

文章编号: 0253-2239(2007)12-2143-7

用于数字条纹轮廓术的一种基于广义分析模型的后滤波方法*

杨宗凯¹ 胡颖嵩^{1,2} 习江涛^{1,2} Joe Chicharo²

(¹ 华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074
² 伍伦贡大学电气、计算机与通信工程系, 澳大利亚)

摘要: 由于数字投影和采集系统的非线性失真,传统的方法通常需对采集到的条纹进行低通或带通滤波从而抑制高次谐波并获取基频分量。基于广义分析模型针对数字条纹轮廓术提出一种对测量后的物体形貌进行后滤波的算法,消除了非线性失真对测量结果所造成的影响并提高了数字条纹轮廓术的测量精度。论述了条纹轮廓术的原理和广义分析模型,分析推导出后滤波算法。仿真和实验结果表明,后滤波方法能够快速准确地实现基于数字投影的三维形貌重建。

关键词: 光学测量; 条纹轮廓术; 后滤波方法; 滤波器设计

中图分类号: TN751 文献标识码: A

A Post Filtering Method Based on Generalized Analysis Model for Digital Fringe Pattern Profilometry

Yang Zongkai¹ Hu Yingsong^{1,2} Xi Jiangtao^{1,2} Joe Chicharo²

(¹ *The Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074*
² *School of Electrical, Computer and Telecommunications Engineering, University of Wollongong, Australia*)

Abstract: Due to the nonlinearity of the digital projection and acquisition system, usually it is necessary for traditional approaches to eliminate high-order harmonics of the captured fringe patterns by using lowpass or bandpass filters and obtain fundamental component. A novel filtering method-post filtering for digital fringe pattern profilometry is presented based on generalized analysis model, it can reduce the influence from the nonlinear distortion of the fringe patterns and improve the accuracy of digital fringe pattern profilometry. The principle of fringe pattern profilometry and generalized analysis model are recited, a derivative process of the post filtering method is analyzed. Simulation and experimental results show that fast and precise digital three-dimensional reconstruction can be achieved by the post filtering method.

Key words: optical measurement; fringe pattern profilometry; post filtering method; filter design

1 引 言

条纹轮廓术是一种非接触式的光学形貌测量方法。它的过程是首先将一组龙基(Ronchi)光栅或正弦光栅相继投射到一个参考平面和被测物体的表面上。参考平面上的条纹形成平直条纹,而由于被测物体表面形貌的变化,投射到被测物体表面的条纹会发生形变。反之言之,这种形变正是物体表面形

貌的一种反映,它记录了物体表面的高度分布。因此,条纹轮廓术是将设计好的算法从变形的条纹中尽可能地准确提取它所记录的物体表面高度分布信息,从而完成形貌测量。基于这一基本原理,研究者提出了许多基于相位恢复的形貌测量方法^[1~18]。在这些条纹方法中,傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)和相移轮廓术

* 澳大利亚研究委员会探索项目(ARC DP0557847)和华中科技大学互联网技术研究中心与澳大利亚伍伦贡大学合作研究项目资助课题。

作者简介: 杨宗凯(1963—),男,博士,教授,主要从事互联网技术、信号处理以及光学信号处理等方面的研究。

E-mail: zkyang@mail.ccnu.edu.cn

收稿日期: 2006-10-31; 收到修改稿日期: 2007-06-19

(Phase shifting profilometry, PSP)逐渐成为两种最典型且受到最为广泛关注的形貌测量技术。

数字投影技术具有操作简单方便、可控制性强等诸多优势,利用已产生条纹的方法被广泛的应用到条纹形貌测量系统中。由于 CCD 的品质与分辨力的大幅提高,高清晰度的数字相机完全可以满足数字条纹形貌测量的解析度要求,因此数字成像设备也被直接引入形貌测量中,从而实现投影和采集的全数字化。由于数字投影和采集系统的非理想特性,在产生和采集条纹图像时,不可避免地引入非线性失真,而非线性失真所引入的高次谐波又将最终导致明显的测量误差^[19,20]。为了减少由非线性失真所造成的影响,通常利用低通或带通滤波的方法对高次谐波进行抑制并获取基频分量。然而,由于理想低通或带通滤波器是不可实现的,滤波后的条纹信号仍然会存在谐波成分,即使很小的谐波分量的泄漏都会对最终重建结果引入明显的误差。同时,当经过物体表面反射后的经过相位调制的条纹频谱发生混叠时,用滤波的方法将无法将基频分量从各次谐波中完全分离出来。此外,如果对实际拍摄到的条纹空间频率估计不准确,同样会引入误差^[21]。虽然在高次谐波影响下得到的测量结果并不准确,但仍可以作为对物体形貌的预估计值,而相应的测量误差可看作是一种噪声信号。因此完全可以设计一种滤波器对粗略测量的结果进行最优滤波,使得滤波器的输出结果尽可能的接近于理论值。基于这一基本思想,本文提出了一种新的滤波方式,称为后滤波(Post Filtering, PF)方法,在实现准确的数字三维形貌测量的同时,避免了直接滤波的各种问题,得到了良好的效果。

