

文章编号: 0253-2239(2006)09-1367-5

# 相移相位测量的全息再现算法及测量误差分析\*

吕晓旭<sup>1</sup> 钟丽云<sup>2</sup> 张以谟<sup>3</sup>

{ 1 华南师范大学信息光电子科技学院, 广州 510631  
2 暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632  
3 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072 }

**摘要:** 用全息原理和方法研究相移相位测量,得到了  $N$  步整周期相移再现物光波复振幅同步叠加函数( $N$  步相移函数),同时提出一种新的相移相位测量误差分析和最大误差估计方法。 $N$  步相移干涉图是以理想平行光为参考光的无衍射同轴全息图,将其与对应的相移参考光相乘后求和得到  $N$  步相移函数;在理想情况下,这是一种复振幅分离、测量和物光波复振幅函数同步叠加方法,存在误差时计算出的相位是最小二乘方法的最佳期望结果。利用  $N$  步相移函数得到的  $N+1$  步相移函数,说明非理想  $N$  步相移函数是理想  $N$  步相移函数与误差函数之和,可以把相位型误差转化为与振幅和强度相对误差同等的误差来对待,降低了相位测量中误差估计的难度,给出了  $N$  步相移算法最大误差的估计方法和公式。

**关键词:** 光学测量; 信息光学; 相移相位测量;  $N$  步相移函数;  $N+1$  步相移算法; 误差

中图分类号: TH741 文献标识码: A

## Holographic Reconstructing Algorithm and Its Error Analysis about Phase-Shifting Phase Measurement

Lu Xiaoxu<sup>1</sup> Zhong Liyun<sup>2</sup> Zhang Yimo<sup>3</sup>

{ 1 School for Information and Optoelectronics Science and Engineering, South China Normal University,  
Guangzhou 510631  
2 College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632  
3 School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072 }

**Abstract:** Phase-shifting phase measurement is studied according to the holographic principle and method, a function of synchronous superposition of object complex amplitude reconstructed from  $N$ -step phase-shifting through one integral period is proposed, and  $N$ -step phase-shifting function is for short. Meanwhile, a novel error analysis and maximum error evaluation method for phase-shifting phase measurement is presented. In  $N$ -step phase-shifting phase measurement, the interferograms are seen as a series of in-line holograms without diffraction and the reference beam is an ideal parallel-plane wave. So the  $N$ -step phase-shifting function can be obtained by summing after multiplying the interferogram by the original reference wave. In the ideal condition, the proposed method is a kind of synchronous superposition algorithm in which the complex amplitude is separated, measured and superposed. When error exists in measurement, the result from  $N$ -shifting function is the optimal expected value of the least-squares fitting algorithm. In the above method,  $N+1$ -step phase-shifting function can be obtained from  $N$ -step phase-shifting function, indicating that the  $N$ -step phase-shifting function can be separated into two parts: the ideal  $N$ -step phase-shifting function and its errors. The phase-shifting errors in  $N$ -step phase-shifting phase measurement can be treated as same as the errors of amplitude and intensity under understanding of  $N+1$ -step phase-shifting function. The difficulties of the error evaluation in phase-shifting phase measurement are depressed by this error evaluation method. Meanwhile the maximum error evaluation method of phase-shifting phase measurement and its formula are proposed.

**Key words:** optical measurement; information optics; phase-shifting phase measurement;  $N$ -step phase-shifting function;  $N+1$ -step phase-shifting algorithm; error

\* 国家自然科学基金(60467003, 6027732)资助课题。

作者简介: 吕晓旭(1959~),男,江西丰城人,华南师范大学教授,主要从事全息术、光学相位测量、光电检测等方面的研究。E-mail: xiaoxulu48@sina.com

