

# 细胞自动机位相展开算法用于三维传感\*

谭松新 苏显渝

(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘 要** 研究了细胞自动机算法用于复杂面形三维传感问题。提出采用调制度分析的方法构造二元控制模板, 以确保细胞自动机算法能展开复杂位相场。给出了采用这种方法对口腔牙型测量的结果。

**关键词** 细胞自动机, 位相展开, 三维传感, 位相测量轮廓术。

## 1 引 言

细胞自动机 (cellular automata)<sup>[1]</sup> 是对一个时间和空间都离散的系统的数学理想化模型, 它可以是一维、二维以至多维的。通常细胞自动机由有限的、均分的阵列构成, 该阵列的每一结点有一离散值, 每一结点的值由该点和其相邻点在上一时间的值并由一定的局域规则决定。细胞自动机能模拟复杂的非线性系统。它已经广泛应用于物理、化学、生物以及数学系统中, 并且作为一种并行算法受到重视。

在干涉计量、结构光场的三维传感等许多领域, 都需要求复函数的位相场, 通过反三角函数 (例如反正切函数) 求出的位相值将被截断在  $(-\pi, \pi)$  区间内。位相展开 (或位相解截断)<sup>[2,3]</sup> 是通过某种算法将截断的位相恢复为原来连续的位相。对于理想的位相图, 这一过程十分简单。位相图中相邻两点位相差超过  $\pi$  的, 可通过加上或减去  $2\pi$  消除截断线, 就能得到连续的位相分布。然而对于实际情况, 由于噪声、阴影、条纹过密引起的不满足采样定理以及物体本身的高度跃变等原因, 展开过程变得极为复杂, 上述方法不能解开截断。1987 年 Ghiglia 等人提出了细胞自动机算法用于干涉条纹的位相展开<sup>[4]</sup>。这种方法有内在并行性和与路径无关的优点。与传统的方法不同, 它是通过一些简单的规则进行迭代, 在每一次迭代后位相的变化范围增大, 向展开的方向趋近, 经过多次迭代, 最后得到连续的位相。1991 年 Spik 等人提出了改进的算法<sup>[5]</sup>, 以期处理干涉条纹中的区域不连续性。

本文研究了将细胞自动机位相展开算法用于结构照明型三维传感问题。通过构造二元控制模板覆盖低调制度区和断裂线, 可以用该算法处理复杂物体面形测量中的位相展开问题, 而采用原有的细胞自动机方法<sup>[4,5]</sup> 不能正确处理这类复杂位相场。文中给出了采用这种方法对口腔牙型测量的实验结果。

\* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995 年 12 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 15 日

## 2 细胞自动机算法用于三维传感

### 2.1 光学三维传感的基本原理

非接触的结构光场的主动型三维传感技术, 由于其速度快、精度高、数据量大、自动化程度高, 已经在自动加工、机器视觉、实物造型、石油勘探以及生物医学等诸多领域得到广泛应用。已经研究的方法包括摩尔轮廓术(MT), 傅里叶变换轮廓术(FTP) 以及位相测量轮廓术(PMP) 等。其中位相测量轮廓术<sup>[6,7]</sup> 是通过投影系统将正弦光栅投影到被测物体表面, 如图 1 所示, 得到被物体表面高度分布调制的变形条纹

$$I(x, y) = I_0 B(x, y) \{1 + C(x, y) \cos [\Phi(x, y)]\}, \tag{1}$$

式中  $I_0$  为背景光强,  $C(x, y)$  为投影条纹的对比度,  $B(x, y)$  是表示物体表面反射率的量。通过将正弦光栅每次横向移动其周期的  $1/N$  ( $N \geq 3$ ), 摄像系统将  $N$  帧变形条纹送入计算机, 可得  $N$  帧变形光栅像  $I_n(x, y)$ , 这样对像场每一点而言得到一个时间序列上的正弦形分布, 通过最小二乘法拟合, 求得位相分布为

$$\Phi(x, y) = \arctg \left[ \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin (2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos (2\pi n/N)} \right] \tag{2}$$

