

文章编号: 0253-2239(2007)03-0461-5

基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法*

施展 赵宏 张璐

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 为了提高测量速度, 提出一种基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法, 只需采集一帧图像, 就能实现高速测量以及动态物体轮廓测量中的相位去包裹。论述了双频相位测量和变精度去包裹原理, 并详细分析影响测量精度的因素。该方法采用计算机生成一帧双频双色正弦条纹图, 用液晶数字投影仪投影, 并用傅里叶变换的方法对两个单色条纹图进行分析, 获得高低两种精度的被测物体高度信息, 从而进行变精度去包裹处理。结果表明, 利用该方法提高了测量速度, 可得到较高的去包裹精度, 其测量最大绝对误差为 $+1.413 \sim -1.582$ mm, 标准差为 0.363 mm。

关键词: 光学测量; 相位去包裹; 双频条纹; 傅里叶变换

中图分类号: TN206 文献标识码: A

Phase-Unwrapping Method Based on Dual-Frequency Colorful Fringe Projection

Shi Zhan Zhao Hong Zhang Lu

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

Abstract: A phase-unwrapping method based on dual-frequency colorful fringe projection was proposed to improve measurement speed. Only one frame image was collected to realize phase-unwrapping in high-speed measurement and dynamic object contour measurement. The dual-frequency phase measurement and the principle of unwrapping with variational precision were discussed, and then factors affecting measurement precision were analysed in detail. A dual-frequency dual-color sinusoidal fringe pattern encoded by computer was projected by a liquid crystal digital projector. And two monochroic fringe patterns were analysed by Fourier transform to obtain height information of the measured object with high and low precisions and then carry out the unwrapping with variational precision. The results showed that the measurement speed and the unwrapping precision were improved. The maximal absolute error was $+1.413 \sim -1.582$ mm, and the standard deviation was 0.363 mm.

Key words: optical measurement; phase unwrapping; dual-frequency fringe pattern; Fourier transform

1 引 言

现行的相位测量法都是通过反正切函数运算得到相位分布, 其值在 $(-\pi, \pi)$ 范围内, 为不连续相位。所以, 在相位测量轮廓术(PMP)和傅里叶变换轮廓术(FTP)中, 要由相位值求出被测物体的高度分布, 必须将此截断的包裹相位恢复为连续的真实相位^[1], 这个过程就是相位去包裹(Phase unwrapping)。

近年来, 针对相位去包裹的研究, 出现了许多算法, 大体上可以分为空域和时域两类。传统的空域

相位去包裹是通过比较包裹相位图中的相邻两点的相位值, 根据相位差值来判断加上或者减去一个周期(2π)来实现的。但在实际测量过程中, 物体表面有断点或者边界区域导致相邻两点的相位值有大于 2π 的跳变时, 就会给相位去包裹带来很大的困难, 往往无法准确恢复物体形貌。变精度二次测量去包裹是一种时域去包裹方法, 该方法通过对被测物体进行两次测量, 得到两幅不同精度的相位图, 以低精度相位图为参考, 根据两个条纹之间的频率关系, 对

* 国家 973 计划(2005CB724106)和国家自然科学基金(50575169)资助课题。

作者简介: 施展(1979—), 男, 浙江慈溪人, 硕士研究生, 主要从事光电检测技术研究。E-mail: scourser@tom.com

导师简介: 赵宏(1964—), 男, 福建人, 教授, 主要从事研究领域为智能化光电检测、实时在线测试以及机器人视觉技术, 光纤生物信息检测、生物组织成像技术等。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-05-16; 收到修改稿日期: 2006-09-05

高精度的相位图进行去包裹处理。这一方法始终对各点独立地进行去包裹处理,而不需要借助相邻点的相位信息,因此当物体表面有相位跳变时,仍然可以得到可靠的结果^[2,3]。为了提高测量速度,本文提出采用一帧双频双色正弦条纹投影,通过图像处理,从 CCD 采集到的位图中分离出两种 RGB 基色分量的变形条纹图。针对两幅(高、低频)单色的物体变形条纹图,采用傅里叶变换获得高、低两种精度的被测物体高度信息,从而进行去包裹处理。

