

# 基于时间相位的反向条纹测量方法

金川, 肖朝

(成都信息工程大学光电技术学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为提升反向条纹生成的速度和精度,提出一种基于时间相位的反向条纹生成方法。方法在垂直和水平两个方向上分别生成一系列条纹周期不同的标准结构光条纹并依次投射到待测物体上,然后将垂直和水平方向的标准条纹和反射得到的变形条纹基于三频时间相位展开算法展开,可得到在两个方向上连续分布的相位,并进一步生成反向条纹。计算机实物仿真实验表明,与已有方法相比,文中所提方法在原理上避免了空间相位展开法引起的像素间传播误差,在反向条纹生成的精度上有所改进,具有良好的实际应用价值。

**关键词:**光学测量;反向条纹生成;时间相位;结构光投影

**中图分类号:**TP391.7

**文献标志码:**A

## 0 引言

反向条纹投影技术是在传统的光学条纹测量方法的基础上发展而来的,除具有传统条纹投影技术的非接触、高精度、高速度等优势外,还具有对微小形变异常敏感的特性,因此广泛应用于工业生产流水线的产品检测、多投影机拼接校正<sup>[1-2]</sup>等领域中。

反向条纹投影技术最早是在1997年由Schönleber等<sup>[3]</sup>提出的,后来国内外许多学者对其进行研究和发展<sup>[4-9]</sup>。根据条纹生成方式的不同,反向条纹生成方法大体上可以分为逆向映射法<sup>[10-11]</sup>和正向映射法<sup>[12-13]</sup>两类。前者将相机坐标系(对应变形条纹)上相位展开后像素点的相位值映射到投影机坐标系(对应标准条纹)上,然后根据不同的插值算法将该相位值分配到投影机坐标系的整数像素上;后者是首先根据相位信息构建投影机坐标系与相机坐标系之间的亚像素级映射关系,然后将投影反向条纹后期望得到的条纹相位值利用上述映射关系直接赋值到相机坐标系所对应的像素点上即可生成反向条纹。无论是哪种方法,在进行相位计算时均采用了空间相位展开方法,因此在测量物面变化剧烈的物体时精度会受影响。

为克服上述缺点,结合时间相位展开方法的优势,提出一种基于时间相位的反向条纹测量方法。方法首先生成一系列不同频率的结构光正弦条纹,然后依次用投影机投射到待测三维物体上,并用相机进行拍摄,得到变形条纹。利用时间相位展开算法对标准条纹和变形条纹进行相位展开,根据展开后的连续相位计算反向条纹相位并进一步生成反向条纹。计算机仿真实

验表明,文中所提方法能够在提升反向条纹的生成精度的同时大幅拓展其适用范围。

## 1 基本原理

### 1.1 反向条纹投影技术

传统的结构光条纹投影技术<sup>[13]</sup>是投射标准条纹到待测物体上,用相机拍摄被物体表面调制后的变形条纹,进行相位展开后根据相位-高度对应关系即可恢复出三维物体的面形。反向条纹投影技术则是根据变形条纹计算出反向条纹并将反向条纹投射到物体上,如果反向条纹计算准确则会在物体表面上得到无形变的期望。条纹(通常为直条纹),否则在有缺陷的位置上条纹会产生扭曲变形。因此该方法能够直观且高效地检测出物体上的微小形变。图1给出传统条纹投影与反向条纹投影对比效果图。

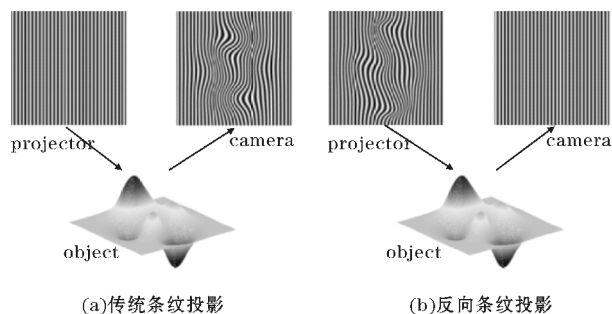


图1 传统条纹投影与反向条纹投影的区别

利用反向条纹投影技术进行测量,为在二维相位图中精确定位,通常需要垂直和水平两套结构光条纹。结构光条纹可以表示为

$$I_v(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f \cdot y]$$

$$I_h(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f \cdot y] \quad (1)$$

