

双步相移光栅投影测量轮廓术

郑东亮 达飞鹏

(东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要 双三步相移算法证明可以较大地减少数字光栅投影测量轮廓术的测量误差, 基于理论分析与实验验证, 针对常用的四步、五步相移算法, 提出了相应的双四步、双五步相移算法。通过两次传统相移算法得到两幅主值相位图, 直接融合两幅主值相位图即可获得测量所需的相位信息, 与已有的针对两幅展开相位进行相位融合方法相比, 此方法实现简单且更加有效。相较于双三步相移算法, 双四步和双五步相移算法实现简单且能够极大地减少测量误差, 仅需通过投影 2 倍数目传统相移算法所需的投影光栅, 且可保持常用三步、四步及五步相移算法固有的优点。

关键词 测量; 双步相移算法; 光栅投影; 测量误差

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0512004

Double-Step Phase-Shifting Algorithm for Fringe-Projection Measurement

Zheng Dongliang Da Feipeng

(School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Double three-step phase shifting algorithm (PSA) works well in reducing the measurement error for a digital fringe projection profilometric system. Based on theoretical analysis and experiments, double four-step PSA and double five-step PSA are proposed. In addition, a new method to average two obtained phase maps and to generate the correct phase map is presented, which is simple and effective for double-step PSA. Experiment verifies the correctness of double four-step PSA and double five-step PSA which can reduce much more measurement error than double three-step PSA in the practical applications. The advantages of three-step, four-step and five-step PSA are kept through projecting double the number of fringe patterns which are needed for traditional phase shifting algorithm.

Key words measurement; double-step phase-shifting algorithm; fringe projection; measurement error

OCIS codes 120.5050; 120.6650; 100.2650; 100.5070

1 引 言

光栅投影测量方法, 又称为光栅投影测量轮廓术(FPP)^[1~7], 具有非接触、低成本和高精度等优点, 广泛应用于光学三维测量领域。相移算法(PSA)是一种常用的数字光栅投影测量方法^[8~10], 已知测量系统中主要的数字投影仪(DVP)和 CCD 相机均被设计成非线性设备。已设计好的具有正弦分布的光栅条纹图由 DVP 投影, 会受到被测物体

表面调制以及环境光强诸多因素影响, CCD 相机对应采集到的光栅条纹图不具有良好的正弦性^[11]。该非正弦性会向相移算法获得的相位信息引入误差。通过投影多幅投影光栅条纹图, 采用多步相移算法可以削弱甚至消除该测量误差, 但是对于常用的三步、四步和五步相移算法而言, 由这种非线性响应引起的测量误差是数字光栅投影测量系统的主要误差来源。三步相移算法仅需要投影三幅光栅图

收稿日期: 2011-10-25; 收到修改稿日期: 2012-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51175081, 61107001)、江苏省自然科学基金(BK2010058)、江苏省研究生创新基金(CXZZ_0156)和东南大学优秀博士论文基金资助课题。

作者简介: 郑东亮(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事三维测量和智能计算等方面的研究。E-mail: zdlseu@gmail.com

导师简介: 达飞鹏(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事三维测量和三维人脸识别等方面的研究。

E-mail: dafp@seu.edu.cn(通信联系人)

像,实现简单;四步相移算法中光栅图像相减的运算,可以消除拍摄获取光栅图像中存在的固定噪声对测量影响^[12];而特定五步相移算法对相移设备产生的相移误差免疫^[13]。因此,不能简单地以多步相移算法代替常用的三步、四步和五步相移算法。

很多学者对该非线性响应产生的相位误差进行研究,提出了可以削弱甚至消除该误差的相位补偿或相位校正方法^[14~19]。Huang^[11]提出一种双三步相移算法可以明显地削弱该相位误差,通过投影两组6幅正弦光栅条纹图,两组条纹图之间的初始相位设计为相差 60° ,两次执行三步相移算法获得两幅主值相位图,主值相位图展开后获得展开相位图,融合所得两幅展开相位图,即可获得测量所需相位信息。理想的主值相位图可由二十步相移算法获得^[18],实验验证三步相移算法相位误差近似符合周期性的标准正弦分布,这也是双步相移算法的基础。两次运用三步相移算法获得的相位信息对应的相位误差刚好具有相反的正弦分布规律,融合两组相位信息可以明显削弱相位误差。双三步相移算法表现良好,能获得高质量的相位信息,但双三步相移算法采用的融合两组相位信息的方法,实现过程过于复杂不利于实际测量。

