

禁忌搜索在最小不连续相位展开算法中的应用

张 婷 路元刚 张旭苹

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

摘要 Flynn 最小不连续相位展开算法能成功展开多种类型的包裹相位数据, 但该算法在整个包裹相位图像中循环搜寻相位不连续区域, 使整个图像的相位不连续最小, 计算量大, 效率较低。为了克服该缺点, 将禁忌搜索的思想应用于最小不连续相位展开算法中, 利用包裹相位图的质量图, 按照质量从劣到优把所有节点划分到不同的等级, 将高质量区域的节点暂时禁忌。这种禁忌搜索策略, 优先在低质量区域搜索相位不连续, 确保搜索区域从不连续概率最高的区域开始, 因此最大可能地减少了无用的搜索过程, 加快了算法的收敛速度, 提高了相位展开算法的运行效率。

关键词 信息光学; 图像处理; 相位展开; 禁忌搜索

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2169

The Application of Tabu Search on Minimum Discontinuity Phase Unwrapping Algorithm

Zhang Ting Lu Yuangang Zhang Xuping

(Institute of Optical Communications Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract Flynn's minimum discontinuity algorithm can be used to successfully solve many different kinds of phase unwrapping problems, but its main drawback is that it requires a large amount of computations and has low efficiency in searching for the phase's discontinuity areas because it takes the whole phase image as the cycling search area. To overcome this drawback, a new minimum discontinuity algorithm based on tabu search is proposed. In the new algorithm, the quality map of wrapped phase is used to classify the total nodes into several ranks from low to high according to the value of quality. The nodes within high quality areas are temporarily taboo, and those within low-qualified areas are searched for phase discontinuity in priority. This tabu search strategy ensures the search process starts from the areas whose probability of discontinuity are highest, and thus can avoid the useless search as much as possible, speed up the convergence rate of the algorithm, and improve the operational efficiency of the phase unwrapping algorithm significantly.

Key words information optics; image processing; phase unwrapping; tabu search

1 引 言

相位展开技术在光学干涉测量、干涉合成孔径雷达、自适应光学、医学磁共振图像处理等领域有广泛的应用^[1]。研究对象的信息通过反正切计算得到的包裹相位值, 它们仅是实际相位在 2π 主值区间内的值, 即处于 $(-\pi, \pi]$ 内的相位值。相位展开就是将包裹相位恢复为真实相位值的过程^[2]。

相位展开方法主要可分为时间相位展开方法和空间相位展开方法。时间相位展开方法^[3~6] 基于采

用光栅投影的相位法轮廓测量术, 可避免相位展开误差在空间中的传播, 但需在不同时刻产生不同频率的投影光栅图像, 测量速度和应用范围受到很大的限制。而空间域相位展开方法仅需根据包裹相位图的 2π 相位跳变及其展开相位图的连续特征等空间信息来进行相位展开, 效率高, 适用范围广。从本质上说, 空间域相位展开方法是二维相位展开方法。

目前, 人们已经研究了多种二维相位展开算法^[7], 主要分为基于路径跟踪的相位展开算法^[8~11]

收稿日期: 2008-10-23; 收到修改稿日期: 2008-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(60607007)资助课题。

作者简介: 张 婷(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事二维相位展开技术方面的研究。

导师简介: 路元刚(1977—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学干涉测量等方面的研究。E-mail: luyg@nju.edu.cn (通信联系人)

和基于最小范数的相位展开方法^[12,13]。然而还没有任何一种相位展开方法能够解决所有的相位展开问题。Flynn 于 1997 年提出的最小不连续算法(简称“Flynn 算法”),能够对多种不同特征的包裹相位图实现展开,效果比较理想。如果一对相邻的像素的包裹相位值的差超过 π , Flynn 算法将之称为一个“不连续”。Flynn 算法以一个特定的路线结构图引导相位展开,使得展开相位的所有的不连续总和最小。然而 Flynn 算法在整个包裹相位图像中进行遍历的循环扫描,而其中大量的搜索是在非相位不连续区域中进行的,对于最终的相位展开是无贡献、冗余的。因而 Flynn 算法存在占用资源大、运行效率低的缺陷。