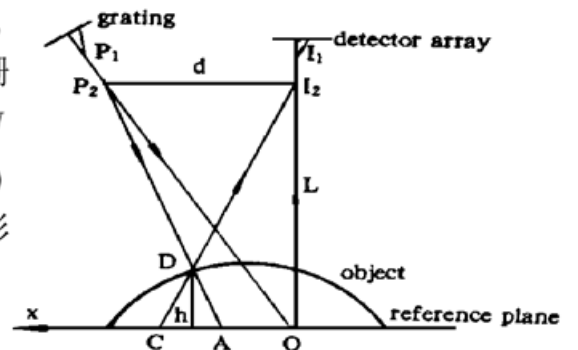


Fig. 1 Optical geometry of a PMP system

相位测量轮廓术同时获取了全场条纹的空间信息和在一个条纹周期内相移条纹的时序信息, 因而精度很高。而且也不存在频谱混叠问题。求出的位相分布被截断在  $(-\pi, \pi)$  的区间内, 需要进行位相展开, 以得到连续的位相分布。最后通过从位相到高度分布的直接映射算法<sup>[8]</sup>, 可以得到物体的三维高度分布。

在  $N$  步相移的相位测量轮廓术中, 定义调制度函数为

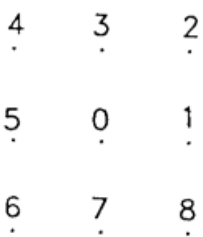
$$m(x, y) = \sqrt{[\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin (2\pi n/N)]^2 + [\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos (2\pi n/N)]^2}, \tag{3}$$

平方项分别是求位相时反正切函数的分子和分母。

### 2.2 细胞自动机算法简介

二维的细胞自动机位相展开算法<sup>[4]</sup> 如下:

1) 以位相图中的每一点为基准, 分别求出它和与它正交相邻的四点(图 2 中的 1、3、5、7 点)的位相差。对图像边缘的点, 其正交方向可能只有三个或两个点, 则只考虑存在的这几个点。模板覆盖的点视为不存在, 不予考虑。



2) 相邻两点的权重(strength-of-vote) 定义为两点之间展开截断所需的  $2\pi$  的整数倍, 将每一点对应的四个权重相加。

3) 如果权重之和为正, 则该中心点的位相值加上  $2\pi$ , 为负则减去  $2\pi$ 。

4) 如果四个权重都为零, 则该点与它相邻四点的位相差都不超过  $\pi$ , 该点值不变。如果正的权重和负的权重刚好抵消, 则该点加上一个  $2\pi$ 。

5) 步骤 1 到 4 的一次重复称为一个局域迭代。经过一次局域迭代, 位相场中每一点的位相值同时变化到了下一时刻的状态。重复步骤 1 到 4, 直到出现周期为 2 的振荡, 即时间上间隔着的两个位相图完全相同。这时算法陷入周期性的重复, 需将相邻(即

Fig. 2 3x3 pixel

一个周期内) 的两个位相图相加求平均。两振荡状态的平均称为总体迭代。然后判断位相是否已完全展开, 如果是则结束, 否则转到步骤 1, 重新开始局域迭代。

该算法从位相图的边缘开始对位相进行处理, 首先将位相变化成剧烈的起伏状态, 经过一个局域迭代, 这种起伏状态传播一个像素, 直到传遍整个位相图, 这时出现周期为 2 的振荡状态, 总体迭代对二者平均后, 最边缘的一个截断被连起来了, 其余的条纹移动到了另一位置。一个总体迭代消除一条截断线, 位相展开最后所需的总体迭代数目要大于或等于位相图中的条纹数。

