 的包裹相位图片,由左右两半不

平行的平面组成,在图中可以明显看到两半平面相接处的垂直剪切线。由图 3(a)加入标准差为 40 的正态分布随机数噪声,则生成图 4(a)。计算质量图时取 (10) 式中  $\gamma_{i,j} = 1$ , 方差窗口为 3 pixel $\times$ 3 pixel。

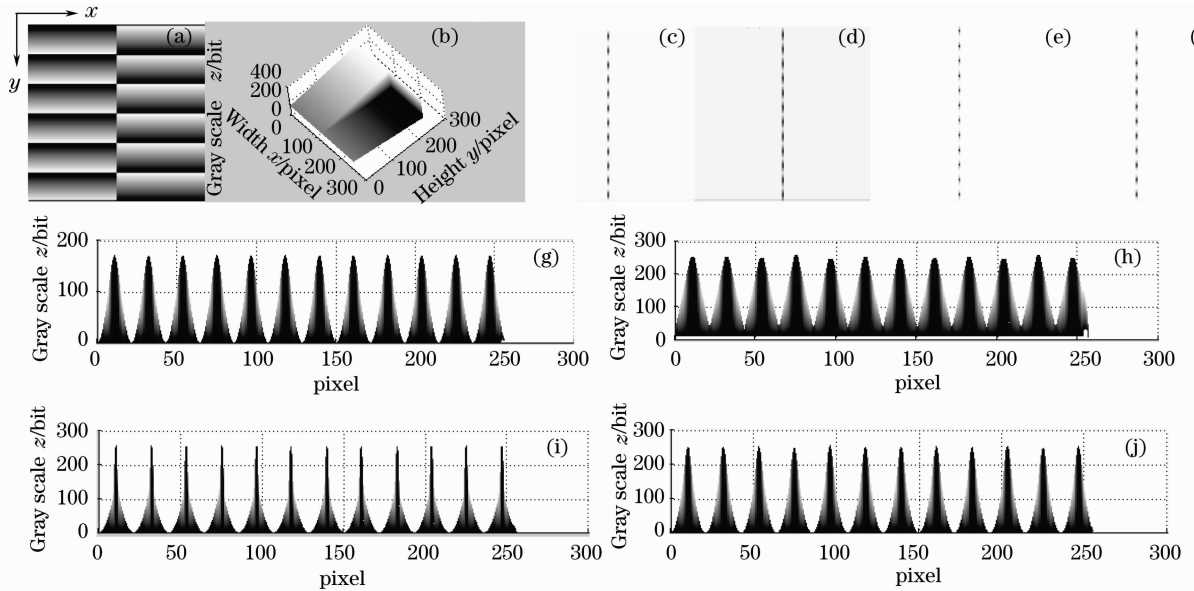


图 3 (a)包裹相位图; (b)展开相位的三维视图; (c)伪相干系数质量图; (d)最大相位梯度质量图; (e)相位导数方差法质量图; (f)MRGAV 法质量图; (g)伪相干系数质量图(左右两半平面相交即垂直剪切线处的切平面视角); (h)最大相位梯度法质量图(视角同 g); (i)相位导数方差法质量图(视角同 g); (j)MRGAV 法质量图(视角同 g)

Fig. 3 (a) Wrapped phase; (b) 3-dimensional view of unwrapped phase; (c) pseudocorrelation map; (d) maximum phase gradient map; (e) phase derivative variance map; (f) map of this paper; (g) pseudocorrelation map (at the view of shear plane between the two semi-plane); (h) maximum phase gradient map (at the same view of Fig. g); (i) phase derivative variance map (at the same view of Fig. g); (j) map of MRGAV (at the same view of Fig. g)

