

# 基于质量线导向的二维相位展开新方法

吴勇辉 程筱胜 崔海华 戴宁

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 为保证二维相位展开的正确性和快速性,分析了现有路径相关二维相位展开算法的优缺点,提出了一种基于质量线导向的二维相位展开新方法,并对新方法进行了综合对比实验和理论分析。新方法定义了相位质量因子及相位方向因子,采用双阈值和非极大值抑制的方式有方向性和有选择性地生成了一种新的枝切线,对生成的枝切线进行平衡处理,以处理后的枝切线为导向进行二维相位展开。理论分析和实验结果表明,新方法综合了现有路径相关二维相位展开方法的优点,速度快、稳定性高,生成的枝切线位置准确,很好地截断了相位突变区域,保证了二维相位展开结果的正确性,具有广泛的适用性。

**关键词** 测量;相位展开;枝切线;非极大值抑制;相位质量

**中图分类号** TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0308004

## A Novel Method for 2D Phase Unwrapping Guided by Quality Cut

Wu Yonghui Cheng Xiaosheng Cui Haihua Dai Ning

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

**Abstract** A novel phase unwrapping method guided by a new kind of branch cut called "quality cut" is proposed after analysis of the many existing path-following methods. The quality cut is defined by means of double thresholds and non-maximum suppression with predefined phase quality factor and phase orientation factor. Then the quality is balanced through expansion, and the phase unwrapping procedure is conducted by the guidance of the quality cut. The perfect location of the quality cut makes the unwrapped phase more reliable and more accurate. Experiments demonstrate the comprehensive result with high accuracy, fast speed and great stability, indicating the practical applicability of the proposed method.

**Key words** measurement; phase unwrapping; branch cut; non-maximum suppression; phase quality

**OCIS codes** 100.5088; 110.5086; 120.5050; 100.5070; 120.3180

## 1 引言

相位编码是结构光三维测量中最常用的结构光编码方式,广泛应用于多步相移法、格雷码加相移法和多频外差法等多种测量方法中。在相位解码时,根据反三角函数得到的相位是位于 $[0, 2\pi)$ 相位主值区间内的包裹相位,需要进行相位展开以获得真实相位。二维相位展开算法可分为路径相关算法和路径无关算法两大类,其中,路径相关算法速度快,

能满足一定的精度要求,使用最为广泛。常用的路径相关相位展开算法有 Goldstein 枝切线算法<sup>[1]</sup>(简称 Goldstein 算法,生成的枝切线称为 branch cut)、Roth 提出的质量导向 (quality-guided) 算法<sup>[2]</sup>, Flynn<sup>[3]</sup> 提出的质量导向枝切线算法(简称 mask cut 算法,生成的枝切线称为 mask cut)及最小不连续算法<sup>[4,5]</sup>等。

Goldstein 算法首先检测图像中的相位残差点,

**收稿日期**: 2011-10-27; **收到修改稿日期**: 2011-11-26

**基金项目**: 国家科技支撑计划(2009BAI81B02)自主课题。

**作者简介**: 吴勇辉(1987—),男,硕士研究生,主要从事计算机视觉、光学三维测量等方面的研究。

E-mail: yong\_will@163.com

**导师简介**: 程筱胜(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事逆向工程, cad/cam、生物医学工程等方面的研究。

E-mail: smcadme@nuaa.edu.cn

将残差点用枝切线相连,使枝切线上残差点的极性之和为零达到平衡(正负残差点个数相等)或达到边界,在相位按积分方式展开时避开枝切线,从而得到正确的展开相位,其速度快,但在残差点密集的情况下效果不理想,会产生较多的封闭区域,且直线形式的枝切线不能很好地反应相位实际分布;quality-guided 算法不生成枝切线,整个展开过程以相位质量为导向,按相位质量由高到低依次进行相位展开,其结果较好,算法稳定,但速度慢;mask cut 算法综合了 Goldstein 算法和 quality-guided 算法的优点,首先检测图像的残差点,再以残差点为起点、质量图为导向按区域生长的方式将质量值小于某一设定阈值的点接受为枝切线,以枝切线平衡或达到边界为结束生长的条件,最后对生成的枝切线进行细化以指导相位展开。其速度较 quality-guided 算法快,相位展开结果较 Goldstein 算法好,但对设定的相位质量阈值敏感,易造成较多的封闭区域,且不能保证细化后的枝切线位于相位质量最低区域,从而影响相位展开的结果。此外还有基于分支设置的质量导向算法<sup>[6]</sup>、模拟退火算法<sup>[7]</sup>、相对距离导向算法<sup>[8]</sup>以及其他相位展开算法<sup>[9~16]</sup>。

