

文章编号: 0253-2239(2006)01-0043-6

相位解码的时-空重建算法*

彭翔^{1,2} 邱文杰¹ 韦林彬¹ 张鹏¹ 田劲东²

(¹ 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
² 深圳大学光电子学研究所教育部光电子器件与系统重点实验室, 深圳 518060)

摘要: 基于相位映射的三维传感技术对几何形状和拓扑结构复杂或表面梯度很大的物体进行绝对相位测量及相位重建仍然是一个困难的问题。近年来国际上提出了一种时间维度相位重建算法可以对此提供一种解决方案。然而,该算法对结构光照明系统提出了很高的要求,当系统无法满足算法要求时,重建结果存在严重的噪声。针对这一问题,提出了一种利用分段函数构造的相位解码的时-空重建算法。该算法在相位重建过程中同时考虑时间维度和空间维度相位的相对关系,使得空间频率非严格按指数增长的条纹序列可以得到正确的重建,消除了跳变边界的相位模糊问题,从而可以更加有效地解决深度表面不连续和存在相互孤立物表面拓扑结构的景物相位重建问题。实验结果证明了此算法的可行性和有效性。

关键词: 信息光学; 三维形貌测量; 时-空重建算法; 分段函数; 声光偏转器

中图分类号: TN863 文献标识码: A

Phase Decoding Based On Temporal-Spatial Phase Unwrapping

Peng Xiang^{1,2} Qiu Wenjie¹ Wei Linbin¹ Zhang Peng¹ Tian Jindong²

(¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrumentation,
Tianjin University, Tianjin 300072
² Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Key Laboratory of Optoelectronic
Devices and Systems of Education Ministry of China, Shenzhen 518060)

Abstract: Absolute phase measurement and phase reconstruction to object surfaces with complex geometric and topologic shapes still remain difficult for phase mapping based on three-dimensional (3D) sensing. Recently, an approach based on temporal phase unwrapping has been proposed to handle this task. However, it is found from the experiment that temporal phase unwrapping imposed severe restriction to the illumination system of structured light. If the required condition is not satisfied, the temporal phase unwrapping will cause severe noise in the reconstructed phase map. To overcome this problem, a new approach based on spatial and temporal phase unwrapping is presented, which is constructed with piece-wise functions by taking both temporal and spatial factors into account during the process of phase reconstruction. This leads to the effective phase reconstruction even under the situation that the number of fringes is not exact the integer exponential of power 2, which is an essential restriction imposed on previous temporal phase unwrapping algorithm. The approach eliminates the problem of phase ambiguity at the boundaries of phase jump corresponding to the wrapped phase map and therefore provides a more efficient solution to the phase reconstruction of 3D object surfaces with complex geometric and topologic shapes or to a scene with isolated objects. Experimental results have demonstrated the proposed approach.

Key words: information optics; three-dimensional measurement; temporal-spatial phase unwrapping; piece-wise function; acoustic-optical deflector

* 国家自然科学基金(60275012, 60472107)、广东省普通高校自然科学研究重点项目(04Z010)、广东省自然科学基金(031804, 04300864)和深圳市科技计划项目(200341)资助课题。

作者简介: 彭翔(1955~),男,湖北人,教授,博士生导师,主要从事三维数字成像及造型、光学信息安全、现代光学测试技术的研究。E-mail: xpeng@szu.edu.cn

收稿日期: 2005-05-10; 收到修改稿日期: 2005-06-07

1 引 言

物体表面的三维传感是三维数字成像及造型的核心技术之一。国内外对激光扫描、成像雷达、聚焦分析、编码结构光、全息和散斑干涉、莫尔、数字摄影测量等三维传感理论和技术都进行了大量的研究^[1~5]。但到目前为止,这些三维传感概念的实现都在精度、视场尺寸与速度之间以及速度与灵活性之间取折衷,从而限制了它们在大量三维动态传感问题中的应用。基于相位映射的三维传感技术具有并行数据采集的特点,因而这种技术在动态三维数字化的应用中具有很大潜力。然而,目前发展的基于相位映射的三维传感技术在应用中仍面临一些重要障碍需要克服,例如对于几何形状和拓扑结构复杂或表面梯度很大的物体进行绝对相位测量及其相位重建的问题^[6]。