2 双频相位测量原理

测量系统的基本结构如图 1 所示。为了实现投影一帧条纹,获得两种精度的物体高度信息,本文采用投影一帧双频双色的正弦条纹图。此条纹由 RGB 三基色中的红和蓝两种颜色组成,蓝色正弦条纹的频率是红色条纹的 4 倍。当条纹投影到参考平面上,通过彩色 CCD 摄像机采集到的图像的分布可以表示为^[4]

$$g_o(x, y) = A_r + B_r \cos[2\pi f_o x + \varphi_{or}(x, y)] + A_b + B_b \cos[8\pi f_o x + \varphi_{ob}(x, y)], \quad (1)$$

式中 A_r 和 A_b 分别为红色分量和蓝色分量的背景光强, B_r/A_r 和 B_b/A_b 分别为红色分量和蓝色分量的对比度, f_o 为红色条纹的基频, $\varphi_{or}(x, y)$ 和 $\varphi_{ob}(x, y)$ 分别为红、蓝条纹的初始相位值。将以上条纹投影到被测物体表面,得到的变形条纹可以表示为

$$g(x, y) = R_r(x, y) \{A_r + B_r \cos[2\pi f_o x + \varphi_r(x, y)]\} + R_b(x, y) \{A_b + B_b \cos[8\pi f_o x + \varphi_b(x, y)]\}, \quad (2)$$

式中 $R_r(x, y)$ 和 $R_b(x, y)$ 分别为物体表面对红光和蓝光的反射率, $\varphi_r(x, y)$ 和 $\varphi_b(x, y)$ 为物体高度在红和蓝两种条纹下对应的相位值,它们是物体表面高度 $h(x, y)$ 的函数。根据 CCD 摄像机采集到的

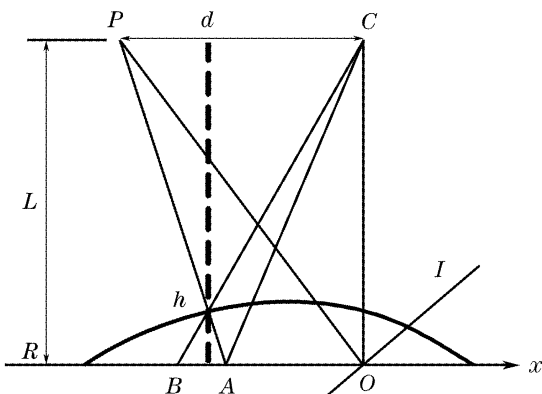


图 1 测量系统的基本结构

Fig. 1 Geometry of measurement system

BMP 位图,可以从(1)式、(2)式中分离出红、蓝两种颜色不同频率的条纹。

由(1)式获得参考平面上的条纹:

$$g_{or}(x, y) = A_r(x, y) + B_r(x, y) \cos[2\pi f_o x + \varphi_{or}(x, y)], \quad (3)$$

$$g_{ob}(x, y) = A_b(x, y) + B_b(x, y) \cos[8\pi f_o x + \varphi_{ob}(x, y)], \quad (4)$$

由(2)式获得物体表面的变形条纹:

$$g_r(x, y) = R_r(x, y) \{A_r + B_r \cos[2\pi f_o x + \varphi_r(x, y)]\}, \quad (5)$$

$$g_b(x, y) = R_b(x, y) \{A_b + B_b \cos[8\pi f_o x + \varphi_b(x, y)]\}, \quad (6)$$

对(3)式和(4)式进行一维傅里叶变换,得到傅里叶频谱图,用一个开口适当的滤波窗口获得基频部分,然后再对该基频进行傅里叶反变换^[5],可以得到信号

$$G_{or}(x, y) = A'_r \exp\{j[2\pi f_o x + \varphi_{or}(x, y)]\}, \quad (7)$$

$$G_{ob}(x, y) = A'_b \exp\{j[8\pi f_o x + \varphi_{ob}(x, y)]\}, \quad (8)$$

同样对物体表面的变形条纹(5)式和(6)式作上述相同的处理,可以得到

$$G_r(x, y) = A'_r R_r(x, y) \exp\{j[2\pi f_o x + \varphi_r(x, y)]\}, \quad (9)$$

$$G_b(x, y) = A'_b R_b(x, y) \exp\{j[8\pi f_o x + \varphi_b(x, y)]\}, \quad (10)$$