本文在对现有路径相关相位展开算法进行实验

分析和总结的基础上,提出了一种基于相位质量因子及方向因子生成枝切线的新方法,生成的枝切线称为质量枝切线,简称质量线(quality cut),并以此指导相位展开(以下称此方法为 quality cut 法)。该方法首先定义相位质量因子及相位方向因子,采用双阈值和非极大值抑制的方式生成质量线,然后对质量线进行平衡处理,最后以处理后的质量线为向导进行二维相位的展开。

## 2 质量线导向的相位展开方法

质量线导向的相位展开算法通过保证质量线的完整性和位置的准确性确保了二维相位展开的正确性,包括 4 个步骤。

### 2.1 计算包裹相位、检测相位残差点、确定相位质量因子及相位方向因子

包裹相位由相机采集得到的多帧具有一定相位差的正弦灰度图像获得,并根据包裹相位导数检测相位残差点<sup>[12]</sup>。相位质量因子反映实际相位分布,可定义为常用的相位质量图,如相位导数方差、最大相位导数等。本文定义的相位质量因子为某一窗口大小内的相位导数方差  $q(x, y)$ ,相应地定义相位方向因子为  $o(x, y)$ ,可表示为

$$q(x, y) = \frac{\sqrt{\sum [\Delta x_{\phi}(i, j) - \Delta \bar{x}_{\phi}(x, y)]^2} + \sqrt{\sum [\Delta y_{\phi}(i, j) - \Delta \bar{y}_{\phi}(x, y)]^2}}{k^2}, \quad (1)$$

$$o(x, y) = \arctan[\Delta \bar{y}_{\phi}(x, y) / \Delta \bar{x}_{\phi}(x, y)], \quad (2)$$

式中  $k$  为窗口大小,  $\Delta x_{\phi}(i, j)$ 、 $\Delta y_{\phi}(i, j)$  分别为窗口内每个点在  $x$ 、 $y$  方向的相位导数,  $\Delta \bar{x}_{\phi}(x, y)$ 、 $\Delta \bar{y}_{\phi}(x, y)$  分别为窗口内  $x$ 、 $y$  方向相位导数均值。  $q(x, y)$  能有效并且正确地反映实际相位分布,从而保证生成质量线位置的准确性;  $o(x, y)$  具有较好的区域一致性,从而保证质量线的生长性以及质量线对相位图的单一响应,使得生成的质量线完整且始终位于相位质量最差处。

### 2.2 生成 quality cut

根据定义的相位质量因子和相位方向因子,采用双阈值和非极大值抑制的方式生成 quality cut,该方式的主要思想为:

将质量因子大于高阈值的点选择为质量枝切线的起点,将质量因子介于两阈值之间的点根据相位方向因子有选择地接受为 quality cut,使其始终处

于相位质量最差处。

经过大量的实验发现,残差点及其相邻的像素点的质量因子值与非残差点的质量因子值存在明显的差别。因此,可根据残差点和非残差点质量均值确定高低阈值的大小。阈值确定后,根据上述思想生成 quality cut,算法流程图如图 1 所示。

### 2.3 对 quality cut 进行平衡处理

根据 Goldstein 的枝切线理论,为保证相位展开的正确性,应使得枝切线上正负残差点个数相等或枝切线与边界相交,从而保证相位展开的积分环路中不存在不平衡的残差点。由 2.2 节方法得到的 quality cut 并不一定满足该条件,需要对其进行处理。平衡处理是指依次对每一条不平衡枝切线上的点进行扩展,直到与其他枝切线相交,并根据相交枝切线的不同情况进行分别处理。