为了解决非正常跃变区域的相位重建问题,Huntley与Saldner提出了一种时间维度相位重建算法^[7,8],以下简称H-S算法,该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,对每一像素对应的相位以时间维的函数进行相位重建,使每一点的相位重建过程独立进行,从而避免了重建过程中的误差传播。最近,Peng等^[9,10]对该算法进行了改进,提高了算法的效率和实时性。

然而,H-S算法需要空间频率严格按指数增长的条纹序列,这无疑对结构光照明系统提出了很高的要求。目前提出的各种结构光照明系统,都无法严格满足算法的要求。对于基于视频投影的结构光照明系统^[11,12],由于计算机处理数据的离散性而带来的舍入误差,只能产生空间频率近似按指数增长的条纹序列;对于基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统^[13,14],由于射频信号的频率不能连续变化,无法产生空间频率严格按指数增长的条纹序列。

本文首先简要分析当条纹序列的空间频率非严格按指数增长时,时间维度算法存在的问题,然后提出一种新的算法,使得空间频率非严格按指数增长的条纹序列可以得到正确的相位重建。同时,还报道了验证这种新算法有效性和可行性的实验方法。

2 时间维度相位重建算法的局限性

H-S算法的核心思想是使每一点的相位重建过程独立进行。为此,使空间频率按指数增长的结构

光投射到物体表面,采样得到载波频率按2的整数次幂增长的编码条纹序列。

文献[9]提出的H-S改进算法的计算过程如下:首先通过被测物体的最高点发生跳变时所对应的相位值 ϕ_0 来判断算法的临界空间频率 t_0 ,即载波频率为 t_0 时相位不发生折叠,载波频率为 $2t_0$ 时相位发生折叠;然后利用条纹分析算法获得载波频率 $t = 2\nu t_0$ ($\nu = 1, 2, 3, \dots$)的折叠相位 $\phi_w(t)$,其展开相位用 $\phi_u(t)$ 表示;由于 $t = t_0$ 时没有发生折叠,即

$$\phi_w(t_0) = \phi_u(t_0),$$

利用迭代公式^[9]

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

其中,ent表示“舍入取整运算”算子,可以从各阶条纹图中得到重建的相位图 $\phi_u(t)$ 。

在实验中发现:由于结构光照明系统的各种误差,所以无法得到空间频率严格按2的整数次幂增长的条纹序列。若实验中获得空间频率分别为 t_0 和 $2t_0 + \Delta t$ ($|\Delta t| \ll t_0$)的两幅折叠相位图 $\phi_w(t_0)$ 和 $\phi_w(2t_0 + \Delta t)$,其中 $t_0 = 60.0 \text{ m}^{-1}$, $\phi_w(t_0)$ 没有发生折叠。

建立物体在某一截面折叠相位值的解析几何图像(如图1),其中实线和虚线分别表示 $\phi_w(t_0)$ 和 $\phi_w(2t_0 + \Delta t)$ 随像素值变化的曲线。若 $\Delta t = -6.67 \text{ m}^{-1}$,如图1(a)所示,当像素值等于86或425时,折叠相位刚刚发生跳变:

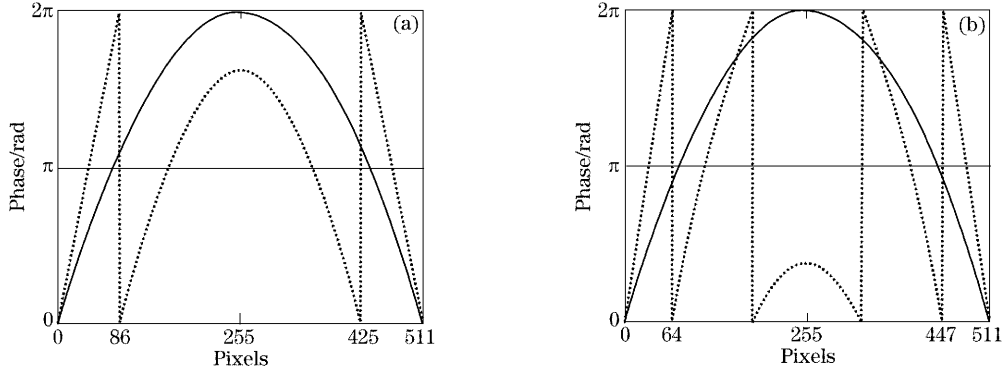
$$\begin{cases} \phi_w(2t_0 + \Delta t) = 0, \\ \phi_u(t_0) > \pi, \end{cases}$$

