

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106144

## 改进枝切法在动态三维重建中的应用\*

常丽 杨志超 郭雨梅 修国一

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院 沈阳 110870)

**摘要:** 枝切相位展开方法因其对噪声有较好地抑制效果而被广泛使用。但是枝切法构造的枝切线不一定是全局最短且容易形成封闭枝切线,造成相位展开错误。因此,提出了基于禁忌搜索的改进枝切法。使用最近邻算法对正负残差点进行匹配得到初始解,然后使用禁忌搜索算法对初始解进行优化全局构造枝切线。通过仿真对算法进行了测试,该算法比枝切法构造的枝切线长度减少了42%,速度提高了28%。并对变化的人脸表情进行了动态三维形貌重建实验,结果表明该算法具有较好的相位展开精度。

**关键词:** 二维相位展开;枝切算法;禁忌搜索算法;三维形貌重建

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Application of improved branch-cut algorithm in dynamic  
3D reconstruction

Chang Li Yang Zhichao Guo Yumei Xiu Guoyi

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The branch-cut phase unwrapping algorithm is widely used because of its better noise suppression effect. However, the branch-cuts constructed by the branch-cut algorithm may not be the shortest globally, and it is easy to form a closed branch-cuts, resulting in phase unfolding errors. Therefore, an improved branch-cut algorithm based on tabu search is proposed. The nearest neighbor algorithm is used to match the positive and negative residues to obtain the initial solution, and then the tabu search algorithm is used to optimize the initial solution to construct the branch-cuts globally. The algorithm was tested by simulation, and the algorithm reduced the length of the branch-cuts constructed by the branch-cut algorithm by 42% and increased the speed by 28%. And the dynamic three-dimensional shape reconstruction experiment is carried out on the changed facial expressions, and the results show that the improved algorithm has better phase unwrapping accuracy.

**Keywords:** two-dimensional phase unwrapping; branch-cut algorithm; tabu search algorithm; 3D shape reconstruction

## 0 引 言

条纹投影轮廓术是非接触三维形貌测量中的一种重要方法,因为其具有高速、高精度的优点已经被广泛应用于许多研究领域<sup>[1-3]</sup>。在条纹投影轮廓术中,常用的方法包括相移轮廓术、傅里叶变换轮廓术和小波变换轮廓术3种<sup>[4-6]</sup>。然而这些方法在提取相位信息时使用的是反正切函数,存在一个缺点:真实相位被包裹在从 $-\pi \sim \pi$ 的范围内,必须将被包裹的相位展开才能取得真实的相位,因此如何对包裹相位图进行相位展开是条纹投影轮廓术中的关键问题<sup>[7]</sup>。

目前常用的相位展开算法包括时间相位展开和空间相

位展开两种方法<sup>[8]</sup>。时间相位展开算法沿时间坐标投影多组具有不同频率的光栅条纹,并分别展开每个像素的相位。该方法具有高分辨率和高精度的优点,可用于测量复杂的物体<sup>[9]</sup>。空间相位展开只需要对单张相位包裹图进行处理,并且根据围绕像素的局部邻域内的相位值计算像素的包裹相位。典型的空相相位展开方法有 Goldstein 枝切法<sup>[10]</sup>、质量图指导方法<sup>[11]</sup>和最小二乘方法<sup>[12]</sup>。其中 Goldstein 等提出的枝切法是一种强大的抗噪声相位展开算法,该方法通过构造枝切线并在相位展开时将其避开,就可以避免误差传播。一般而言,较短的枝切线可以得到更好的相位展开结果<sup>[13]</sup>。但是,由于 Goldstein 算法构造的总枝切线长度可能不是全局上最短的,且在相位展开的过

收稿日期:2021-03-25

\* 基金项目:沈阳市科技局科研计划(F16-205-1-11)项目资助

程中枝切线容易形成闭环,使得闭环中的相位无法正确展开造成误差<sup>[14]</sup>。

本文针对枝切法的不足,将禁忌搜索的思想应用到枝切法中,构造二维包裹相位图中全局最短枝切线,降低了相位展开过程中的误差传播,提高了相位展开的精度。

## 1 基本原理

### 1.1 三维重建原理

基于条纹投影轮廓术的三维形貌重建原理如图 1 所示。计算机生成正弦条纹图案,并将其放入投影仪;投影仪将条纹投射到被测物体上发生形变;同时利用相机将形变图案拍摄传输到计算机中进行处理;然后通过相位提取算法,从变形条纹图中计算出相位;最后根据投影仪、相机和被测物体之间的位置关系和求得的相位即可恢复出物体表面三维形貌。