收稿日期: 2005-09-19; 收到修改稿日期: 2006-01-24

## 1 引 言

相移相位测量技术是一种高精度的光学干涉测量技术<sup>[1]</sup>,在相关的科学研究和测量中已经得到了越来越广泛的应用<sup>[2~4]</sup>。由于相移相位测量方法的高精度和相移干涉条纹图强度的余弦函数性质,使得这种相位测量方法的误差分析成为一个重要和比较困难的问题。相移相位测量方法是在待测量相位不变化的条件下引入两次以上已知的相位变化,并对应地采集三幅以上相移干涉条纹图,继而计算出待测相位。随着研究的深入,对产生测量误差的因素已经有了比较充分的认识<sup>[5~7]</sup>,相移的准确性、图像传感器非线性及动态响应范围限制、采样及模-数转换精度限制、环境因素、光学元件及光学系统、被测量物体的性质、激光器频率稳定性及输出功率起伏等,都是引起测量误差的因素,经过多年的研究,也发展了许多方法来补偿这些因素对测量结果的影响<sup>[8~12]</sup>。但是面对如此多的误差因素,加之误差的随机性、相位表达函数的周期性和非线性等,实际测量误差是各种误差因素的综合结果,难以把不同因素的影响区分开。通过最小二乘方法得到的四步、五步和多步算法是应用比较普遍的方法,但是对这类方法的综合误差评价问题仍然没有得到解决。为了更好地应用和发展相位测量技术,有必要从光学层面上对相位测量技术进行研究,寻找新的误差评估方法。

本文利用光学全息的原理和方法推导出相移相

位测量的  $N$  步和  $N+1$  步全息相移算法,在此基础上提出一种相移相位测量的误差估计方法,对可能出现的最大测量误差进行了分析,给出了最大相位测量误差的估算公式。

## 2 $N$ 步整周期相移再现物光波复振幅同步叠加函数

利用全息术中的术语,把相移相位测量中被物体调制后的光波称为物光波,另一束参加干涉的光波称为参考光波,二者的传播方向与记录平面垂直,假定参考光是初相位为零的平面波,每周期内的相移步数为  $N$ ,则记录平面上第  $i$  幅相移干涉图为

$$I_i(x, y) = |A_O(x, y)|^2 + |A_R(x, y)|^2 + A_O(x, y)A_R(x, y)\exp\{j[\varphi_O(x, y) - \varphi_{PSi}]\} + A_O(x, y)A_R(x, y)\exp\{-j[\varphi_O(x, y) - \varphi_{PSi}]\}, \quad (1)$$

其中  $A_O(x, y)$  和  $A_R(x, y)$  分别是物光波和参考光波的振幅,均为非负实函数; $\varphi_O(x, y)$  是待测量相位,定态测量时不随时间变化。而  $\varphi_{PSi}$  是第  $i$  幅相移干涉图相对第一幅干涉图的相移量,表示为

$$\varphi_{PSi} = \frac{2\pi}{N}i, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, M-1) \quad (2)$$

(1)式可以看作是以理想平面波为参考光波的同轴全息图,根据全息再现原理,用与(1)式中每一幅相移干涉图记录时对应的单位振幅相移参考光与之相乘后相加得到

$$\sum_{i=0}^{M-1} I_i(x, y)\exp\left(j\frac{2\pi}{N}i\right) = [|A_O(x, y)|^2 + |A_R(x, y)|^2] \sum_{i=0}^{M-1} \exp\left(j\frac{2\pi}{N}i\right) + MA_O(x, y)A_R(x, y)\exp[j\varphi_O(x, y)] + A_O(x, y)A_R(x, y)\exp[-j\varphi_O(x, y)] \sum_{i=0}^{M-1} \exp\left(2j\frac{2\pi}{N}i\right), \quad (3)$$

(3)式左边是从实际采集的相移干涉图得到的已知量,当(3)式等号右边的第一和第三项为零时,由第二项可以直接计算出待测量相位。根据对相移步长的假设和复变函数的周期性,第一和第三项为零的充分条件是相移步数  $M$  是每周期内相移步数  $N$  的正整数倍,在实际应用中一般取  $M = N$ ,称为  $N$  步整周期相移算法,这时(3)式变为

$$\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y)\exp\left(j\frac{2\pi}{N}i\right) = NA_O(x, y)A_R(x, y)\exp[j\varphi_O(x, y)], \quad (4)$$

(4)式等号右边表示等式左边算法的意义:

1)  $N$  步整周期相移算法是一种复振幅分离与测量方法,与用单幅全息图从空域进行复振幅分离方法的不同是,这是一种时域分离方法,分离的结果是使不随时间变化的成分[(1)式中与  $i$  无关的第一项和第二项]以及有待测量相位共轭的部分[(1)式中

