

基于调制度分析与二阶导数导向的综合 相位去包裹算法

王岩峰¹ 贾书海^{1,2}

(¹ 西安交通大学理学院光信息科学与技术系, 陕西 西安 710049
² 非平衡物质结构及量子调控教育部重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 在相位去包裹算法中,以调制度为参数的质量导向算法能够较好地抑制阴影、陡峭变化区域错误的传播;而以包裹相位二阶导数模值为参数的导向算法能引导去包裹沿连续性最高的方向进行。综合这两种参数导向算法的特点,提出了基于调制度分析与包裹相位二阶导数导向的综合去包裹算法。该算法首先找到一个最优门限,并根据该门限将调制度质量图分为“好”与“差”两种区域,然后在好质量区域采用洪水算法以提高去包裹算法效率,在差质量区域利用包裹图二阶导数模值引导去包裹路径沿连续性最好的方向进行。对投影条纹法和数字散斑法所得的包裹图处理结果表明,所提出的算法具有较高稳健性和效率。

关键词 图像处理;相位去包裹;调制度分析;二阶导数导向

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.041002

Hybrid Phase Unwrapping Algorithm Based on Modulation Analysis and Second-Order Derivative Guide

Wang Yanfeng¹ Jia Shuhai^{1,2}

(¹ School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China
² Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter,
Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract Among phase unwrapping algorithms, quality guide algorithm adopting fringe modulation as parameter can constrain the error in shadow and abrupt areas from spreading globally. Reliability guide algorithm with second-order derivative of unwrapped phase as parameter can conduct the unwrapping path to orient the most continuous direction. In order to combine the merits of the above two algorithms, a hybrid algorithm based on fringe modulation analysis and second-order derivative guide is proposed. Firstly, the algorithm finds out an optimal threshold, based on which the fringe modulation quality image is divided into two kinds of area, "good area" and "bad area". Within the good area, unwrapping process is implemented by adopting flood algorithm, while in the bad area second-order derivative of wrapped phase guiding method is utilized to conduct the unwrapping path to orient the most continuous direction. Experimental results on the wrapped phase map of projected fringe method and digital speckle pattern interferometry demonstrate the robustness and efficiency of the proposed algorithm.

Key words image processing; phase unwrapping; modulation analysis; second-order derivative guide

OCIS codes 100.5088; 100.2960; 200.4560

1 引言

相位去包裹是干涉合成孔径雷达、光学干涉测量、波前补偿以及磁共振图像处理等领域用于信息获取的一个关键步骤^[1]。由于这些测量方式采用了反正切计算,载有信息的相位值被包裹在了 $(-\pi, \pi]$ 内^[2],必须采用相位去包裹算法将包裹的相位值还原到其真实的相位,以得到真实相位值携带的信息。对于理想的相位包裹图,去包裹容易通过行列路径积分进行^[3]。但是测量时的噪声、被测物体轮廓的不连续以及欠采样等因素^[4]造成了行列路径法会出现拉线等错误。为了避免该错误,质量图导向法^[5]被用于引导积分路径。质

收稿日期: 2010-06-28; **收到修改稿日期**: 2010-12-04

基金项目: 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET20520843)和西安市科技攻关计划(GG05042)资助课题。

作者简介: 王岩峰(1985—),男,硕士研究生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: felix.100@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 贾书海(1969—),男,博士,教授,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: shjia@mail.xjtu.edu.cn

量图内各像素值称为质量值,反映了包裹图内对应像素点的“可靠性”。高质量值像素点优先被去包裹,而低质量值像素点较后被去包裹。这样出现在低质量区域的错误会被限制于该局部,而不会影响到全局。