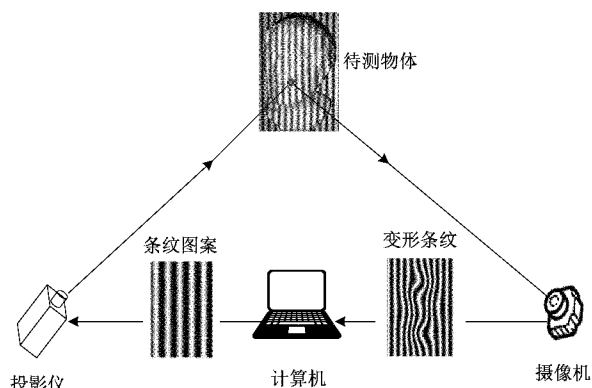


图 1 三维形貌重建原理

### 1.2 枝切法原理

在理想条件下,包裹相位图中的包裹相位梯度应小于  $\pi$ , 进行相位展开时,可以直接对包裹相位进行积分:

$$I = \int_C F(r) dr + \phi(r_0) = \int_C \nabla \phi(r) dr + \phi(r_0) \quad (1)$$

其中,  $\nabla \phi(r)$  是包裹相位梯度,  $r_0$  为起始点,  $r$  为待求点,  $C$  为区域  $D$  中从  $r_0$  到  $r$  的任意一条路径。因为积分结果只和起始点的位置有关,和积分路径  $C$  无关,所以:

$$\int F(r) dr = 0 \quad (2)$$

然而在实际测量中会受到环境中存在的噪声、阴影等因素影响,使得待展开图像中存在使式(2)中的积分不为 0 的残差点,导致展开过程中误差传播。

枝切法的算法原理首先是识别包裹相位图中的残差点,进一步将残差点连接起来构成枝切线,最后在相位展开时避开枝切线,防止误差传播。

枝切法具体过程如下。

1) 识别残差点。根据如图 2 所示的  $2 \times 2$  闭合回路上的包裹相位差之和计算可以得到包裹相位图中的某个像素点的残差值。

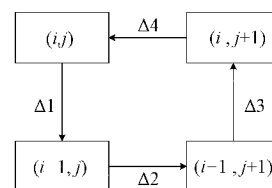


图 2 残差点识别

从图 2 中可以得出,残差值  $Q$  的具体计算公式为:

$$Q = \sum_{n=1}^4 \Delta n = [\phi(i, j+1) - \phi(i, j)] + [\phi(i+1, j+1) - \phi(i, j+1)] + [\phi(i+1, j) - \phi(i+1, j+1)] + [\phi(i, j) - \phi(i+1, j)] \quad (3)$$

可以根据表 1 确定包裹相位图中的某一点是否为残差点以及正负极性。

表 1 残差点判断

$Q$	0	-1	1
残差点	否	负残差点	正残差点

2) 构造枝切线。首先随机选取一个残差点,然后在以其为中心的  $3 \times 3$  邻域内搜寻残差点,当找到其他残差点时,判断其极性和原残差点相同还是相反,相反则极性平衡,将它们连接成枝切线;相同则将搜索区域中心移至新找到的残差点。如果在当前邻域内没有其它残差点存在,就需要将搜索范围扩大。不断重复以上步骤,将包裹相位图中的所有正负残差点的极性进行平衡,当正负残差点的数量不一致时,可以利用包裹相位图的边缘补充数量少的一方。

3) 相位展开。先对枝切线以外的像素点进行展开,待其他位置展开完成后,再依据枝切线周围的展开相位对其展开。

## 2 改进的枝切算法

禁忌搜索算法(tabu search, TS)是一种收敛速度快、能避免搜索陷入局部最优的全局逐步寻优算法<sup>[15]</sup>。TS 算法模拟了人类思考的过程,将搜索过的点放入一个设计好的禁忌表中,在每次迭代中更新禁忌表,从而在下一次搜索时避开这些点,实现搜索范围的全局优化。可以利用禁忌搜索算法应用于对构造枝切线进行优化,从而构造全局最短的枝切线。

枝切线的长度就是包裹相位图中所有正负残差点的距离之和。因为正、负残差点需要保持平衡,所以枝切线的长度可以表示为式(4)的适应度函数:

$$fitness = \sum_{i=1}^N [(x_i^+ - x_i^-)^2 + (y_i^+ - y_i^-)^2]^{1/2} \quad (4)$$

