

文章编号: 0253-2239(2010)01-0097-08

相位展开算法中质量权值的数学描述与分析

崔海华 廖文和 程筱胜 戴宁 傅士强

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要 由于不可预知影响因素的存在,使得相位的正确展开成为一个非常困难的问题,为了更好地指导相位正确展开,对几种经典的质量权值进行了详细的分析。给出了它们的完整的数学描述,然后基于数学模型进行了详细的原理性推导,分析各种质量权值的性能和特点,并根据其物理意义在同领域或相关领域提出了新的改进算法,最后,通过实例验证了改进算法的正确性和优越性,同时也证明了该分析对理解和研究相位展开的普遍指导意义。

关键词 图像处理;相位展开;质量权值;数学分析;统计分析

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0097

Mathematic Descriptions and Analysis of Quality Weighting Factors in Phase Unwrapping Algorithms

Cui Haihua Liao Wenhe Cheng Xiaosheng Dai Ning Fu Shiqiang

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

Abstract Phase unwrapping is a very difficult problem because of the existence of many unpredictable factors. In order to acquire the more accuracy phase unwrapping, a detailed analysis about the several classic quality weighting factors is given. First, the full mathematical formula of them are provided, then the principle of derivation is described and the characteristics of them are analyzed. According to their physical meaning, some improved algorithms in the same field or related fields are proposed. The experiments prove the feasibility and superiority of improved algorithms. It is also testified that the analysis has universal guiding significance for understanding and studying phase unwrapping.

Key words image processing; phase unwrapping; quality weighting factors; mathematic analysis; statistical analysis

1 引 言

自从 1981 年 Oppenheim 等^[1]最初提出相位在信号处理邻域具有重要的作用开始,相位展开作为一个单独的研究领域已经有二十多年了,但直到目前,没有一种算法能保证解决包裹相位中所隐含的各种问题^[2]。因此,相位展开也就成了人们研究的

兴趣点和难点。兴趣点主要在于它的广泛应用性,由于使用相移或傅里叶变换技术得到的相位只是截断在 $(-\pi, +\pi]$ 内的包裹相位^[3,4],这种不连续的包裹相位只有经过展开才能应用于各个领域;难点在于它的展开困难性。在实际应用中,由于噪音、阴影、亚采样、调制度过低等各种不可知因素的存在,

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-04-09

基金项目: 国家 863 计划(2005AA420240)、教育部博士点基金(20070287055)和江苏省数字化制造技术重点建设实验室开放课题(HGDML-0609)资助课题。

作者简介: 崔海华(1979—),男,博士研究生,主要从事非接触三维几何测量技术、机器视觉和图像处理等方面的研究。
E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

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,图形图像技术等方面的研究。
E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

使得正确的相位展开具有复杂多变性的和不可预知性^[2]。

目前,广为采用且效果较好的相位展开方法是基于质量权值或先验知识引导的展开算法,使用质量权值表示相位质量的好坏,然后根据质量权值高低引导相位展开,最大程度地实现相位正确的展开。然而,由于相位噪音的不可预知性,各种相位质量权值也只是对相位质量近似的表示,没有一个客观的标准来评定一个像素相位质量的好坏,进而保证绝对正确的相位展开^[2]。目前,效果较好且广为采用的基础的质量权值主要包括:残差点^[5,6]、调制度权值^[7,8]、相干系数^[9]、包裹相位导数方差^[2,10]、最大包裹相位梯度^[2]、二阶包裹相位差分等^[2,11]。这些权值是被普遍认可的较优的相位质量表示方法,但是,这些质量权值的使用原则及他们具体表示的意义在原文或相关文献中并没有表示,这就为相位展开技术的研究和发展带来了不便。因此,本文给出了这些质量权值的数学表述,并将这些质量权值在数学和物理意义上进行分类,根据其所在类的性质特征,分别提出了新的相位质量权值评估算法,并通过实例验证了提出的质量权值的正确性。

2 相位展开的数学描述

二维相位展开的过程在数学上是一个积分的过程,相位展开的目的是在一定的积分区域 D 内求解曲线积分,表示为

$$I = \int_C f(x, y) dx + g(x, y) dy, \quad (1)$$

式中 C 是在区域 D 中的两点之间的任一个路径,

$$f(x, y) = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad g(x, y) = \frac{\partial \varphi}{\partial y},$$

φ 是包裹相位。针对离散的情况,可表示为

$$\Phi(x, y) = \varphi(x, y) - 2\pi \text{ent} \left[\frac{\varphi(x, y) - \varphi_0}{2\pi} \right], \quad (2)$$