2 条纹轮廓术的原理与广义分析模型

一个典型的条纹形貌测量系统如图 1 所示。首先,投影仪产生一组条纹图,并将此条纹投射到参考平面上。当参考平面被移去后,同样的条纹将被投射到待测物体的表面上,而物体表面的形貌变化会导致原始的投射条纹发生变形。先后被投射到参考平面上以及物体表面上的条纹将被摄像机拍摄并存储下来。为了简单起见,本文仅考虑对于给定 y 坐标的物体横截面,这样,投射条纹的亮度分布和高度分布函数都可以简单地用仅具有单一变量 x 的一维函数来表示,而且这种表示可以很方便地还原为二维分布的形式。分别用 $s(x)$ 和 $d(x)$ 来分别表

示实际投射到参考平面和物体表面的亮度信号, $h(x)$ 表达物体表面的高度分布函数。

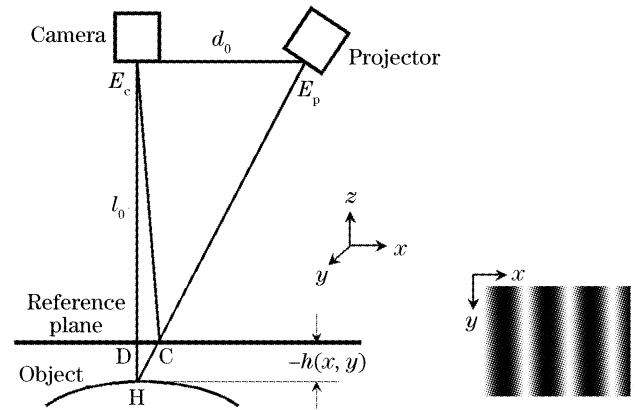


图 1 条纹形貌测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fringe pattern profilometry system

传统的条纹分析方法主要是基于傅里叶展开以及相位调制来进行数学表述。由于滤波器的非理想特性以及频谱混叠等各方面的原因,直接对条纹进行滤波并获取基频分量的方法仍然会引起测量误差。为此要准确地从失真后的条纹中获取三维形貌信息, L. Biancardi 等^[21]提出了一种广义分析模型,对条纹轮廓术的基本原理进行了更一般的解释与描述,其简化的表达形式为

$$d(x) = s[x - u(x)], \quad (1)$$

$$h(x) = \frac{l_0 u(x)}{d_0 + u(x)}, \quad (2)$$

式中 l_0 为摄像机到物体表面的距离, d_0 为摄像机到投影仪的距离, $u(x)$ 为位移分布函数。(1) 式揭示出由物体表面形貌所导致的变形的信号 $d(x)$ 是由原始信号 $s(x)$ 进行位移之后所产生的,而 $u(x)$ 可以通过(2)式来决定物体表面的高度分布。

在此模型中,并未事先要求由投影仪投射出来的信号是正弦的或是周期性的。这意味着,即使在正弦信号中存在非线性失真,投射信号与经物体表面形貌变形后的信号仍然包含关于物体表面形貌的足够信息,而这些信息显然可以用于实现形貌测量。很明显,利用广义分析模型实现条纹轮廓术的关键是从 $s(x)$ 和 $d(x)$ 中准确恢复位移分布函数 $u(x)$,然后通过(2)式最终计算出物体表面的高度分布函数 $h(x)$ 。

