

含噪声及分割间断区的光学条纹图 位相解码*

彭 翔 朱绍明 叶声华

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

提要 提出了一种混合模板匹配的光学条纹图位相解码技术, 计算机模拟和实验结果分析证明: 该技术不仅可以从含高频随机噪声(如散斑噪声)的条纹图中有效地复原位相分布, 而且可以处理条纹图包含分割间断区域(如孔洞、裂纹、边界等)的位相复原问题。

关键词 光学干涉, 系统自动分析, 位相复原

1 引 言

诸如数字莫尔、数字散斑、数字全息的光学干涉技术已广泛用来测量各种物理参数, 如位移、应变、振动、表面形貌和折射率等。与其他技术相比, 这些光学干涉技术具有无接触并能提供全场信息的优点。但是, 这些技术常需要对测量结果作出优化的数值解释。在上述光学干涉技术中, 被测参数以位相分布形式编码在二维光学条纹图中。从条纹图中提取位相分布的两类常用方法是: 相移算法和基于富氏变换的算法^[1]。然而, 通过这两类算法得到的位相值在 $-\pi$ 到 π 的范围内是折叠的(wrapped), 因此在从位相分布中导出被测参数之前必须对所有的像素识别出未知的 2π 倍数跃变, 从而得到复原的位相解码。这一过程称为位相展开(phase unwrapping)或位相复原^[2]。由此可见, 位相复原是条纹图自动分析技术的核心。对于不含噪声、没有分割间断(或称物理间断)的条纹图, 位相复原可以通过简单的行列逐点算法^[3]来实现; 而对于信噪比差的条纹图(如散斑相关条纹)或包含分割间断(如孔洞、边界等)的条纹图位相复原过程变得很困难。当噪声较大同时又包含分割间断时, 位相复原过程尤为困难。近年来发展了各种新的位相复原算法试图克服上述问题^[4~10], 其中较为成功的是基于分割网络的位相复原技术^[4~6]和基于模板标识的位相复原技术^[7~9]。尽管取得了一些进展, 但这些技术仍存在较大的局限性, 它们只能对某种单一情况有效而不能有效地处理同时存在高频噪声和物理间断的条纹图位相复原问题。

本文在详细分析位相复原过程中局部误差传播机理的基础上研究了一种基于局部间断源分割和广义振幅模板混合匹配的位相复原技术用于解决同时包含高频散斑噪声及局部间断的光学条纹图的位相解码问题。

* 国家自然科学基金资助项目(69378020)。

2 位相复原过程中的误差传播

在一幅折叠位相图中, 灰度黑表示 $-\pi$, 灰度白表示 $+\pi$, 其他灰度值相应于 $-\pi$ 到 $+\pi$ 范围内的位相分布值。在折叠位相图中给定像素 P 点的位相, 则任何其他像素 Q 的位相值可以通过沿连接 P 和 Q 的任意路径对 2π 个跃变间断数目计数来实现位相展开(或位相复原)。假定沿所选路径的位相值序列记为 $\Phi(i)$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$), 在相邻像素 $i-1$ 和 i 之间的间断跃变数目 $d(i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 可由下式计算

$$d(i) = \text{Int}\{[\Phi(i) - \Phi(i-1)]/2\pi\} \quad (1)$$

其中 $\text{Int}\{\dots\}$ 表示取最接近整数的运算。以这种方式探测条纹边缘时通常都已隐含假定了图像数字化系统至少以 Nyquist 频率对条纹图采样, 从而在相邻像素 $i-1$ 和 i 之间的真实位相变化应在 $-\pi$ 到 $+\pi$ 范围内。超出 $-\pi$ 到 $+\pi$ 范围外的位相差值说明在相邻像素之间存在一个 2π 跃变间断, 于是 $d(i) = +1$ 或 $d(i) = -1$ 。沿所选路径上 2π 跃变间断的总和可由下式计算

