

时间维相位重建的改进算法*

彭翔^{1,2} 杨昭亮² 牛慈笨¹

(1 深圳大学光电子学研究所,广东省光电子器件与系统重点实验室,广东 518060)

(2 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要 提出了一种时间维-相位重建的改进算法;利用折叠位相图进行时间相位展开以提高算法效率;推导并调整了基于时间相位展开算法初始条件从而减少所需的二维编码条纹图,增加了算法的实时性. 从而可以更加有效地解决深度表面不连续和存在隔离物表面拓扑结构的景物相位重建问题. 实验结果证明了本文所提出算法的可行性及有效性.

关键词 折叠相位;时间相位重建;三维形貌测量

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

用结构光系统获取物体的三维形貌是当前较流行的非接触3-D形貌测量方法,这种测量技术是将物体的高度信息以空间相位调制的方式编码在二维条纹图中^[2]. 为了获得物体的高度信息必须解调编码条纹图以提取相位分布的信息. 相移算法^[3]与傅里叶变换算法^[4]是目前应用最广泛的两种主要的相位提取技术. 然而,根据这两种方法计算得到的相位都被截断在反三角函数的主值范围 $[-\pi, \pi]$ 之间,从而产生了所谓的“折叠”相位. 要正确获得与物体高度信息相关的相位分布则必须能够得到所谓“展开”的连续分布的相位,这就是相位重建或相位展开的问题. 传统的二维空间相位重建算法^[5]是通过比较相邻两个像素位相差的情况来进行相位展开,其缺点是在相位不连续点较多且比较密集时无法进行正常的相位展开. 为了解决上述问题,国际上提出了各种改进算法,包括作者曾提出的基于复合模板的相位重建算法^[6]和表面法向导引的相位重建算法^[7]. 然而,虽然这些算法都具有不同程度的噪声免疫能力,但是对于具有物理间断的表面以及由相互隔离的物体构成的景物的相位重建问题,

这些算法都不能很好地解决.

为此,Huntley与Saldner提出了一种时间相位重建算法-以下简称H-S算法^[1]. H-S算法的基本思想是按时间序列,以足够高的时间抽样频率获取二维编码条纹图. 对每一象素的相位以时间维的函数进行相位重建. 这种相位重建的过程独立于其他象素. 因此,对于物理间断区域以及高噪声区域数据点的相位重建不会影响其他区域数据点. 本文根据时间相位展开算法的思想提出了一种改进算法,提高了时间相位算法的效率以及算法实时性.

1 时间维-相位重建的改进算法

文献[8]提出采用条纹频率按指数增长的条纹序列进行相位重建,根据这种思想设计的算法减少了运算时间,并且结果是可靠的. 首先根据四步相移算法^[3]获得所需的 $t = 1, 2, 4, \dots, s (s = 2^n, n = 0, 1, 2, 3 \dots)$ 种二维条纹编码图,其中表示视场中所采集的条纹个数. 通过相移算法得到折叠相位 $\phi_w(t)$,其展开位相用 $\phi_u(t)$ 来表示. 建立改进算法的解析几何图像(图1),图1(a)表示 $t = 1$ 时的折叠相位示意图;其中曲线代表物体在某一截面的相位值. 对于视场内只有一条条纹而言,不存在相位模糊的问题,所以其

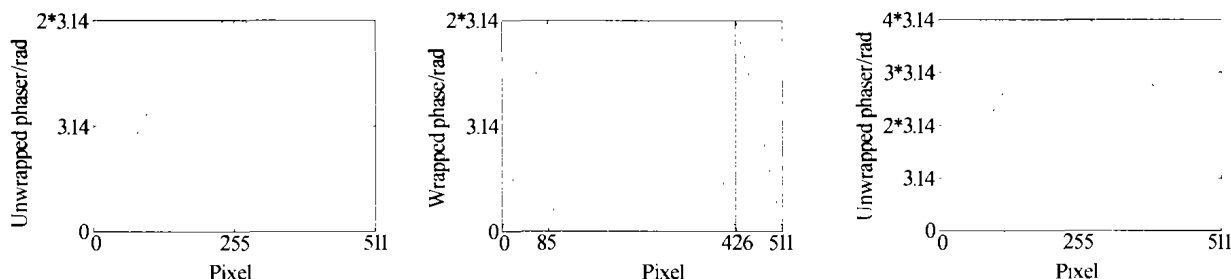


图1 (a) $t = 1$ 时的折叠位相图, (b) $t = 2$ 时的折叠位图, (c) $t = 2$ 时的展开位图

Fig. 1 (a) The wrapped phase for $t = 1$, (b) The wrapped phase for $t = 2$, (c) The unwrapped phase for $t = 2$