代入迭代(1)式得 $\phi_u(2t_0 + \Delta t) = 4\pi$,产生了 2π 跳变误差;若 $\Delta t = 6.67 \text{ m}^{-1}$,如图1(b)所示,当像素值等于64或447时,在折叠相位的跳变边界上相位尚未发生跳变:

$$\begin{cases} \phi_w(2t_0 + \Delta t) = 2\pi, \\ \phi_u(t_0) < \pi, \end{cases}$$

代入迭代(1)式得 $\phi_u(2t_0 + \Delta t) = 0$,产生了一 2π 跳变误差。

由以上分析可以看出,当实验无法得到空间频率严格按2的整数次幂增长的条纹序列时,利用H-S算法重建会产生 2π 跳变误差,使获得的展开相位图中存在大量的噪声。为了消除这些噪声,必须改进时间维度相位重建算法,使其对条纹序列的空间频率倍数关系的敏感程度降低,从算法上防止噪声点的产生。

图 1 相位变化曲线。(a) $\Delta t = -6.67 \text{ m}^{-1}$, (b) $\Delta t = 6.67 \text{ m}^{-1}$ Fig. 1 Phase map. (a) $\Delta t = -6.67 \text{ m}^{-1}$, (b) $\Delta t = 6.67 \text{ m}^{-1}$

3 相位解码的时-空重建改进算法

由迭代公式(1)可以看出:误差是由舍入取整运算产生的,所以将迭代公式的取整运算改为分段函数,对折叠相位进行分段讨论。

若利用条纹分析算法获得载波频率为 t_0 和 $t_n = 2^n t_0 + \Delta t_n (n=1, 2, 3 \dots)$ 的折叠相位 $\phi_w(t_0)$ 和 $\phi_w(t_n)$, 其中 Δt_n 为各阶折叠相位的载波频率相对于 2 的整数次幂的偏离误差且 $|\Delta t_n| \ll t_0$, $\phi_w(t_0)$ 没有发生折叠,即 $\phi_w(t_0) = \phi_u(t_0)$ 。建立物体在某一截面相位值的解析几何图像,如图 2 所示,其中实线和虚线分别表示 $\phi_u(t_0)$ 和 $\phi_w(t_1)$ 随像素值变化的曲线。可以对 $\phi_u(t_0)$ 进行分段讨论:

1) 当 $0 \leq \phi_u(t_0) < \pi/2$ 时, $\phi_w(t_1)$ 不可能发生折叠, $\phi_u(t_1) = \phi_w(t_1)$;

2) 当 $\pi/2 \leq \phi_u(t_0) < 3\pi/2$ 时,可能发生 1 次折叠;若 $\phi_u(t_0) \leq \phi_w(t_1)$, 不发生折叠,

$$\phi_u(t_1) = \phi_w(t_1);$$

若 $\phi_u(t_0) > \phi_w(t_1)$, 发生 1 次折叠,

$$\phi_u(t_1) = \phi_w(t_1) + 2\pi;$$

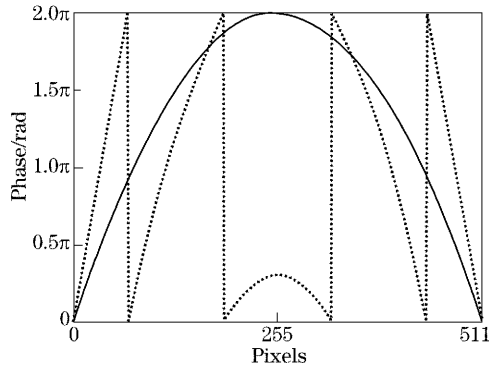


图 2 折叠相位变化曲线

Fig. 2 Wrapped phase map

3) 当 $3\pi/2 \leq \phi_u(t_0) \leq 2\pi$ 时,可能发生 2 次折叠,将 $\phi_u(t_0)$ 向下平移 π 个单位,然后按以上方法进行判断;

