

基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术

邹海华 赵宏 周翔

(西安交通大学机械工程学院机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要 为实现动态物体的实时三维测量,提出了一种基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术。将低、中、高三种频率的正弦条纹分别经投影仪红(R),绿(G),蓝(B)通道同时投影至被测物面,CCD在另一角度拍摄变形条纹图。将变形条纹图R、G、B三分量互减消减背景干扰,用经验模式分解进行颜色解耦,分离各载频项,进而以傅里叶变换解调相位。以变精度去包裹算法按低、中、高频依次完成包裹相位展开,得到高频载频项的展开相位。计算机模拟时相位解调的标准差小于0.0417 rad,具有较高的测量精度;对比实验和面部表情变化实验进一步说明了方法的可靠性。该方法在单次拍摄下实现了相位的解调及高精度相位的精确展开,为动态物体的高精度轮廓测量提供了有效的手段。

关键词 测量;彩色条纹投影;经验模式分解;变精度去包裹;傅里叶变换

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0812009

Triple-Frequency Color-Encoded Fringe Projection Profilometry Based on Empirical Mode Decomposition

Zou Haihua Zhao Hong Zhou Xiang

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition is presented to measure the dynamic objects in real time. Sinusoidal fringe patterns of three frames with different frequencies are encoded in red, green, blue (RGB) channels, respectively, projected on the objects by projector at the same time, and the deformed fringe patterns are captured by CCD at another angle. The background components are eliminated after subtracting the red channel's component from both blue and green components. Then empirical mode decomposition is used for color decoupling and separating the highest, medium and lowest fundamental frequency components. Phases are demodulated by using Fourier transform, and the warped phase demodulated from the highest fundamental frequency components is unwrapped by three-step phase unwrapping with variable precision algorithm. The simulation experiment, in which the standard deviation of phase demodulation is less than 0.0417 rad, shows the method has high precision. Furthermore, the method is verified to be effective by contrast experiments and experiment on facial expression. It implements phase demodulation and phase unwrapping with high precision based on single snapshot, thus it is very effective to measure 3D surface contour of dynamic objects with high precision.

Key words measurement; color-encoded fringe projection; empirical mode decomposition; phase unwrapping with variable precision; Fourier transform

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 120.6650; 330.1710

1 引言

动态物体的实时三维测量在工业生产、国防安

全、医学研究和生活娱乐等众多领域具有广阔的应用前景,例如产品质量的在线检测、航空发动机高速

收稿日期: 2011-02-24; **收到修改稿日期**: 2011-04-11

基金项目: 国家 973 计划(2011CB706805)、国家自然科学基金(50975228)和西安市创新支撑计划(CXY1007)资助课题。

作者简介: 邹海华(1987—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉及光电检测智能化等方面的研究。

E-mail: hai.hua.zou.9999@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 赵宏(1964—),男,博士,教授,主要从事光电检测、实时在线测试、机器人技术及生物组织成像等方面的研究。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

旋转叶片动态特性分析、医疗修复手术、人脸识别和影视动漫等。近几年,动态物体的光学三维测量成为一个研究热点,各种光学测量方法得到了快速发展^[1]。其中时间飞行法、双目立体视觉法和条纹投影相位轮廓术是研究较多的方法^[2]。时间飞行法测量精度低,只适合对测量精度要求不高的场合;立体视觉法在匹配时通常要求被测物体具有明显的纹理,匹配耗时长且容易出现匹配错误;条纹投影相位轮廓术算法简单,只要解调出相位就能恢复物体的轮廓信息,是一种比较适合动态物体全场测量的方法。

条纹投影相位轮廓术中常用相位解调方法有相移法、傅里叶变换法和小波变换法^[3~6]。相移法需要拍摄多帧相移的条纹图,难以实现动态测量;傅里叶变换法虽然能从单帧条纹图解调出相位,但频谱混叠问题限制了其测量范围,无法测量高度变化剧烈的物体;而小波变换方法中母小波及小波变换参数的选择依赖于被测物体的有关先验知识。此外,它们解调出的相位都包裹在 $(-\pi, \pi)$,需要对相位进行展开。

为了实现动态物体快速精确的三维测量,目前主要采用灰度复合条纹^[7~9]和彩色条纹投影^[10~15]两种途径。灰度复合条纹投影法将几种载频条纹组合在灰度条纹中,傅里叶变换用以提取各载频项的包裹相位,采用不同的去包裹算法将相位展开,该方法由于不同载频之间的频谱混叠限制了其测量范围。彩色条纹投影增加了条纹信息,然而被测物体的颜色、投影仪和 CCD 之间的颜色耦合严重影响测量精度。采用滤光片和彩色 3-CCD 可以从硬件角度消除颜色耦合,但采用滤光片极大地削弱了光强,选用彩色 3-CCD 增加了成本。数字投影仪用于彩色三步相移条纹投影,借助旋转色轮快速切换三帧相移条纹图,避免了彩色的颜色耦合问题^[16,17],但是该方法主要有两点不足:1)受旋转色轮切换速率的限制,难以测量高速运动的物体;2)相位的展开在空域进行,算法复杂、可靠性低。

本文提出了一种基于经验模式分解^[18](EMD)的三频彩色条纹投影轮廓术,基于EMD的算法消

减了条纹背景对傅里叶变换解调相位时的干扰,同时实现了颜色解耦,将三频彩色条纹投影与时域相位展开技术相结合,在单次拍摄下实现快速准确的相位展开。该方法可为动态物体的高精度轮廓测量提供有效的手段。

