

文章编号: 1001-3806(2009)05-0462-04

## 相位展开中基于调制度轮廓线的极点连接算法

黄振芬, 张启灿\*, 侯志凌  
(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

**摘要:** 在相位测量型光学3维传感技术中,为了正确恢复物体的真实相位,采用了一种基于调制度轮廓线连接极点的相位展开算法。该算法将调制度分布图与分支阻断法相结合,利用图像增强技术中拉普拉斯算子检测边缘,从被测物体调制度分布中提取物体的轮廓线,用于指导极点的连接和截断线的设置,最后结合菱形算法快速展开被测物体的截断相位,能够得到较为真实的相位展开结果。实验结果表明,新方法结合了调制度分布图展开相位可靠和分支阻断法计算时快的优点。在面形存在陡变和凹陷的复杂情况下,新算法甚至比可靠度排序法更能够有效地恢复出物体的真实相位,保证了测量的精度,而且运算速度比可靠度排序算法快了3倍。

**关键词:** 信息光学;相位展开;分支阻断法;调制度;物体轮廓线

**中图分类号:** O438 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.005

### Novel branch cuts' placement based on the outline of the modulation in phase unwrapping

HUANG Zhen-fen, ZHANG Qi-can, HOU Zhi-ling

(Department of Opto-electronics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** In order to retrieve the nature phase of the tested objects in optical three dimensional sensing based on phase measuring profilometry, a new phase unwrapping method, which connects the residue pairs by branch cuts based on the outline of modulation of the measured object, was presented. The new algorithm employs Laplacian edge detection to extract the outline of modulation, used to guide the branch cuts setting. Then, adopting diamond phase-unwrapping algorithm, the wrapped phase of the measured object can be retrieved accurately. The experimental results show that this new method, combining with the advantages of the reliability of modulation and the rapidity of branch cut algorithm, can effectively remain the accuracy of the measurement and fast retrieve the nature phase of the tested objects under the condition of a steep-shape. It is three times faster than the reliability-guided phase unwrapping algorithm.

**Key words:** information optics; phase unwrapping; branch cut algorithm; modulation; object's contour

## 引言

在相位测量型光学3维传感技术中,通过反正切函数计算出的相位值被截断在函数主值范围( $-\pi, \pi$ )内,因此,在求出被测物体的高度分布之前,必须进行相位展开,将截断相位恢复为原有的连续相位。在实际应用中,由于存在物体轮廓不连续、噪声、条纹欠采样等因素,使得相位展开较为困难。

目前,较为常用的相位展开方法可分两类,即路径积分法<sup>[1-2]</sup>与最小范数法<sup>[3-4]</sup>。可靠度排序法<sup>[5-7]</sup>和分支阻断法<sup>[8-10]</sup>都属于路径积分法。可靠度排序法依赖

质量图数据来指导相位展开:它先将相位可靠度由高到低排序,从可靠度最高的像素点开始按次序逐步对相位图进行路径积分展开。因低调制度的不可靠点被留在最后展开,所以展开错误被限制在局部范围内,展开相位可靠度高。但由于此算法在展开每个像素点前都要对待展像素的可靠度进行排序操作,非常费时。分支阻断法用截断线互连来平衡截断相位图中的正负极点,并使积分路径避开截断线,截断线以外的区域可按任意路径进行相位展开,运算速度快。因为在各极点之间设置不同的截断线<sup>[11-12]</sup>就会得到不同的展开相位面,所以,如何设置截断线对恢复物体的形貌起着至关重要的作用。

作者提出的基于调制度轮廓线的极点连接算法将调制度图与分支阻断法相结合,使截断线设置在合理区域,保留了可靠度排序法和分支阻断法的优点,能够快速准确地得到复杂物体的展开相位。