若 $\phi_u(t_0) - \pi \leq \phi_w(t_1)$, 发生 1 次折叠,

$$\phi_u(t_1) = \phi_w(t_1) + 2\pi;$$

若 $\phi_u(t_0) - \pi > \phi_w(t_1)$, 发生 2 次折叠,

$$\phi_u(t_1) = \phi_w(t_1) + 4\pi.$$

至此得到了载波频率为 t_1 的展开相位 $\phi_u(t_1)$, 如图 3 所示。

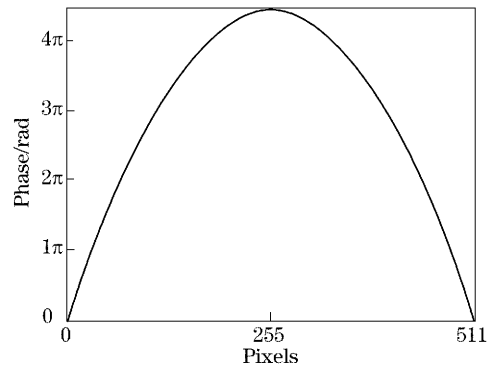


图 3 展开相位变化曲线

Fig. 3 Unwrapped phase map

假设得到了载波频率为 $t_{k-1} = 2^{k-1} t_0 + \Delta t_{k-1}$ ($k=2, 3, \dots, n$) 的展开相位 $\phi_u(t_{k-1})$ 和载波频率为 $t_k = 2^k t_0 + \Delta t_k$ 的折叠相位 $\phi_w(t_k)$, 其中 $0 < \phi_u(t_{k-1}) \leq 2^k \pi + \pi/2$, 同样可以对 $\phi_u(t_{k-1})$ 进行分段讨论:

当 $0 \leq \phi_u(t_{k-1}) < \pi/2$ 时, $\phi_w(t_k)$ 不可能发生折叠, $\phi_u(t_k) = \phi_w(t_k)$;

当 $(2^l - 3/2)\pi \leq \phi_u(t_{k-1}) < (2^l - 1/2)\pi$ 时 ($l=1, 2, \dots, k$), 可能发生 $2^l - 1$ 次折叠;

若 $\phi_u(t_{k-1}) - (2^l - 2)\pi \leq \phi_w(t_k)$, 发生 $2^l - 2$ 次折叠, $\phi_u(t_k) = \phi_w(t_k) + 2(2^l - 2)\pi$;

若 $\phi_u(t_{k-1}) - (2^l - 2)\pi > \phi_w(t_k)$, 发生 $2^l - 1$ 次折叠, $\phi_u(t_k) = \phi_w(t_k) + 2(2^l - 1)\pi$ 。

当 $(2^l - 1/2)\pi \leq \phi_u(t_{k-1}) \leq (2^l + 1/2)\pi$ 时, 可能发生 2^l 次折叠,

若 $\phi_u(t_{k-1}) - (2^l - 1)\pi \leq \phi_w(t_k)$, 发生 $2^l - 1$ 次折叠, $\phi_u(t_k) = \phi_w(t_k) + 2(2^l - 1)\pi$;

若 $\phi_u(t_{k-1}) - (2^l - 1)\pi > \phi_w(t_k)$, 发生 2^l 次折叠, $\phi_u(t_k) = \phi_w(t_k) + 2 \cdot 2^l \pi$ 。

通过以上分析, 可以得到载波频率为 $t_n = 2^n t_0 + \Delta t_n$ 的各阶展开相位 $\phi_u(t_n)$ 。

上述算法在执行过程中不仅需要考虑每个像素时间维度的相位变化, 而且还需要考虑跳变边界处空间维度相邻像素所对应相位的比较。因此, 称此算法为相位解码的时-空重建算法。以上, 我们用数学归纳法证明了相位解码的时-空重建算法成立的普遍性。

4 实验验证

为了实验验证时-空相位重建算法, 利用基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统^[13,14], 对不同几何形状和拓扑结构的物体进行了大量的实验。本文介绍一个人脸模型的实验过程及结果。

4.1 实验系统

基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统的结构如图 4 所示。投影系统为基于双声光偏转器的结构光照明系统, 其原理见文献[14]。成像系统由数字 CCD 摄像机、成像镜头、图像采集卡、计算机组成。其中 CCD 摄像机采用德国 BASLER 公司生产的型号为 A302b 的 CCD 摄像机, 该 CCD 摄像机配置 25mm ($f/1.4$) 的镜头。图像采集卡采用加

拿大 Matrox 公司生产的型号为 Meteor-II/Digital 图像采集卡。成像系统和投影系统中心距离 $d=180$ mm, 参考平面到成像系统中心的距离 $l=1200$ mm, 视场宽度 $l_0=150$ mm。