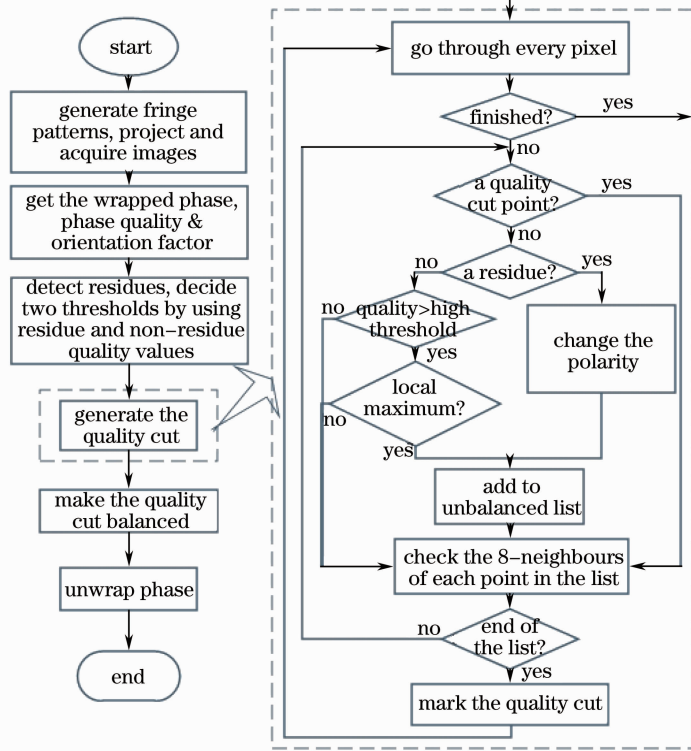


图 1 quality cut 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of quality cut algorithm

图 2 表示一条极性为  $m(m \neq 0)$  的质量线  $A$  扩展至与质量线  $B$  相交的处理情况, 实线表示未平衡的 quality cut, 存储于不平衡序列中; 虚线表示已经平衡的 quality cut。图 2 中:

- (a)  $B$  为边界: 将  $A$  与  $B$  相连, 并将  $A$  极性设为 0, 从不平衡序列中删除;
- (b)  $B$  和边界相连: 将  $A$  与  $B$  相连, 并将  $A$  极性

设为 0, 从不平衡序列中删除;

(c)  $B$  极性为  $n(n \neq 0$  且  $n \neq -m)$ : 将  $A$  与  $B$  相连, 并将相连后的质量线极性设为  $m + n$ ;

(d)  $n = -m$ : 将  $A$  与  $B$  相连, 并将  $A$  极性设为 0, 从不平衡序列中删除;

(e)  $n = 0$ : 将  $A$  与  $B$  相连, 并将相连后的质量线极性设为  $m$ 。

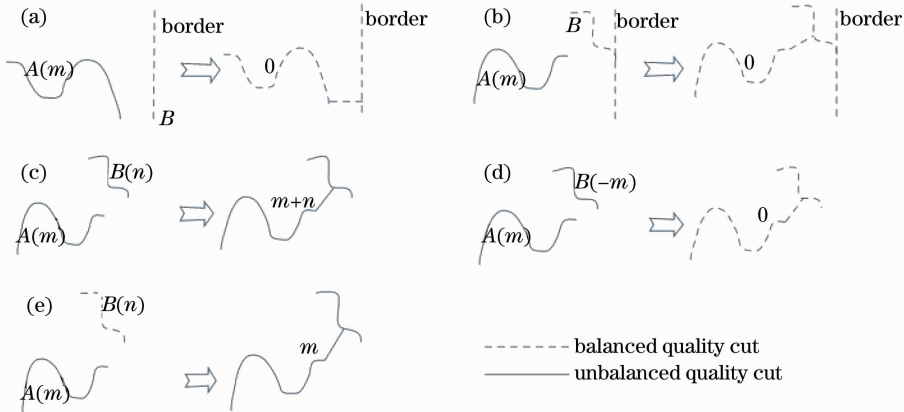


图 2 质量线平衡处理

Fig. 2 Balance-dealing of quality cut

以上平衡算法对所有不平衡的 quality cut 同时进行扩展, 而不是逐一进行平衡处理, 这样能更好地分布 quality cut 的位置, 在最大程度上缩短枝切线的长度, 对于密集残差点分布这样处理也能得到很

好的效果。

## 2.4 二维相位展开

quality cut 生成后, 从图像中任选一个非质量线上的点作为起点, 通过积分逐步进行相位展开, 展

开过程中不能越过质量线。详细展开算法见文献[1],在此不再详述。

### 3 实验与讨论

#### 3.1 算法模拟实验

图3为计算机模拟图,图3(a)为计算机模拟相位分布图,图3(d)含标准差为40 dB的高斯噪声。应用本文方法生成的 quality cut 如图3(b)、(e)所示,

中间黑色的线条表示生成的质量枝切线。可以看出,quality cut 算法很好地截断了图3(a)中的相位分布;在图3(d)含有较强高斯噪声的情况下,仍然获得了较为接近错切线的质量线[图3(e)中黑色线条所示]将左右两部分分开;同时,虽然整体上出现了较多质量线(灰色线条),但产生的封闭区域少,枝切线多为单像素宽度,整幅图像仍能较为完整地展开。