作者简介:黄振芬(1985-),女,硕士研究生,主要研究光信息处理及3维传感技术。

\* 通讯联系人。E-mail:zhqc@email.scu.edu.cn

收稿日期:2008-08-18;收到修改稿日期:2008-10-10

# 1 基础介绍

## 1.1 极点的寻找方法<sup>[9]</sup>

在截断相位分布中,根据与路径无关区域内沿任意闭合路径积分为0的原则,对于2像素×2像素的区域,按图1所示方向依次求相邻两像素点间的截断相位差,用 $\Delta n(n=1,2,3,4)$ 表示,当相邻两点的截断相位差大于 $\pi$ 时,记 $\Delta n=1$ ;当相邻两点的截断相位差小于 $-\pi$ 时,记 $\Delta n=-1$ ;否则,记 $\Delta n=0$ 。计算 $q = \sum_{n=1}^4 \Delta n$ ,当 $q=0$ ,认为这4点是连续的,当 $q>0$ ,认为像素 $(x,y)$ 点是正极点,当 $q<0$ ,则认为像素 $(x,y)$ 点是负极点。

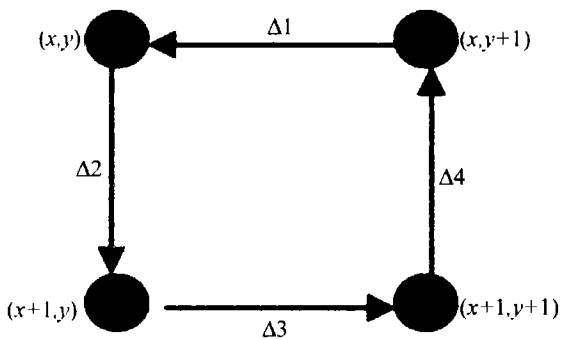


Fig. 1 2×2 region of judging the residues

## 1.2 Goldstein 算法

由JPL实验室的GOLDSTEIN等人提出的Goldstein算法<sup>[9]</sup>直接从相位入手进行相位展开。该算法首先识别出相位图像上的极点,然后用最短的截断线连接正、负极点,使得积分路径不穿过此截断线,从而限制错误展开的传播。这种算法只需保证连接极点的截断线总长最短,所以计算速度快。但是由于没有充分考虑物体的轮廓,如果处理复杂物体时截断线设置不合理,将造成部分区域展开错误;如果截断线形成闭合区域,还会造成局部相位无法展开。所以Goldstein算法用直线连接极点有一定的局限性。

# 2 新算法的原理与实现

## 2.1 原理

在3维测量中采用结构光测量物体时,投影到物体凹陷、斜坡或陡变等高度急剧变化区域上的条纹会发生剧烈变形,因而在这些区域相位展开中就比较容易出现条纹采样不足以及阴影问题,相位不可靠,容易产生极点。当积分路径穿越时将产生错误的展开相位,所以,应该尽量将连接极点的截断线设置在物体轮廓的凹陷或陡变处,以绕过这些相位不可靠处。

提取物体轮廓线的方法很多,如何能合理有效地提取物体轮廓线至关重要。在此通过对调制度做拉普

拉斯变换来提取物体轮廓。由于调制度<sup>[6]</sup>是一个表征相位数据是否可靠的重要参量,调制度的高低反映相位数据的好坏。而且在物体有高度变化的区域调制度也会随之发生变化,物体边缘表现为调制度灰度级的突变,调制度图的轮廓信息对应了物体轮廓信息。因此,只要对调制度信息进行合理处理就能得到物体的轮廓,用于指导设置截断线连接极点。对于采用傅里叶变换轮廓术得到的空间载波条纹图,调制度参量 $M(x,y)$ 可以表示为:

$$M(x,y) = \sqrt{\{ \text{Im}[g(x,y)] \}^2 + \{ \text{Re}[g(x,y)] \}^2} \tag{1}$$

式中, $g(x,y)$ 表示对频谱图中滤出的基频做逆傅里叶变换后得到的复分布。

一般的边缘提取技术对于陡峭边缘和缓慢变化边缘很难确定其边缘线的位置,而拉普拉斯算子<sup>[13]</sup>是旋转不变算子,对边缘很敏锐,可以检测出灰度变化更平缓的边缘。一副2元图像函数 $f(x,y)$ 的拉普拉斯变换定义为:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial^2 y} \tag{2}$$

在实际处理数字图像中,要转化为离散形式:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{1}{4} [f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1)] - f(x,y) \tag{3}$$