折叠相位图就是其展开相位图,即: $\phi_u(1) = \phi_w(1)$. 当 $t = 2$ 时,其折叠相位图 $\phi_w(2)$ 如图1(b)所示. 为了获得展开位相 $\phi_u(2)$,对照示意图1(a)与(b)可

*国家自然科学基金资助项目(No. 60275012)
Email: xpeng@szu.edu.cn
收稿日期:2003-07-07

知,对于 $[0, 85], [426, 511]$ 范围内的像素,与其对应的相位的值域为 $[0, \pi], [0, 2\pi]$ 和 $[\pi, 0], [2\pi, 0]$. 将示意图 1(b)与(a)对应相位相减可知,相位差的值域为 $[0, \pi], [\pi, 0]$. 再由示意图 1(b)可知,此范围内的像素所对应的相位值并没有发生 2π 相位跳变. 即: $\phi_u(2) = \phi_w(2)$. 然而,对于范围 $[85, 426]$ 内的像素,其对应的相位的值域分别为 $[\pi, 2\pi], [0, 2\pi]$,其位相差的值域为 $[-\pi, 0]$,由示意图 1(b)可知,此时的相位值发生了 2π 相位跳变,即 $\phi_u(2) = \phi_w(2) + 2\pi$. 展开相位如示意图 1(c)所示.

从以上过程可以看出,可以通过位相差的值域范围来确定相位值是否存在 2π 相位跳变. $t=2$ 时折叠相位的展开(或重建)过程可用如下“递推”过程来完整描述,即

$$\phi_u(2) = \phi_w(2) - 2\pi \text{INT} \left[\frac{\phi_w(2) - \phi_u(1)}{\pi} \right]$$

其中,算子 $\text{INT}[\cdot]$ 为取整运算. 对于 $t=4$ 的折叠相位仍然可以通过比较 $\phi_w(4)$ 与 $\phi_u(2)$ 之间的差值情况来获得展开位相. 即

$$\phi_u(4) = \phi_w(4) - 2\pi \text{INT} \left[\frac{\phi_w(4) - \phi_u(2)}{\pi} \right].$$

所以,由数学归纳法,对于 $t=1, 2, 4, \dots, s (s=2^n, n=0, 1, 2, 3, \dots)$, 其展开相位为

$$\phi_u(2t) = \phi_w(2t) - 2\pi \text{INT} \left[\frac{\phi_w(2t) - \phi_u(t)}{\pi} \right] \quad (1)$$

其中 $\text{INT}[\cdot]$ 为取整运算,折叠位相图

$$\phi_w(t) = \arctan \left(\frac{I_3(t) - I_1(t)}{I_2(t) - I_0(t)} \right) \quad (2)$$

2 时间相位展开算法边界值的推导

如图 2 所示, P 是投影光学系统的出瞳, C 是成像系统的入瞳, 成像系统的光轴与参考平面垂直, 而投影系统的光轴与成像系统的光轴在同一平面内, 且与参考平面共同相交于 O 点, d 是成像系统与投影系统光瞳之间的距离, l 是成像系统的入瞳与参考平面的距离. h 为被测物体上任一点 D 的高度

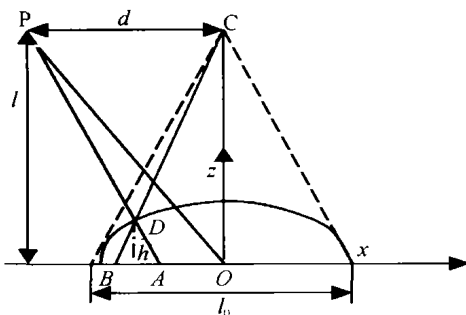


图 2 用结构光法测量物体轮廓的标准光路结构
Fig. 2 The standard optic path configuration for surface profiling with structured light