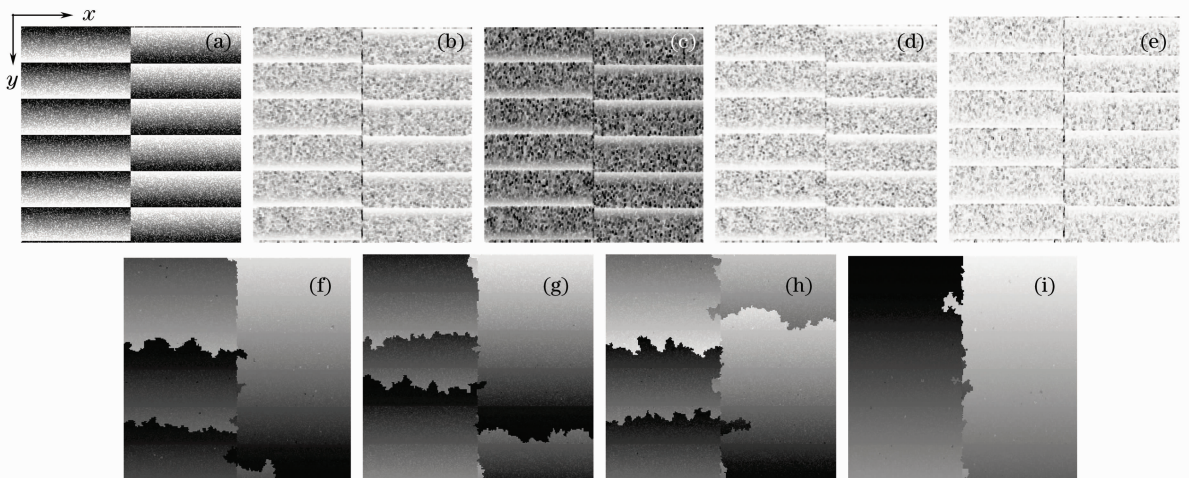


图 4 (a)加入正态分布的随机噪声的包裹相位图; (b)伪相干系数质量图; (c)最大相位梯度质量图; (d)相位导数方差质量图; (e)MRGAV 质量图; (f)伪相干系数质量图得到的展开相位; (g)最大相位梯度质量图得到的展开相位; (h)相位导数方差质量图得到的展开相位; (i)MRGAV 质量图得到的展开相位

Fig. 4 (a) Wrapped phase with the random noise which is normal distribution; (b) pseudocorrelation map; (c) maximum phase gradient map; (d) phase derivative variance map; (e) map of MRGAV; (f) unwrapping phase use pseudocorrelation map; (g) unwrapping phase use maximum phase gradient map; (h) unwrapping phase use phase derivative variance map; (i) unwrapping phase use map of MRGAV

的点)。由于这四幅质量图的观察角度为俯视,所以各点质量值大小变化并不明显,于是沿垂直于剪切线的方向观察,得到左视图,分别如图 3(g)、(h)、(i)、(j)。可见,最大相位梯度质量图几乎将左右两半平面完全分割开来,波峰之间没有断裂,检测出质量差的点较多,这容易将质量好的点放大成质量差的点;相位导数方差质量图波峰与波谷之间分隔明显,但波峰过于尖锐且范围过小,而波谷过于平滑且范围过大。这说明它将质量最差的点标志出来并放大了,而质量稍差的点却被放过当成质量好的点了。这是由于最大相位梯度和相位导数方差两种方法的幅值不正确造成的。伪相干系数质量图和 MRGAV 质量图的波峰和波谷较为均匀且平滑,能够较为正确地反映出像素点质量。除了伪相干系数法的相位展开出现了稍许错误(因为伪相干系数质量图由相干系数法演变而来,而相干系数法由 InSAR 中的参数得到,所以此质量图最适合 InSAR 相位展开而不适合其它情况),其它三种方法都能得到正确的展开相位,展开相位的三维图如图 3(b)。

用各种质量图对加入随机正态分布噪声的图 4(a)进行质量检测,得到质量图如图 4(b)、(c)、(d)、(e)。可见,与没加入噪声的图 3 中各图类似,最大相位梯度质量图检测到的质量差的点过多;相

位导数方差质量图则相反,它高估了各点质量,尤其是剪切线附近的低质量点,几乎无法明显分辨出剪切线;而 MRGAV 的质量图因为是基于各向同性的梯度幅值构造的,所以正确地检测出了剪切线处的质量值,能比较可靠地反映出各点的质量。从各个方法的相位展开图的对比也可看出,只有 MRGAV 得到了正确的相位展开。