式中 $\Phi(x, y)$ 代表展开后的相位值; $\varphi(x, y)$ 表示截断包裹相位; φ_0 表示初始点绝对相位, $\text{ent}[\cdot]$ 表示取整操作。理想情况下,经过以上运算能实现两点之间正确的相位展开,而且展开结果不因路径不同而有差别。然而,实际测量过程中的噪音或实物不连续导致相位误差出现,这些噪音区域都有可能造成非正常的 2π 相位跳动,如果相位展开路径错误的穿过了这些噪音区域,将造成相位展开结果因路径不同而不同,出现相位误差。因此,对相位质量的好坏程度进行表示和正确标识就显的非常重要。

3 相位质量权值对比分析

根据相位产生和获取的软硬件环境,可将导致相位误差出现的原因大致分为 4 类:噪音、亚采样、实物本身的不连续和不连续的相位区域^[7,12~15]。针对这些相位误差源,很多学者都进行了深入和广泛的研究,验证总结了一些相对有效的相位误差检测的方法,对相位好坏程度给出了一些量化的评估标准,主要有以下几种。

3.1 残差点

对于(1)式所表示的连续函数,如果满足格林公式

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial x},$$

那么积分结果与选择的积分路径无关, R. M. Goldstein 等^[5,6]根据该理论最早提出了对于离散相位情况下,不连续相位误差的检测方法,被称之为残差检测理论,将检测到像素点称为残差点,否则称为非残差点。具体计算公式表示为

$$s(i, j) = W[\varphi(i+1, j) - \varphi(i, j)] + W[\varphi(i+1, j+1) - \varphi(i+1, j)] + W[\varphi(i, j+1) - \varphi(i+1, j+1)] + W[\varphi(i, j) - \varphi(i, j+1)], \quad (3)$$

式中 i, j 表示像素坐标, $\varphi(i, j)$ 表示该像素点的包裹相位, $W[\cdot]$ 表示相位解包裹处理,如果相位差值大于 π 或小于 $-\pi$,则分别进行加减 2π ,保证 $-\pi < W[\cdot] \leq \pi$ 。

该方法是一种具有二值化性质的相位质量检测算法。它将不连续的误差点进行了明显的标识,使用该方法能标识出大部分的相位误差点,然而它也有一定的局限性。王军等^[15]指出该方法仅仅能检测到局部逻辑上不连续的相位点,不能检测到由于低调制度或电子噪音引起的无效数据。Xiao Feng 等^[16]通过实例验证了该检测算法对于相位误差存在的检测是充分非必要条件,它不能检测到所有的相位误差点。本文也提出了其理论的缺陷性,比如对于随机的背景噪音,使用该方法并不能标识出所有的残差点。如图 1 所示,图 1(a)是牙模包裹相位图,图 1(b)是检测到底残差点表示图,从图 1(b)看出虽然左上角和右上角都是背景区域,但残差点表示并不相同,从图 1(c)的残差枝切线相连图能更清楚的看出,该方法没有把所有不连续的背景噪音完全标识出来。因此,残差点不能完全正确和全面地表示出相位质量。



图 1 残差点表示的相位质量权值

Fig. 1 Residues phase quality weighting factors

3.2 调制度权值

调制度权值也是表示相位质量好坏的一个重要权值。调制度值是直接从相移光栅条纹信息获取，不用进行相位求解^[7]。调制度在物理意义上可理解为光栅条纹的对比度，该值可以从相移算法中推导出来。假设相移条纹的灰度表示为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) + I_0(x, y)r_0(x, y) \times \cos[\varphi(x, y) + \delta_i(x, y)], \quad (4)$$

式中 $I_i(x, y)$ 是第 i 帧条纹的灰度值, $I_0(x, y)$ 是背景灰度, $I_0(x, y)r_0(x, y)$ 表示条纹调整度灰度。条纹的对比度可以从条纹的背景及调制度灰度值的比值获得

$$M(x, y) = \frac{I_0(x, y)r_0(x, y)}{I_0(x, y)} = r_0(x, y). \quad (5)$$

如果是基于 2π 的四步相移, 那么对比度可表示为

$$M(x, y) = \frac{2 \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_4)^2}}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}.$$

调制度值的大小表示了光栅条纹的明亮程度。Xianyu Su 等^[8,17] 验证了调制度值和曲面的亮度和

条纹的对比度成正比的关系。指出, 利用调制度可以把阴影、表面不连续、图像背景等无效区域从有效区域中分离出来。Y. Xu 等^[7] 是第一个使用调制度信息作为相位质量评估的权值, 经过计算的调制度值处于 $[0, 1]$ 之间, 在条纹信息比较好的区域, 调制度值较小接近于 1。