这样,就可以得到最终所需的相位差

$$\Delta\varphi_r(x, y) = \varphi_r(x, y) - \varphi_{or}(x, y)$$

和

$$\Delta\varphi_b(x, y) = \varphi_b(x, y) - \varphi_{ob}(x, y),$$

$$w[\Delta\varphi_r(x, y)] = \text{Im}\{\ln[G_r(x, y)G_{or}^*(x, y)]\}, \quad (11)$$

$$w[\Delta\varphi_b(x, y)] = \text{Im}\{\ln[G_b(x, y)G_{ob}^*(x, y)]\}, \quad (12)$$

式中 $G_{or}^*(x, y)$ 和 $G_{ob}^*(x, y)$ 分别为 $G_{or}(x, y)$ 和 $G_{ob}(x, y)$ 的复共轭。

3 变精度去包裹原理

从(12)式和(11)式可以得到高、低精度的物体表面相位值 $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$, 其中 $\varphi_1(x, y)$ 对应于(12)式中的 $\Delta\varphi_b(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ 对应于(11)式中的 $\Delta\varphi_r(x, y)$ 。它们是以 2π 为模的包裹相位值,其真实相位值为

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) + 2\pi n(x, y), \quad (13)$$

式中 $n(x, y)$ 为整数。即相位去包裹处理就是确定 $n(x, y)$ 的过程。由于事先设定低频条纹的周期使得

低精度的物体表面相位值 $\varphi_2(x, y)$ 的范围为 $0 \sim 2\pi$, 所以以 $\varphi_2(x, y)$ 为参考, 对高精度的相位值 $\varphi_1(x, y)$ 进行去包裹处理。因为高、低两种精度的物体相位是在同一光学系统下测量得到的, 所以物体表面上任意点 $P(x, y)$ 相对于参考平面的高度 $h(x, y)$ 可以表示为

$$h(x, y) = k_1 \phi(x, y), \quad (14)$$

$$h(x, y) = k_2 \varphi_2(x, y), \quad (15)$$

式中 k_1, k_2 为与测量系统结构有关的常量。结合 (13) 式, 可以得到

$$n(x, y) = \text{ent} \left[\frac{k_2 \varphi_2(x, y) / k_1 - \varphi_1(x, y)}{2\pi} \right], \quad (16)$$

式中 ent 为取整符号。当 k_1, k_2 已知时, 可以求出 $n(x, y)$ 。但是这里会产生不相容误差, 必须对 (16) 式所求得的 $n(x, y)$ 进行修正。设两种精度下测得的高度之差为

$$\Delta(m) = k_1 [\varphi_1(x, y) + 2m\pi] - k_2 \varphi_2(x, y), \quad (17)$$

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

式中必然存在一个 $m = m_0(x, y)$, 使得 $\Delta(m)$ 取得最小值, 这样就得到了精确的条纹级数 $m_0(x, y)$, 即得到了目标点的精确相位去包裹值^[2,3]:

$$\phi(x, y) = \varphi_1(x, y) + 2m_0(x, y)\pi. \quad (18)$$

4 影响测量精度的因素

4.1 傅里叶变换处理的误差

针对从 CCD 获得的彩色位图中分解出来的高、低两种精度的单色变形条纹图, 本文采用傅里叶变换的方法求得两种精度的物体表面高度分布 $h(x, y)$, 在此过程中使用了快速傅里叶变换、频域滤波和傅里叶反变换的处理。因此频谱混叠和零频分量的存在是影响测量精度的重要因素^[5]。可以通过以下的方法来减小此类误差:

1) 根据傅里叶变换轮廓术原理, 为了正确恢复面形, 必须从变形条纹的频谱中滤出基频信息, 因此必须保证基频分量同零频以及高次谐波频率的分离。由傅里叶变换的性质可知, 条纹越接近正弦, 高次谐波频率对基频的混叠越小。本文提出用计算机编码、数字投影仪投影, 不仅可以得到正弦性较好的条纹, 而且可以非常灵活地改变条纹的各种参量, 这显著改善了用龙基(Ronchi)光栅投影时的频谱混叠问题。

2) 为了避免零频分量对基频的影响, 可以通过窗口傅里叶变换对变形光栅图像进行局部分析^[6]。该方法是对高斯函数所确定的窗口中的变形光栅图像进行傅里叶分析、滤波, 移动窗口位置, 重构出全部的基频分量, 滤除其他的频谱信息。