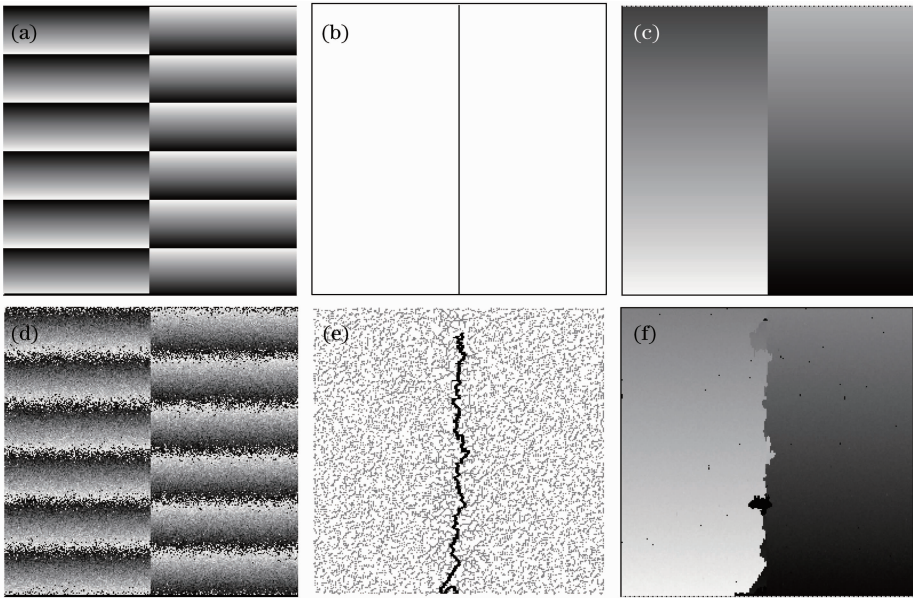


图3 计算机模拟图。(a)模拟相位图;(b)图(a)的质量线;(c)图(a)的展开相位;(d)带高斯噪声的相位图;(e)图(d)的质量线;(f)图(d)的展开相位

Fig. 3 Diagram of computer simulation. (a) Simulated wrapped phase; (b) quality cut of (a); (c) unwrapped phase of (a); (d) simulated wrapped phase with Gauss noise; (e) quality cut of (d); (f) unwrapped phase of (d)

#### 3.2 对比与讨论

##### 3.2.1 4种算法对比实验

为验证 quality cut 算法相位展开的质量和速度,选取 Goldstein 算法、quality-guided 算法和 mask cut 算法等3种路径相关展开算法进行实验比较。被测物为60 cm×50 cm×25 cm的下牙石膏

模型,包含锐边、陡峭区域、平坦区域等各种情况;条纹采用周期为16 pixel的四步相移编码条纹。编码条纹经投影仪(NEC NP50+)投影,相机(嘉恒中自,AM1310)采集,得到由牙模调制后的4幅具有一定相位差的正弦编码条纹图像。取其局部进行处理,图4(a)为其包裹相位图,其中存在几处相位突变

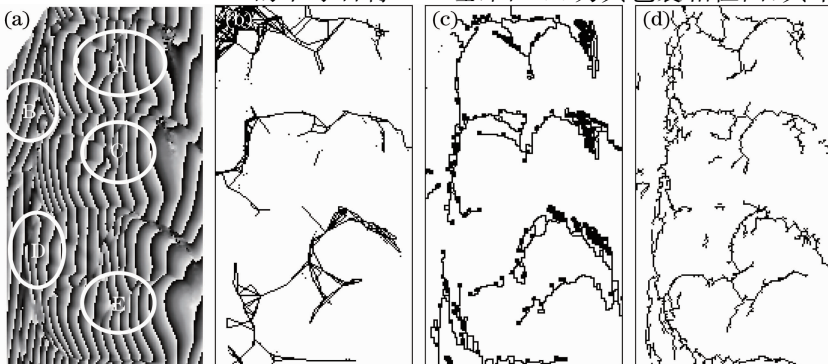


图4 选定区域的处理结果。(a)局部包裹相位图;(b)Goldstein 枝切线;(c)flynn 质量导向枝切线;(d)质量线

Fig. 4 Processed result of chosen part. (a) Part of the wrapped phase map; (b) branch cut; (c) mask cut; (d) quality cut