调制度信息虽然间接表示了相位的质量, 该信息对分离背景区域等具有一定的效果, 但是, 调制度信息是基于原始条纹灰度值进行的处理, 限制了其应用的广泛性。另外, 调制度值是条纹亮度和对比度的直接表示, 对于相位质量的评估是间接表示, 因此这种粗糙的评估方法容易错误的评估相位质量。如图 2 所示, 图 2(b) 是光栅正弦相位条纹图 2(a) 的调制度权值表示, 对于图 2(b) 使用基于直方图的方法来实现自适应二值化处理得到图 2(c)^[2], 从图 2(c) 看出, 虽然背景得到滤除, 但同时也损失了牙齿内部区域数据。

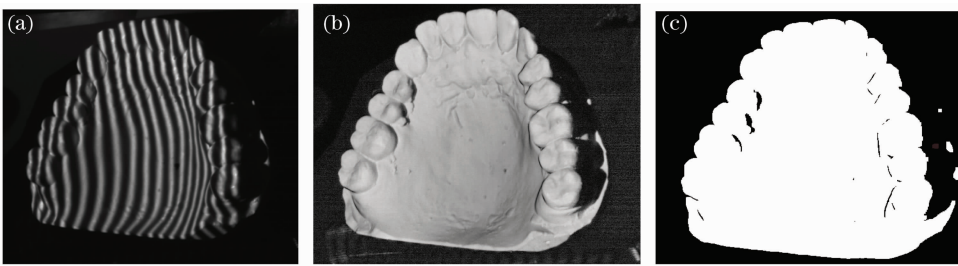


图 2 调制度表示的相位质量权值

Fig. 2 Modulation phase quality weighting factors

3.3 相位导数方差

相位导数方差(PDV)^[2,10], 是对包裹相位原始数据沿 x, y 方向求取相位偏导数的方差。在离散图像里, 相位导数可用相位差分来表示, 具体公式为

$$B_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k (\nabla \Phi_{i,j}^x - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^x})^2} + \sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k (\nabla \Phi_{i,j}^y - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^y})^2}}{k^2}, \quad (6)$$

式中 $\nabla \Phi_{i,j}^x = W[\Phi_{i,j} - \Phi_{i-1,j}]$ 表示水平方向的包裹相位导数, $\nabla \Phi_{i,j}^y = W[\Phi_{i,j} - \Phi_{i,j-1}]$ 表示垂直方向的包裹相位导数, k 是相位处理的窗口尺寸, $\overline{\nabla \Phi_{i,j}^x}$ 和 $\overline{\nabla \Phi_{i,j}^y}$ 分别是 $k \times k$ 窗口内水平和垂直方向相位导数的均值。

对上面公式分析得到该方法是一种概率统计学方法, 它将水平和垂直方向的偏差作为两个相互独立的随机变量进行方差估计, 通过方差表示随机变量的分布特征及其在数学期望周围的偏离程度。众所周知, 样本方差是样本中各数据与样本平均数的差平方

和的平均数,是衡量一个样本与其均值的偏离波动大小的量,样本方差越大,样本数据的波动就越大^[17]。那么该方法的使用就具有了一定的局限性,如对于一些噪音区域大于窗口 k 的情况,质量权值会得到较小的方差值,会被误认为好的相位;对于因物体表面局部突变造成的 k 窗口内方差较大的情况,虽然是好的相位也被误标志为质量较差的相位;另外,该质量评估方法将水平和垂直差分作为两个相互对立的随机变量进行处理,这种无相关约束有可能导致错误的相位误差评估结果。因此,提出一种旋转不变性的改进相位质量评估方法,公式具体表示为

$$B_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k (|\nabla \Phi_{i,j}| - |\nabla \Phi_{i,j}|)^2}}{k^2}, \quad (7)$$

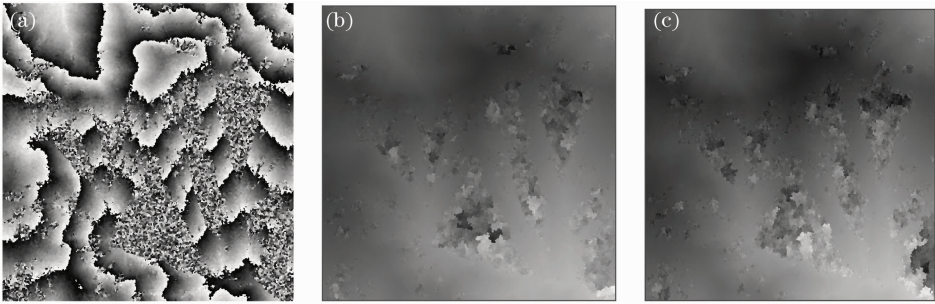


图3 相位导数方差表示的相位质量权值

Fig. 3 Phase derivative variance phase quality weighting factors

3.4 最大相位梯度

最大相位梯度(MPG)质量权值也是一种以相位梯度为基础数据的评估方法^[2],以当前像素为中心计算 $k \times k$ 窗口内各像素点的水平垂直方向梯度值,再把这些梯度值中的最大值做为当前像素的评估权值。该权值评估方法像相位导数方差评估方法一样,质量权值越大表示相位质量越差。具体公式为

$$B_{i,j} = \max \left\{ \begin{array}{l} \max(|\nabla \Phi_{i,j}^x|)_{k \times k} \\ \max(|\nabla \Phi_{i,j}^y|)_{k \times k} \end{array} \right. , \quad (8)$$