其中  $I_v(x, y)$  和  $I_h(x, y)$  分别表示垂直和水平方向的结构光条纹光强,  $a(x, y)$  是条纹图的背景光强,  $b(x, y)$  称为条纹图的调制光强,  $f$  是结构光条纹的空间频率。

为得到条纹图上每个像素点的相位值,需要使用相位测量轮廓术(PMP)生成具有固定相位差的一组标准条纹。以 4 步相移为例,公式如下:

$$I_{isv}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f \cdot x + \frac{\pi}{2} \times i]$$

$$i = 0, 1, 2, 3$$

$$I_{ish}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f \cdot y + \frac{\pi}{2} \times i]$$

$$i = 0, 1, 2, 3 \quad (2)$$

在公式(2)中,相邻的相移条纹图之间存在  $\pi/2$  的相移。将生成的标准相移条纹图依次投射到物体上,可得到被物体表面调制后的变形条纹图:

$$I_{idv}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f \cdot x + m(x, y) + \frac{\pi}{2} \times i] \quad i = 0, 1, 2, 3$$

$$I_{idh}(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f \cdot y + m(x, y) + \frac{\pi}{2} \times i] \quad i = 0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

其中  $m(x, y)$  表示物体表面引起的相位调制。为方便计算,需要将条纹图光强度信息转换为相位信息:

$$\varphi_\omega(x, y) = \arctan\left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}\right] \quad (4)$$

由式(4)解出的相位值  $\varphi_\omega(x, y) \in (-\pi, \pi)$ , 称为截断相位, 相位函数被截断在反三角函数的主值范围内, 因此不连续。为从相位函数中计算被测物体的相应信息, 必须将反三角运算引起的截断相位分布恢复成连续相位分布, 这就是相位展开。下面进一步讨论相位展开算法<sup>[17-18]</sup>中的时间相位展开算法。

## 1.2 时间相位展开方法

时间相位展开方法最早是由英国科学家 Huntley<sup>[14]</sup>和 Saldner<sup>[15]</sup>等于 1993 年提出的, 方法通过投影一系列频率不同的结构光条纹图到物体表面, 拍摄得到一个受物体表面调制后的变形条纹图序列。有别于传统的空间相位展开方法, 基于时间相位展开方法的每个像素点的相位值不依赖任何空间相邻点, 而是在不同频率条纹图下自身的压缩相位迭代展开, 是一种严格意义上的独立展开。这种展开方式可以避免误差的传播, 从而减少噪声的影响。其基本思想是使光栅条纹的频率随着时间的变化而变化。采用时间相位展

开方法的突出优点是可以准确测量表面不连续的等复杂面形物体。

时间相位展开方法按照投影时间与频率的不同大致可以分为: 线性型、指数型、负指数型、三频法等。线性型需要在每个时间点都投影图像, 数量庞大且极其耗时, 不适于实际的工业现场测量; 而指数型或负指数型方法仅需在很有限的若干个时间点投影图像, 就能够达到与线性型方法形同的测量精度; 三频展开法仅需 3 套周期不同的条纹  $t = 1, \sqrt{s}, s$  ( $s$  为最大投影条纹数量) 做时间相位展开, 极大地缩短了测量时间, 可以在某种程度上满足实时性的要求。

基于此, 文中采用三频时间相位展开方法。首先定义相位展开运算符  $U[\varphi_1, \varphi_2]$ :

$$U[\varphi_1, \varphi_2] = \varphi_1 - 2\pi \text{NINT}\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2\pi}\right) \quad (5)$$

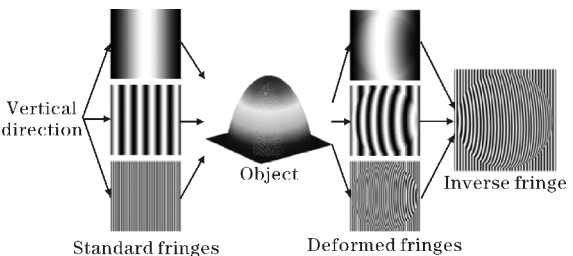
其中  $\varphi_1, \varphi_2$  表示相位,  $\text{NINT}(\cdot)$  表示四舍五入取整。三频展开法需要投影 3 组频率不同的条纹, 每组条纹周期数分别为  $t = 1, \sqrt{s}, s$ , 以每组条纹进行 4 次相移为例, 在得到式(4)中的截断相位后, 利用以下公式进行相位展开:

$$\varphi_u(v^k) = U[\varphi_w(v^k), v \cdot \varphi_u(v^{k-1})] \quad (6)$$

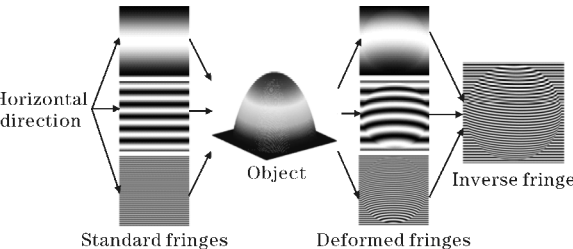
其中  $\varphi_u$  为展开后的连续相位,  $\varphi_w$  为截断相位,  $v = \sqrt{s}, k = 1, 2$ , 起始展开相位值  $\varphi_u(1) = \varphi_w(1)$ , 在整个相位展开过程中, 只需要两次计算即可。

## 1.3 基于时间相位的反向条纹投影

图 2 为文中所提方法的实现原理流程图。



(a) 垂直方向条纹测量

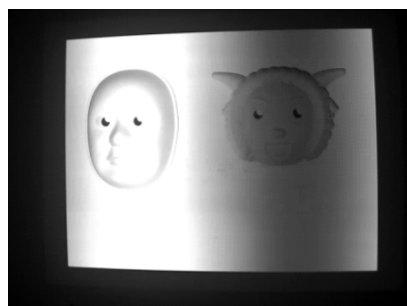


(b) 水平方向条纹测量

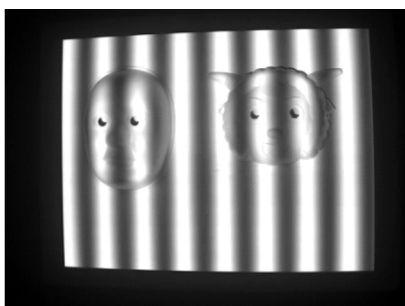
图 2 基于时间相位的反向条纹投影测量原理

在垂直和水平两个方向上分别生成一系列条纹周期不同的标准结构光条纹,然后将这些条纹依次投射到待测物体上,可以用相机拍摄到由于被物体表面调制而生成的变形条纹图。将垂直和水平方向的标准条纹和变形条纹基于时间相位展开算法展开后,可得到在两个方向上连续分布的相位,利用展开后的标准相位和变形相位根据反向条纹生成方法即可生成两个方向上的反向条纹。

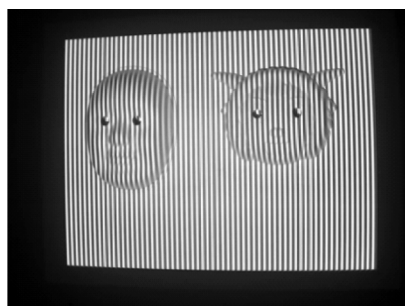
## 2 实验与结果讨论



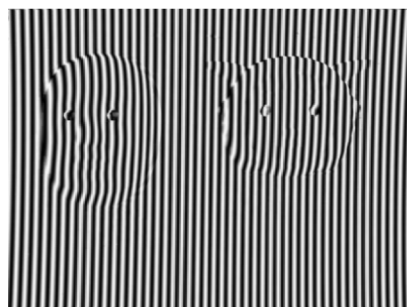
(a)周期数为1的垂直变形条纹



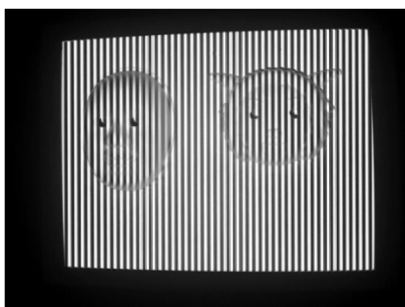
(b)周期数为8的垂直变形条纹



(c)周期数为64的垂直变形条纹



(d)垂直反向条纹



(e)投影垂直反向条纹后得到的直条纹

图3 垂直变形条纹的生成过程

### 2.2 实物结果讨论

从图3可以看出,基于三频时间相位展开的反向条纹生成方法能够以较大的精度实现对物体的测量,面具的眼睛空洞位置也没有影响相位的正确展开,成功避免了空间相位展开法中引入的误差扩散问题,因此文中所提的方法可以拓展反向条纹的测量领域。