区域。A、C、E 三处存在相位突变和周期融合；B、D 两处由于物体表面陡峭变化，产生相位周期消失。图 4(b)~(d) 中黑色线条分别为生成的枝切线 branch cut、mask cut 和 quality cut，其中 branch cut 在 A、C 两处截断效果不完全，并在 A、C、E 三处都产生了较大的封闭区域，在 B、D 两处也未能成功截断周期消失区域；mask cut 和 quality cut 较为相近，能较完整地截断相位突变区域，但 mask cut 仍未能完全截断 D 处区域，且在 A 处产生了较大的隔离区域；而

quality cut 则获得了较好的效果，位置准确，截断完全，产生的封闭区域少且小，且质量枝切线为单像素宽度。

图 5 为展开相位图，可以看出，本文提出的 quality cut 算法获得了与质量导向展开算法相当的结果，优于 Goldstein 算法和 mask cut 展开算法。各种展开算法使用的时间如表 1 所示，虽然 quality cut 算法生成质量线的时间更长，但其位置更准确，产生的封闭区域更少。

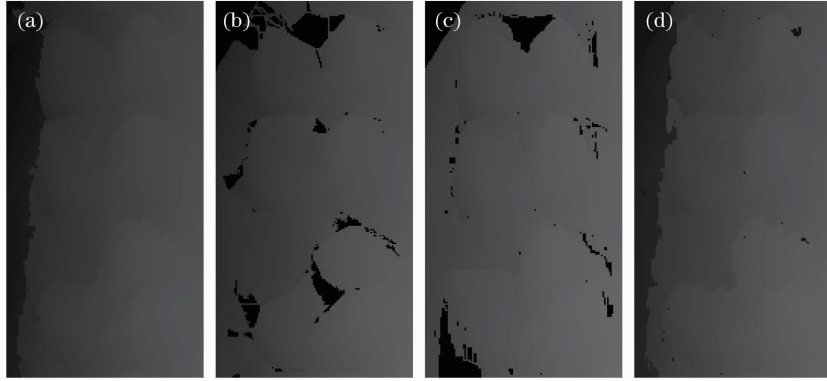


图 5 展开相位图。(a)质量导向算法；(b) Goldstein 算法；(c) mask cut 算法；(d) quality cut 算法

Fig. 5 Unwrapped phase of the four algorithms. (a) Quality-guided phase unwrapping; (b) branch cut algorithm of Goldstein; (c) mask cut algorithm; (d) quality cut algorithm

表 1 4 种相位展开算法使用时间

Table 1 Execution time for each of the four algorithms

	Goldstein	Mask cut	Quality cut	Quality-guided
Time for placing cuts / ms	31	188	357	—
Time for phase unwrapping / ms	450	450	450	3510
Total time /ms	481	638	807	3510

### 3.2.2 4 种算法的联系

事实上，quality cut 算法和 Goldstein 算法、mask cut 算法和 quality-guided 算法有着内在的联系。quality-guided 算法对所有像素按质量进行排序，实际上是定义了两条相距为一个像素的枝切线 A 和 B(如图 6 中所示，设各像素点的相位质量随序号 1、2、... 的递增逐渐降低)，按相位质量由高到低的顺序依次展开相位，实际上是以枝切线 A 和 B 为导向进行相位展开；而 Goldstein、mask cut 和 quality cut 算法则是在不同程度上放松了枝切线 A 和 B 定义的条件，其中以 Goldstein 算法的条件最为宽松，仅依据残差点定义 A 和 B，生成直线型枝切线 branch cut(如图 6 中点画线所示)；mask cut 算法增加了相位质量条件，生成的枝切线 mask cut(图 6 中细实线所示)明显优于

branch cut，但由于缺少方向指导，mask cut 对质量阈值极为敏感，易产生封闭环；quality cut 则同时采用了相位质量因子和相位方向因子，使生成的枝切线更满足相位质量分布，同时有效地减少了封闭环。由此推论，对 quality cut 算法条件进行适当放松，则能获得与 Goldstein 和 mask cut 算法相同的结果，而实验也证明，当 quality cut 算法中高低阈值都取为残差点的质量因子值时，可得到与 Goldstein 算法相同的结果；当 quality cut 算法放宽方向性要求或非极大值要求