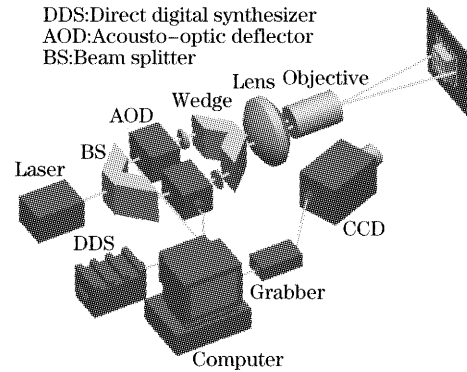


图 4 基于双声光偏转器的时序变频三维数字成像系统
Fig. 4 Time-varying frequency three-dimensional digital imaging base on dual-optic-acoustic deflectors

4.2 实验过程和数据处理结果

首先, 通过在计算机平台上编制的控制软件向射频驱动源的通信端口写入不同的控制字以便获得不同频率的射频信号, 从而能向被测物投射具有不同空间频率的条纹结构光序列。在该次实验中, 直接数字频率合成器 (DDS) 的控制字分别为“A5”、“AB”和“B9”, 相应得到的射频信号的频率分别为 80.5665 MHz、83.4962 MHz 和 90.3321 MHz, 相应产生的编码条纹图的条纹个数分别为 22, 46 和 93, 如图 5 所示。之后将采集得到的图像进行傅里叶变换得到相应的折叠相位图, 如图 6 所示。最后利用经过本文提出的算法获得展开相位图, 如图 7 所示, 其中图 7(a) 为展开相位图, 图 7(b) 三维重建的物体表面。

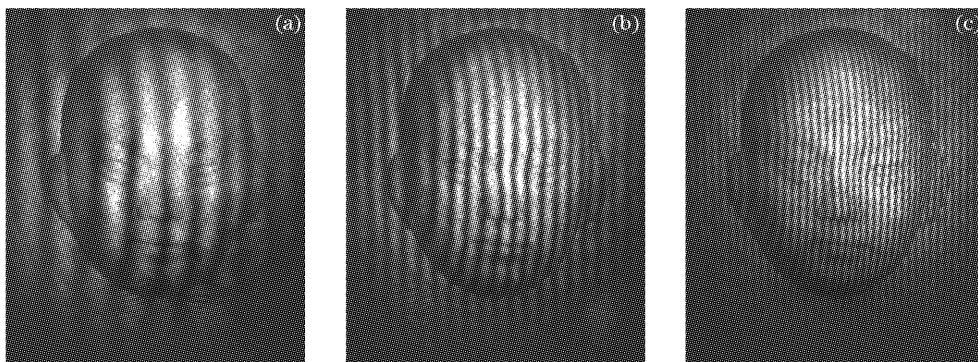


图 5 不同空间频率的编码条纹图。(a) $t=22$, (b) $t=46$, (c) $t=93$

Fig. 5 Encoded fringe patterns with different spatial frequencies. (a) $t=22$, (b) $t=46$, (c) $t=93$

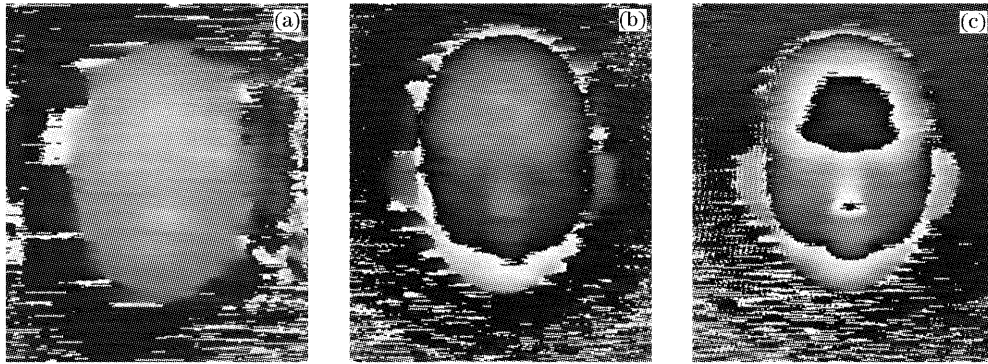
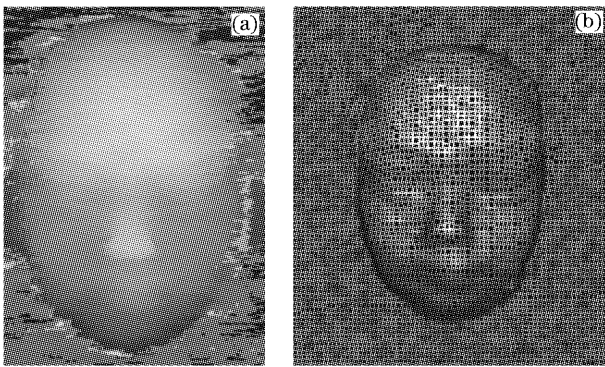
图 6 折叠相位图。(a) $t=22$, (b) $t=46$, (c) $t=93$ Fig. 6 Wrapped phase maps. (a) $t=22$, (b) $t=46$, (c) $t=93$ 