其中,  $(x_i^+, y_i^+)$ 、 $(x_i^-, y_i^-)$  分别为正负残差点的坐标。改进算法具体步骤如下。

1) 初始解

(1)首先在二维包裹相位图中找到所有残差点,根据

式(3)和表 1 判断残差点正负极性,并标记其在图中的位置。对正负残差点中数量少的添加边界点使正负残差点的数量相等。

(2)一般禁忌搜索算法使用随机产生的初始解,为了保证初始解的质量,使用局部最近邻方式匹配正负残差点产生初始解。

2) 邻域结构

保持正残差点的顺序不变,选取任意两个负残差点,交换这两个节点形成的新的排列作为原排列的邻域。

3) 解的评价

以式(4)的适应度函数作为解的评价函数,评价函数越小,则得到的解越好。

4) 禁忌对象

禁忌对象选用每次迭代得到的最优解。

5) 终止准则

如果在进行多次迭代后,评价函数的值没有减小则停止。

3 计算机仿真和实验

3.1 仿 真

模拟物体是通过 MATLAB 软件中的 peaks 函数生成的,函数表达式为:

$$g(x,y) = 3(1-x)^2 \exp[-x^2 - (y+1)^2] - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^3\right) \exp(-x^2 - y^2) - \frac{1}{3} \exp[-(x+1)^2 - y^2] \quad (5)$$

模拟物体为  $3 \times \text{peaks}$ , 图像大小为  $128 \times 128$ , 并加入了方差为 0.5 的随机噪声,图 3(a)、(b)分别为包裹相位图、残差点分布图,图 4(a)、(b)分别为采用枝切法以及改进算法设置的枝切线。通过比较可以看出,对于二维包裹相位图中残差点密集区域,改进枝切法没有形成闭合区域,建立的枝切线长度明显短于枝切法。而图 5(a)、(b)的最终相位展开后的结果显示,改进枝切法可以很好地恢复出被测物体的真实相位,而枝切法则由于构造枝切线时形成了一块封闭区域,使得相位展开时发生了错误,没有正确展开。

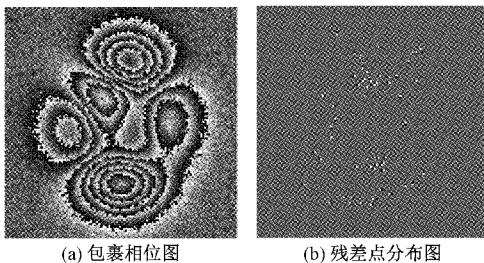


图 3 包裹相位和残差点分布图

表 2 对比了枝切法和改进方法建立的枝切线长度与时间消耗。改进方法构造的枝切线长度减少了 42%,所用时间减少了 28%。



图 4 枝切线对比

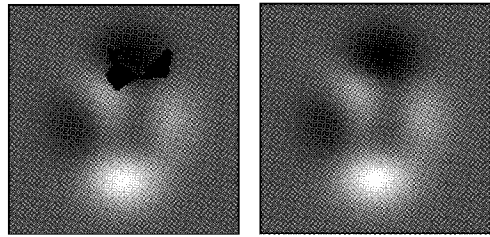


图 5 相位展开对比结果

表 2 算法比较

算法	长度/pixel	时间/s
枝切法	1 651	1.8
改进算法	963	1.3

为了进一步比较相位展开的效果,在不同噪声强度下对两种算法的相位展开误差进行了比较。两种算法重建的均方根误差(RMSE)比较如表 3 所示,可以看出本文算法的 RMSE 小于枝切相位展开算法。

表 3 两种相位展开方法的 RMSE 值

噪声	枝切法	改进枝切法
0.2	2.412 6	1.806 5
0.3	2.380 2	1.832 4
0.4	2.401 5	2.156 3
0.5	2.536 2	2.304 8


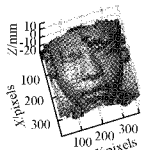
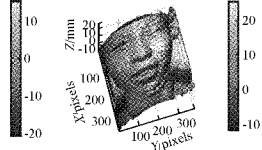

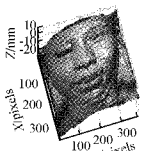
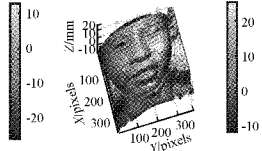

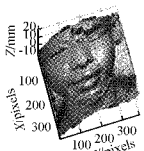
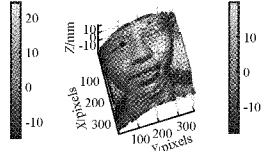