$$v = \sum_{i=1}^N d(i) \quad (2)$$

于是像素 Q 点的位相值可由 P 点的位相值加或减 $2\pi v$ 来获得, 这称为对像素 Q 点的位相复原。由于真正的位相分布是空间位置的单值函数, 因此从原理上讲位相复原可以沿任意路径进行。在这种情况下, 用逐点位相展开算法^[3] 就可以复原整场的连续位相分布图。然而, 如果条纹图存在较大的噪声, 则会造成折叠位相图产生非正常跃变的间断, 其相应像素称为局部间断源。此时如果再用行列逐点位相展开算法就会在局部间断源处造成 2π 位相复原误差。又由于行列位相展开算法的逐点运算性质, 就会导致这种局部误差的传播。另一方面, 如果条纹图本身固有地存在物理间断区, 则在相应像素处也会产生非正常跃变的局部间断源。在此情况下使用行列位相复原算法同样会在局部间断区产生误差并导致局部误差的传播。这两类误差传播的结果都会在最终复原的连续位相分布图中造成阶梯式性态, 即“拉线”现象, 从而无法获得正确的条纹图位相解码。由于局部间断源的存在, 位相展开的结果与所选择的路径有关。

Goldstein^[4] 和 Huntley^[5] 分别证明: 通过构造局部间断源的分割网络可以避免这种局部误差源的传播。他们提出的算法可以有效处理含高频噪声的条纹图位相解码, 但不能处理包含分割间断区的条纹图; Stetson^[7], Vrooman^[8] 和 Anderson 等人^[9] 的工作表明, 利用模板标识出条纹图中的物理分割间断区域可以有效处理包含固有间断区域的条纹图, 但这些技术在处理信噪比差的条纹图时效果不理想。

3 混合模板匹配的位相解码板技术

为解决以往技术的局限性, 本文提出一种基于混合模板匹配的位相复原(解码)技术。这种位相解码技术由两个主要部分组成: (1) 条纹图物理间断区域和局部间断源的混合模板识别技术; (2) 基于混合模板匹配的位相复原(解码)算法。

3.1 条纹图物理间断区域的识别方法

一幅由三步相移算法计算的光学条纹图的广义振幅定义为^[9]

$$B(m, n) = \{3[I_0(m, n) - I_2(m, n)]^2 + [2I_1(m, n) - I_0(m, n) - I_2(m, n)]^2\}^{1/2} \quad (3)$$

其中, $I_1(m, n)$, $I_2(m, n)$ 分别表示引入相移后的干涉条纹强度。如果条纹图包含物理间断区,

则在间断区内的像素具有很低的广义振幅值,从而使条纹图在间断区内包含无效像素。这些无效像素丢失了位相的精度,导致了位相复原过程的局部误差传播。于是,根据广义振幅 $B(m, n)$ 值我们有可能通过设置阈值来识别间断区。当 $B(m, n)$ 小于某一规定的阈值 B_T 时,认为对应的 (m, n) 是无效像素;对于那些灰度值超过 255(饱和)的像素也作为无效像素。对所有的无效像素都作出一种相同的标志,例如,使其逻辑值为 1;而对所有有效像素则取逻辑值 0,我们就可以构造一个二值模板。这种二值模板可以非常有效地探测出条纹图中的物理间断区,例如,孔洞、边界等。在实际应用中我们发现取 $B_T = 64\sigma_n$,其中 σ_n 是条纹图标准偏差,不仅可以准确地标识出原始条纹图物理间断区,而且还可以在在一定程度上识别出由于高频噪声引起的折叠位相图中的局部间断源。由此,我们构造出第一层模板。

3.2 高频噪声局部间断源的识别方法

由第二节的讨论可知,如果将位相复原的路径选择为一条闭合回路,则围绕这条闭合回路的跃变数目的代数和为

$$s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \text{Int}\{[\Phi(i, j) - \Phi(i-1, j-1)]/2\pi\} \quad (4)$$

在离散条纹图中,最小的闭合回路由四相邻像素构成。对于这样的路径(顺时针走)跃变数目的代数和将总是 $-1, 0, +1$, Godstein 把它们称为“留数”^[4], $s = +1$ 对应于正留数; $s = -1$ 对应负留数。对于更大的闭合回路,跃变数目总的代数和只不过是这条闭合回路包围的所有留数的代数和。显然,对于正常条纹跃变,任何闭合回路内的净留数应该等于零。如果一个闭合回路内包含正或负留数,则这个闭合回路内就必然存在局部间断源。于是,通过搜索留数就可以识别出由于高频噪声导致的局部间断源的位置。由此可见,如果将相距最近的留数对全部连接起来使连接线上的留数的代数和为零,并且在位相复原过程中的路径不跨过这样的分割线,则可以隔离局部间断源并且不会产生局部误差的传播。将所有的分割线取逻辑 1,其余部分取逻辑值 0,我们就构造出另一个二值模板并将它作为第二层模板。