### 3.2 实例验证

如图 5(a),用投影仪投影 4 幅正弦条纹图像到牙模上,而后相机采集到  $800 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$  的图像。图 5(b)是用四步相移法得到的包裹相位图,可以看到图 5(b)中牙模的条纹信息良好,但同时牙模周围的无用条纹信息也显示出来了,这不但会减慢图像的计算速度,而且可能会导致错误的相位展开。因此,对包裹相位图进行了掩模(mask)处理。掩模<sup>[15]</sup>是指将一幅图像中目标信息周围的无用信息屏蔽掉,即将目标信息的权值设置为 1,而无用信息的权值设置为 0。在具有原始干涉数据的实例中,用来进行掩模的数据是调制度信息,处理的方法是:先用大津法(OTSU)得到自适应阈值而后二值化,然后用形态学进行开运算和闭处理<sup>[16,17]</sup>,得到最终的掩模图,如图 5(c)所示。掩模后得到 5(d)所示的包裹相位图,然后对未屏蔽部分进行相位展开。相位展开的计算时间

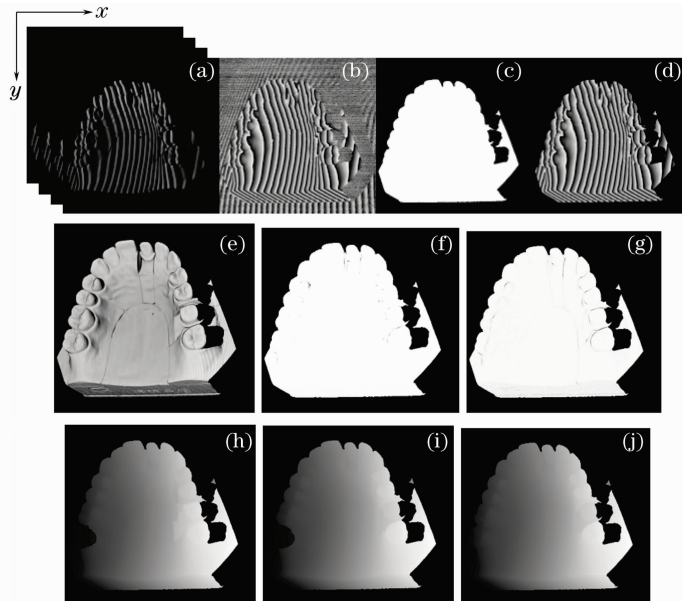


图 5 (a)4 幅牙模正弦条纹图;(b)包裹相位图;(c)掩模图;(d)掩模后的包裹相位图;(e)调制度图(调制度质量图);(f)相位导数方差质量图;(g)MRGAV 质量图;(h)调制度质量图展开相位;(i)相位导数方差质量图展开相位;(j)MRGAV 质量图展开相位

Fig. 5 (a)Four phase-shift sinusoidal fringe patterns on the tooth model; (b)wrapped phase; (c)mask map; (d)wrapped phase after mask; (e)modulation map; (f) phase derivative variance map; (g)map of MRGAV; (h) unwrapping phase use Fig. 5(e); (i) unwrapping phase use Fig. 5(f); (j)unwrapping phase use Fig. 5(g)