本文针对 Flynn 算法的不足,将禁忌搜索的思想应用到最小不连续相位展开算法中,使对相位不连续的搜索局限于有效区域。数字模拟和实验结果表明,这种算法在很大程度上减少了冗余的搜索过程,提高了运行效率,是一种有效的相位展开新算法。

2 最小不连续相位展开算法的基本原理^[7,11]

假设像元 (m, n) 处的包裹相位为 $\phi_{m,n}$, 展开相位为 $\phi'_{m,n}$, 二者满足关系: $\phi'_{m,n} = \phi_{m,n} + 2\pi c_{m,n}$ 其中整数 $c_{m,n}$ 称为“包裹数”。在包裹数 $c_{m,n}$ 的选取上, 以使 (m, n) 处的展开相位与其相邻像元展开相位之间的“不连续”最小为原则。展开相位之间的不连续表现为展开相位值的跳跃。沿垂直方向和水平方向, 定义像元 (m, n) 处的跳跃数分别为:

$$v_{m,n} = \text{Int}\left(\frac{\phi_{m,n} - \phi_{m-1,n}}{2\pi}\right), z_{m,n} = \text{Int}\left(\frac{\phi_{m,n} - \phi_{m,n-1}}{2\pi}\right)$$

这里函数 $\text{Int}(x)$ 表示取最接近 x 的整数。跳跃数与包裹数是有联系的。包裹数 $c_{m,n}$ 的增加会引起跳跃数 $v_{m,n}$ 和 $z_{m,n}$ 增加, $v_{m-1,n}$ 和 $z_{m,n-1}$ 减少; 反之, 跳跃数变化也会引起包裹数变化。整个包裹相位图跳跃数总和定义为

$$E = \sum |v_{m,n}| + \sum |z_{m,n}|, \quad (1)$$

它是全局相位不连续性的衡量标准。若提供质量图, 可以加上质量相关的权重。

最小不连续算法的目标就是通过识别包裹相位图像中相位差大于 π 的边界, 然后对边界内的相位加上 2π 的整数倍, 通过一定的操作改变包裹相位图对应的跳跃数, 使跳跃数总和 E 最小。跳跃数 E 减少时, 包裹数 $c_{m,n}$ 也减少了, 这样就达到了展开包

裹相位的目的, 最终得到最小不连续解。

在改变包裹相位图对应的跳跃数的操作中, 算法在包裹相位图的像元阵列平面上引入一个“节点”阵列, 其阵列点在水平和垂直方向上与像元点之间的距离, 为相邻像元间距的 $1/2$ 。通过扫描在节点之间添加不同方向的“边”, 从而找到闭合的“边界线”, 也称为“增长环”, 对由增长环隔开的环内外像素的跳跃数组进行增减操作, 从而实现对边界内的像元的相位增加 2π 的整数倍来减小跳跃数总和 E , 使不连续趋于最小, 实现相位的展开。

Flynn 算法相位展开可分为 3 步: 首先计算包裹相位图中的跳跃数; 其次, 搜寻构造闭合的“边界线”以生成增长环, 对增长环包围的闭合边界内的相位加上 2π 的整数倍, 使跳跃数减少; 最后, 依据跳跃数计算展开相位。

3 基于禁忌搜索的最小不连续相位展开新算法

Flynn 最小不连续算法的循环扫描是一个遍历过程, 而其中大量的扫描过程添加了多余的不能构成增长环的边, 使得 Flynn 算法占用资源大, 运行效率低。实际上相位不连续的区域仅是包裹相位图的极少部分区域, 这些区域与跳跃数不为 0 的区域以及质量较差的区域往往有很大的交集, 因此可应用禁忌搜索的思想, 在搜索增长环时把质量较高、形成增长环概率很低的节点禁忌, 同时通过设定一定的特赦规则将一些节点解禁, 可保证搜索过程尽可能处于有效区域, 以提高算法的运行效率。