值, l_0 为 CCD 摄像机的视场宽度. 实验平面内没有物体的时候, 条纹投影到参考平面上, 可计算出参考平面各点的相位分布; 放入被测物体后, 可以计算出被测物体各点的相位分布. 物体上的 D 点与参考面上的 A 点具有共同的相位, 即存在 $\phi_D = \phi_A$, 而物体上 D 点与参考面上的 B 点在 CCD 摄像机靶面上成像于同一点. 因此

$$\phi_B - \phi_A = \phi_B - \phi_D = \phi_{BD} \quad (3)$$

ϕ_{BD} 为物体上的 D 点与参考面上 B 点的相位差. 如果 $\phi_{BD} > 2\pi$ 将被截断在反三角函数的主值范围内, 即发生 2π 相位跳变. 另一方面, 由光路结构图可知, $\Delta CPD \approx \Delta BAD$. 因而, $\overline{AB}/\overline{PC} = h/(1-h) = \overline{AB}/d$ 即

$$\overline{AB} = dh/(1-h) \quad (4)$$

此外, 令 CCD 摄像机视场宽度 l_0 对应的总相位差为 ϕ_0 , 由图 2 可知

$$\phi_{AB} = (\overline{AB}/l_0) \phi_0 \quad (5)$$

由式(3), (4)及(5)可得

$$\phi_{BD} = \frac{dh}{(1-h)l_0} \phi_0 \quad (6)$$

对于时间相位展开算法中所采用的空间频率按指数变化的投影条纹序列而言, $\phi_0 = 2\pi, 4\pi, 8\pi, \dots$, 由式(6)如果被测物体上 D 点不随着时间变化而变化, ϕ_{BD} 会随着 ϕ_0 的变化而变化, 而当 $\phi_{BD} > 2\pi$ 时, 被测物体上 D 点将发生 2π 相位跳变. 因此, 可以通过被测物体的最高点发生跳变时, 所对应的 ϕ_0 值来判断时间相位展开算法的临界值.

3 两种算法的时间复杂度分析

下面对 H-S 算法与本文所提出的改进算法进行时间复杂度分析. 对于时间相位展开算法: 需要获得 n 种条纹频率的二维条纹编码图, 其中按四步相移算法, 每种条纹频率二维条纹编码又需要有初相位分别为 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 四种条纹图.

对于 H-S 算法, 其临界条件由式 $\phi_w(1) = \arctan \left(\frac{I_3(1) - I_1(1)}{I_2(1) - I_0(1)} \right)$ 需要 4 次运算. 另外, 获得相邻折叠位相差共需 16 次运算^[1], 相位展开过程共需 6 次运算^[8]. 因此, 对于整个相位展开过程 H-S 算法总的时间复杂度为

$$T = O(4) + O(16(n-1)) + O(6(n-1)) \quad (7)$$

而对于本文提出的改进算法, 获得折叠位相图由式(2)可知共需 4 次运算. 进行相位展开过程由式(1)可知共需 5 次运算. 因此, 对于整个相位展开过程总的时间复杂度为

$$\bar{T} = O(4n) + O(5(n-1)) \quad (8)$$

由式(7)及(8)可以看出本文提出的改进算法明显的提高了算法的效率.

另外,考虑初始条件的选取,折叠位相在 $n = k$ 时发生跳变,则对于式 $\bar{T} = O(4n) + O(5(n-1))$, 则时间复杂度为

$$\bar{T} = O(4(n-k+1)) + O(5(n-k)) \quad (9)$$

更加提高了本文算法的效率.

4 时间维-相位重建改进算法的实验

4.1 实验系统

依据时间维-相位重建改进算法,设计的实验系统如图3.