文献^[14]给出了常用的三步、四步和五步相移算法对应相位误差的数学模型,与实验结果一致。有趣的是,四步与五步相移算法对应的相位误差规律与三步相移算法相位误差规律类似,因此,本文提出双四步和双五步相移算法。由于相位误差正弦分布周期长度与相移算法的相移步数相关联,对于双四步相移算法,两组正弦条纹图之间的初始相位差

设计为 45° ,双五步相移算法初始相位差设计为 36° 。双四步和双五步相移算法能够更大地减少测量误差,且能较好用于实际测量。另外,传统的相移算法获得主值相位是包裹相位,不能通过直接融合两幅主值相位图获取最终所需的相位信息,需要进行相位展开获得展开相位图,然后进行相位融合。实际测量过程中,主值相位图通常会存在噪声或者不连续现象,导致展开相位产生误差^[20]。两幅展开相位图中微小的误差会给最终获取的相位信息带来较大的误差,而且需要对两幅主值相位图进行相位展开,常用的相位展开方法往往较复杂,进而增加运算时间。因此,本文提出一种直接融合两幅主值相位图的相位信息融合方法,仅需对一幅主值相位图进行相位展开,实验结果证明了该方法的有效性。

2 双步相移算法

数字光栅投影测量系统的非线性响应可以由一个非线性函数来描述,CCD相机拍摄获取的光栅条纹图 $I_i^c(x,y)$ 可表示为

$$I_i^c = f[I_i(x,y)], \quad (1)$$

针对 N 步相移算法,式(1)中的 $I_i(x,y)$ 代表 N 幅序列投影正弦光栅条纹图中的第 i 幅, $I_i(x,y)$ 可表示为^[18]

$$I_i(x,y) = I_b(x,y) + I_m(x,y)\cos[\phi(x,y) + \delta_i], \quad (2)$$

式中 $I_b(x,y)$ 为背景光强, $I_m(x,y)$ 为调制幅度, $\delta_i = 2\pi i/N$ 为序列投影正弦光栅条纹的初始相位, $\phi(x,y)$ 为理想相位信息,可表示为^[14]

$$\phi(x,y) = -\arctan\left[\frac{\sum_{i=0}^{N-1} I_i^c(x,y)\sin\delta_i}{\sum_{i=0}^{N-1} I_i^c(x,y)\cos\delta_i}\right]. \quad (3)$$

CCD相机拍摄的非正弦性光栅条纹图 $I_i^c(x,y)$ 可由五阶傅里叶级数表示为

$$I_i^c = f[I_i(x,y)] \approx a_0 + \sum_{k=1}^5 a_k \cos\{k[\phi(x,y) + \delta_i]\}. \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式,实际相位信息 $\phi'(x,y)$ 可表示为

$$\phi'(x,y) = -\arctan\left\{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \left\{a_0 + \sum_{k=1}^5 a_k \cos\{k[\phi(x,y) + \delta_i]\}\right\} \sin\delta_i}{\sum_{i=0}^{N-1} \left\{a_0 + \sum_{k=1}^5 a_k \cos\{k[\phi(x,y) + \delta_i]\}\right\} \cos\delta_i}\right\}. \quad (5)$$

根据三角函数公式

$$\tan\Delta\phi(x,y) = \tan[\phi'(x,y) - \phi(x,y)] = \frac{\tan\phi'(x,y) - \tan\phi(x,y)}{1 + \tan\phi'(x,y)\tan\phi(x,y)}. \quad (6)$$

则相位误差相位函数 $\Delta\phi(x,y)$ 为

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\tan\phi'(x, y) - \tan\phi(x, y)}{1 + \tan\phi'(x, y)\tan\phi(x, y)}\right]. \quad (7)$$