通常用于生成质量图的主要参数有条纹图调制度和包裹图二阶导数模值^[6]。这两种参数各自有不同的优点。调制度参数图反映了测量质量,通常在阴影区域以及陡峭变化区域的参数值比较小^[5]。而二阶导数模值则可引导积分路径始终沿着包裹相位图中连续性最好的路径进行。但两种参数也有各自的缺点,比如,以调制度为参数图虽然可以抑制阴影区以及陡峭变化区域错误的全局传播,但是没提供从哪个方向来计算低质量值点的相位值能获得更大的正确率;而包裹图二阶导数值与阴影、陡峭区域并没有必然联系,这将导致积分路径有可能较早通过这些区域而产生错误;另外二阶导数导向法需要计算即将去包裹点的多个方向的二阶导数,程序时耗因而加大。本文提出一种基于条纹图调制度分析和包裹图二阶导数模值导向的综合算法。这种综合算法不仅可以避免低调制度区域的错误在全局传播,而且可以从最可靠的方向对低调制度像素点进行去包裹,从而获得更大的正确率。

2 基于条纹调制度分析去包裹算法

2.1 最优门限选取

划分条纹图调制度质量图为“好”和“差”区域的二元模板是通过调制度质量图中每点的质量值与一个固定门限比较生成的。为了在好质量区域进行洪水算法^[7]时不会产生错误,另外为了将尽可能少的像素点划入“差”质量区域,门限值应该到达最优。所谓最优门限是指能够保证在好质量区域使用洪水算法去包裹而不产生错误的最小数值。即用比该门限大的数值作为门限生成模板一定可以保证洪水算法在好质量区域不会出错,而用比该门限小的数值作为门限生成的模板在使用洪水算法处理好质量区域时一定会出错。

算法首先建立一个队列用于存储质量图中出现过的质量值,并将其升序排列。选择队列中值,以此为门限生成模板,并判断该模板能否满足连通的极点^[8]极性总和为0,或者极性总和不为0的极点群和包裹图边界相连。如果可以满足,则将队中在此中值之后的所有元素从队中删除;如果不满足则将中值之前的所有元素删除。重复在队中选择中值进行上述操作,直到队中只剩两个元素。这时队列中第二个元素值则为所得门限值。

2.2 极点之间的连通

在每次循环中,程序都会检测生成的模板能否保证连通的极点极性总和为0,或者极性总和不为0的极点群和边界相连。极点连通是通过相邻像素之间的虚拟路径来实现的。当像素的质量值不大于特定门限,从而被标记为“差”质量区域时,与该像素相邻的虚拟路径被设定为“通”。这样畅通路径将极点与极点之间“连接”了起来。如图1(a)所示,其中白色方块代表“好”质量的像素点,而黑色方块代表“差”质量像素点;相邻像素点之间是虚拟路径,用黑线表示畅通路径,而非畅通路径未标出;夹在每四个像素点之间的点存储的是 2×2 环路积分出的极点值^[8],1值在图中用加号表示,-1值用减号表示,0值未在图中标出。

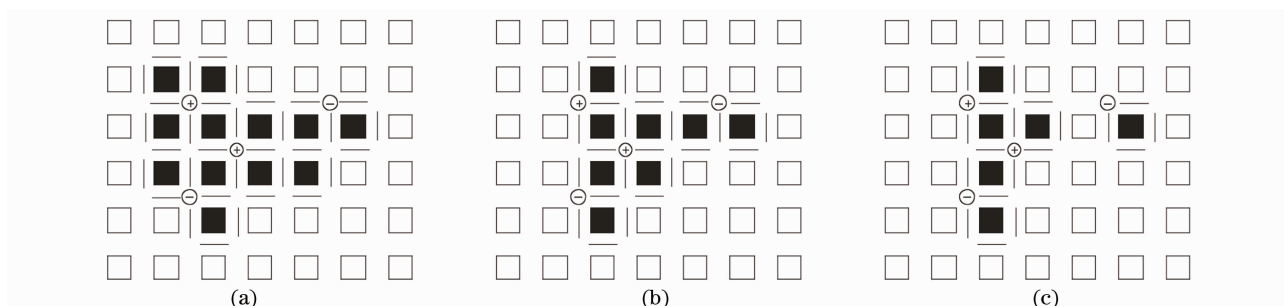


图1 极点连通图示

Fig. 1 Residue connectivity pattern

由于同一包裹图正确的去包裹结果只能是一个,即去包裹结果不依赖积分路径的选择。则为了在“好”质量区域进行的相位去包裹结果可以不依赖于积分路径,任何一个积分环路所包含的极点极性总和应该为0^[8]。这可以通过保证在差质量区域内相互连通的极点极性总和为0实现。如图1(a)所示,在此门限下生