3.1 禁忌搜索算法的基本原理

禁忌搜索 (Tabu search, TS) 的思想最早由 Glover 提出^[14], 它是对局部邻域搜索的一种扩展。TS 通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过特赦规则来赦免一些被禁忌的优良状态, 从而保证对不同的有效搜索途径的探索。它的一般描述如下:

(1) 随机选取初始解 x_{now} , 令 $x_{\text{best}} = x_{\text{now}}$; 选取禁忌表 H 。

(2) 若满足终止规则, 停止计算, 输出结果; 否则转(3)。

(3) 在 x_{best} 的邻域 $N(x_{\text{best}})$ 中选取满足不受禁忌的候选解集 $N'_{x_{\text{best}}}$, 在候选集 $N'_{x_{\text{best}}}$ 中选一个评价函数最佳的解 x_{now} , 令 $x_{\text{best}} = x_{\text{now}}$, 更新禁忌表 H , 转步骤(2)。

3.2 禁忌搜索在最小不连续相位展开算法中的应用

一般而言,设计禁忌搜索算法需要考虑到的主要因素有初始解、适配值函数、邻域结构、禁忌表、禁忌长度、特赦规则和终止规则。

1) 初始解和适配值函数

在 Flynn 最小不连续算法中,只要确定所有相位的包裹数 $c_{m,n}$,也就确定了最终的展开相位。而包裹数可根据跳跃数 $v_{m,n}$ 和 $z_{m,n}$ 来决定的,所以新算法根据原始包裹相位数据计算出跳跃数 $v_{m,n}$ 和 $z_{m,n}$,将其作为初始解。适配值函数用于对搜索状态的评价,进而结合禁忌准则和特赦规则来选取新的当前状态。在最小不连续算法中,(1)式中的跳跃数总和 E 是全局相位不连续性的衡量标准。算法的最终目标就是使得 E 趋于最小,所以新算法选取跳跃数总和 E 作为适配值函数。

2) 邻域结构

基于禁忌搜索思想的新算法,在每一搜索过程中是通过识别数据图像中相位差大于 π 的边界,搜寻“增长环”,然后对环两侧的跳跃数进行操作。所以只有在搜寻到增长环时,才有可能发生跳跃数的改变,即相位展开解的移动。新算法每次增长环搜索都选取不连续概率最大的区域(跳跃数不为 0 或者质量最差的区域),将在该区域内搜寻到的增长环触发的跳跃数增减作为解的邻域结构。

3) 禁忌对象和禁忌长度

禁忌对象就是被放入禁忌表中的那些变化元素。在最小不连续相位展开问题中,解的变化通过增长环的生成来实现,所以通过禁忌某些节点,就禁忌了某些环的生成,从而禁忌了某些解的改变。

包裹相位图的质量图^[7]在一定程度上能够准确反应包裹相位图的实际相位不连续情况。质量较低的区域,往往是实际相位不连续区域,而质量高的区域,出现实际相位不连续的概率较低。因此优先在不连续概率较高的区域内搜索增长环,可使搜索过程更加高效。在新算法中,由于搜索的对象是节点,需要将像素质量图在 x 和 y 方向上将其大小从 x_{size} 和 y_{size} 扩充为 x_{size+1} 和 y_{size+1} ,以保持与节点阵列相对应。以此节点质量图作为重要依据,禁忌对象选择为质量较高区域中的节点。

根据包裹相位计算得到的跳跃数不为 0 的区域,是包含实际相位不连续可能性最大的区域,我们将这些不连续区域的节点称为非零跳跃数节点。为提高相位展开算法的运行效率,将质量图从低到高划分为 N 个等级。首先将非零跳跃数节点集合和

质量最低的一组节点划为等级 0,其余像素对应的节点质量按其像素质量,从低到高依次划分到 1,2, ..., $N-1$ 等级。 N 越大,算法的精度越高,但搜索运行时间越长。在扫描低等级的节点时,高等级的节点则将被加入禁忌表中。