该质量权值检测标准过于苛刻,放大了相位质量不好的程度。

对于这种分析方法,可以从图像处理的角度来理解它。如果把相位值归一化为 $[0, 255]$ 的灰度图像,那么最大梯度提取是变相的对相位灰度图像进行边缘检测处理。从图像处理基础技术^[18]可知,在离散的数字图像中梯度运算可用一些近似的运算来简化表示,用一阶差分代替一阶微分操作,如果假设图像灰度为 $f(x, y)$, 点 (x, y) 的灰度梯度为 $G[f(x, y)]$,

$$\Delta f_x(x, y) = f(x, y) - f(x - 1, y),$$

这种质量权值不仅保证包裹相位导数运算的各向同性,也保证对未知随机噪音的提取在最大变化率上,它对相位噪音具有更大的灵敏性,也克服了水平和垂直相位差分运算的方向性。如图3所示,图3(a)是有噪音的包裹相位图,图3(b)是使用相位导数方差方法获得的相位质量权值图,不连续的区域是相位误差的检测结果,图3(c)是使用本文的相位导数幅值方差方法获得的相位质量权值图,图3(c)在整体上灰度细节信息优于图3(b)。另外,结合图3(a)看出,图3(c)对误差标识更为清楚和正确,如3(c)图右下角的相位误差得到正确清楚的表示,而图3(b)得到错误的相位展开结果。

$$\Delta f_y(x, y) = f(x, y) - f(x, y - 1),$$

那么图像 $f(x, y)$ 的梯度幅值为

$$G[f(x, y)] = \{[\Delta f_x(x, y)]^2 + [\Delta f_y(x, y)]^2\}^{1/2},$$

为了避免平方和运算及开方运算,也可将幅值用两个分量的绝对值之和或最大绝对值来表示:

$$G[f(x, y)] = |\Delta f_x(x, y)| + |\Delta f_y(x, y)| \text{ 或 } G[f(x, y)] \approx \max(|\Delta f_x(x, y)|, |\Delta f_y(x, y)|), \quad (9)$$

这三种幅值表示方式之间有下列关系:

$$\begin{aligned} \max(|\Delta f_x(x, y)|, |\Delta f_y(x, y)|) &\leq \\ \{[\Delta f_x(x, y)]^2 + [\Delta f_y(x, y)]^2\}^{1/2} &\leq \\ |\Delta f_x(x, y)| + |\Delta f_y(x, y)|. &\quad (10) \end{aligned}$$

这表明,用绝对值相加表示梯度,比实际梯度大,用水平和垂直差分取最大值方法计算的梯度比实际梯度小,在对相位质量评估方面,对于相位质量苛刻程度依次变化。而对于检测水平和垂直方向上的边缘时,上述三种表示法是等价的,然而对于位置方向的边缘检测时,相位梯度幅值方法会得到更好的结果,因此针对最大相位梯度权值检测标准过于苛刻的缺陷,本文提出:根据需求使用以上三种幅值

对不同的相位质量进行评估。使用基于梯度幅值的质量权值对相位进行评估,如图 4 所示。图 4(a)是带有噪音的包裹相位图,图 4(b)是使用最大相位梯度方法标志相位质量并进行相位展开的结果,图 4(c)是使用本文的相位梯度幅值方法标志相位质量并展开的结果,从两图的对比结果看出本文的