3 基于广义分析模型的后滤波算法

理论分析所指出投影和采集条纹图像时的非线性失真的引入是不可避免的,同时这些非线性失真

将会对利用傅里叶变换形貌测量法或相移形貌测量法所计算出的高度分布的最终结果在精度上产生严重的影响^[20]。而另一方面,虽然在非线性失真存在时,傅里叶变换轮廓术或相移形貌测量法并不能得到准确的形貌重建结果,但仍有足够的能力对待测物体进行粗略的形貌测量。因此,完全可以将这些传统方法的测量结果 $h_p(x)$ 作为实际高度分布函数 $h(x)$ 的预估值。对应 $h_p(x)$ 于,位移分布信号的预估值 $u_p(x)$ 可以方便地利用(2)式直接得到。显然,与位移分布函数的理论值 $u(x)$ 相比, $u_p(x)$ 的结果是不准确的,但可以将这一不准确估计结果的误差看作为一种噪声,进而设计一种数字滤波器对其进行滤波并使得噪声得以抑制。在这个意义上,位移估计问题可以转化为一个新的以设计滤波器并使得滤波器的输出成为对 $u(x)$ 准确估计的新问题。新的最优滤波器设计问题仍然需要基于广义分析模型。

3.1 符号与数学表达

通常在一个预估计信号 $u_p(x)$ 被一个 $2K+1$ 阶的空间滤波器滤波之后,所得到的滤波结果 $u(x)$ 可以表示为

$$u(x) = \sum_{k=-K}^K u_p(x+k)p(k), \quad (3)$$

式中 $p(k)$ 为滤波器的参量。滤波之后的输出信号 $u(x)$ 能尽可能地满足由(1)式所给出的广义分析模型,这样由于预估计信号 $u_p(x)$ 是已知的,就转化为基于广义分析模型对空间滤波器 p 进行参量估计。

为了简单起见,用一个列向量来表示原始的离散信号

$$\mathbf{u} = [u(1), u(2), \dots, u(N)]^T, \quad (4)$$

式中 N 为离散信号 $u(x)$ 的长度, $(\cdot)^T$ 代表转置操作。类似地, $p(k)$ 也可表示为一个列向量 $\mathbf{p} = [p(-K), p(-K+1), p(-K+2), \dots, p(0), p(1), \dots, p(K)]^T$ 。这样,(3)式可以用矩阵和向量的形式

进行表述

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_p \times \mathbf{p}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{U}_p 为一个 $N \times (2K+1)$ 矩阵,定义为

$$\mathbf{U}_p = (u_{ij})_{N \times (2K+1)}, \quad (6)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, 2K+1$, 以及

$$u_{ij} = \begin{cases} u_p(i+j-K-1), \\ (K+1 < i+j \leq N+K+1) \\ 0, \text{ other} \end{cases} \quad (7)$$

这样,由于 \mathbf{U}_p 是已知的,因此最终的估计结果 \mathbf{u} 仅依赖于所设计滤波器的参量向量 \mathbf{p} 。

3.2 后滤波算法的推导

按所述的信号表示方法,不必直接计算 \mathbf{u} 的每一个元素值,而只需对滤波器向量 \mathbf{p} 进行估计即可。因此定义 $s(x)$ 和 $d(x)$ 之间的均方差作为目标函数进行优化,

$$J = E(e^2) = E\{\{d(x) - s[x - u(x)]\}^2\}, \quad (8)$$

式中 $e = d(x) - s[x - u(x)]$, $E(\cdot)$ 表示期望值。在此, $u(x)$ 代表向量 \mathbf{u} 的第 x 个元素,即 $u(x)$ 。类似地,对于一个矩阵 \mathbf{A} ,用 $\mathbf{A}(q)$ 代表矩阵 \mathbf{A} 第 q 行。于是,将(5)式代入(8)式中,目标函数可以表示为

$$J(\mathbf{p}) = E\{\{d(x) - s[x - \mathbf{U}_p \cdot \mathbf{p}(x)]\}^2\}, \quad (9)$$

通过对此目标函数关于参量向量 \mathbf{p} 进行最小化,滤波器向量 \mathbf{p} 的估计值 $\hat{\mathbf{p}}$ 可在最小均方误差意义上进行估计。为了最小化 J ,利用梯度方法以迭代的方式对 $\hat{\mathbf{p}}$ 进行估计:

$$\hat{\mathbf{p}}_{m+1} = \hat{\mathbf{p}}_m - \eta \cdot \nabla_p J(\hat{\mathbf{p}}_m), \quad (10)$$

式中 $\nabla_p J(\cdot)$ 代表目标函数 $J(\cdot)$ 对于其变量 \mathbf{p} 的梯度。 η 为学习步长,下标 m 代表计算过程中的第 m 次迭代计算。利用最小均方差算法,可以用 $\hat{\nabla}_p J(\hat{\mathbf{p}}_m)$ 作为真实梯度 $\nabla_p J(\hat{\mathbf{p}}_m)$ 的估计,从而令计算得到简化。即

$$\hat{\mathbf{p}}_{m+1} = \hat{\mathbf{p}}_m - \eta \cdot \hat{\nabla}_p J(\hat{\mathbf{p}}_m), \quad (11)$$