禁忌长度是被禁忌对象不允许选取的迭代次数。在本算法中,位于等级 $m(0 \leq m \leq N-1)$ 的节点的禁忌长度为扫描 0 到 $N-1$ 等级节点直到没有更小的 E 出现的循环次数。

4) 特赦规则

在 TS 算法的迭代过程中,会出现候选集中的全部对象都被禁忌,或有一个对象被禁忌,但若解禁则导致目标函数值会有较大的下降。在这两种情况下,为了达到全局的最优,应该让一些禁忌对象重新可选,这种方法称为特赦,相应的规则称为特赦规则。

为了让搜索更加有效,将高质量区域内的节点禁忌,但是有些环的构成必须经过高质量区域。所以在对于低等级区域扫描后未发现更优的解,则将解禁更高等级的节点区域,以便发现更优的解。

5) 终止规则

禁忌长度如果取得充分大,会对状态空间遍历搜索,往往达不到优化的效果。因此实际设计算法时,通常需要一个终止规则来结束算法的搜索进程。在最小不连续相位展开算法中,可以选取某质量值或某质量等级(T)作为终止规则,当扫描的节点的质量值达到某值后或者说扫描到质量等级 $m(m < T)$ 的节点时,没有更优的解,即没有新的增长环产生,则终止搜索。

3.3 新算法流程

以质量图作为依据,将禁忌搜索的思想应用到最小不连续相位展开算法上,可以使得算法搜索更加集中有效,避免在高质量区域产生多余的边。

在进入循环扫描过程前,算法还对原始跳跃数组进行了两个预处理过程,其作用在于去除零散噪声,以及使搜寻增长环过程更加有效。两个预处理过程如下:

1) 去除孤立非零跳跃数节点

以该非零跳跃数节点为中心,在 3×3 或更大的邻域范围内,包括其本身如果共有不多于 2 个非零跳跃数节点,即可认定在该局部区域不能形成有效增长环,则可将该邻域范围内的非零跳跃数节点添加到禁忌表中。

2) 斜对角非零跳跃数节点的处理

由于最小不连续算法中所添加的“边”只有水平和垂直两个方向,不可能出现倾斜的边,所以如果非零跳跃数节点为斜对角分布,如图 1(a)所示,则无法有效构成边。因此需要将其补全为直角结构。如

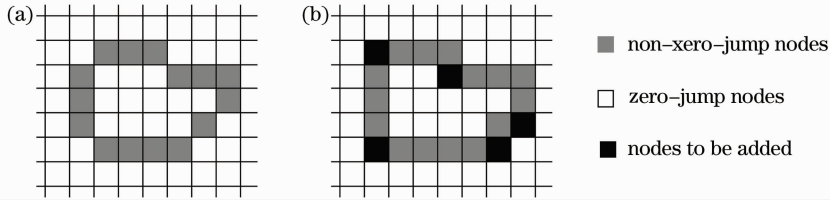


图 1 斜对角非零跳跃数节点的处理

Fig. 1 The handling of diagonal non-zero-jump nodes

新算法具体步骤如下:

Step1 根据原始包裹相位计算得出跳跃数阵列 h_{jump} 、 v_{jump} 和节点质量图,禁忌表置空。

Step2 将非零跳跃数节点集合设扫描等级为 0,其他节点按质量图高低依次划分为等级 1 到等级 $N-1$ 。初始扫描等级 $R_{\text{now}}=0$,而质量等级为 1 到 $N-1$ 的节点加入禁忌表,设为禁忌状态;设定终止搜寻的等级数为 $T(T < N)$ 。

Step3 在二维节点阵列图中逐行逐列扫描非零跳跃数节点,若该节点四邻点中存在不少于 2 个非零跳跃数节点,则将其零跳跃数节点添加到禁忌表中,等级设为 $N-1$ 。

Step4 逐行逐列扫描二维节点阵列中未禁忌的节点,将孤立的非零跳跃数节点加入禁忌表。

Step5 处理斜对角非零跳跃数节点,将补充的

图 1(b)中黑色节点就是所添加的节点,将它们添加到当前扫描列表中,并设其质量等级为 0,这样处在对角的两个非零跳跃数节点就可以通过一个水平和一个垂直的边连接起来。