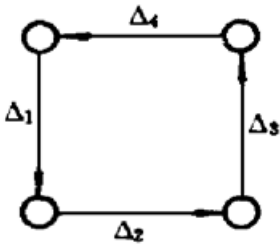


Fig. 3  $2 \times 2$  pixel for pole checking

Ghiglia 等人提出的细胞自动机算法本身并不能自动判断位相图中的错误, 它的前题是假定原位相是一个连续的函数, 不存在噪声、阴影和条纹的断裂等。对于不完善的条纹图, 直接使用这种方法将无穷迭代下去, 不能得到收敛的结果。因而在使用这种方法之前必须按一定的规则, 将不能展开的区域用模板覆盖住, 位相展开时绕开覆盖区, 避免展开错误传播开来, 以得到收敛结果。Ghiglia 等人采用了一种简单的方法在  $2 \times 2$  的区域上来覆盖极点这种点状的不连续区。对  $2 \times 2$  像素的一个区域, 如图 3 所示, 将截断位相按箭头所指方向局域展开,  $\Delta_i$  代表相邻两点之间的截断位相差。如果  $\sum_{i=1}^4 \Delta_i = 0$ , 则认为这四点

是连续的。如果  $\sum_{i=1}^4 \Delta_i \neq 0$ , 则这四点不连续, 截断位相差为正的四点称为正极点, 为负的四点称为负极点。对不连续的四点, 设置一个模板将其覆盖, 以保证展开时绕过这些点。对于二维位相图中的每一  $2 \times 2$  区域, 重复以上步骤, 直至剔除所有的极点。对于连续的位相图, Ghiglia 等人的方法经过一系列迭代, 总能将位相展开。然而仅仅在  $2 \times 2$  的区域上判断条纹的不连续性是不够的。该方法只能盖住点状噪声, 对大尺度的区域不连续, 它只能覆盖断裂线的端点, 展开将通过断裂线, 引入解截断误差, 甚至不能够得到收敛的结果。Spik 等人<sup>[5]</sup>提出了改进的方法。由于经过一次总体迭代, 截断线移到了另一位置, 因而而在每一总体迭代之后, 重复  $2 \times 2$  的极点剔除方法, 将移开一段位置的断裂线的新的端点盖住, 最终可以自动将整个断裂线剔除。为了适应这种极点剔除方法, 并提高收敛速度, Spik 等人将原算法中判别相邻四点的权重改为判别相邻八点的权重(如图 2 中 1 到 8 点), 收敛速度可以提高一倍。但是, 对于有着精细结构和细节的位相图, 细胞自动机的复杂的集体行为有着许多不可预见性, Spik 的方法在处理复杂三维面形测量问题时存在困难。本文的实验也表明, 这种方法并不是总能正确地展开位相场。

### 2.3 基于调制度分析的模板覆盖方法

直接将上述细胞自动机方法用于三维传感中的位相展开, 效果十分不好。在复杂物体的三维面形测量中, 不仅存在着噪声、阴影, 而且存在局部条纹过密引起的欠采样, 以及低调制度的区域等, 它们往往还同时发生。采用 Spik 等人改进的细胞自动机算法虽然可以部分克服阴影的影响, 但却无法处理采样不足和低调制度区, 最后得到的位相图存在很大的解截断误差, 极端情况下不能得到收敛的结果。同时它也不能将物体和其背景有效地分离开来。

为了有效地覆盖住可能导致展开错误的区域, 在计算离散位相的同时, 本文作者算出了每一像素对应的调制度。在物体的阴影或高度变化剧烈的地方以及背景区, 条纹的调制度一般都比较低, 因而可设置一个二元调制度模板, 将调制度低于某个阈值的区域覆盖住, 展开

时绕开这些易于出错的地方, 就能保证细胞自动机方法较快地收敛到正确的结果。

控制模板设置方法如下:

首先解算出截断位相和调制度函数, 计算出调制度函数的直方图分布, 从中选出一个合适的阈值, 作为条纹质量的一个判据。调制度函数高于阈值的部分, 认为可以正确的展开, 将对应点的二元模板的值设为 0, 反之则认为不能, 将模板的值设为 1。位相展开时绕开模板值为 1 的区域。阈值选得大, 则展开的可靠性高, 但可能覆盖有效的区域, 这些地方的位相最后必须通过插值得到, 误差较大; 阈值选得过小, 又会使展开变得不可靠。因此选取适当的阈值是十分重要的。然后, 从截断位相图中找出成对存在的正负极点, 将它们在模板上对应的点设为 1。成对的正负极点由断裂线联系着, 还必须将断裂线用模板覆盖, 否则展开可能通过断裂线, 引入附加的展开误差。在作者所遇到的绝大多数情况下, 通过调制度模板就可有效地覆盖断裂线。对少数孤立的极点, 可通过如下方法连断裂线: 首先从一孤立极点周围相邻的 12 个点中找到一个调制度最低的点, 在模板上将该点置为 1, 然后在该点周围的 8 个点(即  $3 \times 3$  的区域)中找出调制度最低的一点(不包括前面已经覆盖的点), 也将它对应的模板值设为 1, 重复在  $3 \times 3$  的区域内的寻找, 直到将断裂线引入另一极点、背景区或图像边缘。为防止计算机在某些情况下连接断裂线时出现误判断, 软件提供了用户中断功能, 能够通过手工清除或添加断裂线。这样, 就构造了一个二元展开控制模板, 位相展开只对模板为 0 的点进行, 模板中为 1 的点的位相值, 在展开完成之后通过插值的方法得到。

### 3 实验结果

实验中使用了人牙床的石膏模型, 采用五步相移的位相测量轮廓术。图 4 是所测牙模的调制度函数的直方图分布。将调制度的阈值设为 100, 最后的二元展开控制模板如图 5 所示, 其中白色部分代表有效的区域, 位相展开只对白色区域进行, 黑色部分为模板覆盖区, 它的位相值最后由插值得到。

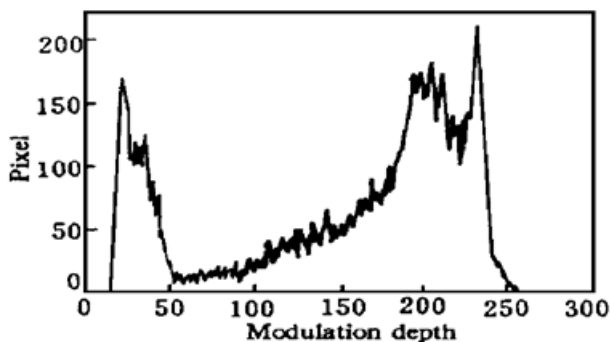


Fig. 4 Histogram of modulation depth

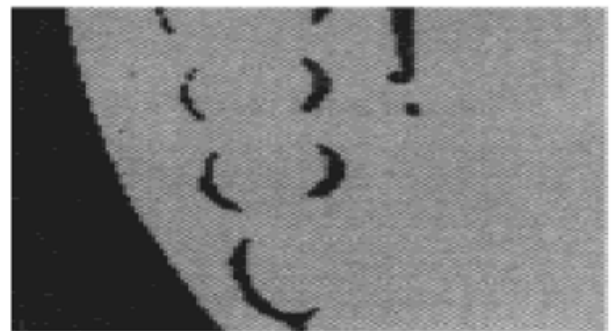


Fig. 5 Binary control mask using modulation analysis

对所测牙模的位相分布采用细胞自动机算法展开, 经过 579 次局域迭代, 8 次总体迭代, 在主频 40 MHz 386 兼容微机上, 用了近 30 分钟时间, 得到了牙模的三维高度分布图(图 6), 正确恢复了物体的面形。采用 Spik 等人改进的细胞自动机方法进行位相展开的结果如图 7 所示, 由于低调制度区域没有有效覆盖, 存在很大的展开误差, 牙的外形难以辨认。