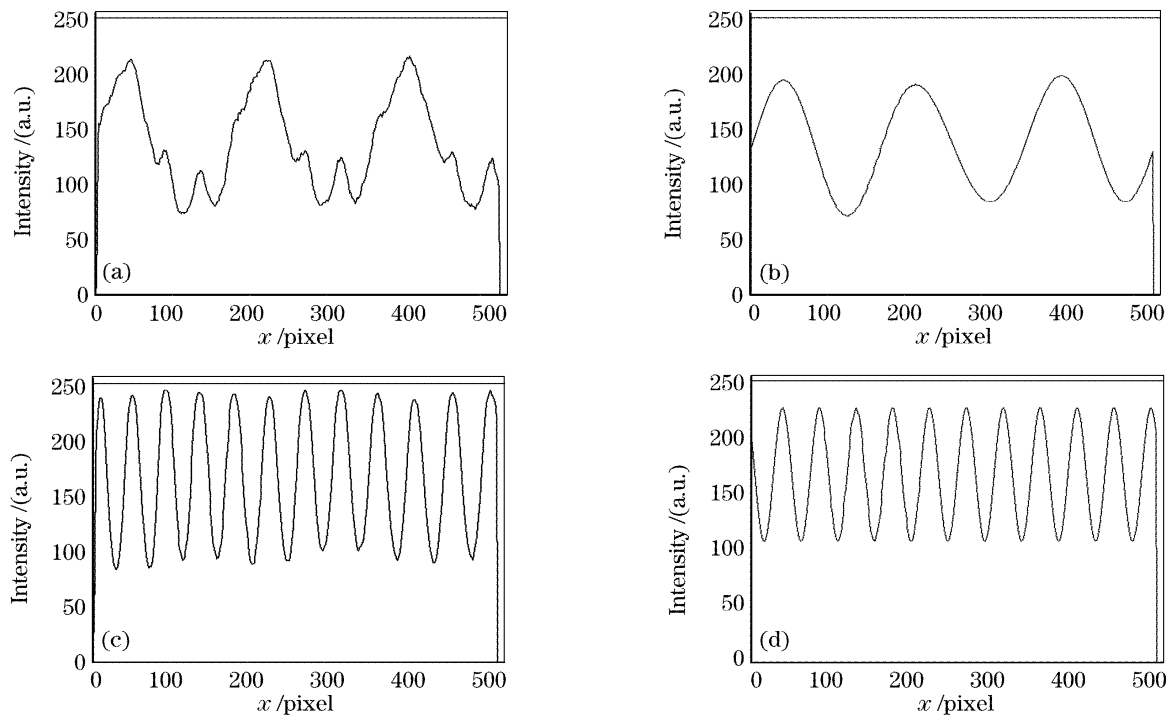


图 2 颜色混叠的消除。(a) 混有高频噪声的低频条纹曲线; (b) 消除高频噪声后的低频条纹曲线; (c) 混有低频噪声的高频条纹曲线; (d) 消除低频噪声后的高频条纹曲线

Fig. 2 Elimination of color coupling. (a) Low-frequency curve mixed with high-frequency noises; (b) low-frequency curve after high-frequency noises are eliminated; (c) high-frequency curve mixed with low-frequency noises; (d) high-frequency curve after low-frequency noises are eliminated

4.2 颜色误差

4.2.1 物体表面颜色的干扰

该方法针对两种基色分量(红和蓝)条纹进行独立分析和处理,因此物体表面颜色对采集条纹的颜色信息有干扰,从而影响测量精度,所以该方法适合于测量表面颜色单一的物体。如果物体表面颜色不单一,可以预先作表面喷涂处理。

4.2.2 颜色混叠的影响

用彩色 CCD 摄像机采集到的位图经过图像处理,分解出单色分量的条纹图,往往会有颜色混叠。

从图 2(a)中可以看到,在低频曲线上存在高频噪声,同样在高频曲线上也存在低频噪声,如图 2(c)。这是由彩色 CCD 摄像机颜色通道的光谱重叠造成的,这增加了频谱混叠的可能性,降低了测量精度。因此在傅里叶变换处理过程中,选择合适的滤波窗口消除颜色混叠引起的误差,得到图 2(b)、图 2(d)所示的理想正弦条纹是一个重要的处理环节。