式中

$$\hat{\nabla}_p J(\hat{\mathbf{p}}_m) = \nabla_p \{\{d(x) - s[x - \mathbf{U}_p(x) \cdot \hat{\mathbf{p}}_m]\}^2\} = \nabla_p e_m^2 = 2e_m \nabla_p e_m = 2e_m \nabla_p s(\hat{\mathbf{p}}_m) = -2e_m \nabla_u s[\hat{u}_m(x)] \cdot \nabla_p \hat{u}_m(x), \quad (12)$$

这里 $u(x) = \mathbf{U}_p(x) \cdot \mathbf{p}$, $u_m(x) = \mathbf{U}_p(x) \cdot \mathbf{p}_m$ 。于是有

$$\begin{aligned} \hat{\nabla}_p J(\hat{\mathbf{p}}_m) &= -2e_m \frac{s\{x - [\hat{u}_m(x) + 1]\} - s\{x - [\hat{u}_m(x) - 1]\}}{[\hat{u}_m(x) + 1] - [\hat{u}_m(x) - 1]} \nabla_p \hat{u}_m(x) = \\ &= e_m s\{x - [\hat{u}_m(x) + 1]\} - s\{x - [\hat{u}_m(x) - 1]\} \mathbf{U}_p(x) = \\ &= -\{d(x) - s[x - \mathbf{U}_p(x) \cdot \hat{\mathbf{p}}_m]\} s\{x - [\hat{u}_m(x) + 1]\} - s\{x - [\hat{u}_m(x) - 1]\} \mathbf{U}_p(x) = \\ &= -\{d(x) - s[x - \mathbf{U}_p(x) \cdot \hat{\mathbf{p}}_m]\} s[x - \mathbf{U}_p(x) \cdot \hat{\mathbf{p}}_m - 1] - s[x - \mathbf{U}_p(x) \cdot \hat{\mathbf{p}}_m + 1] \mathbf{U}_p(x), \end{aligned} \quad (13)$$

因为对于每个信号 $s(x)$ 和 $d(x)$ 的采样点,实际上都包含了关于参量向量 \mathbf{p} 的有用信息,因此可顺序并循环地使用从 1 到 N 的所有采样点直到算法收敛。即对于第 m 次迭代,可使用 $x = (m-1)[N - \text{ent}(N)] + 1$ 处的采

样点进行迭代并利用(13)式计算梯度值,在此 $[N - \text{ent}(N)]$ 代表对 N 取余数操作, $\text{ent}(\cdot)$ 为取整符号。于是导出基于广义分析模型的后滤波算法为

$$\hat{p}_{m+1} = \hat{p}_m + \eta \cdot \{d(x) - s[x - U_p(x) \cdot \hat{p}_m]\}s[x - U_p(x) \cdot \hat{p}_m - 1] - s[x - U_p(x) \cdot \hat{p}_m + 1]U_p(x), \quad (14)$$

对于算法的初始化,可简单的令

$$p_1 = [p_1(-M), p_1(-M+1), p_1(-M+2), \dots, p_1(0), p_1(1), \dots, p_1(M-1), p_1(M)]^T, \quad (15)$$

式中

$$p_1(m) = \begin{cases} 1, & m = 0 \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (16)$$

此初始向量实际上对应于对预估计的信号 $u_p(x)$ 未进行任何滤波的情况。

后滤波算法是一种基于优化的迭代算法,而用于优化的目标函数则是基于(8)式对单帧图像进行设计推导的。而对基于单幅条纹图像进行形貌重建的算法(如傅里叶变换轮廓术),物体表面反射率的不均匀分布将会对最终结果产生影响^[22]。理论上而言,本文提出的基于单帧的后滤波算法也将受到不均匀反射率的影响,因此一方面可以利用文献[22]所建议的方法对条纹进行处理,而另一方面,则可以将此算法简单地扩展到利用多帧图像进行重建的情况,从而利用多帧间的相互补偿来消除不均匀反射率所带来的影响。由于后滤波算法的最终结果实际上是最优滤波器的输出,因此能够在最小均