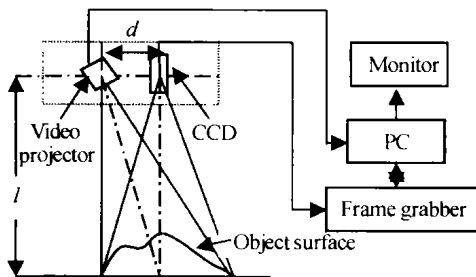


图3 基于数字视频投影的三维数字成像装置
Fig.3 The setup for 3-D digital imaging system with digital video projector

本文采用的投影系统是 ASK 的 C60 数字投影仪,它的亮度是 1300 lm,分辨率为 1024×768 . CCD 摄像机选用的是松下公司生产的型号为 WV-CP460/CH 的 CCD 摄像机. PC 机采用奔腾四主频为 2 GHz 的 CPU,其中选用了可以支持双监视器的显卡,从而可以实现在一台 PC 机上同时进行结构光条纹的投影照明和编码条纹图的数据采集. 成像系统和投影系统中心距离 d 为 180 mm,参考平面到成像系统中心的距离 l 为 1200 mm. 视场宽度 $l_0 = 150$ mm,应用数字视频投影仪,并采用 VC++ 编程实现照明投影条纹的生成.

4.2 实验过程和数据处理结果

首先通过式(6)来判断算法的初始条件,即视场内的条纹个数. 对于本文作者所采用的实验系统装置, $L = 1200$ mm, $d = 180$ mm, $l_0 = 150$ mm, 台阶状被测物体最高点大约为 $h = 48$ mm. 因此由式(6)可得,对于台阶状被测物体 $\phi_0 > 40\pi$ 时将会发生 2π 相位跳变. 即在采用时间相位展开算法过程中,视场内的条纹个数多于 20 个条纹时,所得的折叠位相图将发生相位跳变. 所以选择为 $t = 16$ 初始条件.

然后,通过 VC++ 编程产生初相位分别为, $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ 空间频率为 $t = 16, t = 32$ 的二维空间编码条纹图案. 将这些图案分别投影到参考平面及被测物体上进行采集. 如图4所示. 之后将采集的图像进行四步相移算法获得 $t = 16, t = 32$ 时的折叠位

相图. 如图5所示,最后通过 VC++ 实现式(1)进行相位展开,所得相位展开图及三维视图如图6所示.

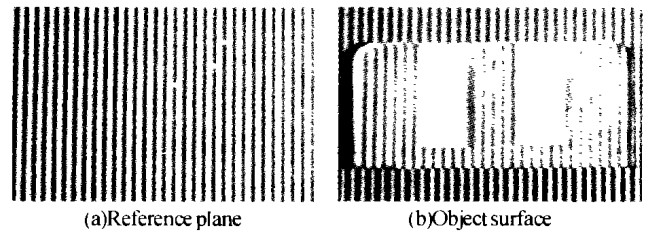


图4 $t = 32$ 初相位为 0 时的二维编码条纹图
Fig.4 The 2-D coded fringe pattern with ($t = 32$) and phase shifts of 0

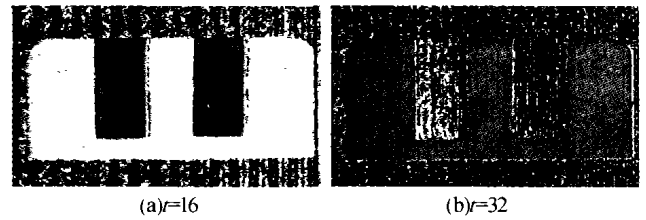


图5 折叠位相图
Fig.5 The wrapped phase map

4.3 实验结果分析

由图6可以看出,本文算法可以避免相位误差的传播,有效地解决了深度表面不连续和存在隔离物表面拓扑结构的景物相位重建. 相对于 H-S 算法而言,本文算法仅用 $t = 16, t = 32$ 两种空间频率的条