4.3 去包裹的误差

本文的去包裹方法,是以低精度相位图作为参考,根据两个条纹之间的频率关系,对高精度的相位图进行相位展开,因此,去包裹的精度取决于高低频相位图本身的精度。另外,该法始终对各点独立地进行去包裹处理,而不需要借助相邻点的相位信息,所

以当物体表面相邻点有相位跳变,或者有个别噪声点时,不会影响整体的相位展开,仍然可以得到可靠的结果。

5 实验及结果

测量系统的实验装置如图 3 所示。投影装置采用 InFocus-LP330 投影仪,图像获取装置采用 Panasonic WV-CP410/G 彩色 CCD 摄像机,由图像卡把 CCD 采集到的数字信号存储为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 24 位 BMP 格式图像。测量时投影的红、蓝条纹周期分别为 48 pixel , 12 pixel 。投影仪与摄像

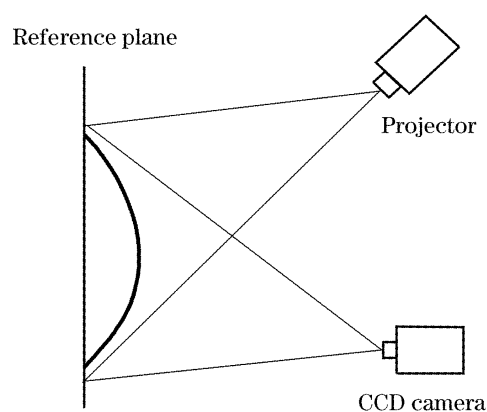


图 3 投影及摄像系统实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of projection and imaging system

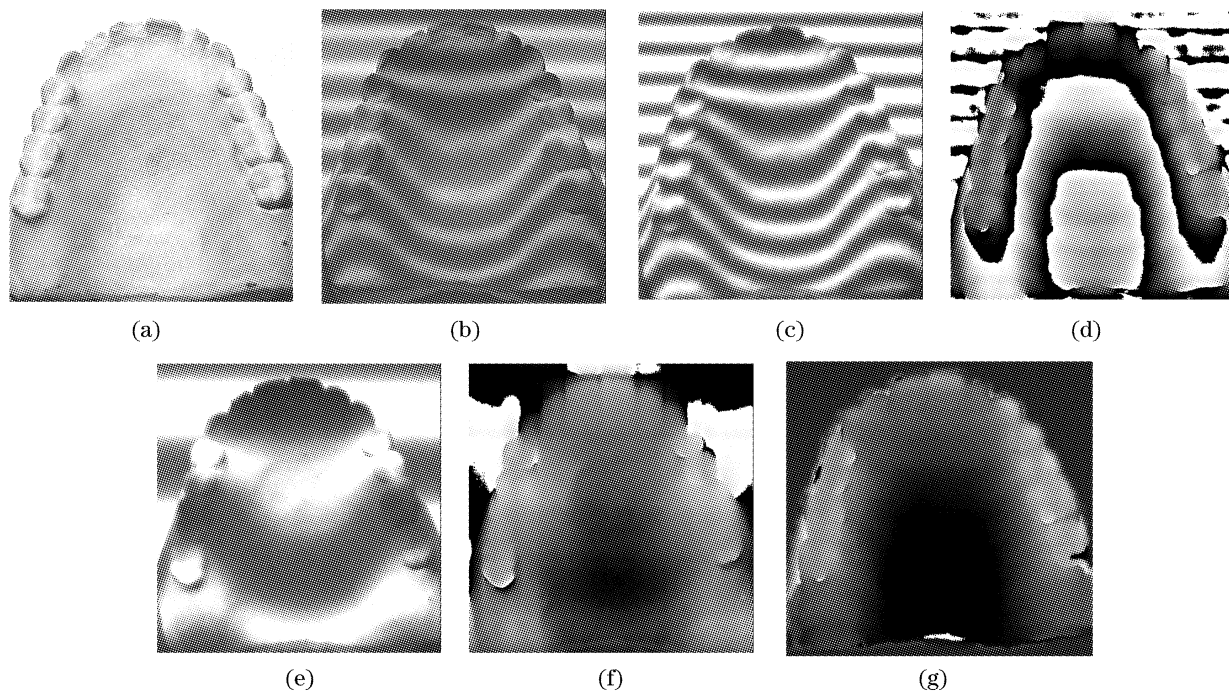
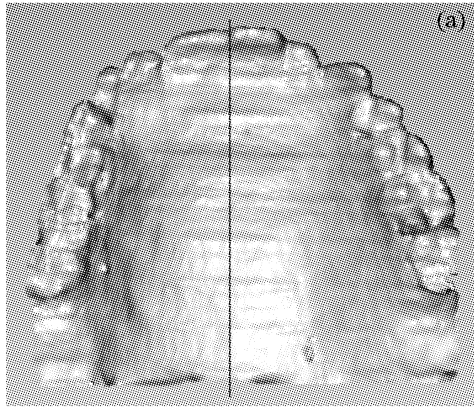