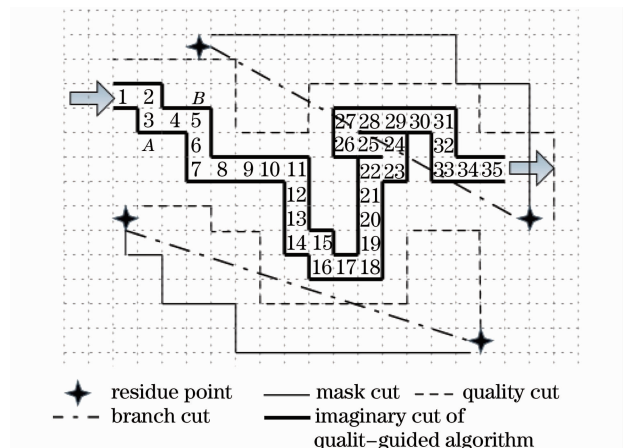


图 6 4 种算法的枝切线

Fig. 6 Cuts of the four unwrapping algorithms

时,则可获得与 mask cut 算法相同的结果。因此,4 种算法实质上存在着密切的关系,而 quality cut 算法则在性能上达到了最优,具有较快的速度和与 quality-guided 算法相当的结果。

## 4 结 论

提出了一种以质量线导向的相位展开新方法,首先定义了相位质量因子和相位方向因子,采用双阈值和非极大值抑制的方式生成质量线,使得质量线始终处于相位质量最差处,且为单像素宽度(质量线对相位的单一响应性);然后根据 Goldstein 枝切线平衡理论对质量线进行处理,使其达到平衡;最后以平衡后的质量线为导向进行二维相位展开,获得了很好的效果。实验结果表明,本文提出的质量线导向相位展开新方法生成的质量线位置准确且无需进行细化处理,能很好地截断相位突变区域;算法综合了现有路径相关相位展开算法的优点,在速度、精度和稳定性上均具有一定的优越性。还从理论上分析了几种方法的内在联系,并进行了实验验证,突出了本方法的综合性能。

## 参 考 文 献

- 1 R. M. Goldstein, H. A. Zebker, C. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, **23**(4): 713~720
- 2 Su Xianyu, Chen Wenjing. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a renew [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 3 Thomas J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[C]. New Jersey: Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996, **4**: 2057~2059
- 4 E. Zappa, G. Busca. Comparison of eight unwrapping algorithms applied to Fourier-transform profilometry [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2008, **46**(2): 106~116
- 5 Thomas J. Flynn. Phase unwrapping using discontinuity optimization [C]. Seattle: 1998 IEEE International Geoscience and Remote

- Sensing Symposium Proceedings, 1998, **1**: 80~82
- 6 Lu Yuangang, Wang Xiangchao, He Guotian *et al.*. Quality-guided phase unwrapping method based on placement of branch cuts[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 460~464  
路元刚, 王向朝, 何国田 等. 基于分支设置的质量导引相位展开算法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 460~464
- 7 Peng Zhenjun, Qian Feng, Wang Xuefeng *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on simulated annealing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 845~849  
彭震君, 钱 锋, 王学锋 等. 基于模拟退火的相位展开方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 845~849
- 8 Yu Liang, Su Xianyu. Phase unwrapping algorithm based on relative distance guidance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1235~1239  
余 亮, 苏显渝. 一种相对距离导向的相位展开算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1235~1239
- 9 J. M. Huntley, C. R. Coggrave. Progress in phase unwrapping[C]. *SPIE*, 1998, **3047**: 86~93
- 10 Mitsuo Takeda. Recent progress in phase unwrapping techniques[C]. *SPIE*, 1996, **2782**: 334~343
- 11 Zhijun Wang, Shusun Li. Phase unwrapping through a branch-cut-based cut-bridging and window-patching method [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(5): 805~814
- 12 G. Dennis, C. Ghiglia, Mark D. Pritt. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software[M]. New York: Wiley, 1998
- 13 Cui Haihua, Liao Wenhe, Cheng Xiaosheng *et al.*. Mathematic descriptions and analysis of quality weighting factors in phase unwrapping algorithms [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 97~104  
崔海华, 廖文和, 程筱胜 等. 相位展开算法中质量权值的数学描述与分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 97~104
- 14 Fu Shiqiang, Liao Wenhe, Cui Haihua *et al.*. Modulation-Roberts gradient amplitude variance quality map for phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 727~732  
傅世强, 廖文和, 崔海华 等. 用于相位展开的调制度-罗伯特梯度幅值方差质量图[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 727~732
- 15 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
- 16 Wang Jun, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. A novel synthetic 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

栏目编辑:何卓铭