根据(5)式和(7)式,常用的三步相移算法对应的相位误差函数可以近似表示为

$$\Delta\phi(x, y) \approx -c_1 \sin[3\phi(x, y)], \quad (8)$$

式中的 c_1 为一个常数。对于传统的四步和五步相移算法而言,相对应的相位误差函数可以近似表示为

$$\Delta\phi(x, y) \approx -c_2 \sin[4\phi(x, y)], \quad (9)$$

$$\Delta\phi(x, y) \approx -c_3 \sin[5\phi(x, y)], \quad (10)$$

其中 c_2 和 c_3 也是常数。与三步相移算法类似,常用的四步和五步相移算法对应的相位误差也近似符合正弦分布规律,正弦分布的周期且与相移算法的步数以及理想相位分布相关联。已知改变用于相移算法的序列投影正弦光栅条纹的初始相位,理想的相位分布也会随之改变,进而相位误差分布规律发生改变。在 N 幅序列投影正弦光栅条纹图中,如果引入额外的初始相位 ϑ ,设计好的正弦光栅条纹图则可描述为

$$I_i(x, y) = I_b(x, y) + I_m(x, y)\cos\{[\phi(x, y) + \vartheta] + \delta_i\}, \quad (11)$$

上述形式的投影光栅条纹图对应的理想相位分布变为 $[\phi(x, y) + \vartheta]$,根据 CCD 相机采集到的光栅条纹图像,利用(5)式,即可获得 N 步相移算法的实际主值相位分布。则对于传统的四步相移算法,相位误差可以近似表示为

$$\Delta\phi'(x, y) \approx -c_2 \sin\{4[\phi(x, y) + \vartheta]\} = -c_2 \sin[4\phi(x, y) + 4\vartheta], \quad (12)$$

当 $\vartheta=0$ 时,即投影光栅条纹图未引入额外的初始相位,采用传统四步相移算法获取的实际相位分布对应的相位误差为 $\Delta\phi(x, y)$,此时实际主值相位分布可表示为

$$\phi'_1(x, y) = \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y). \quad (13)$$

当 $\vartheta=\pi/4$ 时,相位误差变为

$$\Delta\phi'(x, y) \approx -c_2 \sin[4\phi(x, y) + 4 \times \pi/4] = c_2 \sin[4\phi(x, y)] = -\Delta\phi(x, y). \quad (14)$$

则此时实际主值相位分布可以由两种形式表示:

$$\phi'_2(x, y) = \phi(x, y) + \vartheta - \Delta\phi(x, y), \quad (15)$$

$$\phi'_2(x, y) = \phi(x, y) + \vartheta - \Delta\phi(x, y) - 2\pi. \quad (16)$$

如图 1 所示,蓝线(彩图请见网络电子版)代表实际相位 $\phi'_1(x, y)$ 的一行分布规律,主值相位被包裹到 $[-\pi, \pi]$ 范围内。引入 $\vartheta=\pi/4$ 后,获取的实际相位 $\phi'_2(x, y)$ 的同一行相位分布由图 1 中红线描述,

相较于 $\phi'_1(x, y), \phi'_2(x, y)$ 在 x 轴方向上有一个明显的相移。以在 x 轴方向上从 A 到 C 为一个相位周期为例,从 A 到 B, $\phi'_2(x, y)$ 可由(15)式表示,在 B 到 C 之间, $\phi'_2(x, y)$ 可由(16)式表示。

额外引入的初始相位 ϑ 是一个已知的常数,基于上述理论分析以及(13)、(15)和(16)式,通过融合两组实际相位信息 $\phi'_1(x, y)$ 和 $\phi'_2(x, y)$,可以削弱或去除常用的三步、四步和五步相移算法对应的相位误差,以得到理想的正确相位分布 $\phi(x, y)$,上述即为双四步相移算法的基本思想。显然,对于双三步和双五步相移算法而言,额外引入的初始相位分别设置为 $\vartheta=\pi/3$ 和 $\vartheta=\pi/5$ 。