节点设为非禁忌状态,等级为 0。

Step6 逐行扫描非禁忌状态的节点,添加边,若出现增长环,进行跳跃数增减操作,移除环。重复这个过程,直到没有新的边被添加,也没有新的增长环被移除。

Step7 R_{now} 加 1,更新禁忌表,将小于等级 R_{now} 的节点解禁,大于等级 R_{now} 的节点保留于禁忌表中。

Step8 判断是否满足终止规则,若满足,终止搜索,展开包裹相位;若不满足,转 Step6。

4 结果与讨论

4.1 螺旋剪切图的相位展开

图 2(a)为计算机模拟的一个螺旋剪切表面的包裹相位图,图像大小为 $257 \text{ pixel} \times 257 \text{ pixel}$ 。展开该包裹图像,使用了相位导数方差质量图^[7],质量

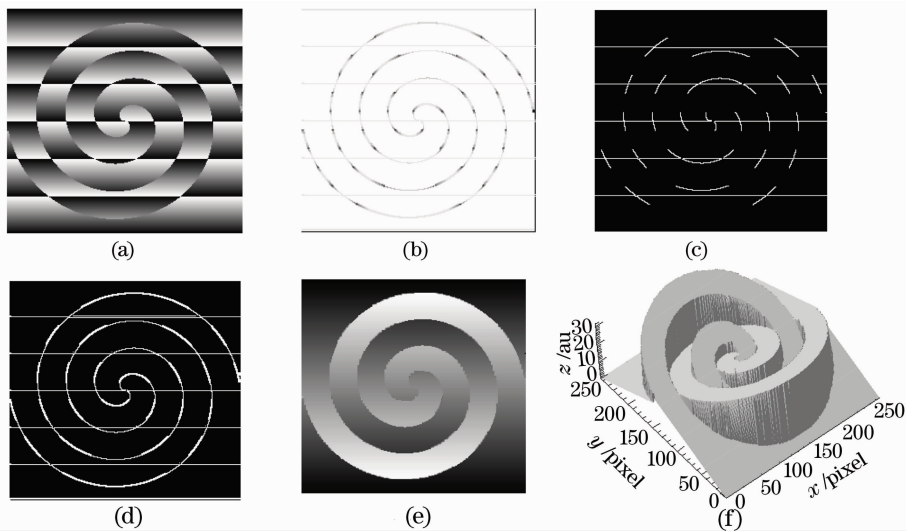


图 2 螺旋平面剪切包裹相位图的相位展开。(a)包裹相位图;(b)分级质量图(总级数为 10);(c)等级为 0 的节点集合(白色区域);(d)等级小于终止等级($T=9$)的节点集合(白色区域);(e)相位展开结果;(f) (e)对应的三维显示

Fig. 2 Unwrapping of a simulated wrapped phase image with surface discontinuities. (a) wrapped phase image; (b) ranked quality map (total rank $N=10$); (c) nodes whose quality rank equal 0 (in white); (d) nodes whose quality rank smaller than terminate rank $T=9$ (in white); (e) unwrapped result; (f) three-dimensional rendering of (e)

值在 0~1 之间,选取总等级 $N=10$,除非零跳跃数节点集合为等级 0 外,其余按质量大小平均等分,将节点分配至等级 1~9。终止等级 T 定为 9,也就是搜索只在等级 0~8 内进行。图 2(b)是分级后的质量图,黑色的为质量最差的节点,等级最低。图 2(c)中白色区域是等级为 0 也是第一批非禁忌状态的节点集合,图 2(d)中白色区域是等级 $n = T = 9$

表 1 新算法与 Flynn 算法对螺旋剪切包裹相位图的展开效率比较

Table 1 The efficiency comparison of the new algorithm and the Flynn's algorithm in unwrapping the spiral wrapped phase data