与图像大小和掩模信息多少相关,本例未使用掩模平均用时为 13.26 s,使用后平均用时为 2.65 s。

取窗口为 3 pixel×3 pixel,利用条纹信息图和包裹相位图,计算各点的质量值并将之缩放到[0,255]范围,得到了调制度质量图 5(e)、相位导数方差质量图 5(f)、MRGAV 质量图 5(g)。比较三图可以发现,调制信息质量图 5(e)灰度变化均匀且详细,能够较完整地反映出各个像素点的质量值,这是因其信息来源于原始干涉数据。但其中牙模各个部分之间、牙齿之间有明显的分割线,质量好的区域被质量差的像素点包围起来了,这很容易导致相位展开时本该正确连接的区域产生分离断层,从展开相位图 5(h)可以很明显地看出,牙模的左侧和右侧的展开相位都出现了断层的错误。相位导数方差质量图 5(f)中牙模里面黑色部分信息很少,即它将牙模内部的绝大部分信息点都当成了质量好的点,但通过调制度图 5(e)可以看出,这并不正确,它放过了许多原本质量差的点,如图 5(e)中牙模中间的黑色轮廓线处的点。同时,从图 5(f)左上方可以看到,质量差的地方中间像素点非常黑,像素灰度的级差很大,这是由于某些方向上的梯度幅值被放大了而某些方向反之的原因。通过图 5(i)可以看到,相位导数方差质量图展开的相位大部分是正确的,但左侧的牙齿处仍然产生了断层错误。MRGAV 质量图 5(g)比调制信息质量图粗糙但质量指示正确,比梯度幅值方差质量图更为详细,噪声点和相位跃变线都很明显地显示出来,且灰度信息过度平滑。这主要因为它是基于各向同性的梯度幅值构造而来,并且利用了原始干涉数据中的调制信息,所以新的质量图能以较高可靠度来标识相位数据质量,图 5(j)的正确展开相位也证明了 MRGAV 法的合理性。

## 4 结 论

首先阐述了相位展开过程中传统的相位导数方差质量图和调制信息质量图的缺陷,然后根据图像锐化和统计方法,结合调制制度的优点提出了新的质量图。这种质量图基于各向同性的梯度幅值构造且考虑了原始干涉图的信息,有效地弥补了相位导数方差质量图和调制信息质量图的部分缺陷。通过计算机模拟的图像和四幅相移牙模的实例,采用洪水质量引导相位展开算法,验证了新质量图的可靠性。模拟和实验结果均证明,新的质量图可以正确地展开相位,

而且其结果优于相位导数方差质量图的展开结果。

## 参 考 文 献

- 1 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. Two-dimensional phase unwrapping. theory, algorithms, and software[M]. New York: John Wiley and Sons, 1998. 31~176
- 2 Hui Mei, Wang Dongsheng, Li Qingxiang *et al.*. Phase unwrapping method based on the solution of discrete poisson equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1245~1249  
惠 梅,王东生,李庆祥等. 基于离散泊松方程解的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1245~1249
- 3 T. J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map [C]. IGARSS'96, Lincoln, NE. USA, 1996, **4**: 2057~2059
- 4 J. A. Quiroga, E. Bernabeu. Phase-unwrapping algorithm for noisy phase-map processing[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(29): 6725~6732
- 5 D. J. Bone. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25): 3627~3632
- 6 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, L. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 7 Zhu Yongjian, Liu Liren, Zhu Luan *et al.*. A hybrid phase-unwrapping method for optical interferometry based on new parameter map and local plane approximation[C]. *SPIE*, 2006, **6292**: 62921C-1~62921C-8
- 8 Zhu Yongjian, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. New quality map based on modulation for phase unwrapping algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 667~672  
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
- 9 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~721  
李思坤,陈文静,苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~721
- 10 M. D. Pritt. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, (34): 728~738
- 11 Su Xianyu, Su Likun, Li Wansong *et al.*. New 3D profilometry based on modulation measurement[C]. *SPIE*, 1998, **3558**: 1~7
- 12 Su Xianyu, Su Likun, Li Wansong *et al.*. A new Fourier transform profilometry based on modulation measurement[C]. *SPIE*, 1999, **374**(9): 438~439
- 13 Shao Shuangyun, Xu Nan. Optical Three-dimensional profilometry based on modulation ratio[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 435~438  
邵双运,徐 楠. 基于调制度比的光学三维测量轮廓术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 435~438
- 14 Xia Liangzheng. Digital image processing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999. 193~220  
夏良正. 数字图像处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999. 193~220
- 15 J. A. Quiroga. Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2560~6732
- 16 Y. Xu, C. Ai. Simple and effective phase unwrapping technique [C]. *SPIE* 1993, **2003**: 254~263
- 17 Pierre Soille. Morphological phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering* 2000, **32**(4): 339~352