的第四项]完全被“滤除”掉,只留下含待测量相位的物光波部分,因此,相移相位测量方法也可以理解为一种利用时域信号实现的空间滤波方法;

2) 算法所得到的结果是使记录到的有相位差含物光波部分的复振幅,变为没有相位差的物光波同步叠加,同步叠加的结果是待测量相位得到保留,

其信号幅度增强为单幅相移干涉图的  $N$  倍,使得随时间变化的随机噪声得到抑制。为方便起见,把(4)式算法的结果称为  $N$  步整周期相移再现物光波复振幅同步叠加函数,简称为  $N$  步相移函数,即

$$A_{\text{NSPS}}(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} i\right), \quad (5)$$

从(4)式和(5)式,注意到  $I_i(x, y)$  是正实函数,得到与熟知的  $N$  步相移算法相同的结果

$$\tan[\varphi_0(x, y)] = \frac{\text{Im}[A_{\text{NSPS}}(x, y)]}{\text{Re}[A_{\text{NSPS}}(x, y)]} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \sin\left(j \frac{2\pi}{N} i\right)}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \cos\left(j \frac{2\pi}{N} i\right)}, \quad (6)$$

可见,  $N$  步整周期相移算法得到的相位测量结果,就是最小二乘方法的最佳期望结果。

### 3 相移测量的误差因素及 $N+1$ 步整周期相移算法

以上分析是在理想条件下进行的,实际情况下误差因素的影响是不可避免的。在双光束干涉的情况下,对所采集的干涉条纹图,误差因素的影响往往可以归结为相干因素的振幅影响和相位影响及非相干因素的功率影响两类。例如,相移误差、空气流动和温度变化、振动等因素主要是对相位产生影响;激光器输出起伏等因素主要对参与干涉的光束的振幅产生影响;而图像传感器非线性、采样及模-数转换精度限制、电子噪声等对干涉条纹不产生影响,主要是在图像采集过程中对采集结果产生影响。为了讨论这些误差因素对测量的影响,把实际的相移干涉图由(1)式修改为下面的关系:

$$\begin{aligned} I_i(x, y) &= [A_0(x, y) + \Delta A_{0i}(x, y)]^2 + [A_R(x, y) + \Delta A_{Ri}(x, y)]^2 + \Delta n_i(x, y) + \\ & [A_0(x, y) + \Delta A_{0i}(x, y)][A_R(x, y) + \Delta A_{Ri}(x, y)] \exp\{j[\varphi_0(x, y) - \varphi_{\text{PS}i} - \Delta\varphi_i(x, y)]\} + \\ & [A_0(x, y) + \Delta A_{0i}(x, y)][A_R(x, y) + \Delta A_{Ri}(x, y)] \exp\{-j[\varphi_0(x, y) - \varphi_{\text{PS}i} - \Delta\varphi_i(x, y)]\} = \\ & \tilde{A}_{0i}^2(x, y) + \tilde{A}_{Ri}^2(x, y) + \Delta n_i(x, y) + \tilde{A}_{0i}(x, y) \tilde{A}_{Ri}(x, y) \exp\{j[\varphi_0(x, y) - \varphi_{\text{PS}i} - \Delta\varphi_i(x, y)]\} + \\ & \tilde{A}_{0i}(x, y) \tilde{A}_{Ri}(x, y) \exp\{-j[\varphi_0(x, y) - \varphi_{\text{PS}i} - \Delta\varphi_i(x, y)]\}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $\Delta A_{0i}(x, y)$ 、 $\Delta A_{Ri}(x, y)$ 、 $\Delta\varphi_i(x, y)$  均为实函数,分别是物光振幅、参考光振幅和综合相位的偏差; $\Delta n_i(x, y)$  是非相干因素对图像强度的影响,为非负实函数。将(7)式代入(5)式可以得到存在误差因素影响时的  $N$  步相移函数,为了比较它与(4)式的差别,进而得到对相位测量结果的影响,需要先讨论  $N+1$  步整周期相移算法及意义。