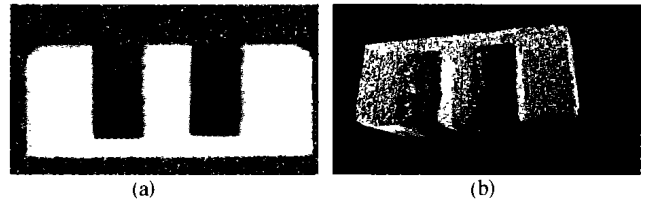


图6 (a) $t = 32$ 时的展开相位图, (b) 三维视图
Fig.6 (a) The unwrapped phase map, (b) 3-D plot

纹图获得 $t = 32$ 时的相位展开图. 所需采集的空间二维编码条纹图个数为 16 幅. 如果采用 H-S 算法,需采集 $t = 1, 2, 4, 8, 16, 32$ 六种空间频率总共 48 幅二维编码条纹图. 很显然,本文算法极大的节省了时间相位展开算法所需条纹图的数量. 增加了时间相位展开算法的实时性. 同时节省了算法的运行时间,提高了效率.

5 总结

基于 H-S 算法的局限性,本文提出了一种时间维-相位重建的改进算法,可以避免相位误差的传播,有效地解决深度表面不连续和存在隔离物表面拓扑结构的景物相位重建. 与 H-S 算法相比,本文算法有以下不同之处:1) 在本文算法的描述过程中,给出了清晰的几何图像,而几何图像对于算法的理解和实现都是至关重要;2) H-S 算法是利用相邻空间频率条纹图的折叠位相差进行相位展开,增加

了算法的时间复杂度. 而本文算法在获得每种空间频率条纹的折叠位相图进行相位展开, 从而减少了算法运行时间, 增加了算法的效率. 3) H-S 算法进行相位展开需要采集大量的二维空间编码条纹图, 从而极大的减少了算法的实时性. 而本文算法推导了时间相位展开算法的初始条件, 有效的减少了所需采集的二维空间编码条纹图. 增加了算法的实时性. 因此本文所提出的改进算法本身具有简易性, 鲁棒性强的特点, 适合运用于准动态形变测量的情况, 提高了实时相位展开的可行性.

参考文献

- Huntley J M, Saldner H O. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis. *Appl Opt*, 1993, **32**(17):3047 ~ 3052
- Zhao Huandong, Li Zhineng, Bi Gang. A novel fourier-transform profilometry based on differentiation. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4):508 ~ 512
- 王冬梅, 方如华, 张修银. 载波相移云纹干涉法研究. 光子学报, 2001, **30**(11):1376 ~ 1380
- Wang D M, Fang R H, Zhang X Y. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1376 ~ 1380
- Takeda M, Ina H, Kobatashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(1): 156 ~ 160
- Ghiglia D C, Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. Chapter 2 ~ Chapter 6, and references therein
- Peng X, Zhu S M, Ye S H. The problem of phase unwrapping for fringe pattern overlaid with random noise and segmented-discontinuity. *Proc SPIE*, 1996, **2889**: 96 ~ 104
- Lo C F, Peng X, Cai L. Surface normal guided method for two-dimensional phase unwrapping. *Optik*, 2002, **113**(10): 439 ~ 447
- Huntley J M, Saldner H O. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(9): 986 ~ 992

An Enhanced Temporal Phase Unwrapping Algorithm

Peng Xiang^{1,2}, Yang Zhaoliang², Niu Hanben¹

¹ Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronics and System of Guangdong Province, Guangdong 518060

² National Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation, Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2003-07-07

Abstract An enhanced scheme for temporal phase unwrapping is presented. Temporal unwrapping based on the wrapped maps is proposed to increase the efficiency. The determination and modification of the initial condition is deduced to reduce 2D coded fringe patterns and increase the possibility of real time phase unwrapping. So it is solved better that the problem of phase unwrapping for the surfaces with discontinuous range data or the scene constructed by isolated objects. Experimental results prove the enhanced algorithm valid and feasible.

Keywords Wrapped phase; Temporal phase unwrapping; Three-dimension shape measurement



Peng Xiang was born in Dec. 1955. He received his M. S. and Ph. D. in the College of Precision Instrumentation and Optoelectronics Engineering, Tianjin University. Now he is a professor in Shenzhen University. His current interests are 3D imaging and modeling, optical and laser metrology, optical information cryptography.