方误差的意义上进一步减少由反射率变化所引入的噪声。在精度上,后滤波算法能够对利用传统方法得到的预估值进行进一步的滤波处理和优化,去除非线性失真所带来的影响,因此在理想的无非线性失真的情况下,与传统算法的精度相当,而在投影条纹有非线性失真的情况下它的性能将尤为突出。

4 仿真与实验

4.1 仿真

利用一个抛物面作为待测物体的表面,此抛物面的最大高度为160 mm,其三维形貌如图2(a)所示。考虑到二次谐波通常在各次谐波分量中具有最强的能量,因此在仿真中用到的条纹由一个基频的正弦条纹和二次谐波信号所组成,其数学表达式为

$$s(x) = 128 + 100\cos(2\pi f_0 x) + 10\cos[2\pi(2f_0)x], \quad (17)$$

式中 f_0 为投影条纹的基频分量的空间频率,在仿真

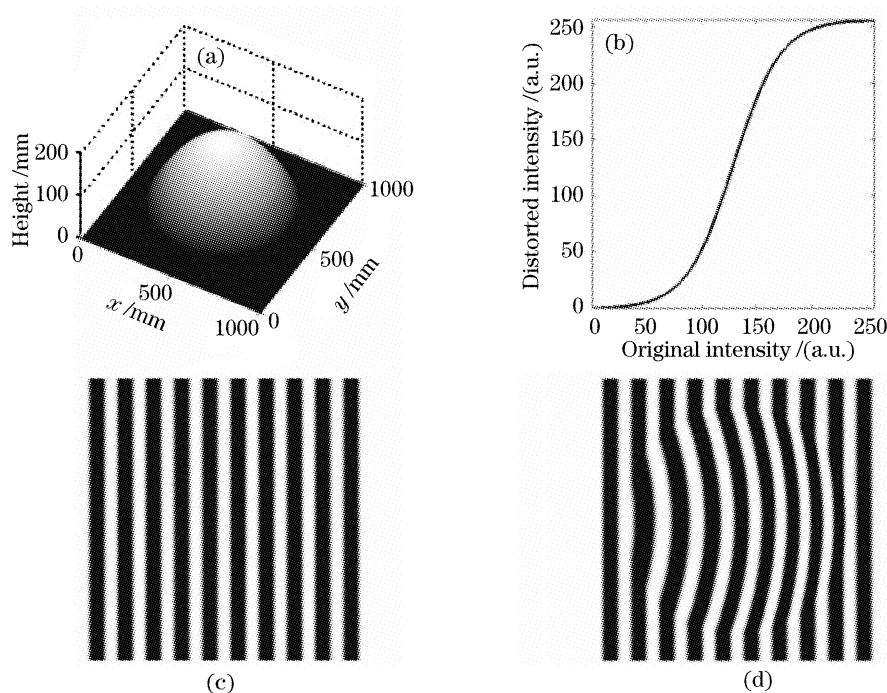


图2 仿真中的投影条纹和待测物体表面。(a)待测三维物体表面,(b)非线性失真曲线,(c)参考平面上的投影条纹,(d)物体表面上的投影条纹

Fig. 2 Simulated fringe patterns and object surface to be measured. (a) Three-dimensional object surface to be measured, (b) curve of nonlinear distortion, (c) fringe pattern on the reference plane, (d) fringe pattern on the object surface

中假设它的值为 10 cycle/m, 即条纹的空间周期为 100 mm。同时假设在图 1 中 l_0 和 d_0 分别为 5 m 和 2 m。拍摄到的条纹图像所对应的空间分辨力假设为每毫米一个像素。注意对于由(17)式给出的条纹中, 二次谐波的能量和基频成分相比仅有 -20 dB。

进一步假设当投射到参考平面上的条纹信号被摄像机所采集到时, 又被一个非线性函数引入了非线性失真:

$$\zeta(s) = 128 \frac{\tanh(3s/128 - 3)}{\tanh 3} + 128, \quad (18)$$

式中 $\zeta(s)$ 为一个非线性函数, 此函数是一个由区间 $[0, 256]$ 到区间 $[0, 256]$ 的一个非线性映射。 $\zeta(s)$ 的曲线如图 2(b) 所示。即实际在参考平面上拍摄到的条纹图像为

$$\hat{s}(x) = \zeta[s(x)]. \quad (19)$$

对应于(17)式, 经过物体表面的反射而发生形变的条纹以及此条纹实际被摄像机所拍摄到的条纹信号可以分别表示为

$$d(x) = 128 + 100\cos[2\pi f_0 x + \phi(x)] + 10\cos[2\pi(2f_0)x + 2\phi(x)], \quad (20)$$