根据前面对整周期相移相位测量方法的说明,对干涉场进行  $N$  步整周期 + 1 步相移,即从相移量  $\varphi_{\text{PS}0} = 0$  开始,以  $2\pi/N$  为相移步长,相移至  $\varphi_{\text{PS}N} = 2\pi$ ,共采集  $N+1$  幅相移干涉图,则第 1 至第  $N$  幅干涉图组成第一组整周期相移干涉图,第 2 至第  $N+1$  幅干涉图组成第二组整周期相移干涉图。注意到理想条件下第 1 幅相移干涉图与第  $N+1$  幅相移干涉图的相位差为  $2\pi$ ,用逆向计算从第二组整周期相移干涉图来求第  $N+1$  幅相移干涉图的相位,可以得到逆向  $N$  步相移函数

$$\begin{aligned} A_{\text{NSPS}}^{-}(x, y) &= \sum_{k=0}^{N-1} I_k(x, y) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} k\right) = \\ & \sum_{i=1}^N I_i(x, y) \exp\left[j\left(2\pi - \frac{2\pi}{N} i\right)\right], \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $k$  与  $i$  的关系是  $k = N - i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。在没有

误差的情况下,上式与(4)式得到的结果是相同的。

当相移过程中存在误差时,正向与逆向计算中的振幅和强度误差之间的关系为

$$\begin{cases} \Delta A_{0i}(x, y) = \Delta A_{0(N-k)}(x, y), \\ \Delta A_{Ri}(x, y) = \Delta A_{R(N-k)}(x, y), \\ \Delta n_i(x, y) = \Delta n_{(N-k)}(x, y), \end{cases} \quad (9)$$

而二者相位变化之间关系为

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{PS}i} + \Delta\varphi_i(x, y) &= 2\pi - [\varphi_{\text{PS}(N-k)} + \Delta\varphi_{(N-k)}(x, y)] = \\ & \varphi_{\text{PS}i} - \Delta\varphi_{(N-k)}(x, y), \end{aligned} \quad (10)$$

把(5)式与(8)式相加求平均,得到平均  $N$  步相移函数,即  $N+1$  步相移函数的算法

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\text{NSPS}}(x, y) &= \frac{1}{2} [I_0(x, y) + I_N(x, y)] + \\ & \sum_{i=1}^{N-1} I_i(x, y) \exp\left(j \frac{2\pi}{N} i\right), \end{aligned} \quad (11)$$

与(4)式类似,  $N+1$  步相移函数的意义可以表示为

$$\bar{A}_{\text{NSPS}}(x, y) \approx N A_0(x, y) A_R(x, y) \exp[j\tilde{\varphi}_0(x, y)], \quad (12)$$

表示含有误差的  $N$  步相移函数,近似等号表示实际振幅与(12)式存在微小区别,  $\tilde{\varphi}_0(x, y)$  是用实际相移干涉图计算出的含有误差的测量相位。下面分析其可能存在的最大误差。

#### 4 $N$ 步整周期相移算法的误差估计

为了分析  $N$  步相移算法的误差,把(7)式、(9)式和(10)式代入(11)式,并用第 1 幅相移干涉图替代第  $N+1$  幅相移干涉图,得到

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\text{NSPS}}(x, y) = & \sum_{i=0}^{N-1} [\tilde{A}_{\text{O}_i}^2(x, y) + \tilde{A}_{\text{R}_i}^2(x, y) + \Delta n_i(x, y)] \exp\left(j \frac{2\pi i}{N}\right) + \\ & \frac{\exp[j\varphi_0(x, y)]}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{A}_{\text{O}_i}(x, y) \tilde{A}_{\text{R}_i}(x, y) \{ \exp[j\Delta\varphi_i(x, y)] + \exp[-j\Delta\varphi_i(x, y)] \} + \\ & \frac{\exp[-j\varphi_0(x, y)]}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \tilde{A}_{\text{O}_i}(x, y) \tilde{A}_{\text{R}_i}(x, y) \exp\left(j 2 \frac{2\pi i}{N}\right) \{ \exp[j\Delta\varphi_i(x, y)] + \exp[-j\Delta\varphi_i(x, y)] \}, \quad (13) \end{aligned}$$