构造留数分割的算法如下:扫描折叠位相图文件直至发现一个留数。以这个留数为中心设置一个 3×3 的窗口(由 8 相邻像素构成)并继续在窗口内搜索另一个留数。如果发现符号相同的留数,则将窗口中心放置到新的留数位置并继续搜索;如果发现符号相反的留数,则记录在留数分割的二值模板文件中,将二者之间的像素设置为 1;如果窗口内不存在其它留数,则将窗口尺寸扩大到 5×5 进行搜索,直至发现符号相反的留数或搜索到数据边界为止,并记录在二值模板文件中。重复这样的过程,直至搜索完全部数据。这样就得到了隔离局部间断源的留数分割模板。

3.3 基于混合模板匹配的位相解码技术

将上述两层二值模板复合在一起,我们可以同时识别出由于条纹分割间断区域以及由于高频随机噪声导致的局部间断源。与此同时,复合模板同时也隔离了原始条纹图的间断区域和对应折叠位相图中的局部间断源。

利用复合模板识别出物理分割间断区和噪声局部间断源后,剩下的问题就是对由复合模板定义的有效像素区域进行位相解码。该算法可以对任意形状的区域进行位相复原。算法的基本思想是:位相解码路径不通过复合模板标识的无效像素区域及留数分割线,这样就同时避免了由于原始条纹图的物理间断区域和由于高频噪声导致的折叠位相图中的局部间断源的误差传播,从而得到正确的连续位相分布。基本方法是:按行进行位相复原。当扫描到某一行时,

将该行的所有有效像素点都进行位相复原。算法步骤如下:

首先搜索到条纹图最上和最左边的第一个有效像素,为编程序方便起见,将该像素的整数位相值置为 128。然后向右进行位相复原。当一有效行扫描完之后,对紧接的一行像素的第一个有效点相对前一行相应像素进行位相复原,然后向右对当前行其余像素进行位相复原;如果前一行相应像素也无效时,则根据边缘跟踪法(参见附录及参考文献[11])从当前位相尚未复原的像素搜索位相已经复原的有效像素,直至发现另一个位相已经复原的有效像素为止,并相对于该像素进行位相复原;如果边缘跟踪搜索又回到当前像素时,说明此部分像素构成独立区域。从而将当前像素的整数位相置为 128,按照上述步骤对该区域像素进行位相复原。对离散条纹图的全部数据进行相同处理,即可得到整个位相场的解码。

3.4 无效像素拟合

复合模板分割线隔离的无效像素将出现在解码后的位相场中。为了提高位相复原(解码)的精度,必须对这些无效像素进行插补,这可以通过对这部分像素逐点进行多面体拟合来实现。设平面方程为

$$ax + by + cz = 1 \quad (5)$$

并假设点 (i, j) 为无效像素,而其附近有不在同一直线的三点: (i_1, j_1) , (i_2, j_2) 和 (i_3, j_3) 。将其坐标值和灰度值代入(5)式,联合解出平面参数 a, b, c 。再将 i, j 代入下式得到该点的拟合值

$$z = \frac{(1 - ai - bj)}{c} \quad (6)$$

重复这一过程就可以获得由局部间断源产生的所有无效像素的拟合值。

4 计算机模拟和实验条纹图的处理结果

本节我们利用计算机模拟的条纹图和由实验获得的脉冲双曝光散斑相关条纹图验证混合模板匹配位相解码技术的有效性。分析过程由一套标准微机图像处理系统(386 DX 微机, CA 5200 图像处理卡)完成。计算机模拟的光学条纹图可以从如下模型获得,并假定背景光强和调制度均服从高斯分布,光强分布表示为:

$$I(m, n) = I_0(m, n) \{1 + b \cos[\Phi(m, n) + N(m, n)]\} D(m, n) \quad m, n = 0, 1, \dots, 255 \quad (7)$$