$$\hat{d}(x) = \zeta[d(x)]. \quad (21)$$

式中 $\phi(x)$ 为由物体表面的形貌变化所导致的相位分布函数。因此在仿真中, 实际在参考平面和物体表面上拍摄到的条纹图像如图 2(c) 和图 2(d) 所示。此外, 为了比较的简洁与清楚, 利用重建后的物体表面的中央横截面来显示对于三维物体表面形貌重建的结果。由于非线性失真对投射条纹的影响, 傅里叶变换轮廓术只能粗略地对被测物体的高度分布进行测量与恢复, 如图 3(a) 所示。

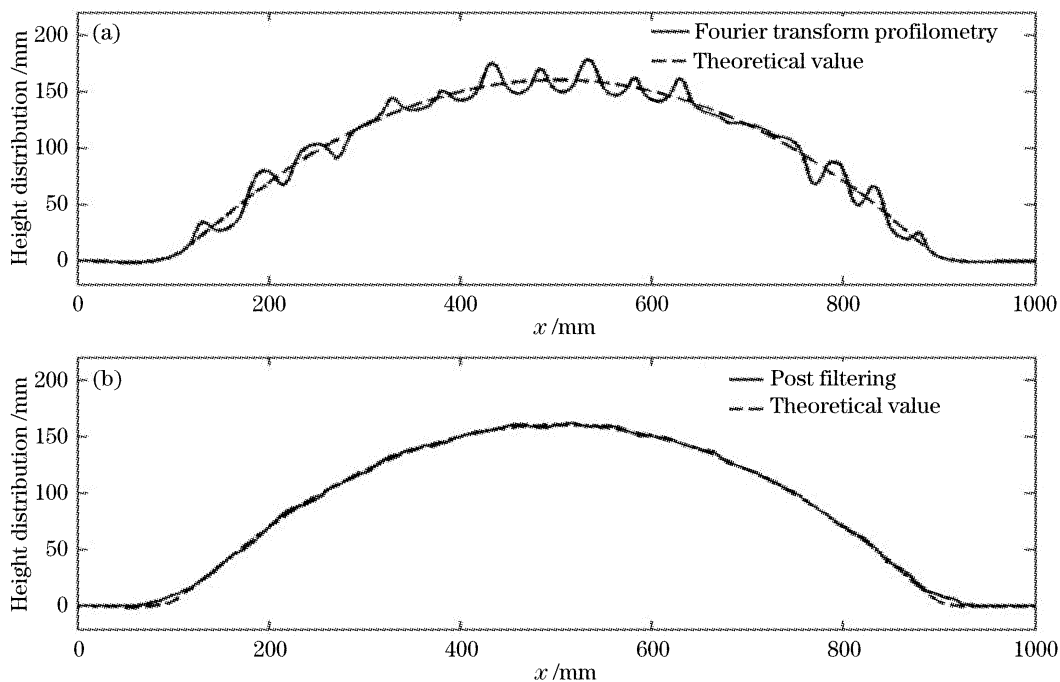


图 3 利用不同方法得到的形貌重建结果。(a)傅里叶变换轮廓术, (b)后滤波

Fig. 3 Reconstruction results by using different method. (a) Fourier transform profilometry, (b) post filtering

利用傅里叶变换轮廓术所粗略估计的高度分布, 可用(2)式的逆运算得到位移分布函数的预估值 $u_p(x)$ 。在仿真中, 用 $K=30$ 来进行形貌重建。从初始向量 p_1 开始, 可以利用由(14)式所给出的迭代算法来对滤波器参量向量 p 进行调整, 直至最终收敛到对最优值向量 p 的一个估计值 p_{opt} 。同时, 利用估计出来的滤波器向量对原始信号进行滤波, 可以得到准确的形貌测量结果, 如图 3(b) 中实线所示。可以看出最终形貌重建的结果与物体形貌的理论值几乎完全一致。同时, 其重建所得到的结果比

传统的傅里叶变换轮廓术更加准确, 得到的表面也更加平滑, 也进一步验证了所提出的基于后滤波方法能够对预估的物体形貌进行最优滤波。

4.2 实验

实验利用一台 InFocus LP530 DLP 投影仪将由计算机产生的条纹图像投射出去, 投影仪距离参考平面 2 m。投影条纹经物体表面反射, 被一台 DuncanTech MS3100-RGB 3CCD 摄像机所拍摄, 摄像机距离投影仪 810 mm, 并且通过图形采集卡连接到计算机上。待测物体是一个位于参考平面上的