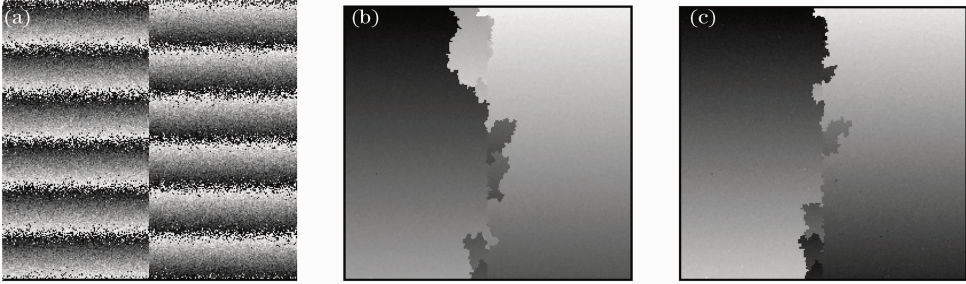


图 4 最大相位梯度表示的相位质量权值

Fig. 4 Maximum phase gradient phase quality weighting factors

3.5 二阶相位差分

二阶相位差分 (SPD) 也是评估相位质量的不好程度^[19,20],在 $k \times k$ 的窗口内,定义为

$$B_{i,j} = \sqrt{h^2(i,j) + v^2(i,j)}, \quad (11)$$

式中

$$h(i,j) = W[\Phi_{i-1,j} - \Phi_{i,j}] - W[\Phi_{i,j} - \Phi_{i+1,j}],$$

$$v(i,j) = W[\Phi_{i,j-1} - \Phi_{i,j}] - W[\Phi_{i,j} - \Phi_{i,j+1}],$$

$h(i,j)$ 和 $v(i,j)$ 即是分别在水平和垂直方向进行二次相位差分。M. A. Herraez 等^[11]认为二阶相位质量权值能更好的体现出相位质量的凹凸信息,相比于一般的相位梯度质量权值更能清楚的表现细节,同时提出了一种变形的二阶相位差分质量评估权值:

$$B_{i,j} = \sqrt{h^2(i,j) + v^2(i,j) + d_1^2(i,j) + d_2^2(i,j)},$$

式中

$$d_1(i,j) = W[\Phi_{i-1,j-1} - \Phi_{i,j}] - W[\Phi_{i,j} - \Phi_{i+1,j+1}],$$

$$d_2(i,j) = W[\Phi_{i-1,j+1} - \Phi_{i,j}] - W[\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i+1,j-1}].$$

对以上两式分析发现,以二阶相位差分为基础数据的相位质量评估方法,是对相位进行变相的拉普拉斯运算。从图像处理和分析的方法可知^[18],拉

方法能更全面和正确的指导相位展开。因此,针对不可预知的相位误差,可以根据情况使用不同的方法进行相位质量评估,比如采用罗伯特算子和索贝尔算子等经典的边缘检测方法来进行处理,在某些情况下能得到比以水平和垂直差分为基础数据更好的结果。

普拉斯运算是偏导数运算的线性组合,设

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

为拉普拉斯算子,那么对于离散的相位二阶偏导可表示为

$$\frac{\partial^2 f(i,j)}{\partial x^2} = \Delta f_x(i+1,j) - \Delta f_x(i,j) =$$

$$W[f(i+1,j) - f(i,j)] - W[f(i,j) - f(i-1,j)],$$

$$\frac{\partial^2 f(i,j)}{\partial y^2} = \Delta f_y(i,j+1) - \Delta f_y(i,j) =$$

$$W[f(i,j+1) - f(i,j)] - W[f(i,j) - f(i,j-1)].$$

因此,基于二阶相位差分的质量权值也是基于图像边缘检测的原理,本质上,也是基于相位差分进行的边缘检测。从图像处理技术可知,拉普拉斯运算可以使图像轮廓边界增强,起锐化的图像的作用,但是只有图像模糊过程符合扩散方程的模糊图像,使用拉氏算法才能获得良好的结果,否则,不一定有较好的效果,所以,该种质量权值的使用具有一定的局限性。在此高级边缘锐化思想的指导下,使用图像处理技术进行了其他的尝试,如图 5 所示。图 5(a)为

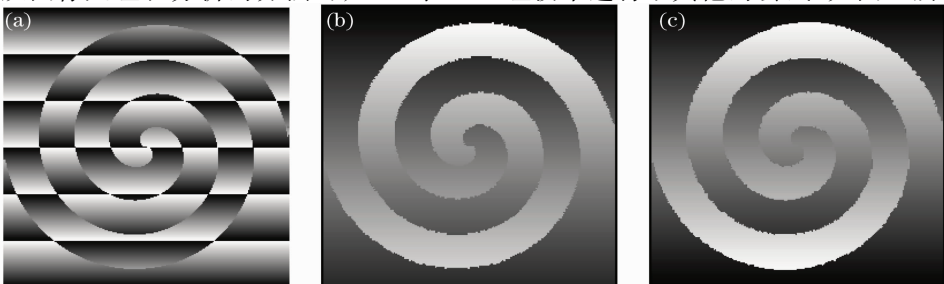


图 5 二阶相位差分表示的质量权值

Fig. 5 Phase quality weighting factors by second phase difference

复杂的包裹相位图,使用变相的高斯-拉普拉斯锐化操作处理结果如图 5(c)所示,相比于二阶相位差分结果图 5(b),图 5(c)的灰度细节渐变表示更明显。

3.6 相干系数和伪相干系数

相干系数(Coherence coefficient)主要用于 SAR 数据,是衡量相位质量的标准之一^[2]。以干涉雷达为例,它的相干性是指两幅图像之间相关程度的高低,反映了影像获取间隔期内的地面变化信息。相干值的高低决定了能否进行干涉处理和最后获取数据的精度。如果相干性很差,即使强行进行干涉处理,最终的精度也会很低,甚至是错误的。相干系数定义为

$$\gamma = \frac{|E(S_1^* S_2)|}{\sqrt{E(|S_1|^2) \times E(|S_2|^2)}}. \quad (12)$$