其中, $I_0(m, n)$ 为背景光强, $I_0(m, n)b$ 为光强调制度(b 为常数), $\Phi(m, n)$ 为待求的位相分布, $N(m, n)$ 为位相随机分布噪声, $D(m, n)$ 表示边界、孔洞等物理分割间断区域。

图 1(a)表示当取位相分布 $\Phi(m, n)$ 为双曲函数, $N(m, n)$ 为 0.0~4.5 均匀分布伪随机数的模拟散斑条纹图。在这幅条纹图中除了包含高频随机噪声(模拟散斑噪声)外,还存在边界和由两个任意形状的孔洞构成的物理分割间断区域。图 1(b)是图 1(a)经过 5×5 中值滤波后的结果。图 1(c)显示了根据三步相移算法获得的折叠位相分布图。图 1(d)是应用本文提出的基于混合模板匹配位相解码技术获得的复原位相分布图(经过多面体拟合处理后。)图 2(a)显示了根据设置广义振幅阈值构造的二值模板,它准确地识别出了原始条纹图中的边界和孔洞。图 2(b)显示出由于高频噪声(散斑噪声)导致的留数(局部间断源)分布图,其中白点表示正留数,黑点表示负留数。图 2(c)是我们构造出的复合二值模板,它同时标识了物理间断区域(原始条纹图的边界、孔洞)及局部间断源(随机噪声产生的留数)的分割。根据复合模板匹配的位相解码结果如图 2(d)所示(尚未经过多面体拟合处理)。由此图可见,局部间断源分割造成的

无效像素出现在解码后的位相场中。将图 2(d) 与图 1(d) 做一比较即可看出无效像素拟合后的效果。

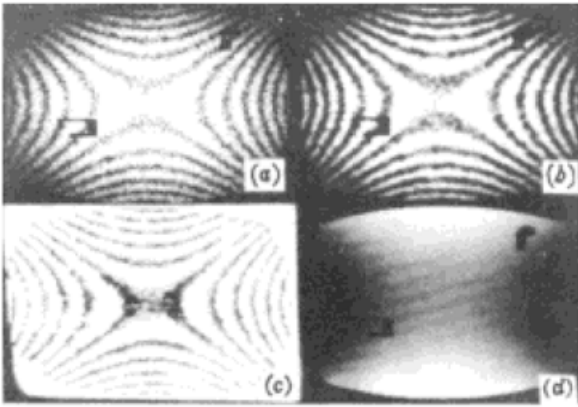


图 1 计算机模拟干涉图的位相解码

(a) 由散斑噪声、孔洞及边界覆盖的原始条纹图; (b) 条纹图(a) 经过 5×5 中值滤波后的结果; (c) 条纹图(a) 的折叠位相图; (d) 展开后的位相分布(经过插值)

Fig. 1 Phase decoding with computer-simulated interferogram

(a) original interferogram overlaid speckle noise, holes and boundary; (b) 5×5 median filtering of (a); (c) wrapped phase map of (a); (d) unwrapped phase distribution (after interpolation)

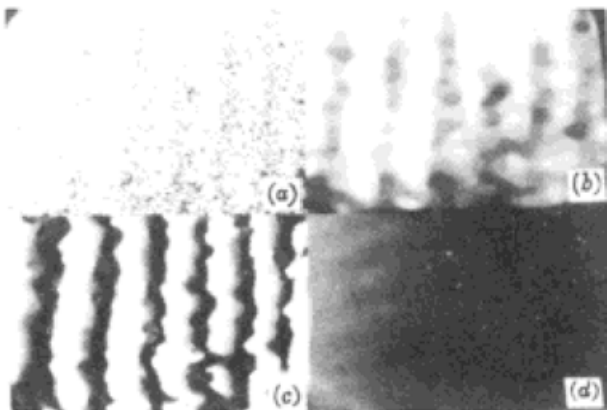


图 3 实验干涉图的位相解码

(a) 散斑相关条纹图; (b) 条纹图(a) 经过 13×13 中值滤波后的结果; (c) 条纹图(a) 的折叠位相图; (d) 位相解码的结果

Fig. 3 Phase decoding with experimental interferogram

(a) speckle correlation interferogram; (b) 13×13 median filtering of (a); (c) wrapped phase map of (a); (d) result of phase decoding