在本文中,使用(3)式对被测物体的调制度进行运算,能有效提取出物体边缘即轮廓线。然后用物体轮廓线来指导截断线的连接,不但避免了直线连接可能造成的封闭区域,而且能使截断线的设置更符合物体轮廓,得到很好的相位展开结果。

## 2.2 新算法的实现步骤

- (1)按照第1.1节中寻找极点的方法找出极点。
- (2)用调制度拉普拉斯导数提取物体轮廓线。
  - (a)首先用离散拉普拉斯算子(即(3)式)对调制度做运算,得到1幅边缘增强图像。对此图像设定合理阈值,二值化后初步提取出物体的轮廓线图。
  - (b)由于连接极点的截断线仅需要一个像素宽度,所以,对步骤(a)中得到的轮廓线图进行骨骼化。极点不会出现在调制度高的可靠区域,在该区域也不需要设置截断线,应再对调制度图设定合理阈值,得到二值化结果,用该二值化结果做模板去除轮廓线图中一般不存在极点的线段和端点。
  - (c)经步骤(b)处理后的物体轮廓线图还有许多毛刺和分枝,所以再进行剪枝处理<sup>[14]</sup>,得到最终的物体轮廓线图以便用于连接极点。
- (3)用物体轮廓线指导设置截断线。
 

在上一步骤得到的物体轮廓线图中,只有在同一

条连通轮廓线上的正负极点才应该配对。所以在每一条轮廓线上,依据连接极点所需轮廓线总长最短的原则合理配对,保留连接极点所必需的轮廓线做截断线,将所有正负极点两两连接,获得相位展开的截断线分布。

(4)用截断线覆盖截断相位,以菱形展开算法展开覆盖后的相位。

(5)对截断线模板覆盖掉的部分做插补,得到物体的连续相位。

由于该算法进行边缘提取、二值化操作后,连接极点所需考虑的数据量较少,而且在后期相位展开时是采用速度快的菱形算法,所以,对比逐一对待展开点进行调制度排序的可靠度导向算法,新算法总体耗时较少。

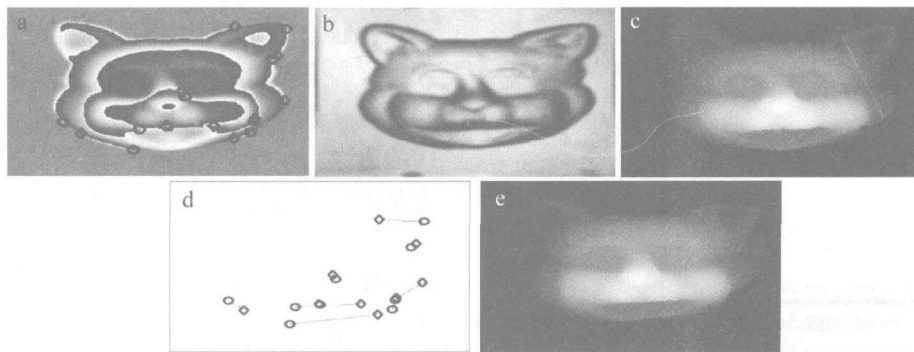


Fig. 2 Experimental on a cat model

a—wrapped phase of a cat model b—modulation map c—phase unwrapping result by means of reliability-guided phase unwrapping algorithm d—branch cuts by means of Goldstein algorithm e—phase unwrapping result by means of Goldstein algorithm

的右上角以及猫脸下边缘出现展开错误,此算法不能正确恢复猫脸的正确面形。

新算法首先对调制度图做拉普拉斯变换并设定适当阈值初步获得猫脸的轮廓线,如图3a所示,菱形为

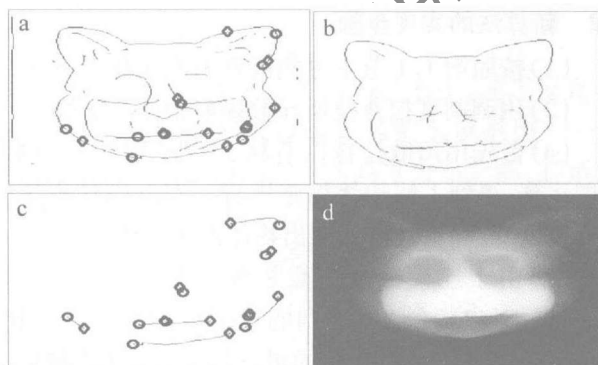


Fig. 3 Proposed algorithm

a—outline of the modulation extracted by means of Laplacian and setting threshold b—outline of the cat face c—branch cut by means of the proposed algorithm d—phase unwrapping result by means of the proposed algorithm