成的模板保证了差质量区域内连通极点极性和为0,则在好质量区域任何环路包含的极性和都为0,故而在好质量区域去包裹结果不依赖积分路径。当门限下降一步后,新生成模板结果如图1(b)所示。由于在“差”区域依旧满足极点总和中和,故而好质量区域的去包裹结果依旧不依赖积分路径。门限再下降一步,差质量区域范围缩小,如图1(c)所示。由于差质量区域不能满足极点总和中和,好质量区域一些积分环路会包含带有极性的区域,故而不能满足在好质量区域去包裹结果的路径不依赖性。而对于单极点情况^[9],当与该单极所在极点群的连通路达到边界时,也可以保证在好质量区域去包裹结果的路径不依赖性。

算法通过反复验证依据门限所生成的模板是否能满足连通的极点极性和为0,或者极性总和不为0的极点群和边界相连,寻找到满足条件的最优门限值。用此最优门限生成的模板,可以保证好质量区域去包裹的路径不依赖性,同时不会把多余像素点纳入差质量区域内。

2.3 基于条纹调制度分析去包裹算法流程

算法的具体步骤如图2程序流程图,针对某些步骤给出一些要点和说明如下:

- 1) 在将质量图中像素值入队时,不重复装入队中已经出现的质量值;
- 2) 在门限确定并且生成模板后,如果一些差质量区域内没有极点,那么则将该差质量区域重新划分入好质量区域。因为不包含极点的差质量区域能够依旧保证洪水算法去包裹结果不依赖于所选路径。