圆锥体,如图 4(a)所示。圆锥体的高度为 38 mm,其底面直径为 94 mm。图 4(b)和图 4(c)是分别从参考平面和物体表面所拍摄到的条纹图像。图 4(d)为图 4(b)条纹图像横截面上的一维信号。实验所使用的 CCD 摄像机的分辨力为 $1392 \text{ pixel} \times 1039 \text{ pixel}$,视野为 $260 \text{ mm} \times 194 \text{ mm}$ 。因此,等效的空间分辨力为每像素 0.1868 mm 。投射条纹等效的空间周期

为 25.7 mm ,对应的空间频率为 $f_0 = 38.9 \text{ cycle/m}$ 。

由于非线性失真,利用傅里叶变换轮廓术得到的测量结果如图 5 所示,可以看出,恢复出来的圆锥体表面十分粗糙且伴有纹波状噪声。截然不同是,在进行后滤波后可准确地得到待测圆锥的形貌,清晰看出圆锥的平直边缘及光滑表面,如图 6 所示。

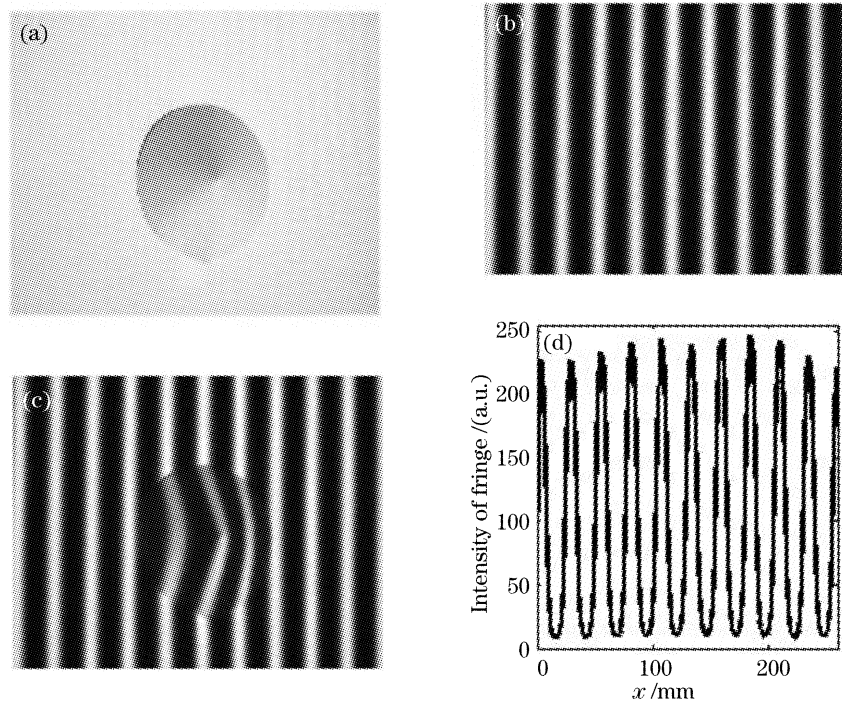


图 4 实验中拍摄到的条纹图像和待测圆锥体。(a)待测圆锥体,(b)参考平面的条纹图像,(c)圆锥体表面的条纹图像,(d)条纹图像的横截面信号

Fig. 4 Fringe pattern images and a cone to be measured in experiment. (a) The cone to be measured, (b) fringe pattern image on reference plane (c) fringe pattern image on the surface of cone, (d) a cross section of the fringe pattern signal

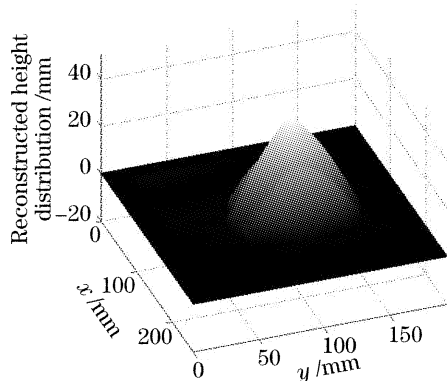


图 5 实验中利用傅里叶变换轮廓术得到的三维形貌重建结果

Fig. 5 Reconstruction result of three-dimensional profile by using Fourier transform profilometry in experiment