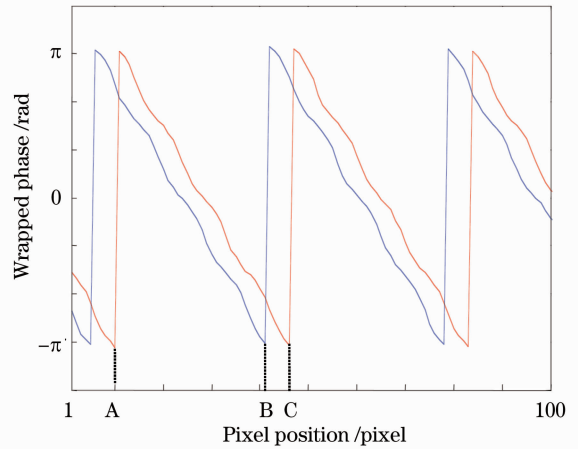


图 1 两次运用传统四步相移算法获得的主值相位分布

Fig. 1 Wrapped phases obtained by twice running the standard four-step PSA

3 相位融合方法

传统的双三步相移算法相位融合方法首先需要展开两幅主值相位图,得到两幅展开相位图,然后融合两幅展开相位图获取用于测量的相位图。基于本文提出的双四步相移算法,传统的相位融合方法描述如下。额外的初始相位 $\vartheta=\pi/4$,并根据(2)式和(1)式设计两组 8 幅理想的正弦光栅条纹图,投影到理想的参考平面,两次运用四步相移算法(5)式获取两幅主值相位图,采用相位展开方法展开后即可获得两幅展开相位图。图 2 为取展开相位图中间一行进行对比分析, x 轴表示展开相位图中的像素位置, y 轴表示展开相位图的相位值,单位为弧度(rad)。图 2 中绿线及红线(彩图请见网络电子版)分别描述两次运用四步相移算法获取的两幅展开相位分布情况。蓝线表示理想相位信息,在本文实验中,它是采用二十步相移算法获取得到。明显看出,通过融合

上述两组展开相位信息,可以获得接近理想相位的相位信息,常用四步相移算法获取的相位

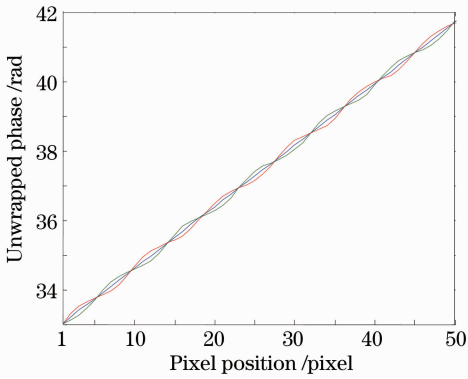


图2 展开相位图中的一行相位分布

Fig. 2 Unwrapped phase distributions for one row in the center of the unwrapped phase maps

信息存在的周期性相位误差得到削弱甚至消除。

传统的相位融合方法的有效性取决于能否准确的展开主值相位,但在实际测量过程中,主值相位图通常会存在噪声或者不连续现象,使相位展开变得困难,导致最终展开相位存在误差。两幅展开相位图中局部微小误差会给最终融合得到的相位信息带来较大误差。而且需要对两幅主值相位图进行相位展开,常用的相位展开方法往往较复杂,这样也会相应增加运算时间。本文提出一种直接融合两幅主值相位图的相位信息融合方法,仅需对融合获取得到的一幅主值相位图进行相位展开。实验证明该方法易于实现,且能高效地用于双步相移算法。根据两组主值相位信息 $\phi'_1(x, y)$ 和 $\phi'_2(x, y)$ 之间的关系,如(13)、(15)、(16)式和图1所示,给出直接融合两组主值相位信息的方法,即

$$\phi(x, y) = \begin{cases} [\phi'_2(x, y) + \phi'_1(x, y) - \partial]/2, & \phi'_2(x, y) - \phi'_1(x, y) > 0 \\ [\phi'_2(x, y) + \phi'_1(x, y) + 2\pi - \partial]/2, & \phi'_2(x, y) - \phi'_1(x, y) < 0 \end{cases} \quad (17)$$

由主值相位信息 $\phi'_1(x, y)$ 和 $\phi'_2(x, y)$ 大小关系,即可得到正确的主值相位信息。然后对正确主值相位信息进行相位展开,避免了相位融合过程给最终的展开相位带来误差,可以得到能准确用于测量的相位信息。

4 实 验

双步相移算法光栅投影测量方法通过两次进行传统相移算法,投影2倍数目的正弦光栅条纹图,不需要对存在误差的相位信息进行补偿或校正操作,即可获得较高的精度。本文基于实验室构建的数字光栅投影测量系统,验证了双三步、双四步和双五步相移算法的有效性。系统包括 CCD 相机 C 型号为 UNIQ UP1800,投影仪(型号为 Optoma EP737)以及相应的图像采集卡和计算机。相机与投影仪均控制在合理的范围内,相机距离投影仪约为 20 cm,距离待测物体约为 90 cm。图 3(a)为一幅设计周期为 32 像素正弦投影光栅,投影到参考平面上,CCD 相机拍摄获取对应的光栅图像如图 3(b)所示。