2 理 论

2.1 三频彩色条纹投影轮廓术

三频彩色条纹投影轮廓术采用图 1 所示的光轴交叉型光路结构, y 轴垂直于纸面,投影仪和 CCD 光心的连线与参考平面平行, L 为投影仪光心到参考平面的距离, d 为投影仪光心与 CCD 光心之间的距离。

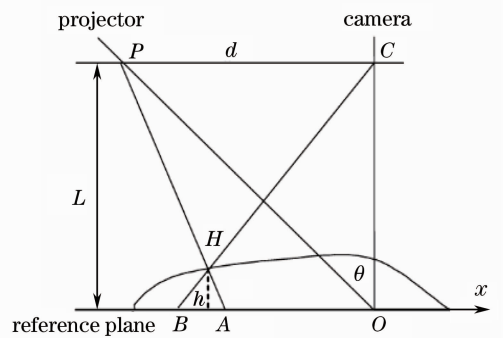


图 1 光路原理图

Fig. 1 Schematics of light path

用计算机生成(1)式所示的三频正弦条纹,并将其分别调制在投影仪的红(R),绿(G),蓝(B)三个通道中,形成三频彩色正弦条纹图。

$$\begin{bmatrix} R(x, y) \\ G(x, y) \\ B(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_r \\ a_g \\ a_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_r \cos(2\pi f_r x) \\ b_g \cos(2\pi f_g x) \\ b_b \cos(2\pi f_b x) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $\{a_i, i = r, g, b\}$ 分别为三频正弦条纹的均值; $\{b_i, i = r, g, b\}$ 为条纹对比度; $\{f_i, i = r, g, b\}$ 为载频频率,并假定 $f_r < f_g < f_b$ 。投影仪将三频彩色正弦条纹图投影到被测物表面,彩色 CCD 从另一角度拍摄被测物体高度调制的彩色变形条纹图,考虑商用投影仪和 CCD 的颜色耦合,彩色变形条纹图的光强分布表示为

$$\begin{bmatrix} g_r(x, y) \\ g_g(x, y) \\ g_b(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{rg} & C_{rb} \\ C_{gr} & C_{gg} & C_{gb} \\ C_{br} & C_{bg} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_r(x, y) \{a_r + b_r \cos[2\pi f_r x + \Phi_r(x, y)]\} \\ r_g(x, y) \{a_g + b_g \cos[2\pi f_g x + \Phi_g(x, y)]\} \\ r_b(x, y) \{a_b + b_b \cos[2\pi f_b x + \Phi_b(x, y)]\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_r(x, y) \\ n_g(x, y) \\ n_b(x, y) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\{C_{ij} \leq 1, i, j = r, g, b\}$ 为 R, G, B 通道之间的耦合系数且 $\{C_{ij} = 1, i = j\}$, $\{C_{ij} \in [0, 1, 0.3], i \neq j\}$; $\{r_i(x, y), i = r, g, b\}$ 分别为被测物体对红、绿、蓝三种颜色的反射率; $\{n_i(x, y), i = r, g, b\}$ 为高频噪声; $\{\Phi_i(x, y), i = r, g, b\}$ 为物体高度调制相位分布。当 $L \gg h(x, y)$ 时,它与高度的关系为

$$h(x, y) = -\frac{L\Delta\Phi_i(x, y)}{2\pi f_i d} = -\frac{L}{2\pi f_i d} [\Phi_i(x, y) - \Phi_{0i}(x, y)] \quad (i = r, g, b), \quad (3)$$

式中 $\{\Phi_{0i}(x, y), i = r, g, b\}$ 为参考面的相位分布；可见只要精确获取了高频载频项的展开相位，就能恢复物体高精度的轮廓信息。

基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术的基本原理为：利用计算机生成低、中、高三种频率的正弦条纹图，将其分别调制在液晶投影仪的 R, G, B 三个通道中，形成三频彩色正弦条纹图；投影仪将三频彩色条纹图同时投影至被测物体表面；彩色 CCD 从另一角度拍摄变形彩色条纹图；然后将变形条纹图中 R, G, B 三分量互减消减背景干扰；用经验模式分解进行颜色解耦，分离各载频项；进而以傅里叶变换解调相位；以变精度去包裹算法按低、中、高频依次完成包裹相位展开，得到高频载频项的展开相位；最终标定系统，恢复被测物体的高度信息。其中背景消减、颜色解耦和相位展开是本文讨论的重点。

2.2 背景消减及基于经验模式分解的颜色解耦

2.2.1 经验模式分解

EMD^[18] 自适应地将信号中所含的基本模式分量(IMF)按频率从高到底的顺序依次提取出来，IMF 满足条件：

1) 极值点个数相等或者至多不相差一个；2) 局部均值为零。

对于给定的信号 $x(t)$ ，EMD 实现过程如下：

1) 找 $x(t)$ 的所有局部极大值点 $M_l, l = 1, 2, \dots$ ，和局部极小值点 $m_l, l = 1, 2, \dots$ ；

2) 采用插值算法得到局部极大值的上包络 $M(t)$ ，局部极小值的下包络 $m(t)$ ；

3) 计算 $x(t)$ 的局部均值 $e(t) = [M(t) + m(t)]/2$ ；

4) 从 $x(t)$ 中减去 $e(t)$ ： $h(t) = x(t) - e(t)$ ；

5) 重复步骤 1) ~ 4)，直至 $h(t)$ 为一个 IMF，记作 $c_1(t)$ ；

6) 从 $x(t)$ 中减去 $c_1(t)$ ，得到剩余值序列 $r_1(t)$ ： $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ；重复上面五步，依次可得第二、第三直至第 n 个 IMF，当满足预定的停止准则即停止处理。