式中 S_1 是一个复数影像; $S_1^* S_2$ 表示 S_1 的共轭与 S_2 相乘。在实际图像处理过程中,常用

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^l (S_1^* S_2) \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (|S_1|^2) \times \sum_{i=1}^l (|S_2|^2)}}$$

进行干涉相干值的估计,用到的相干估算器是最大似然估计^[9]。式中, l 表示视数,干涉相干性情况可

从相干图上明显看出,亮点区域相干性好,暗的区域相干性差。

伪相关系数(Pseudo-coherence coefficient)是评估相位的相干性和相位的一致性情况,该质量权值也是从相位数据本身提取,不需要其他的额外数据信息。具体公式如下:

$$\gamma_{m,n} = \frac{\sqrt{(\sum \cos \Phi_{i,j})^2 + (\sum \sin \Phi_{i,j})^2}}{k^2}. \quad (13)$$

式中 $\Phi_{i,j}$ 是像素坐标 (i,j) 的包裹相位值。经过验证发现,最大相位梯度幅值相位评估方法对于干涉图像具有良好的优越性,图 6 是各种相位质量评估权值的对比,以图 6(a)的相干系数质量图为基础,图 6(b)是伪相干系数,图 6(c)是相位梯度方差表示的质量图,该相位质量评估方法几乎不能体现细节信息。对其他几种相位质量评估方法进行了对比,图 6(d)是最大相位梯度表示的质量图,该图将相位质量进行了剧烈放大,图 6(e)是使用 2.4 节描述的本文的最大相位梯度幅值表示的质量图,该质量图最接近相干系数质量图,相比其他几种方法更具有优越性和准确性。

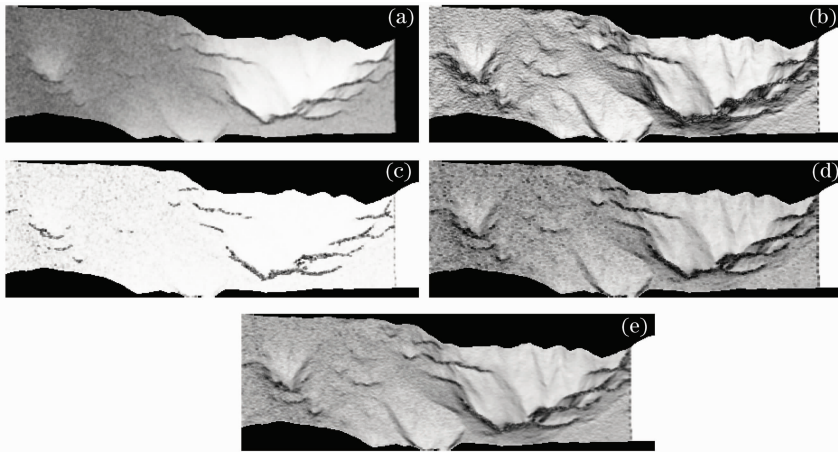


图 6 各种质量权值与本文提出的权值对比结果 1

Fig. 6 Comparative results between our algorithm and other algorithms one

3.7 基于窗口加权的相位质量评估权值

B. L. Cho 等^[21]发现许多相位质量的评估都是基于固定窗口 k ,当相位被噪声影响时,有时候基于固定窗口的质量权值不能很好的评估出相位的真实

质量,因此提出了一种窗口加权的相位质量提前方法。具体表示以相位导数方差为例,加权窗口的相位质量权值为

$$B_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k [\omega(i,j)(\nabla \Phi_{i,j}^x - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^x})]^2 + \sum_{i=0,j=0}^k [\omega(i,j)(\nabla \Phi_{i,j}^y - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^y})]^2}}{\omega(i,j)^2}, \quad (14)$$

$$\omega(i,j) = A_0 \alpha \exp(-\alpha t), \quad -(k-1)/2 \leq i,j \leq (k-1)/2, \quad \alpha = K \frac{\sigma_1}{I}$$

式中 t 是当前像素到窗口中心像素的距离, I 是 $k \times k$ 窗口的质量图, \bar{I} 是质量图的均值, σ_I 是质量权值的标准差, A_0 是标准常量, K 是阻尼权值, 该值由不加权的质量权值决定。Karout Salah^[22] 指出该质量权值对相位质量评价虽然更加智能化, 但是该方法一个最大缺陷是计算量非常大。本文也将其他的方法和本文