正极点,圆形为负极点。经第2.2节中步骤(2)的(a)和(b)所述方法处理后,获得如图3b所示用于指导极点连接的轮廓线图。再用步骤(3)叙述的原理连接所有极点,得到如图3c所示的截断线。最后用菱形算法

### 3 实验结果与分析

实验在主频 1.8GHz, 1G 内存的计算机上运行。图2a是将光栅投影到猫脸模型的条纹图经过傅里叶变换、频谱移中后得到的截断相位图,图像大小为 256 像素 × 256 像素,菱形为正极点,圆形为负极点。下面将新算法的展开结果与使用 Goldstein 算法和基于调制度的可靠度排序算法所得到的结果进行对比。猫脸的调制度图如图2b所示,图2c是使用可靠度排序算法得到的相位展开结果,仅右下角出现展开错误。使用 Goldstein 算法连接极点的分支图如图2d所示,图2e是 Goldstein 算法的相位展开结果,由于没有充分考虑被测物体的轮廓分布信息,明显可以看出猫耳部分

对猫脸的截断相位进行展开,并对截断线模板覆盖掉的部分做数据缝合,得到如图3d所示的连续相位。

新算法的截断线设置明显比 Goldstein 算法合理。而将新算法的展开结果与可靠度排序法的展开结果进行对比,猫脸的右下角有明显差别。图4a是基于调制度的可靠度排序法的展开结果,虽然猫脸右下角由于

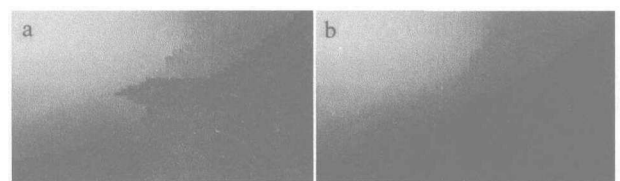


Fig. 4 Comparison of part (bottom right corner) of results based on the proposed algorithm and reliability-guided phase unwrapping algorithm

a—phase unwrapping result by means of reliability-guided phase unwrapping algorithm b—phase unwrapping result by means of the proposed algorithm

阴影造成了调制度局部较低,但此处相位仍然是较为可靠的,基于调制度的可靠度排序算法反而会导致少量的展开相位不合理。而新算法截断线设置合理,展开相位更符合猫脸的真实形貌,如图4b所示。新算法的另外一个明显优势就是所花费的时间短,在本实验中用可靠度排序法所用时间为 16.30s,而使用新算法从提取物体轮廓线到使用菱形算法并得到最终的猫脸

展开相位所需时间共为 5.33s,快了 3 倍。

## 4 结 论

提出了基于调制度轮廓线进行极点连接的方法,克服了 Goldstein 算法中截断线不符合物体轮廓的缺点。由于截断线是在调制度轮廓的基础上提取的,所以,能覆盖因物体的凹陷或陡变而形成的不可靠相位区域,避免了积分路径穿越这些区域时而产生错误。实验表明,新算法与目前较为可靠的相位展开方法——基于调制度的可靠度排序算法展开效果相似,甚至更好一些,并且运算速度远快于后者。显示了该方法的优越性。

### 参 考 文 献

- [1] JARLE S, TORFINN T. Performance evaluation of two-dimensional phase unwrapping algorithms [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (20) : 4333-4344.
- [2] CUSACK R, HUNTLEY J M, GOLDREIN H T. Improved noise immune phase unwrapping algorithm [J]. *Appl Opt*, 1995, 34 (5) : 781-789.
- [3] GHIGLIA D C, ROMERO L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods [J]. *J O S A*, 1994, A11 (1) : 107-117.
- [4] YANG F T, LUO J L, LIU Zh Q, *et al.* Comparison of six phase unwrapping algorithms [J]. *Laser Technology*, 2008, 32 (3) : 323-326 (in Chinese).