图 4 对一个牙模的测量实验。(a) 被测物体, (b) 双频条纹投影下的物体图像, (c) 高频物体变形条纹图, (d) 高精度物体包裹相位图, (e) 低频物体变形条纹图, (f) 低精度物体相位图, (g) 高精度去包裹相位图

Fig. 4 Measuring a tooth model. (a) Original object, (b) image of object projected with dual-frequency colorful fringe pattern, (c) high-frequency deformed fringe pattern, (d) high-precision wrapped phase image, (e) low-frequency deformed fringe pattern, (f) low-precision phase image, (g) high-precision unwrapped phase image

机之间的夹角为 60° ，两者的距离 $d=500$ mm。投影仪、摄像机与参考平面之间的距离 $L=400$ mm。

如图 4 所示,对一个石膏牙模进行测量,图 4(b)是双频双色条纹投影下的物体图像,(c)和(e)分别为高频和低频的物体变形条纹图,(d)和(f)分别为高、低精度的物体相位图。(g)是以低精度(f)为参考,高



精度相位(d)的去包裹相位图。

图 4(g)生成的三维立体模型如图 5(a)所示。用一个纵向截面截取一条曲线与参考曲线(用精度为 $30\ \mu\text{m}$ 的测量仪器获得)进行对比[图 5(b)],分析采用 Geomagic Qualify 软件,得到其测量最大绝对误差为 $+1.413\sim-1.582$ mm,标准差为 0.363 mm。

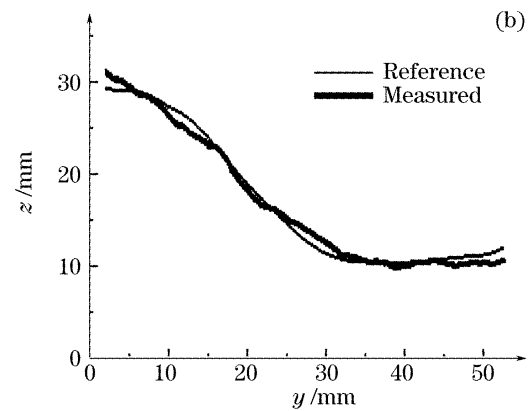


图 5 去包裹相位图生成的(a)三维模型以及(b)误差分析

Fig. 5 (a) Three-dimensional model of unwrapped phase image and (b) error evaluation

6 结 论

提出了双频双色投影相位测量去包裹方法,在有效解决有断点和边界的物体的相位去包裹问题的基础上,实现了只需要投影一帧条纹图即可获得物体高低两种精度的高度信息,从而进行去包裹处理。利用该方法显著提高了测量速度,其测量最大绝对误差为 $+14.3\sim-1.582$ mm,标准差为 0.363 mm,因此该技术可望应用于动态物体的三维轮廓测量。

参 考 文 献

- 1 Yang Yaliang, Wu Lan, Ding Zhihua. Application research of Fourier-transform-based deterministic phase-unwrapping algorithm[J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(3): 33~36 (in Chinese)
杨亚良,吴 兰,丁志华等. 基于傅里叶变换的确定性相位去包裹算法的应用研究[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(3): 33~36

- 2 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yushan. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20): 4497~4500
- 3 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yushan. A new phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(7): 898~901 (in Chinese)
赵 宏,陈文艺,谭玉山. 一种新的相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 1995, **15**(7): 898~901
- 4 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 (in Chinese)
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
- 5 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5): 263~284
- 6 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of dilating Gabor transform to three-dimensional shape analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 725~729 (in Chinese)
翁嘉文,钟金钢. 伸缩窗口傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 725~729