这样就将信号 $x(t)$ 分解为若干个 IMF $c_l(t) (l = 1, 2, \dots, n)$ 与一个余项 $r_n(t)$ 的和：

$$x(t) = \sum_{l=1}^n c_l(t) + r_n(t). \quad (4)$$

分解过程的停止准则，它可以是如下条件之一：

- 1) 最后一个 IMF $c_n(t)$ 或剩余分量 $r_n(t)$ 变得比预期值小；
- 2) 剩余分量 $r_n(t)$ 变成单调函数。

而 IMF 的筛选准则可通过限制两个连续的处理结果之间的标准差 S_d 来实现：

$$S_d = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{(k-1)}(t) - h_k(t)|^2}{h_k^2(t)}, \quad (5)$$

式中 T 为信号的时间跨度， $h_{(k-1)}(t)$ 和 $h_k(t)$ 是筛选过程中两个连续的处理结果。如果 S_d 小于某一预先设定的阈值，就判定为 IMF， S_d 通常取 0.2~0.3。

2.2.2 背景消减及基于 EMD 的颜色解耦

在彩色条纹投影中，被测物表面的颜色严重影响测量精度，为此，通过标定技术，建立各颜色通道的光强分布查找表初步校正条纹均值和对比度。进一步，根据文献[19]的方法精确地校正均值和对比度。对 CCD 获取的如(2)式所示的彩色变形条纹图，令 $A(x, y) = r_i(x, y)a_i, B_i(x, y) = r_i(x, y)b_i (i = r, g, b)$ ，并进行以下处理：

1) 校正条纹的均值和对比度

假设 R, G, B 通道条纹图的均值分别为 m_r, m_g, m_b ，以 G 通道条纹均值和对比度为基准，校正 R, B 通道条纹的均值的表达式为

$$\begin{bmatrix} g_{1r}(x, y) \\ g_{1g}(x, y) \\ g_{1b}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_r(x, y) \\ g_g(x, y) \\ g_b(x, y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_g - m_r \\ 0 \\ m_g - m_b \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$\{g_{li}, i = r, g, b\}$ 是经过均值校正后的各通道条纹分布，均值都为 m_g ，设它们的方差分别为 d_r, d_g, d_b ；再校正条纹对比度的表达式为

$$\begin{bmatrix} g_{2r}(x, y) \\ g_{2g}(x, y) \\ g_{2b}(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [g_{1r}(x, y) - m_g] \frac{d_g}{d_r} \\ g_{1g}(x, y) \\ [g_{1b}(x, y) - m_g] \frac{d_g}{d_b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_g \\ 0 \\ m_g \end{bmatrix}, \quad (7)$$

经校正后，各通道条纹的背景项和条纹对比度几乎相等。

2) 消减背景

用傅里叶变换解调条纹相位时，条纹背景的干扰限制了测量范围，影响测量精度。本文在 1) 的基础上，采用通道条纹图相减，消减背景，具体实现为：

① 用高频分量减去低频分量

$$f_{\text{High-Low}}(x, y) = g_{2b}(x, y) - g_{2r}(x, y) = (C_{br} - C_{rr})B_r(x, y)\cos[2\pi f_r x + \Phi_r(x, y)] + (C_{bg} - C_{rg})B_g(x, y)\cos[2\pi f_g x + \Phi_g(x, y)] + (C_{bb} - C_{rb})B_b(x, y)\cos[2\pi f_b x + \Phi_b(x, y)] + n_b(x, y) - n_r(x, y), \quad (8)$$

② 用中频分量减去低频分量

$$f_{\text{Mid-Low}}(x, y) = g_{2g}(x, y) - g_{2r}(x, y) = (C_{gr} - C_{rr})B_r(x, y)\cos[2\pi f_r x + \Phi_r(x, y)] + (C_{gg} - C_{rg})B_g(x, y)\cos[2\pi f_g x + \Phi_g(x, y)] + (C_{gb} - C_{rb})B_b(x, y)\cos[2\pi f_b x + \Phi_b(x, y)] + n_g(x, y) - n_r(x, y). \quad (9)$$

3) 二维离散小波降噪

在实际测量中,噪声是不可避免的,空气中的灰尘、被测物体表面的污点、CCD 的暗电流等都会引入噪声。噪声不仅给相位的解调带来误差,而且也会引起相位去包裹错误,因此需要对 CCD 获取的变形条纹图进行降噪预处理。

小波变换具有优良的降噪能力,这里处理的是图像,所以采用二维离散小波降噪;需要注意的是在对 $f_{\text{Mid-Low}}(x, y)$ 降噪时,应将耦合的少量高频分量 $(C_{gb} - C_{rb})B_b(x, y)\cos[2\pi f_b x + \Phi_b(x, y)]$ 滤掉,避免它干扰中低频载频项的分离。

4) 采用 EMD 分离各载频项

对降噪后的 $f_{\text{High-Low}}(x, y)$ 进行 EMD 分解,第一个 IMF 即为高频载频项

$(C_{bb} - C_{rb})B_b(x, y)\cos[2\pi f_b x + \Phi_b(x, y)]$, 残余分量混有低频载频项和少量耦合的中频载频项;同样地,对降噪后的 $f_{\text{Mid-Low}}(x, y)$ 进行 EMD 分解,第一个 IMF 为中频载频项

$(C_{gg} - C_{rg})B_g(x, y)\cos[2\pi f_g x + \Phi_g(x, y)]$, 残余分量即为低频载频项

$(C_{gr} - C_{rr})B_r(x, y)\cos[2\pi f_r x + \Phi_r(x, y)]$.