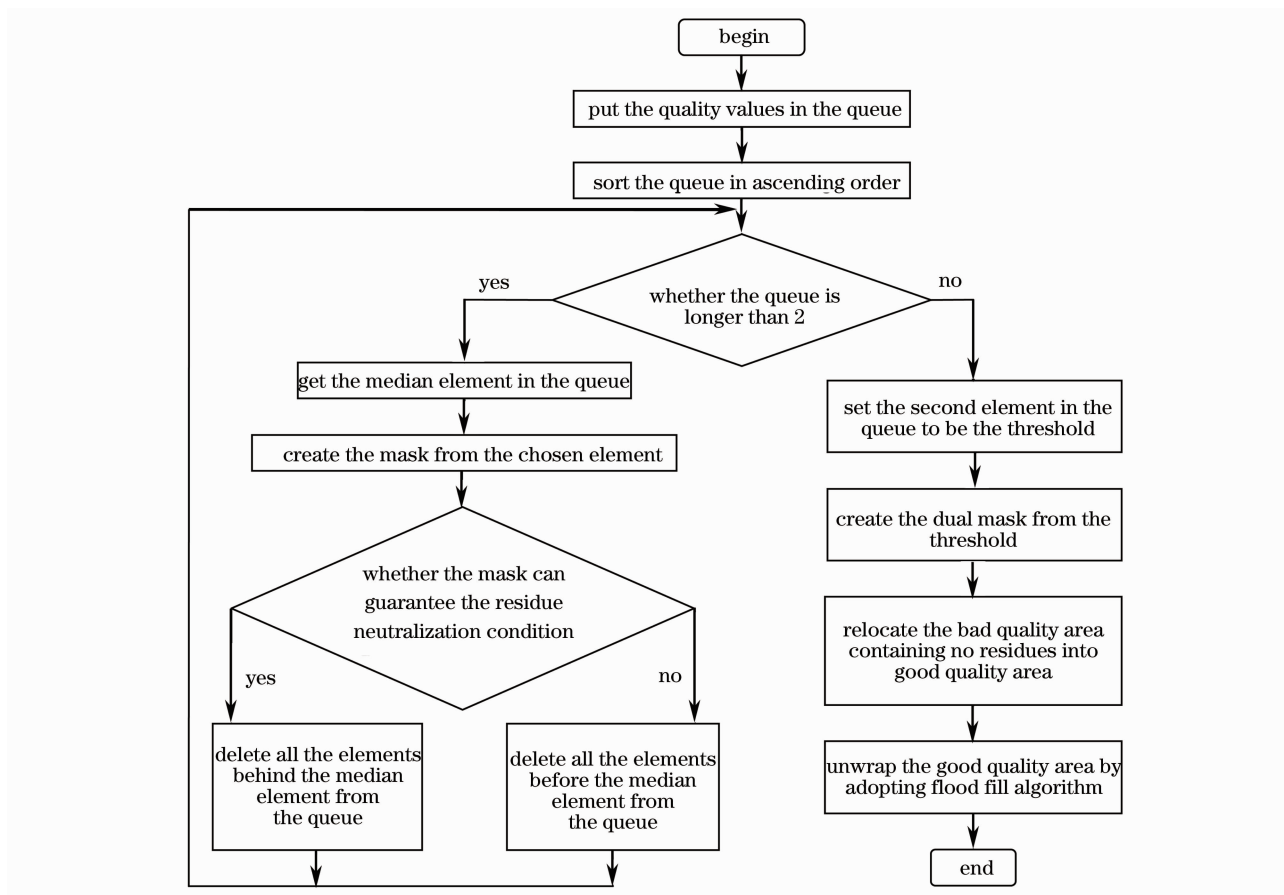


图2 基于条纹图调制度分析去包裹算法流程图

Fig.2 Flow chart of phase unwrapping algorithm based on fringe modulation analysis

3 以二阶导数模值为参数的质量导向法

3.1 二阶导数模值计算与查表入队算法

经过上一步算法的处理,相位包裹图只剩下差质量区域像素点没有被去包裹。在本章节,算法以包裹相位的二阶导数模值为参数引导积分路径从连续性较好的方向对剩余像素点进行去包裹处理。由于二阶导数模值可以反映某个方向包裹相位变化的快慢,二阶导数模值小的,变化慢,连续性好;而二阶导数模值大的,

变化快,连续性较差。从连续性较好的方向对某点进行去包裹,可以避免由于不连续等原因产生的错误。其计算过程如图3所示。

图3中0号像素为即将去包裹点,如果与其相邻的1~8号像素均已被去包裹处理,则计算该8点的二阶导数值模值,例如

$$\varphi''(1) = |\langle \varphi(1) - \varphi(0) \rangle - \langle \varphi(9) - \varphi(1) \rangle|, \quad (1)$$

式中 φ 表示包裹相位值; $\langle \dots \rangle$ 表示做包裹处理,即对括号中的数值加 2π 整数倍,使和值落入 $(-\pi, \pi]$ 。在该8个导数值模值中找到最小的,假设其为 $\varphi''(5)$,则0号像素点的相位值通过5号像素点求出

$$\phi(0) = \phi(5) + \langle \varphi(0) - \varphi(5) \rangle, \quad (2)$$

式中 ϕ 为去包裹相位值。实际计算时要注意的一点是,8个方向中可能只有个别几个方向的像素点经过去包裹,所以路径只能从已经去包裹点进行选取。

二阶导数导向法采用查表入队的方式^[10]来实现。具体来说,是将二阶导数值模值的取值区间 $[0, 2\pi]$ 均分为若干个子区间,比如5000个,从小到大排序,并为各个区间建立一个队列用于存储像素点。当计算一个像素点的二阶导数值模值后,按照其值大小,将该像素点存储于对应区间值的队列中。算法每次从当前非空的最小区间队列中取出像素点进行去包裹操作,再对新边界点重复入队过程,直到所有的像素点都被去包裹为止。

3.2 二阶导数值导向算法流程

1) 在洪水算法已经去包裹结果的基础上,对差质量区域中位于好差区域边界像素点,计算8个方向内已经去包裹点的二阶导数值模值,并选取最小值为该边界点的质量值,记录方向号。