的最大相位梯度幅值方法进行了对比, 如图 7 所示, 图 7(a), 图 7(b), 图 7(c) 分别是相干系数质量图, 相位梯度方差质量图, 加权窗口的相位梯度方差质量图, 图 7(d) 是本文最大相位梯度幅值质量图, 图 7(d) 表示的相位质量与图 7(c), 图 7(a) 的相位质量评估很相近, 较大准确程度的评估了相位质量。

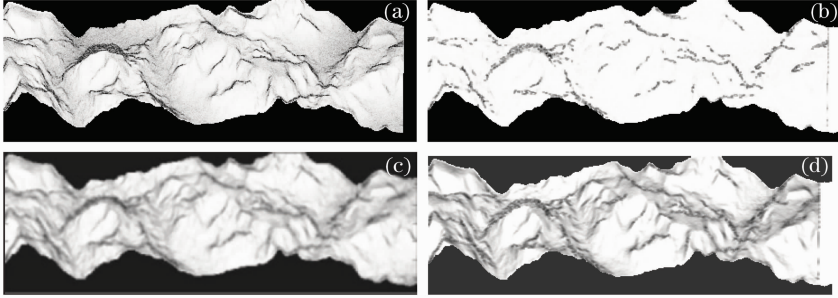


图 7 各种质量权值与本文提出的权值对比结果 2

Fig. 7 Comparative results between our algorithm and other algorithms two

4 实例验证与分析

根据相位展开的原理和本文新提出的相位质量评估权值进行了相位展开试验, 针对背景噪音会导致相位误差传播的缺点, 本文使用调制度信息对背景进行了滤除, 使用(5)式计算出每个像素点的 $[0, 1]$ 内的调制度值, 将该值归一到 $[0, 255]$ 进行灰度表示, 采用图像形态学方法和最大类间方差法 (OTSU) 在保证前景区域不受影响的情况下将背景有效的分割出来^[18], 避免了传统的单纯使用直方图进行分割造成前景区域受影响的情况发生, 根据分割结果只对感兴趣区域使用新提出的相位质量评估权值进行相位展开, 获得了比较好的结果。实验使用的质量评估权值

为相位二阶导数方差, 公式具体为

$$B_{i,j} = \frac{\sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k (\nabla \Phi_{i,j}^{xx} - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^{xx}})^2} + \sqrt{\sum_{i=0,j=0}^k (\nabla \Phi_{i,j}^{yy} - \overline{\nabla \Phi_{i,j}^{yy}})^2}}{k^2}, \quad (15)$$

式中 $\nabla \Phi_{i,j}^{xx}$ 表示水平方向的包裹相位二阶导数, $\nabla \Phi_{i,j}^{yy}$ 表示垂直方向的包裹相位二阶导数, $\overline{\nabla \Phi_{i,j}^{xx}}$ 和 $\overline{\nabla \Phi_{i,j}^{yy}}$ 分别是 $k \times k$ 窗口内水平和垂直方向相位导数的均值。