然而 EMD 从信号中分离出 IMF 需要满足一定条件,对于正弦二分量信号

$$s(x) = \cos(2\pi x) + a\cos(2\pi f x + \varphi), \quad (f \in [0, 1]) \quad (10)$$

根据 Rilling 的理论^[20], $\cos(2\pi x)$ 与 $a\cos(2\pi f x + \varphi)$ 能否分离要看 a 和 f 满足的条件:当 $f > 0.67$, 不论 a 为何值,二分量都不能分离;当 $f \leq 0.67$ 且 $af^2 > 1$ 时,二分量也不能分离;只有当 $f \leq 0.67$ 且 $af < 1$ 时,二分量才能完全分开;其他情况分离的结果不确定。对于降噪后的 $f_{\text{High-Low}}(x, y)$, 各载频的瞬时频率分别为

$$\phi'_r(x) = 2\pi f_r + \frac{\partial \Phi_r}{\partial x} = 2\pi f_r - 2\pi f_r \frac{d}{L} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (11)$$

$$\phi'_g(x) = 2\pi f_g + \frac{\partial \Phi_g}{\partial x} = 2\pi f_g - 2\pi f_g \frac{d}{L} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (12)$$

$$\phi'_b(x) = 2\pi f_b + \frac{\partial \Phi_b}{\partial x} = 2\pi f_b - 2\pi f_b \frac{d}{L} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (13)$$

假设瞬时频率之比 $\phi'_r(x) : \phi'_g(x) : \phi'_b(x) = f_r : f_g : f_b = 1 : 3 : 9$, EMD 分离高频载频项时, $f = f_g/f_b = 1/3 < 0.67$, $af = (C_{bg} - C_{rg})B_g(x, y)f_g/(C_{bb} - C_{rb})B_b(x, y)f_b < 1$, 因此高频载频项从 $f_{\text{High-Low}}(x, y)$ 中完全分离出来。而在 $f_{\text{Mid-Low}}(x, y)$ 中,用 Rilling 理论同样分析,中频载频项就能与低频载频项完全分离。

5) 解调各载频项的相位;

EMD 自适应地将各载频项分离出来,既消减了背景,又解除了颜色的耦合,采用傅里叶变换就可以简单方便的解调相位。

2.3 三频变精度相位去包裹算法

傅里叶变换解调出来的相位包裹在 $(-\pi, \pi)$, 需要对其展开成连续分布的真实相位。现有很多空域去包裹方法都是基于邻域相位信息,不仅计算量大,而且存在噪声点时,相位展开可靠性低。Zhao 等^[21]提出了双频变精度时域去包裹算法,随后 Huntley 等^[22]综合 Zhao 等^[21]的方法,提出了条纹级呈指数变化的变精度时域去包裹方法。根据 Huntley 等^[22]的思想,本文采用三频变精度相位去包裹方法。该方法是对相位图中的各点逐级去包裹,不需要借助邻域相位信息,具有很好的稳健性,可靠性高,并且处理速度快。其算法的实现如下:设各精度下包裹相位为 $\Delta\Phi_i(x_i, y_i)$ ($i = r, g, b$), 展开相位为 $\Phi_i(x, y)$ ($i = r, g, b$), 并保证低精度下的相位无包裹,则

$$\Phi_r(x, y) = \Delta\varphi_r(x, y), \quad (14)$$

$$\Phi_i(x, y) = \Delta\varphi_i(x, y) + 2n_i(x, y)\pi \quad (i = g, b), \quad (15)$$

三频变精度相位去包裹的基本原理为:

1) 先以低精度展开相位为参考,求中精度下的展开相位

$$n_g(x, y) = E\left[\frac{\Phi_g(x, y)}{2\pi}\right] = E\left[\frac{k_r\Phi_r(x, y)/k_g - \Delta\varphi_g(x, y)}{2\pi}\right], \quad (16)$$

式中 E 为取整操作, k_r, k_g 是(3)式中的系数 $k_r = -\frac{L}{2\pi f_r d}, k_g = -\frac{L}{2\pi f_g d}$ 。噪声和系统标定误差会产

生不相容误差,必须对(16)式求得的 $n_g(x,y)$ 进行修正,设两种精度下测得的高度之差为

$$\Delta(m) = k_g[\Delta\varphi_g(x,y) + 2m\pi] - k_r\Phi_r(x,y),$$

$$[m = n_g(x,y), n_g(x,y) \pm 1] \quad (17)$$

式中每一点都存在一个 m 值使得 $\Delta(m)$ 最小,令此时 m 的集合为 $m_{0g}(x,y)$,则经修正后的中精度展开相位为

$$\Phi_g(x,y) = \Delta\varphi_g(x,y) + 2m_{0g}(x,y)\pi. \quad (18)$$

2)同样地,以中精度下的展开相位 $\Phi_g(x,y)$ 为参考,可以得到高精度下的展开相位 $\Phi_b(x,y)$ 。

3 计算机模拟

根据(2)式由计算机生成一幅 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 含高频噪声的模拟三频彩色耦合条纹图,如图2所示,各参数设置为:颜色耦合系数 $\{C_{ij} = 0.2, i \neq j; C_{ij} = 1, i = j\}$;条纹均值 $\{a_i = 4, i = r, g, b\}$;