**结 论** 采用调制度分析方法, 通过有效地覆盖低调制度区和断裂线, 细胞自动机算法可用于三维传感领域的位相展开, 从而实现了对复杂物体三维面形的全自动获取。该方法有着并行性和与路径无关的优点。实验表明这种方法是可行的。伴随着并行处理机的使用, 细胞自

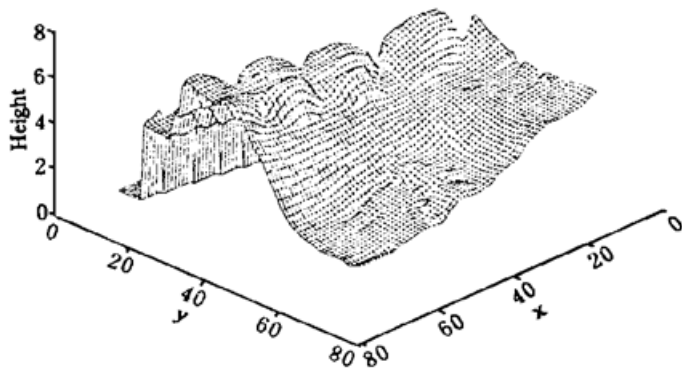


Fig. 6 3-D height distribution of the object

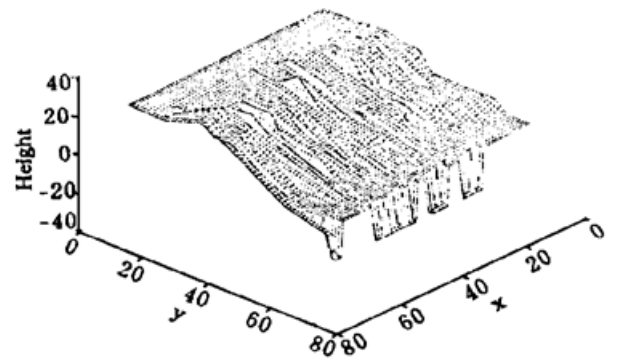


Fig. 7 Object height distribution using previous improved cellular automata method

动机方法费时的缺点将被克服。这种方法并有可能在其它一些领域得到应用。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] S. Wolfram, Statistical mechanics of cellular automata. *Rev. Mod. Phys.*, 1983, **55**(3) : 601~ 644
- [ 2 ] T. R. Judge, P. J. Bryanston-Cross, A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis. *Opt. & Laser in Engng.*, 1994, **21**(4) : 199~ 239
- [ 3 ] X. -Y. Su, G. Von Bally, D. Vukicevic, Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1/2/3) : 141~ 150
- [ 4 ] D. G. Ghiglia, G. A. Mastin, L. A. Romero, Cellular-automata method for phase unwrapping. *J. Opt. Soc. Am(A)*, 1987, **4**(1) : 267~ 280
- [ 5 ] A. Spik, D. W. Robinson, Investigation of the cellular automata method for phase unwrapping and its implementation on an array processor. *Opt. & Laser in Engng.*, 1991, **14**(1) : 25~ 37
- [ 6 ] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffused objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108
- [ 7 ] X. -Y. Su, W. -S. Zhou, G. Von Bally *et al.*, Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6) : 561~ 573
- [ 8 ] W. -S. Zhou, X. -Y. Su, A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry. *J. Mod. Opt.*, 1994, **41**(1) : 89~ 94

## Utilization of Cellular Automata Phase Unwrapping Method in 3-D Sensing

Tan Songxin     Su Xianyu

(*Optoelectronics Department, Sichuan Union University, Chengdu 610064*)

(Received 26 December 1995; revised 15 March 1996)

**Abstract** The utilization of cellular automata phase unwrapping method in 3-D sensing of complex object shapes has been studied. By constructing binary control mask using intensity modulation analysis method, we can unwrap complex phase maps. The experimental results of a human jaw model are given.

**Key words** cellular automata, phase unwrapping, 3-D sensing, phase measuring profilometry.