## 3 结束语

提出一种基于三频时间相位展开的反向条纹生成方法。方法利用三频时间相位展开算法构建投影机坐标系与相机坐标系之间的亚像素级映射关系。由于三频时间相位算法具有测量精度高、能够用于表面非连

### 2.1 实物仿真实验

为验证文中所提方法的有效性和可行性,设计实物仿真实验。

测试物体为两个长宽分别为  $8\text{ cm} \times 6\text{ cm}$  和  $6\text{ cm} \times 8\text{ cm}$  的卡通面具,采用斜投影正拍摄的方式进行测量。投影机和拍摄相机的分辨率均为  $1280 \times 960$ ,在垂直和水平两个方向上分别投影3套周期不同的条纹  $t = 1, 8, 64$ 。图3(a)(b)(c)依次为周期不同的条纹  $t = 1, 8, 64$  的垂直变形条纹图,通过三频展开法生成的垂直反向条纹图如图3(d),投影结果为图3(e)所示。

续物体测量等优势,将其与反向条纹生成方法相结合可大幅提升其测量精度。实物仿真实验表明,文中所提方法在反向条纹生成的精度上有较大提升,具有良好的实际应用价值。

致谢:感谢成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201516)对本文的资助

### 参考文献:

- [1] 蔡元元,苏显渝.采用多投影器的反向条纹投影技术[J].光学学报,2006,26(11):1641-1646.
- [2] 肖朝,杨红雨,梁海军,等.多投影显示系统结构光几何校正算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(6):802-808.

- [3] M Schönleber, H-J Tiziani. Fast and flexible shape control with adapted LCD fringe masks [C]. SPIE, 1997, 3098: 35–42.
- [4] Michael K K, Wolfgang O, Werner J. Inverse projected fringe technique [C]. SPIE, 2001, 4317: 505–510.
- [5] Thorsten B, Li Wansong, Christoph von K, et al. Object adapted inverse pattern projection-generation, evaluation and applications [C]. SPIE, 2003, 4933: 291–296.
- [6] Li Wansong, Bothe T, Kalms M, et al. Applications for inverse pattern projection [C]. SPIE, 2003, 5144: 492–503.
- [7] Li Wansong, Bothe T, Osten W, et al. Object adapted pattern projection-Part I: generation of inverse patterns [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2004, 41(1): 31–50.
- [8] Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse projected-fringe technique based on multi projectors [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2007, 45: 1028–1034.
- [9] 唐廷勇, 苏显渝. 反向条纹投影技术及其在数字地球仪中的应用 [J]. 光电工程, 2010, 37(4): 60–65.
- [10] 蔡元元, 苏显渝, 李勇, 等. 基于三次插值坐标变换的反向条纹投影技术 [J]. 光电工程, 2006, 33(5): 85–90.
- [11] 陈云富, 李勇, 张海花, 等. 采用 RBF 神经网络求解反向条纹的研究 [J]. 光学与光电技术, 2010, 8(5): 37–40.
- [12] 肖朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2120–2124.
- [13] 李雪, 张启灿. 基于剪枝优化算法的反向条纹生成方法 [J]. 光学学报, 2013, 33(12).
- [14] Lawson C L. Software for C surface interpolation [M]. New York: Academic Press, 1997.
- [15] Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H T. The quickhull algorithm for convex hulls [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 1996, 22(4): 469–483.
- [16] Yu Jie, Lv Pin, Zheng Changwen. A comparative research on methods of Delaunay triangulation [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8): 1158–1167.
- [17] 杨锋涛, 罗江龙, 刘志强, 等. 相位展开的 6 种算法比较 [J]. 激光技术, 2008, 32(3): 323–326.

## Inverse Fringe Generation Method based on Temporal Phase

JIN Chuan, XIAO Chao

(College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to improve the speed and accuracy of inverse fringe, an inverse fringe generation method based on temporal phase is proposed. In this method, a series of standard structured light fringe of different period of fringe are generated in the vertical and horizontal directions, and project it onto the object in turn. Then, the standard structured light fringe and deformation fringe which is generated by reflection are unwrapped by algorithm based on triple frequency temporal phase unwrapping. Finally, continuous distribution phase are available through the above method and the inverse fringe could be generated easily. The real object experiments demonstrate that the method proposed in this paper gets an improvement at the accuracy of inverse fringe generation compared with existing methods which avoid the error-diffusing of pixels is caused by spatial phase unwrapping. Thus, the proposed method has a good practical application value.

**Key words:** optical measurement; inverse fringe generation; temporal phase; structured light projection