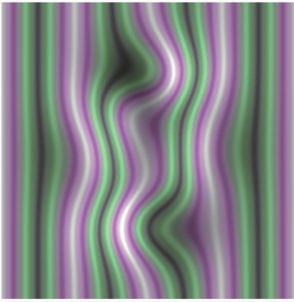


图2 模拟三频条纹图

Fig. 2 Simulated triple-frequency fringe pattern

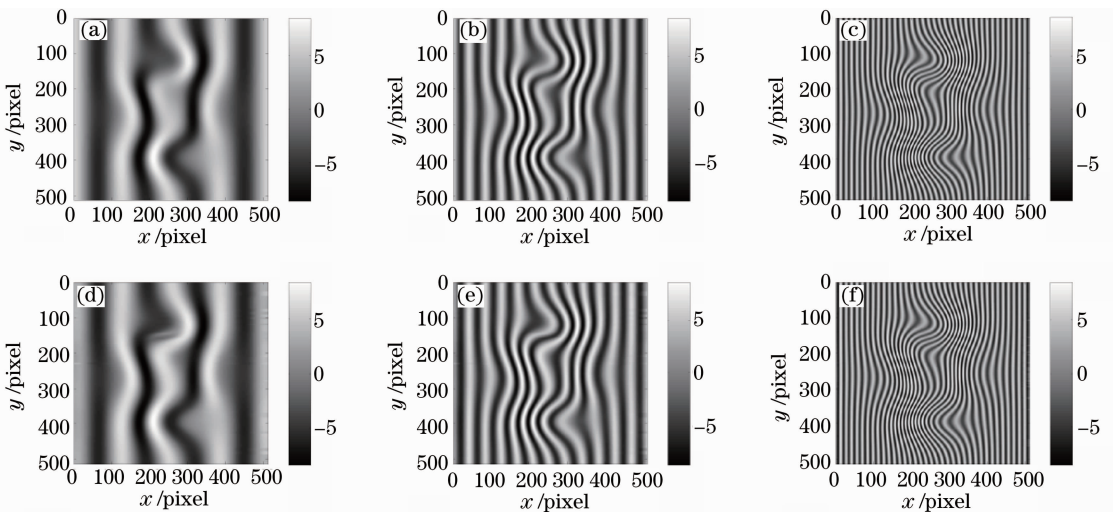


图4 低(a)中(b)高(c)载频项与EMD分离出的低(d)中(e)高(f)载频项

Fig. 4 Lowest (a), medium (b), highest (c) fundamental frequency components and the results of lowest (d), medium (e), highest (f) using EMD

条纹对比度 $\{b_i = 2, i = r, g, b\}$;各载频频率 $f_r = 1/128, f_g = 3f_r, f_b = 9f_r$;调制相位 $\Phi_r = 3\text{peaks}(512)/8, \Phi_g = 3\Phi_r, \Phi_b = 9\Phi_r$;模拟表面反射率 $r(x,y) = 3 + 40\Phi'_r(x,y)$,其分布如图3所示。噪声:分别模拟10000个幅度为2的高斯白噪声点 $n_i(x,y)$ ($i = r, g, b$)。

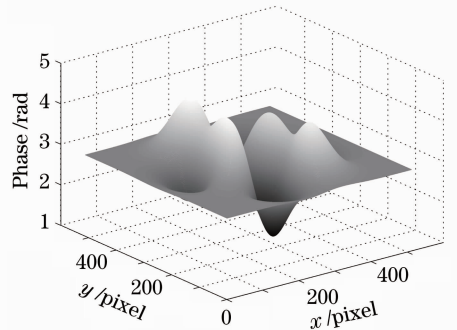


图3 模拟表面反射率

Fig. 3 Simulated surface reflectivity

采用本文提出的方法,先对条纹图作减法运算,消去背景项;接着用二维离散小波变化降噪;然后用EMD自适应分离各载频项,结果如图4所示,其中图4(a)~(c)为真实载频项,图4(d)~(f)为EMD分离的结果;继而用傅里叶变换解调相位,最后用三频变精度去包裹算法展开高精度下的真实相位分布,如图5(b)所示,图5(a)为真实值。取第256行数据结果分析,与真实值对比显示于图6;绝对误差如图7所示,排除EMD算法边界效应的影响,计算值与真实值的标准差小于0.0417 rad,具有较高的精度。

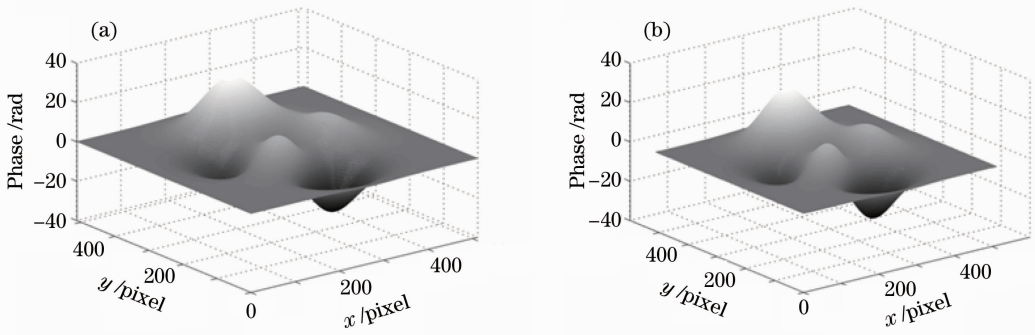


图 5 真实相位分布(a)及恢复的高频条纹相位分布(b)

Fig. 5 True phase distribution (a) and restored phase distribution with the highest precision (b)