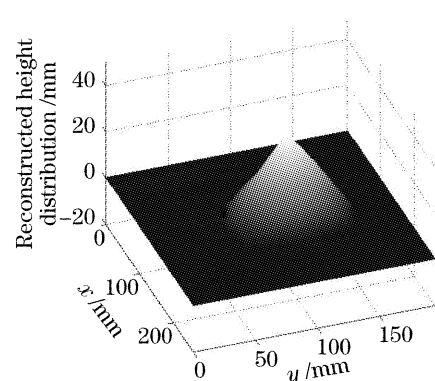


图 6 实验中利用后滤波方法得到的三维形貌重建结果
Fig. 6 Reconstruction result of three-dimensional profile by using post filtering in experiment

5 结 论

基于广义分析模型提出了一种后滤波方法,并导

出了后滤波方法中用到的空间滤波器的参量计算迭代算法。通过所设计的空间滤波器能够实现对预

估计信号的在最小均方差意义上的最优滤波,即经过后滤波后的信号能够在最小均方差意义上满足广义分析模型,从而在非线形失真存在的情况下实现了对三维物体形貌的准确重建。仿真和实验结果都表明,后滤波方法能够有效、准确地实现数字条纹轮廓术。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, Hideki Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1982, **72**(1): 156~160
- 2 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 3 Fu Lin, He Anzhi, Li Zhenhua *et al.*. High-speed measurement and identification of highway pavement surface deformation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 115~118 (in Chinese)
付 林,贺安之,李振华等. 动态傅里叶变换轮廓术实现路面形变快速检测[J]. 光电工程, 2006, **33**(7): 115~118
- 4 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229 (in Chinese)
毛先富,陈文静,苏显渝等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 225~229
- 5 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 99~104 (in Chinese)
毛先富,陈文静,苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 99~104
- 6 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 7 Zhao Wenchuan, Su Xianyu. Analysis of nonlinearity errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1560~1564 (in Chinese)
赵文川,苏显渝. 相位测量轮廓术(PMP)中光场非线性误差分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(10): 1560~1564
- 8 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166 (in Chinese)
李 勇,苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1162~1166
- 9 Shao Shuangyun, Su Xianyu. New depth recovery algorithm in modulation measurement profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 43~46 (in Chinese)
邵双运,苏显渝. 调制度测量轮廓术高度信息获取新算法[J]. 光电工程, 2005, **32**(9): 43~46
- 10 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Wang Hua *et al.*. Calibration of the measurement system based on modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 203~206 (in Chinese)
邵双运,苏显渝,王 华等. 调制度测量轮廓术的系统标定[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 203~206
- 11 S. Toyooka, Y. Iwaasa. Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(10): 1630~1633
- 12 M. R. Sajan, C. J. Tay, H. M. Shang *et al.*. Improved spatial phase detection for profilometry using a TDI imager[J]. *Opt. Commun.*, 1998, **150**(1~6): 66~70
- 13 M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor. Fringe pattern demodulation with a two-frame digital phase-locked loop algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(26): 5471~5478
- 14 M. A. Gdeisat, D. R. Burton, M. J. Lalor. Fringe pattern demodulation with a two-dimensional digital phase-locked loop algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(26): 5479~5487
- 15 D. M. Meadows, W. Johnson, J. B. Allen. Generation of surface contours by moire patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 942~947
- 16 Wang Zhao, Zhao Hong, Tan Yushan. The frequency shifting technology in shadow moire [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(6): 816~820 (in Chinese)
王 昭,赵 宏,谭玉山. 频移阴影莫尔法[J]. 光学学报, 1999, **19**(6): 816~820
- 17 A. J. Moore, F. Mendoza-Santoyo. Phase demodulation in the space domain without a fringe carrier[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1995, **23**(5): 319~330
- 18 J. Villa, M. Servin, L. Castillo. Profilometry for the measurement of 3-D object shapes based on regularized filters[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **161**(1~3): 13~18
- 19 Hongwei Guo, Haitao He, Mingyi Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914
- 20 Yingsong Hu, Jiangtao Xi, Enbang Li *et al.*. Three-dimensional profilometry based on shift estimation of projected fringe patterns [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(4): 678~687
- 21 L. Biancardi, G. Sansoni, F. Docchio. Adaptive whole-field optical profilometry; a study of the systematic errors[J]. *IEEE Trans. Instrum. and Measure.*, 1995, **44**(1): 36~41
- 22 Zhou J, Liang Z. Several factors impairing the phase measurement accuracy[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1995, **23**(4): 199~212