Algorithm	The number of edges	The number of improving loop	The relative processing time %
Flynn's algorithm	2424434	476	100
Algorithm based on TS	292859	93	25.6

4.2 IFSAR 模拟数据包裹相位图展开

图 3(a)为模拟的 IFSAR 数据包裹图^[15],图像大小为 512 pixel×578 pixel 像素。在新算法中,使用了伪相关质量图^[7],选取整幅图像的质量平均值作为第一个分级值,小于该值的节点加入等级 1,然后选取第一个分级值与最大质量值的中值作为第二个分级值,将介于第一和第二分级值的节点加入等级 2,以此类推,并将终止等级定为最高等级。若终止等级定为最高等级,那么等级分得越多,被禁忌的节点越少,扫描的范围就越大,循环次数也越多,效率相对也会更低些。表 2 是总等级数分别为 3、4 和 5 时算法的运行情况。可在不降低相位展开质量的前提下,选择较小的总等级数,以提高算法

表 2 基于不同质量分级的新算法与 Flynn 算法对 IFSAR 包裹相位图的展开结果比较

Table 2 The efficiency comparison of the new algorithm with different quality classification and the Flynn's algorithm in unwrapping the IFSAR wrapped phase data

Algorithm	The number of edges generated	The number of improving loop	Processing time /s
New algorithm based on TS	Total classification ranks $N=5$	26298757	74.562
	Total classification ranks $N=4$	22106648	62.484
	Total classification ranks $N=3$	16490338	47.296
Flynn's algorithm	50323522	68463	79.875

4.3 光纤连接器端面包裹相位图的相位展开

图 4(a)为通过正弦相位干涉测量方法获得的光纤连接器端面的包裹相位图像。图像大小为 512 pixel×512 pixel。对本包裹相位图采用了伪相关质量图,总等级数 $N=4$ 。跳跃数非零节点等级设为 0,质量值范围在 0~1 之间,平均值为 0.94,把质量值在 0~0.94 之间的节点设置为等级 1,0.94~1 之间平均分为后 2 个等级(即等级 2 和 3),图 4(b)中

时的搜索范围,占整幅图像面积的 9.67%。

新算法与 Flynn 算法对螺旋剪切包裹相位图的展开效率比较如表 1 所示。从表 1 可以看出,对于该包裹相位图,与 Flynn 最小不连续算法相比,新算法生成的边数和增长环数小了一个量级,时间也仅为原算法的 25.6%,运行效率显著提高。

的运行效率。图 3(b)为总等级数为 3 的相位展开结果。

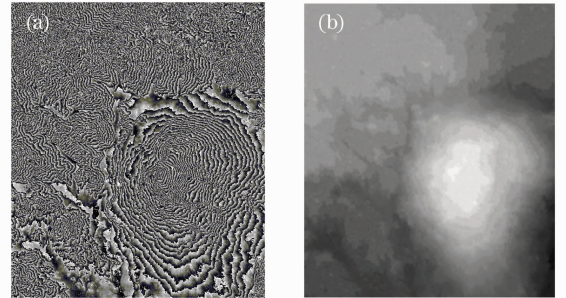


图 3 (a) IFSAR 包裹相位图;

(b) 总等级数为 3 时的相位展开结果

Fig. 3 (a) Wrapped IFSAR phase image; (b) unwrapped result when the total classification ranks $N=3$

白色区域是等级 $n = T = 3$ 时的搜索范围,占图像总面积的 28.23%,黑色部分即被禁忌的节点。图 4(c)和图 4(d)是分别用基于禁忌搜索思想的新算法与 Flynn 算法得到的展开结果。利用新算法得到的光纤连接器端面重复测量误差小于 2 nm。可以看到,在展开效果上,新算法比 Flynn 算法更可靠。主要是新算法禁忌了质量较好的节点,在一定程度上避免局部误差的扩散,在效率上也提高许多,详见表 3。