2) 按照质量值,将该像素点存储于对应的区间队列中。

3) 从当前非空的最小序数区间队列中取出一个像素点,如果该像素没有被去包裹,则按照记录的方向对其去包裹,否则将其从队列中删除。

4) 找到与上步所去包裹点相邻的未去包裹点,计算其上步去包裹点所在方向的二阶导数值模值,并按照该值查表入队。这里会出现两种情况,第一种是将未装队的像素点入队。如图4所示,当C点被去包裹处理后,其上相邻的三个黑点会被入队;第二种是将已入队的像素点以另一个质量值入队。图4中,C点左右两个点会再次以另一个质量值入队(这两个点先前已经入队)。同一像素点重复入队的情况并不会造成算法对该像素点的重复去包裹,因为算法总是先从最小序数区间处理。同一像素点较先被程序从较小序数区间内取出,并从所记录的方向进行去包裹处理,而当该点再次被从队列中取出时,由于其已经被去包裹处理,而不做重复去包裹,仅从队列中删除。

5) 重复步骤3),4)直到表内所有队列为空,这时,包裹图中的所有像素已都被进行去包裹处理。

4 实验结果和讨论

实验用两个例子以分别说明最优门限选取方法可以找到2.1节所定义的最小门限值,以及算法本身的稳健性。第一个实验是对一个在眼睛处具有孔洞的人脸模型进行投影条纹法测量,实验过程与结果如图5所示。如图5(a),(b)所示,在眼睛部位的孔洞以及在下巴处陡峭轮廓造成了包裹图内相位跳变条纹的间断,图5(c)为用条纹调制度生成的质量图。图5(d)为用本文提出算法所求得门限生成的二元模板,其中黑

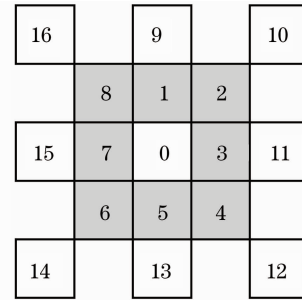


图3 二阶导数计算图示

Fig. 3 Second-order derivative calculation pattern

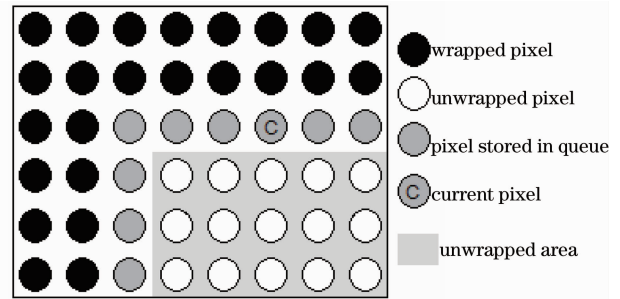


图4 二阶导数幅值导向算法过程图示

Fig. 4 Pattern of the process of second-order derivative module guide

色区域的像素点为质量大于门限的点,被认为是好点,而白色区域中的像素点为差点。图 5(e)为极点图,其中黑点为负极点,白点为正极点。将不包含极点的差质量区域划分到好质量区域则得到最终模板,如图 5(f)所示。图 5(g)为在图 5(f)模板的约束下用洪水算法对好质量区域去包裹的结果,可见洪水算法成功地处理了好质量区域的像素点;在门限选取算法中最后得到的具有两个元素的质量队为 $[0.058076888203466, 0.058082725256443]$,算法要求选择第二个质量值作为门限。但如果选择第一个值做门限生成模板,进而用洪水算法去包裹,则会出现错误,如图 5(h)所示,在人脸下巴处明显出现了拉线的现象,可见该门限选取算法的确能找到保证在好质量区域使用洪水算法去包裹而不产生错误的最小数值。图 5(i)为差质量区域经过二阶导数模值导向算法处理后的去包裹结果,由图可见,陡峭变化的下巴区域被正确地包裹,眼睛处的孔洞已经污染了包裹图,从而丧失了有用信息,但是该错误已被算法限制于局域而没有扩散到全局。