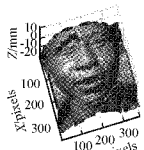
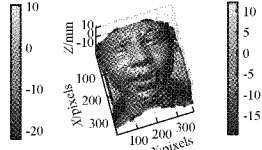
3.2 实 验

为了证明所提方法的实际效果,应用到动态三维重建中进行验证。三维形貌测量系统包括 DLP LightCraft4500 投影仪、BFS-U3-13Y3M-C 相机和个人计算机 (intel i5 1135G7 CPU、16G RAM),算法采用 MATLAB 2018b 实现。

本文选取了变化的人脸表情进行动态三维形貌重建,利用投影仪投射一幅条纹图案,相机采集形变条纹,通过计算机使用傅里叶变换轮廓术提取相位,分别利用枝切法和改进枝切法进行相位展开。重建速度为 18 帧/s,选取了其连续 4 帧,三维形貌重建结果如表 4 所示。

从基于人脸的动态三维形貌重建结果可以看出,经典枝切算法实现的人脸动态三维重建连续序列中均存在重建

表 4 动态人脸的三维形貌重建

帧数	形变条纹	枝切法	改进枝切法
11			
12			
13			
14			

信息缺失的问题,信息损失较严重。本文提出的改进枝切算法对人脸动态三维形貌重建整体深度信息完整,可以明显看出动态人脸重建效果好于经典枝切法。

#### 4 结 论

本文针对枝切法中构造枝切线的问题进行了研究,利用禁忌搜索算法对枝切线的连接进行了改进,减小了构造枝切线的长度,同时避免了在残差点密集的区域容易形成闭合区域的问题。仿真结果表明改进方法和枝切法相比可以获得更短的枝切线,在不同噪声下相位展开的误差更小。人脸动态三维重建实验验证了改进的相位展开方法能够提高动态重建效果。不足之处在于实验过程中由于阴影的影响导致被测物体和背景的边缘处相位展开效果不够理想,需进一步改进边缘处的重建效果。

#### 参考文献

- [1] 赵小龙,李丽娟,侯茂盛,等. 基于光栅投影扫描的复杂零件测量路径规划研究[J]. 电子测量技术,2019,42(22):118-122.
- [2] 常轶民,金永,吴靖. 基于光栅投影的钢板孔洞缺陷测

量[J]. 光电子·激光,2019,30(10):1062-1067.

- [3] 王希波,李爱娟,高金胜,等. 基于机器视觉的轮胎花纹深度测量系统研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(4):66-70.
- [4] 李茂月,马康盛,许浩浩,等. 基于单目结构光的形貌测量误差补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(5):19-31.
- [5] 王建华,周玉冈,杨延西. 基于相位误差自校正的高速三维测量技术[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(12):116-125.
- [6] LÓPEZ T C V, COLORES S S, KELLS K, et al. Improving 3D reconstruction accuracy in wavelet transform profilometry by reducing shadow effects[J]. IET Image Processing,2019,14(2): 310-317.
- [7] HE Z, CUI J, TAN J, et al. Discrete fringe phase unwrapping algorithm based on Kalman motion estimation for high-speed I/Q-interferometry [J]. Optics Express,2018,26(7): 8699-8708.
- [8] 毛翠丽,卢荣胜,董敬涛,等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报,2018,39(5):628-640.
- [9] 李雯,蔡宁,林斌,等. 基于几何约束的自适应相位解包裹算法[J]. 光子学报,2019,48(8):98-105.
- [10] 王永红,陈维杰,钟诗民,等. 相位解包裹技术及应用研究进展[J]. 测控技术,2018,37(12):1-7,16.
- [11] AMJAD J M. Robust and fast filtering method for enhancement of two-dimensional quality-guided path unwrapping algorithms [J]. Applied Optics, 2020, 59(13): 3920-3926.
- [12] 彭国,李伟明,黄扬,等. 一种改进的最小二乘解包裹算法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(18):279-286.
- [13] DU G, WANG M, ZHOU C, et al. A simple spatial domain algorithm to increase the residues of wrapped phase maps [J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(3): 231-237.
- [14] 李泓宇,宋红军,王辉. 引入质量图指导的改进的枝切法[J]. 国外电子测量技术,2016,35(8):38-41.
- [15] 朱毅,杨航,吕泽华,等. 一种基于禁忌搜索的全局最优模糊聚类算法[J]. 电子学报,2019,47(2):289-295.

#### 作者简介

常丽,副教授,主要研究方向为纳米位移测量与控制、智能仪器及网络化测控系统等。

E-mail:changlianli@163.com