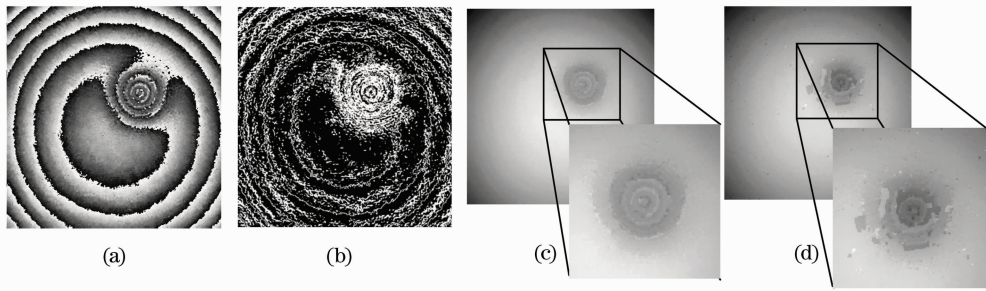


图 4 光纤连接器端面包裹相位图的相位展开。(a) 包裹相位图;(b) 未被禁忌的节点集合(白色区域);
(c)新算法的展开结果;(d)Flynn 算法的展开结果

Fig. 4 Unwrapping of a wrapped phase image of an optical fiber connector endface: (a) wrapped phase image; (b) nodes that aren't in the tabu list(white areas); (c)unwrapped result of new algorithm; (d) unwrapped result of Flynn's algorithm

表 3 新算法与 Flynn 算法对光纤连接器端面包裹相位图像的展开效率比较

Table 3 The efficiency comparison of the new algorithm and the Flynn's algorithm in unwrapping of a wrapped phase image of an optical fiber connector endface

Algorithm	The number of generated edges	The number of improving loop	The relative processing time %
Flynn's algorithm	7166970	4973	100
Algorithm based on TS	210125	1492	10.82

5 结 论

本文针对最小不连续算法效率较低的缺陷,结合禁忌搜索的思想,提出了一种快速可靠的相位展开新算法。新算法基于最小不连续算法,利用包裹相位图的质量,按照质量从劣到优把节点划分到不同的等级,将高质量区域的节点暂时禁忌。利用禁忌搜索策略,最大可能地减少了无用的搜索过程,加快了算法的收敛速度,显著提高了相位展开算法的运行效率。实验结果表明,本文算法在效率上优于 Flynn 最小不连续算法,并能得到较好的相位展开结果。

参 考 文 献

- 1 V. V. Volkov, Y. Zhu. Deterministic phase unwrapping in the presence of noise[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(22): 2156~2158
- 2 K. Itoh. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(14): 2470~2470
- 3 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(17): 3047~3052
- 4 Lei Zhihui, Li Jianbing. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency frings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 39~42
雷志辉,李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 39~42
- 5 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267
盖绍彦,达飞鹏. 一种新的快速解相位方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- 6 Hu Chunguang, Hu Xiaodong, Li Dachao *et al.*. Application of

three-dimensional phase unwrapping algorithm in precision motion measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 68~72

胡春光,胡晓东,栗大超等. 三维相位展开算法在精密运动测试中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 68~72

- 7 D. C. Ghiglia, M. Pritt. Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software [M]. New York: Wiley-Interscience publication, 1998
- 8 R. Goldstein, H. Zebker, C. Werner. Satellite radar interferometry two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio. Sci.*, 1988, **23**(4): 713~720
- 9 T. J. Flynn. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[C]. *Proceeding of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, NJ*, 1996, 2057~2059
- 10 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
- 11 T. J. Flynn. Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(10): 2692~2701
- 12 D. C. Ghiglia, L. A. Romero. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(1): 107~117
- 13 J. L. Marroquin, M. Rivera. Quadratic regularization functionals for phase unwrapping[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(11): 2393~2400
- 14 F. Glover, E Tailard, D de Werra. A user's guide to tabu search [J]. *Ann. Oper. Res.*, 1993, **41**(1-4): 3~28
- 15 Yongjian Zhu, Liren Liu, Zhu Luan *et al.*. A reliable phase unwrapping algorithm based on the local fitting plane and quality map[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2006, **8**(6): 518~523