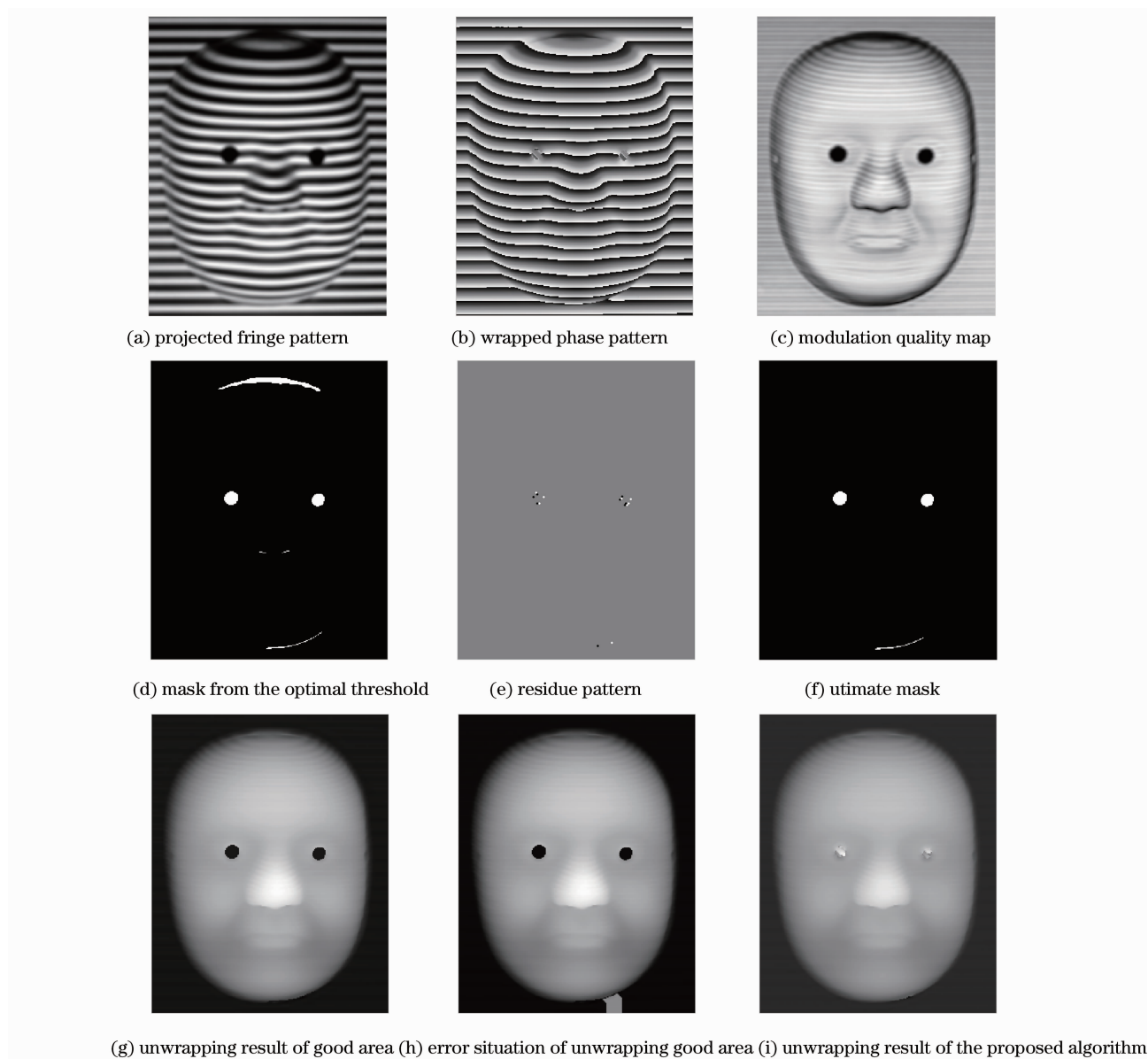


图 5 实验一过程与结果

Fig. 5 Process and result of the first experiment

在运算速度上,综合算法由于采用了洪水算法因而大大加快。用 Matlab 分别实现本文提出的算法和快速质量图导向算法^[10],在同一计算机上对图 5(b) (346×271) 去包裹。快速质量图导向法,采用查表入队的方式引导去包裹先从高质量像素进行。相比传统排序方式的实现的质量图导向算法,该算法的速度快近

100 倍^[10]。对比实验结果显示本文算法时耗为 25 s,而快速质量图导向算法时耗为 2.6 min。

第二个实验是对数字散斑测量的物体进行的去包裹处理。被检测物体是一个表面具有孔洞的块状物体。从图 6(a)可见,该包裹图中存在大量噪声和孔洞造成的相位跳变条纹间断^[11]。图 6(b)为用本文提出算法处理所得的结果。可见噪声区域与孔洞造成的相位跳变条纹间断所带来的错误并没有在全局传播。