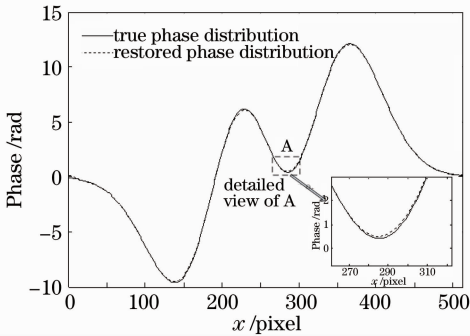


图 6 256 行相位恢复图及 A 处局部放大图

Fig. 6 Restored phase distribution of the 256th row and the detailed view of A

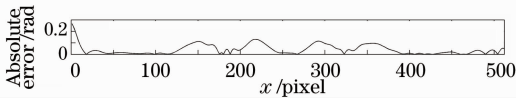


图 7 256 行相位恢复的绝对误差

Fig. 7 Absolute phase error of the 256th row

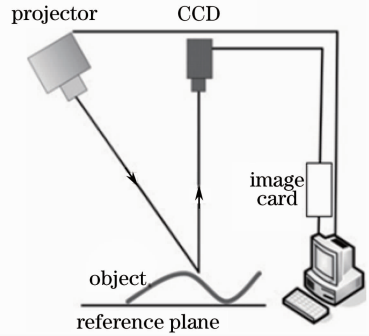


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental setup

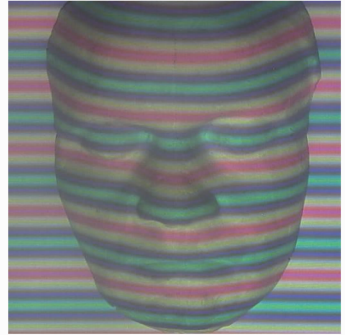


图 9 彩色变形条纹图

Fig. 9 Color-encoded deformed fringe patterns
用变精度去包裹算法展开的相位如图 12 所示,恢复的相位结果如图 13(b)所示。

4 对比实验

为了分析该方法的测量精度,在静态条件下,以一个人脸石膏像作为测量对象,比较本方法与四步相移法、传统 FTP 的测量结果。实验装置如图 8 所示,用分辨率为 1024 pixel×768 pixel 的液晶投影仪投影一幅三频彩色正弦条纹图(R,G,B 条纹的像素周期分别为 81,27 和 9 pixel;物理周期为 45,15 和 5 mm)至物体表面,图 9 显示了 CCD 拍摄的 512 pixel×512 pixel 的三频彩色变形条纹图。

采用本文提出的方法对三频彩色变形条纹图处理,为了更好说明本方法,给出了较详细的中间结果。EMD 分离的各载频项如图 10 所示,其中图 10(a)~(c)分别是变形图中 R,G,B 通道图像,图 10(d)~(f)是分离的结果。图 11 显示了 EMD 分离前后 256 列信号分布。傅里叶变换解调出各载频项的相位及采

采用 FTP,四步相移法对物体[图 13(a)所示人脸石膏像]进行了测量,结果依次显示于图 13(c),(d)。图 14 显示了第 256 列各种方法恢复的相位分布。从图 13,14 可以看出,在高度变化平缓的区域,三者的精度很接近。但是在高度变化剧烈的区域,本方法与 FTP 精度都不如四步相移法,原因在于,FTP 中频谱混叠决定了其不能测量高度变化剧烈的物体,而本方法的 EMD 是基于插值实现的,造成在表面变化剧烈处,插值结果与实际栅线有较大差异,从而影响测量精度。

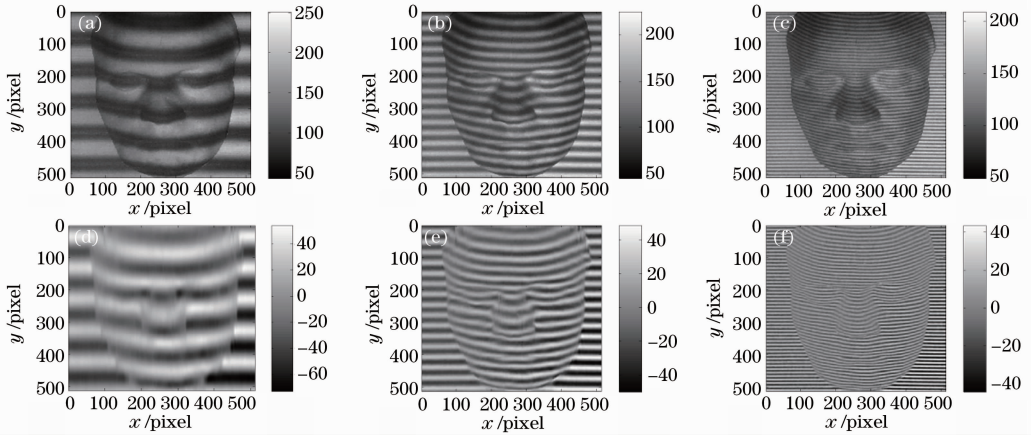


图 10 变形条纹图 R(a),G(b),B(c)通道图像及 EMD 分离的低(d),中(e),高(f)载频项

Fig. 10 Image of deformed fringe patterns R (a), G (b), B (c) channels and the lowest (d), medium (e), highest (f) fundamental frequency components separated by EMD