图 7 利用本文提出的算法获得的展开相位图

Fig. 7 Phase unwrapping with use of this approach

4.3 实验结果分析

图 8 为利用 H-S 算法获得的展开相位图。可以看到当条纹空间频率没有按指数增长时,利用 H-S 算法获得的展开相位图存在大量噪声,而这些噪声主要分布在其对应的折叠相位图的跳变边界上,这与前面的理论分析结果一致。由图 7 可以看出,利用本文的时-空相位重建算法获得的展开相位,克服了 H-S 算法带来的噪声,得到正确的展开相位图。



图 8 利用 H-S 算法获得的展开相位图

Fig. 8 Phase unwrapping with H-S

5 结 论

本文利用分段函数构造了一种时-空相位重建算法,该算法不仅考虑每个像素时间维度的相位变化,而且还考虑跳变边界处空间维度相邻像素所对应相位的比较,并因此称为相位解码的时-空重建算法。本文提出的算法解决了当结构光照明系统无法精确产生按指数增长的条纹序列时的相位重建问题。与 H-S 算法相比,本文算法虽然在数学表达式上显得比较复杂,但在实际应用中由于折叠相位的折叠次数有限,因此可以很容易编程实现。更重要的是,本文算法不要求编码条纹图的空间载波频率严格按指数增长,因此降低了算法对结构光照明系统的要求,提高了算法的适用性。

参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Zhang Zonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. A new color 3-D optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 994~998 (in Chinese)
张宗华, 彭翔, 胡小唐. 一种新型彩色三维光学成像系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 994~998
- 3 Weining Wang, Jianhai Sun. A modified moiré interferometer for three-dimensional displacement measurement [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 396~398
- 4 Liyun Zhong, Yimo Zhang, Xiaoxu Lu *et al.*. The reconstruction of diffractive object digital hologram at a short distance[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(5): 265~267
- 5 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 667~691 (in Chinese)
潘伟, 赵毅, 阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 667~691
- 6 Mitsuo Takeda, Quan Gu, Masaya Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations[J]. *Appl. Opt.*, 1997,

- 36(22)**: 5347~5354
- 7 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32(17)**: 3047~3052
- 8 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase unwrapping application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36(13)**: 2770~2775
- 9 Xiang Peng, Zhaoliang Yang, Hanben Niu. Multi-resolution reconstruction of 3-D image with modified temporal unwrapping algorithm[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224(1~3)**: 35~44
- 10 Peng Xiang, Yang Zhaoliang, Liu Hanben. An enhanced temporal phase unwrapping algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33(7)**: 880~883 (in Chinese)
彭 翔,杨昭亮,牛憨笨. 时间维相位重建的改进算法[J]. 光子学报, 2004, **33(7)**: 880~883
- 11 H. O. Saldner, Huntley J. M. Profilometry by temporal phase unwrapping and spatial light modulator based projector[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36(2)**: 610~615 (in Chinese)
- 12 Peisen S. Huang, Chengping Zhang, Fu-Pen Chiang. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42(1)**: 163~168
- 13 Peng Xiang, Li Enbang. The Method and Apparatus of 3D Imaging and Modeling with Dynamic Multi-Resolution [P]. Chinese Patent, ZL 02131096.3
彭 翔,李恩邦. 动态多分辨率的三维数字成像的方法及装置 [P]. 国家发明专利号:ZL 02131096.3
- 14 X. Peng, J. Tian, P. Zhang *et al.*. 3D vision with dual-acousto-optic deflections encoding[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30(15)**: 1965~1967