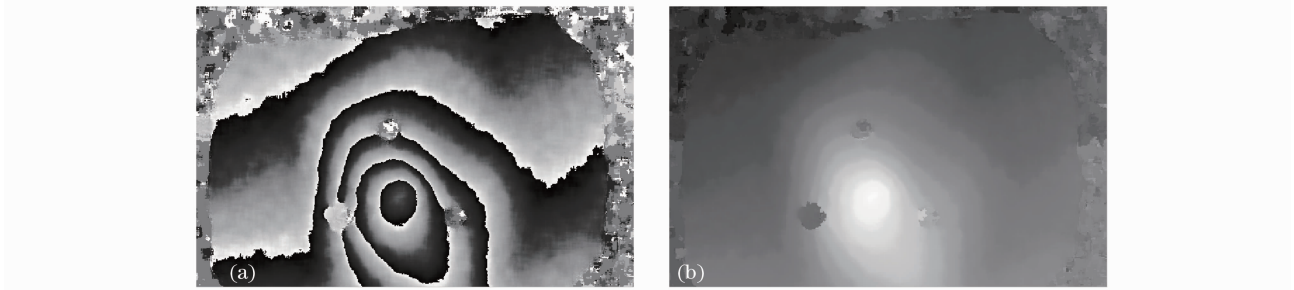


图 6 实验二结果。(a)相位包裹图,(b)去包裹结果

Fig. 6 Result of the second experiment. (a) wrapped phase pattern, (b) unwrapped pattern

值得指出的是,本算法能够适用于处理由投影条纹法、数字散斑法等测量大多数目标物体所得的包裹图。但如果被测物体的形貌突变导致相位跳变条纹的间断区域出现在较好的质量区域中,则处理结果会有潜在错误发生。这是因为无论调制度参数导向去包裹算法还是包裹图二阶导数导向去包裹算法都无法有效处理该问题。该情况多见于用投影条纹法测量整体轮廓与底板有较大高度差的物体。

5 结 论

在相位去包裹算法中,以条纹调制度为参数的质量导向算法能够较好地抑制阴影、陡峭变化区域错误的传播。而以包裹相位二阶导数模值为参数的导向算法能引导去包裹沿连续性最高的方向进行。为综合这两种参数导向算法的优势,提出了一种基于条纹图调制度分析与包裹图二阶导数模值导向的综合相位去包裹算法。在好质量区域采用的洪水算法极大地提高了综合算法的速度,使综合算法在速度和稳健性上达到了一个平衡。另外最优门限不但可以进一步提高算法效率,而且因不需人为规定门限,从而极大地提高了算法的自动性。

参 考 文 献

- 1 Hussein Abdul-Rahman, Miguel Arevalillo-Herráez. Robust three-dimensional best-path phase-unwrapping algorithm that avoids singularity loops[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(23): 4582~4596
- 2 Marvin A. Schofield, Yimei Zhu. Fast phase unwrapping algorithm for interferometric applications [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(14): 1194~1196
- 3 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
- 4 Bernd Gutmann, Herbert Weber. Phase unwrapping with the branch-cut method: clustering of discontinuity sources and reverse simulated annealing [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(26): 5577~5593
- 5 Xianyu Su, Wenjing Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: review [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 6 J. A. Quiroga, A. Gonza'lez-Cano, E. Bernabeu. Phase-unwrapping algorithm based on an adaptive criterion [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2560~2563
- 7 Donald J. Bone. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25): 3627~3632
- 8 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Sci.*, 1988, **23**(4): 713~720
- 9 J. M. Huntley, J. R. Buckland. Characterization of sources of 2π phase discontinuity in speckle interferograms [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(9): 1990~1996
- 10 Li Yong, Su Xianyu. Fast algorithm for reliability-guided phase unwrapping [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 76~79
- 李 勇, 苏显渝. 用于可靠性导向相位展开的快速算法[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 76~79
- 11 Shi Yuqing. Robust phase unwrapping by spinning iteration [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8059~8064