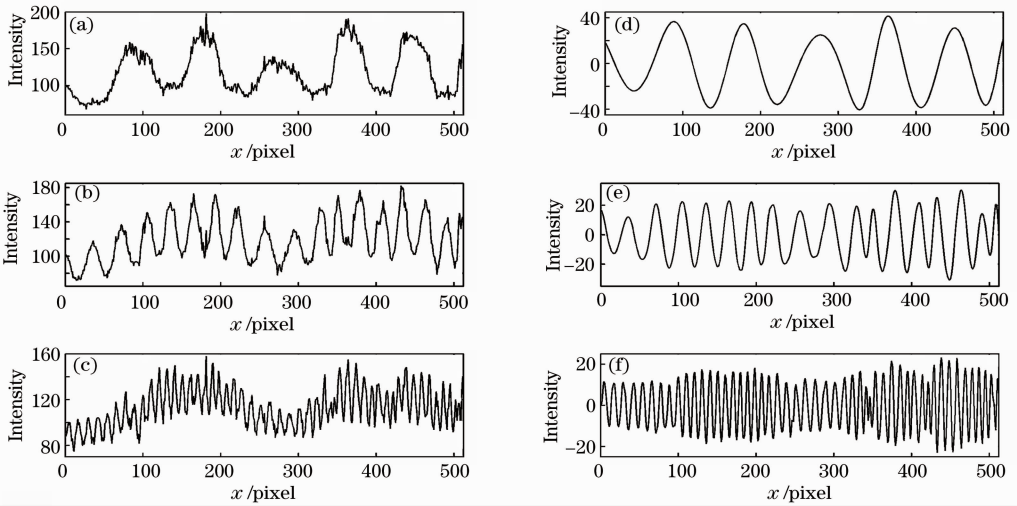


图 11 256 列变形条纹图 R(a),G(b),B(c)通道信号及 EMD 分离的低(d),中(e),高(f)载频项

Fig. 11 256th column signal of deformed fringe patterns R (a), G (b), B (c) channels and the lowest (d), medium (e), highest (f) fundamental frequency components separated by EMD

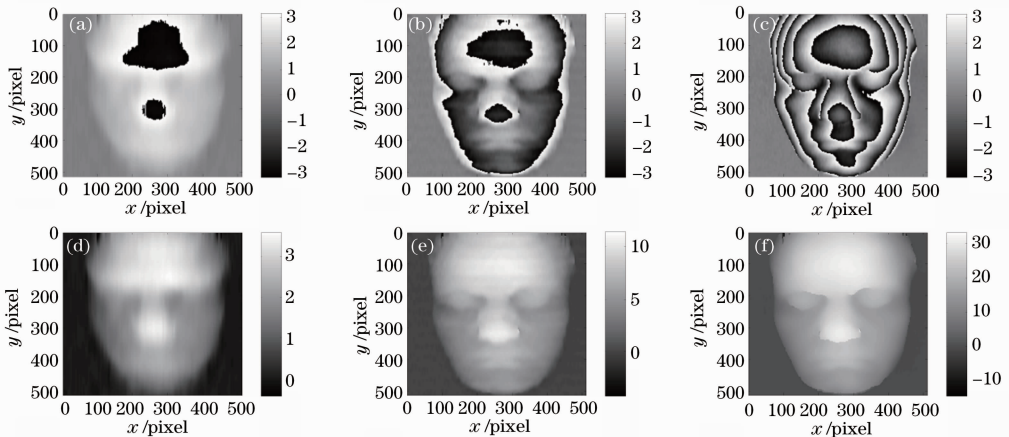


图 12 低(a),中(b),高(c)精度的包裹相位与低(d)、中(e)、高(f)精度的展开相位

Fig. 12 Wrapped phases with lowest (a), medium (b), highest (c) precision and unwrapped phases with lowest (d), medium (e), highest (f) precision

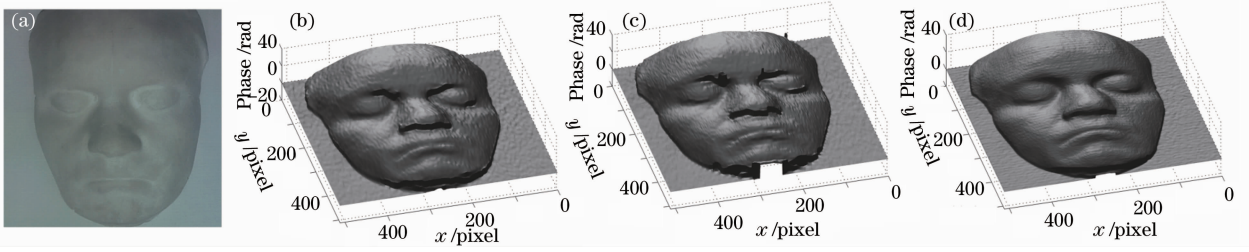


图 13 人脸石膏像(a)以及用本方法(b), FTP(c), 四步相移法(d)恢复的相位分布

Fig. 13 Plaster-stature model of human face (a) and restored phase distribution by the proposed method (b), FTP (c), four-step phase-shifting method

5 人脸表情实验

在同一测量系统下,对人的脸部表情变化进行了测量,定性说明该方法为动态物体测量提供一种有效的手段。图 15(a)~(c)分别表示惊讶、忧伤和窃喜表情,图 15(d)~(f)是采用本方法恢复的相位分布结果。由于条纹投影技术适合测量平滑规则、反射率一致的表面,形状陡峭、纹理复杂严重影响其的测量精度,因此在眼睛、鼻孔和牙齿等处测量精度低。

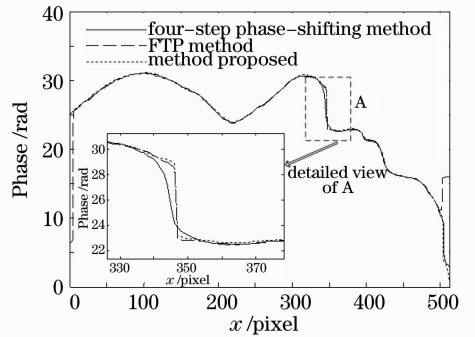


图 14 第 256 列恢复的相位分布及 A 处的局部放大图

Fig. 14 Restored phase distribution of the 256th column and the detailed view of A