根据以上方法对牙模进行了相位展开实现, 具体试验结果和中间数据显示如图 8 所示。利用步距

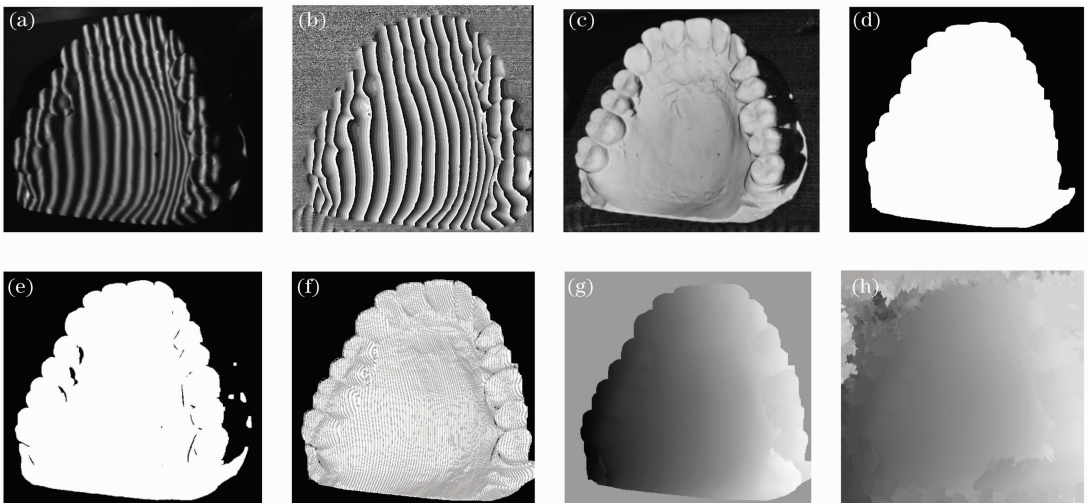


图 8 使用本文算法相位展开的结果

Fig. 8 Phase unwrapping result with our algorithm

为 $\pi/2$ 的正弦光栅条纹作为相移的基础数据,图 8(a)是 4 幅光栅条纹中的一幅,经过 4 步相移获得 $[-\pi, +\pi]$ 的包裹相位,将包裹相位图归一到 $[0, 255]$ 后进行灰度显示如图 8(b)所示,为去除背景噪声的影响,调制度信息对相位质量进行了灰度显示如图 8(c)所示,然后使用本文的分割方法有效地将实物轮廓前景全部信息提取了出来如图 8(d)所示,黑色区域为背景标识,白色区域是分割出的感兴趣的区域,相比于传统直方图法结果如图 8(e),本文的分割结果能尽量保证感兴趣区域完整不受影响,这种轮廓分割的方法优于依靠调制度进行二值化的结果,因为调制度信息对相位质量只是粗糙的评估,单纯二值化处理有可能将实物内部好的数据标识为坏的数据,容易形成空洞区域如图 8(e)所示。对于分割出的感兴趣区域进行了相位质量评估如图 8(f)所示,颜色越白表示相位质量越好,最后,依靠相位质量高低信息使用洪水算法进行了相位展开如图 8(g)所示,相比于没有进行感兴趣区域分割的情况 8(h),本文算法得到了更好的结果。

5 结 论

对目前相位展开技术中常用和主要的几种质量权值进行了详细的描述和分析,对这些质量权值的数学模型进行了分析,根据其不同形态把这些方法进行了归类,然后在各自的领域内进行了相似的扩展和推导,提出了改进的算法,这些改进算法的正确结果验证了本文的逆向推导和归类的正确性。这种分析为正确的理解和研究相位质量评估方法提供了帮助,通过对这些方法所属的类别进行理解相位质量,得到了一个新的理解相位质量的视角,为广泛和深入的正确相位展开拓宽了思路。

参 考 文 献

- 1 A. V. Oppenheim, J. S. Lim. The importance of phase in signals[J]. *Proc. the IEEE*, 1981, **69**(5): 529~541
- 2 D. C. Ghiglia, M. D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software [M]. New York: John Wiley and Sons, 1998. 100~176
- 3 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1527~1532
李中伟, 王从军, 史玉升等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1527~1532
- 4 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 5 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, L. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 6 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15): 3268~3270
- 7 Y. Xu, C. Ai. Simple and effective phase unwrapping technique [C]. *SPIE*, 1993, **2003**: 254~263
- 8 Xianyu Su, Wenjing Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **42**(3): 245~261
- 9 R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel *et al.*. Coherence estimation for SAR imagery[J]. *IEEE Trans on Geosci and Remote Sens*, 1999, **37**(1): 135~149
- 10 M. D. Pritt. Phase unwrapping by means of multigrad techniques for interferometric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geosci. and Remote Sens.*, 1996, **34**: 728~738
- 11 M. Arevallilo Herraes, D. R. Burton, M. J. Lalor *et al.*. Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(35): 7437~7444
- 12 P. Andrae, U. Mieth, W. Osten. Strategies for unwrapping noisy interferograms in phase-sampling interferometry [C]. *SPIE*, 1991, **1508**: 50
- 13 He Guotian, Wang Xiangzhao, Zeng Aijun. Real-time surface profile measurement using sinusoidal phase-modulating interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1997~2002
何国田, 王向朝, 曾爱军. 物体表面形貌的正弦相位调制实时干涉测量技术研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1997~2002
- 14 T. J. Flynn. Two-Dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(10): 2692~2701
- 15 Wang Jun, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. A novel synthetical method for phase unwrapping[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 795~799
王 军, 赵建林, 范 琦等. 相位图去包裹的一种新的综合方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 795~799
- 16 Xiao Feng, Wu jicang, Zhang Lei. A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping [C]. *APSAR' 2007*, pp: 755~759
- 17 Niu Jiayi, Guo Zhiying, Liu Yongzheng *et al.*. Probability and Statistics [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press. 1988. 95~120
牛家骥, 郭之盈, 刘永政等. 概率统计[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1988, 95~120
- 18 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
- 19 Zhu Yongjian, Luan Zhu, Sun Jiangfeng *et al.*. Quality weight based discrete cosine transform phase unwrapping algorithm in optical interferogram processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 848~852
朱勇建, 栾 竹, 孙建锋等. 光学干涉图像处理中基于质量权值的离散余弦变换解包裹相位[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 848~852
- 20 J. A. Quiroga, E. Bernabeu. Phase-unwrapping algorithm for noisy phase-map processing[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(29): 6725~6732
- 21 B. L. Cho, Y. K. Kong, Y. S. Kim. Quality map extraction for radar interferometry using weighted window[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(8): 472~473
- 22 Karout Salah. Two-Dimensional Phase Unwrapping [D]. Liverpool: Liverpool John Moores University, 2007. 12~39