(上接第 461 页)

## 3 结 论

针对高功率密度运转下的光纤激光对其适用的光纤器件的特殊的要求,设计了双光路系统,对光纤的插入损耗进行了实验研究。实验系统中通过各项定标和折射率匹配滤波,双光路同时测量等,系统的精度和可靠性有大幅提高。通过实验测量发现,插入损耗测量精度控制优于 0.07dB。

### 参 考 文 献

- [1] ZENG H F, XIAO F H. The development of Yb-doped double-clad fiber laser and its application [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (4) : 438-444 (in Chinese).
- [2] LOU Q H, ZHOU J, WANG Zh J. Analysis of high-power fiber laser weapons [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (3) : 161-165 (in Chinese).
- [3] LI Ch, YAN P, CHEN G, GONG M L. Using China-made Yb-doped double-clad fiber for fiber laser output power breakthrough 700W [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33 (6) : 738 (in Chinese).
- [4] WANG R X. Number study on the coupling loss of the photonic crystal

- [5] BONE D J. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase-unwrapping problem [J]. *Appl Opt*, 1991, 30 (25) : 3627-3632.
  - [6] SU X Y, CHEN W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42 (3) : 245-261.
  - [7] SU X Y, XUE L. Phase unwrapping algorithm based on fringe frequency analysis in Fourier-transform profilometry [J]. *Opt Engng*, 2001, 40 (4) : 637-643.
  - [8] SU X Y, ZARUBIN A M, von BALLY G. Modulation analysis of phase-shifted holographic interferograms [J]. *Opt Commun*, 1994, 105 (5/6) : 379-387.
  - [9] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23 (4) : 713-720.
  - [10] SALFITY M F, RUIZ P D, HUNTLEY J M, *et al.* Branch cut surface placement for unwrapping of undersampled three-dimensional phase data: application to magnetic resonance imaging arterial flow mapping [J]. *Appl Opt*, 2006, 45 (12) : 2711-2722.
  - [11] CHAVEZ S, XIANG Q S, AN L. Understanding phase maps in MRI: a new outline phase unwrapping method [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2002, 21 (8) : 966-977.
  - [12] XU L H, SU X Y. Analysis on the processing on three classes of residuals for phase unwrapping [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12 (12) : 1267-1270 (in Chinese).
  - [13] LEI L Zh. On the edge detecting method of digital image [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2006 (3) : 40-42 (in Chinese).
  - [14] WU Q Y, SU X Y, SONG F. A pruning algorithm for the skeleton of line-structure-light pattern [J]. *Journal of Sichuan University*, 2006, 28 (5) : 148-151 (in Chinese).
- fiber [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (5) : 494-495 (in Chinese).
- [5] GUO Y, CAO M C, LUO Zh X, *et al.* Design of multifunctional instrument of insert loss and return loss measurement [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (5) : 548-550 (in Chinese).
  - [6] Wuhan Post and Telecommunications Science and Technology Institute. GB/T 15972.4-1998 Generic specification for optical fibres part 4: measuring methods for transmission and optical characteristics [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1998: 1-33 (in Chinese).
  - [7] RABAH A, JACQUES M. Mode scrambler for polymer optical fibers [J]. *Opt Engng*, 2000, 39 (1) : 299-303.
  - [8] Wuhan Post and Telecommunications Science and Technology Institute. YD/T 893-1997 Technical conditions for fiber coupler [S]. Beijing: Chinese Standards Press, 1997: 1-47 (in Chinese).
  - [9] HUANG B C, NING D, HAN J, *et al.* Study of ytterbium-doped double-clad fiber absorption characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32 (11) : 1472-1477 (in Chinese).
  - [10] VAYSHENKER I, LEHMAN J H, LIVIGNI D J, *et al.* Trilateral optical powermeter comparison between NIST, NMIJ/AIST and METAS [J]. *Appl Opt*, 2007, 46 (5) : 643-647.
  - [11] ZENG Z Q. Three methods of realization serial communication between single chip and PC based on visual C++ platform [J]. *Automation and Instrumentation*, 2005, 9 (3) : 60-65 (in Chinese)