把(13)式中的各量展开化简,其间利用了欧拉公式和余弦函数展开公式,并略去高次小量,得到

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\text{NSPS}}(x, y) \approx & A_{\text{O}}(x, y) A_{\text{R}}(x, y) \times \\ & \left\{ N \exp[j\varphi_0(x, y)] + \frac{\exp[j\varphi_0(x, y)]}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \left[ 2 \frac{\Delta A_{\text{O}_i}(x, y)}{A_{\text{O}}(x, y)} + 2 \frac{\Delta A_{\text{R}_i}(x, y)}{A_{\text{R}}(x, y)} - \Delta\varphi_i^2(x, y) \right] + \right. \\ & \sum_{i=0}^{N-1} \left[ 2 \frac{\Delta A_{\text{O}_i}(x, y)}{A_{\text{R}}(x, y)} + 2 \frac{\Delta A_{\text{R}_i}(x, y)}{A_{\text{O}}(x, y)} + \frac{\Delta n_i(x, y)}{A_{\text{O}}(x, y) A_{\text{R}}(x, y)} \right] \exp\left(j \frac{2\pi i}{N}\right) + \\ & \left. \frac{\exp[-j\varphi_0(x, y)]}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \left[ 2 \frac{\Delta A_{\text{O}_i}(x, y)}{A_{\text{O}}(x, y)} + 2 \frac{\Delta A_{\text{R}_i}(x, y)}{A_{\text{R}}(x, y)} - \Delta\varphi_i^2(x, y) \right] \exp\left(j 2 \frac{2\pi i}{N}\right) \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

(14)式等号右边第 1 项是(4)式所表示的理想  $N$  步相移函数,第 2 项至第 4 项是相对理想  $N$  步相移函数的误差函数,其中,第 2 项是与理想  $N$  步相移函数相位相同的同步误差,第 3 项是背景误差因素带来的背景误差,第 4 项是与待测相位的共轭有关的共轭误差。由于(14)式是复变函数,它所产生的误差函数与理想  $N$  步相移函数的相位误差,主要由全部误差函数之和的模大小及其与待测相位的相角差决定。可见,利用  $N+1$  步相移函数的算法,可以把  $N$  步相移函数算法中的相位误差转化为与振幅和强度型误差等同的形式,方便了对相位测量误差的进一步分析。

(14)式是一个复杂的函数,由它准确计算各种误差因素对测量结果的影响是很困难的,从中只能粗略分析各误差因素对误差振幅影响的权重,例如:1) 当各误差因素足够小时,同步误差对相位测量误差的影响可以忽略,因此相位测量误差主要由背景误差和共轭误差引起;2) 当各误差因素的大小相同时,干涉光振幅相对变化是影响误差振幅大小的主要因素,相位误差的精度控制比振幅相对误差的精度控制要求小得多;3) 参考光与物光的比例为 1:1 时,干涉光振幅相对变化引起的误差最小,等等。

光学相位测量是在二维情况下进行的,所采集的条纹图数量不可能很多,加之相位表达函数的周期性和非线性,误差的分布特性不一定是正态的,因此需要根据相位测量的特点研究新的误差估计方法。从测量的误差分析方面考虑,获得最大测量误

差估计具有重要的实际意义。为了估计最大相位误差,需要先估计误差函数的最大模和与待测相位的相角差。当各误差因素足够小时,同步误差对相位测量误差的影响可以忽略,在背景误差和共轭误差中以误差因素绝对值最大者替代各误差因素的大小,那么全部误差函数之和的模应小于所有模的绝对值的和,其产生最大相位测量误差时的相位角与待测相位的相角差约为  $\pi/2$ ,因此在可能产生最大相位测量误差的情况下,(14)式可以简化为

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\text{NSPS}}(x, y) \approx & N A_{\text{O}}(x, y) A_{\text{R}}(x, y) \times \\ & \{ \exp[j\varphi_0(x, y)] + 7.5 \Delta_{\text{max}} \exp[j\varphi_0(x, y) + j\pi/2] \}, \quad (15) \end{aligned}$$