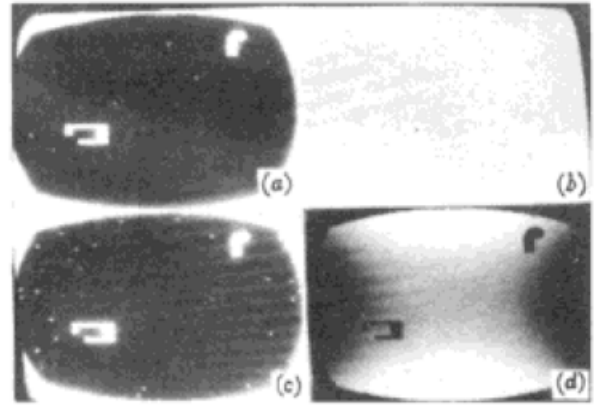


图 2 误差源辨识及位相展开

(a) 广义振幅模板; (b) 留数分布图; (c) 复合模板; (d) 展开的位相图(插值前)

Fig. 2 Error sources recognition and phase unwrapping

(a) general amplitude mask; (b) residual distribution map; (c) composite mask; (d) unwrapped phase map (before interpolation)

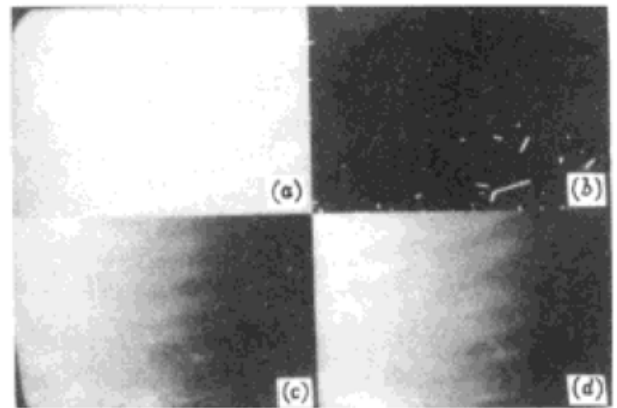


图 4 局部误差源的识别及位相图插值

(a) 折叠位相图中的留数分布; (b) 复合模板; (c) 未经插值的位相展开图; (d) 插值后的位相展开图

Fig. 4 Local error source recognition and phase map interpolation

(a) residual distribution in wrapped phase; (b) composite mask; (c) unwrapped phase map before interpolation; (d) unwrapped phase map after interpolation

图 3 和图 4 显示了混合模板匹配位相解码技术应用于脉冲双曝光散斑相关条纹图的处理

结果。图 3(a) 是反映物体动态位移(离面线性位移)的原始双曝光散斑相关条纹图, 这幅条纹图具有很差的调制度和信噪比。图 3(b) 是原始条纹图(图 3(a)) 经过 13×13 中值滤波的结果。图 3(c) 是根据三步相移算法得到的折叠位相图, 从此图可以清楚地看出由于散斑噪声导致折叠位相图中的非正常跃变, 即局部间断源的存在。图 3(d) 显示了应用本文位相解码算法的处理结果。由于原始条纹图不存在边界和孔洞, 所以复合模板仅有一层。相应于随机噪声的留数分布图和局部间断源分割图分别由图 4(a) 和图 4(b) 所示。图 4(c) 和图 4(d) 分别显示了无效像素拟合前后的结果比较。