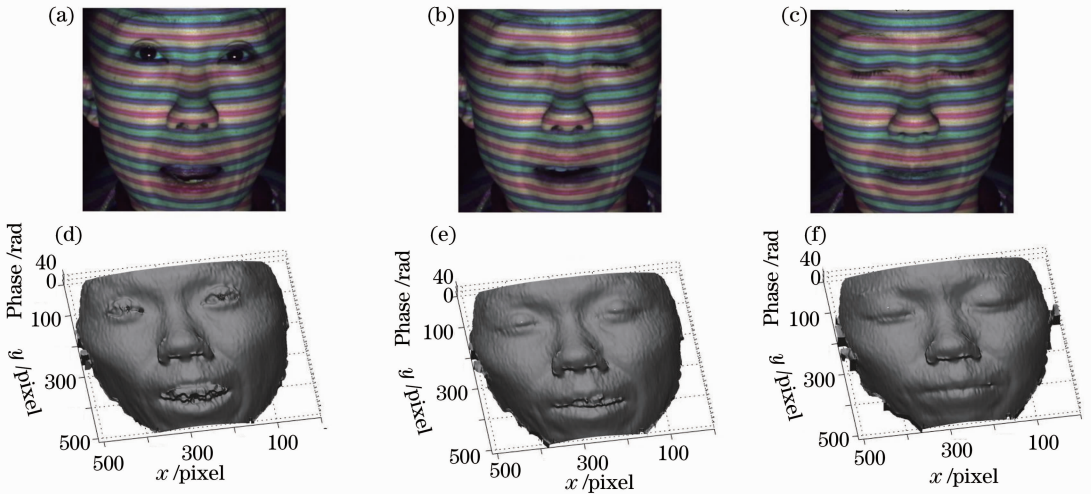


图 15 脸部惊讶(a), 忧伤(b), 窃喜(c)表情及恢复的惊讶(d)、忧伤(e)、窃喜(f)表情的相位分布

Fig. 15 Surprised (a), sad (b) and chuckle (c) expression and the restored phase distribution of surprised (d), sad (e) and chuckle (f) expression

6 结 论

提出了一种基于 EMD 的三频彩色条纹投影轮廓术,消减了背景的干扰;采用 EMD 解除了颜色的耦合、分离出各载频项;三频变精度去包裹算法将解调出的相位快速可靠地展开,获取高的测量精度;实

现了在单次拍摄下的相位解调和相位展开,为动态物体的实时三维测量提供了一种有效的手段。通过计算机模拟、对比实验和人脸表情变化实验,验证了该方法的有效性。

需要指出的是,在测量时,需要校正投影仪和 CCD 光强的非线性,保证条纹的正弦性,避免高次

谐波的影响; EMD 是在一维方向上对信号进行处理, 对极值点的依赖性很强, 因此也就对噪声很敏感; 此外, 本方法在表面变化剧烈处测量精度不高。下一步的工作是研究一种抗噪性能好的 EMD 改进算法, 以及结合其他光学三维测量方法(如立体视觉)弥补本方法在表面变化剧烈处测量精度不高的不足。

参 考 文 献

- 1 E. Stoykova, A. A. Alatan, P. Benzie *et al.*. 3-D time-varying scene capture technologies - a survey[J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2007, **17**(11): 1568~1586
- 2 S. Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 149~150
- 3 Li Sikun, Su Xianyu, Chen Wenjing. Applications of two-dimensional wavelet transform on phase analysis of spatial carrier-fringe pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1673~1679
李思坤, 苏显渝, 陈文静. 二维实小波变换在空间载频条纹相位分析中的应用[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1673~1679
- 4 Zhou Xiang, Zhao Hong. Three-dimensional profilometry based on Mexican hat wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 197~202
周翔, 赵宏. 基于 Mexican hat 小波变换的三维轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 197~202
- 5 Zhou Xiang, Zhao Hong. Phase profilometry using discrete wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1563~1569
周翔, 赵宏. 使用离散小波变换的相位轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1563~1569
- 6 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~721
李思坤, 陈文静, 苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~721
- 7 Weihung Su, Hongyu Liu. Calibration-based two-frequency projected fringe profilometry: a robust, accurate, and single-shot measurement for objects with large depth discontinuities[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9178~9187
- 8 H. Yue, X. Su, Y. Liu. Fourier transform profilometry based on composite structured light pattern [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2007, **39**(6): 1170~1175
- 9 Mitsuo Takeda, Q. Gu, H. Takai *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
- 10 J. Pan, P. S. Huang, F. Chiang. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed 3D shape measurement: color coupling and imbalance compensation[C]. *SPIE*, 2004, **5265**: 205~212
- 11 P. S. Huang, Q. Hu, F. Jin *et al.*. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1065~1071
- 12 L. Kinell. Multichannel method for absolute shape measurement using projected fringes[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2004, **41**(1): 57~71
- 13 W. Su. Projected fringe profilometry using the area-encoded algorithm for spatially isolated and dynamic objects[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2590~2596
- 14 Zonghua Zhang, C. E. Towers, D. P. Towers. Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency Selection[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(14): 6444~6455
- 15 Shi Zhan, Zhao Hong, Zhang Lu. Phase-unwrapping method based on dual-frequency colorful fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 461~465
施展, 赵宏, 张璐. 基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 461~465
- 16 N. Karpinsky, S. Lei, S. Zhang. High-resolution, real-time fringe pattern profilometry[C]. *SPIE*, 2009, **7522**: 75220E
- 17 P. S. Huang, C. Zhang, F. Chiang. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(1): 163~168
- 18 Norden E. Huang, Zhneq Shen, S. R. Long *et al.*. The empirical mode decomposition and the hilbert-spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1998, **454**(1971): 903~995
- 19 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1153~1157
陈文静, 苏显渝, 曹益平等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1153~1157
- 20 G. Rilling, P. Flandrin. One or two frequencies? the empirical mode decomposition answers [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2008, **56**(1): 85~95
- 21 Hong Zhao, Wenyi Chen, Yushan Tan. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20): 4497~4500
- 22 J. M. Huntley, H. O. Saldner. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 1997, **8**(9): 986~992