$\Delta_{\text{max}}$  代表(14)式等号右边误差因素中绝对值最大者。依据图 1 所示的(15)式的矢量叠加意义,  $N$  步整

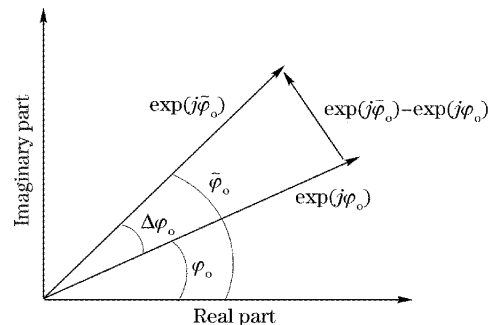


图 1  $N$  步相移函数、理想  $N$  步相移函数与它们之间误差的关系

Fig. 1 Relationship of  $N$ -step phase-shifting function, ideal  $N$ -step phase-shifting function and their phase errors

周期相移测量的最大测量误差为

$$\Delta\varphi_{\text{Omax}}(x, y) = \tilde{\varphi}_0(x, y) - \varphi_0(x, y) < 7.5\Delta_{\text{max}}. \quad (16)$$

只要知道了产生误差最大的因素,从(16)式可以很容易估计最大相位误差和其它误差因素的控制精度。例如以平均输出功率为  $I_0$ 、输出稳定性 3% 的激光器为最大误差控制目标,可以达到的相位测量精度为  $2\pi/56$ ,这时最大相移误差需要控制在  $10^\circ$  以内,其它误差因素的总噪声功率需要控制在  $0.0075I_0$  以内。

## 5 结 论

用光学全息的原理和方法,对  $N$  步整周期相移相位测量算法进行了分析,证明了在理想条件下  $N$  步整周期相移算法是一种复振幅分离、测量和物光波复振幅函数同步叠加方法,给出了  $N$  步整周期相移再现物光波复振幅同步叠加函数( $N$  步相移函数)。而在存在误差的情况下,由此得到的相位测量结果,就是最小二乘方法的最佳期望结果,虽然分析的结果与已有的结果是相同的(理应是相同的),但这样的分析过程更具有物理性。利用  $N$  步相移函数得到了  $N+1$  步相移函数,提出了一种  $N$  步相移算法的误差分析方法,利用复数求和的矢量叠加性,给出了  $N$  步相移算法最大误差的估计方法和公式。

## 参 考 文 献

- 1 R. Crane. Interference phase measurement[J]. *Appl. Opt.*, 1969, **8**(3): 538~542
- 2 B. N. Saif, J. Millerd, R. Keski-Kuha *et al.*. Instantaneous phase-shifted speckle interferometer for measurement of large optical structures[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5494**: 152~162
- 3 L. Joannes, F. Dubios, J. C. Legros. Phase-shifting schlieren; high-resolution quantitative schlieren that uses the phase-shifting technique principle[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(25): 5046~5053
- 4 Lü Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting in-line lensless Fourier digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1511~1515 (in Chinese)
- 5 吕晓旭,张以谟,钟丽云等. 相移同轴无透镜傅里叶数字全息的分析与实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1511~1515
- 5 J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*. Digital wavefront measuring interferometry; some systematic error sources[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 6 K. Kinnstaetter, A. W. Lohmann, J. Schwider *et al.*. Accuracy of phase shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(24): 5082~5089
- 7 B. Gutmann, H. Weber. Phase-shifter calibration and error detection in phase-shifting applications; a new method[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(32): 7624~7631
- 8 K. G. Larkin, B. F. Oreb. Design and assessment of symmetrical phase-shifting algorithms[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, **9**(10): 1740~1748
- 9 P. J. Groot, L. L. Deck. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2172~2178
- 10 J. Schmit, K. Creath. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3610~3619
- 11 Luo Yinlong, Lü Xiaoxu, Zhu Yue *et al.*. A real-time high accuracy phase-shifting calibrating method based on one-dimensional spatial digital correlation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **24**(5): 1117~1122 (in Chinese)
- 12 罗印龙,吕晓旭,朱越等. 基于一维空间数字相关的实时相移标定方法[J]. *中国激光*, 2005, **24**(5): 1117~1122
- 12 Wang Liwu, Su xianyu, Zhou Libing. Correction algorithm of random phase shifting error in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 614~618 (in Chinese)
- 王立无,苏显渝,周利兵. 相位测量轮廓术中随机相移误差的校正算法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 614~618