5 结 论

对计算机仿真条纹图以及对从实验中获得的脉冲双曝光散斑相关条纹图的分析表明: 本文提出的基于混合模板匹配位相解码技术可以有效地应用于包含物理间断区域和高频随机噪声的光学条纹图的自动分析。这种位相解码方法对于诸如数字莫尔、数字全息和数字散斑干涉技术以及粒子成像测速技术等具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- 1 P. K. Rastogi. Holographic interferometry. Berlin: Springer-Verlag, 1994, 151~ 209
- 2 P. Stephenson, D. R. Burton, M. J. Lator. Data validation techniques in a tiled phase unwrapping algorithm. *Opt. Eng.*, 1994, **33**(11) : 3703~ 3708
- 3 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1) : 156~ 160
- 4 R. M. Godstein, H. A. Zebker, C. L. Werner. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.*, 1988, **23**(4) : 713~ 720
- 5 J. M. Huntley. Noise-immune phase unwrapping algorithm. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(15) : 3268~ 3270
- 6 D. J. Bone. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(25) : 3627~ 3632
- 7 K. A. Stetson. Phase-step interferometry of irregular shapes by using an edge-following algorithm. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25) : 5320~ 5325
- 8 H. A. Vrooman, A. M. Maas. Image processing algorithm for the analysis of phase-shifted speckle interference patterns. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(13) : 1636~ 1641
- 9 K. Anderson, Q. Yu. Robust phase unwrapping by spin filtering combined with a phase direction map. *Optik*, 1993, **94**(4) : 145~ 149
- 10 D. C. Ghiglia, G. A. Mastin, L. A. Romero. Cellular-automata method for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am.*, 1987, **4**(1) : 267~ 280
- 11 T. Pavlidis. Algorithms for Graphics and Image Processing. Chp. 7. Computer Science Press, Inc., 1992

Phase Decoding of Interferogram with Random Noise and Segmented-discontinuity

Peng Xiang Zhu Shaoming Ye Shenghua

(Institute of Precision Instrumentation & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract A phase decoding technique is proposed to solve the problem of phase re-

trieval from an optical interferogram that is overlaid with random noise and segmented-discontinuity. The technique is on the basis of a composite mask matching combined with a special phase unwrapping algorithm. The computer aided analysis and experimental interferograms show that the technique can be quite efficient in phase unwrapping procedure for interferograms in which speckle noise or true phase discontinuities or both may exist.

Key words optical inference, automatic fringe analysis, phase unwrapping

附录: 边缘跟踪方法

边缘跟踪的基本思想是: 从当前有效像素开始, 依次由前、左和右边相邻像素顺序搜索有效像素直至该集合内的有效像素全部找到为止。如图 5 所示。

$i - 1, j - 1$	$i - 1, j$	$i - 1, j + 1$
$i, j - 1$	i, j	$i, j + 1$
$i + 1, j - 1$	$i + 1, j$	$i + 1, j + 1$

图5 边缘跟踪的像素分布

Fig. 5 Pixels distribution for contour tracing

假定首先发现有效像素 (i, j) , 将其在模板文件对应像素位置做上标志, 然后搜索另一有效像素。此时根据当前有效像素的位置分 5 种情况分别按照不同路径

搜索下一个有效像素: (1) 如果点 (i, j) 是第一个有效点, 则认为此时搜索方向是从左到右, 于是依次从左(点 $(i - 1, j)$)、前方(点 $(i, j + 1)$) 或右方(点 $(i + 1, j)$) 等相邻像素寻找另一有效点; (2) 如果当前有效像素是点 $(i, j - 1)$, 此时与 (1) 情况相同, 即搜索方向为从左到右, 因此先后依次从左方(点 $(i - 1, j - 1)$)、前方(点 (i, j)) 和右方(点 $(i + 1, j - 1)$) 等相邻像素寻找另一个有效点; (3) 如果当前有效像素为点 $(i - 1, j)$, 此时搜索方向为从上到下, 先后依次从左方(点 $(i - 1, j + 1)$)、前方(点 (i, j)) 或右方(点 $(i - 1, j - 1)$) 等相邻像素寻找另一有效点; (4) 如果当前有效像素为点 $(i + 1, j)$, 此时搜索方向为从下到上, 先后依次从左方(点 $(i + 1, j - 1)$)、前方(点 (i, j)) 或右方(点 $(i + 1, j + 1)$) 等相邻像素寻找另一有效点; (5) 如果当前有效像素为点 $(i, j + 1)$, 此时搜索方向为从右到左, 先后依次从左方(点 $(i + 1, j + 1)$)、前方(点 (i, j)) 或右方(点 $(i - 1, j + 1)$) 等相邻像素寻找另一有效点; 如果搜索到有效像素, 将其在模板对应位置作出标记, 并且从该点开始按照上述路径继续搜索有效像素; 如果没有搜索到有效路径, 则说明此次边缘跟踪已经完成。如果是跟踪无效像素, 则是先后依次从左方、前方和右方相邻像素搜索; 如果是跟踪无效像素, 则是先后依次从左方、前方和右方相邻像素搜索。具体步骤与上同。