根据前文所述方法得到双三步、双四步和双五步相移算法对应的相位信息,然后将其与理想相位信息相减获得双步相移算法的相位误差,其中理想相位信息由二十步相移算法求得。取相位误差图中间区域 $101 \text{ pixel} \times 101 \text{ pixel}$ 范围内进行误差分析,将该区域内 101 行相位误差取平均值,表 1 给出了

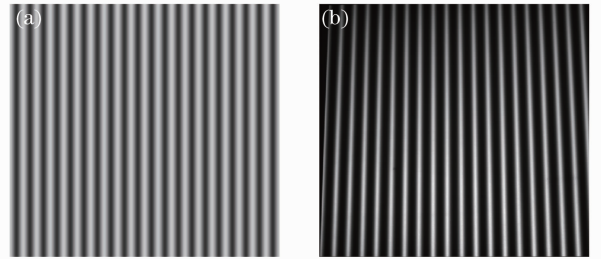


图3 标准正弦投影栅图与对应的正弦光栅图的比较。
(a)一幅设计的标准正弦投影光栅图;(b)拍摄得到对应的正弦光栅图

Fig. 3 Compariser between a computer-generated ideal sinusoidal fringe and its corresponding captured sinusoidal fringe. (a) Computer-generated ideal sinusoidal fringe; (b) corresponding captured sinusoidal fringe

相位的最大误差值以及均方根(RMS)误差值,图4中蓝线代表三步相移算法相位误差,红线表示双三步相移算法相位误差,图5和图6分别对应四步相移算法以及五步相移算法(彩图请见网络电子版)。由图可知,常用的三步、四步和五步相移算法相位误差近似符合正弦分布规律,且正弦分布周期与相移步数有关,符合前文理论分析。相较于常用相移算法,双步相移算法可以明显减少相位误差。由表1可知,双四步和双五步相移算法相位误差的均方根误差值分别可以减少到 0.0055764 和 0.0016445,比双三步相移算法能够减少更多的相位误差,甚至

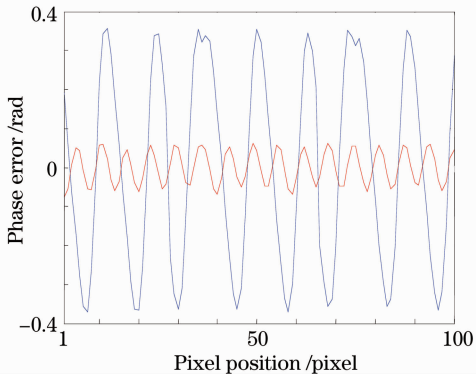


图 4 三步相移算法与双三步相移算法相位误差对比图

Fig. 4 Average phase error of three-step PSA and double three-step PSA

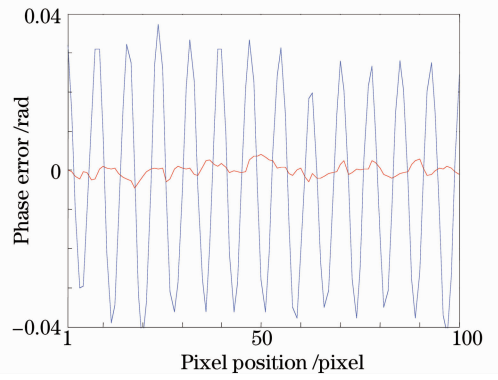


图 6 五步相移算法与双五步相移算法相位误差对比图

Fig. 6 Average phase error of five-step PSA and double five-step PSA

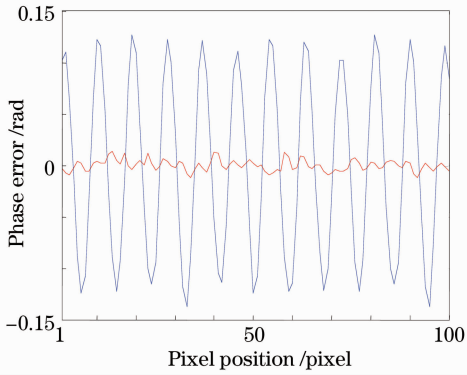


图 5 四步相移算法与双四步相移算法相位误差对比图

Fig. 5 Average phase error of four-step PSA and double four-step PSA

表 1 相位误差中的 101 行平均相位误差值

Table 1 Average phase error for the 101 rows

	Largest error	RMS error
3-step(double 3-step)	0.3697(0.075)	0.25862(0.04252)
4-step(double 4-step)	0.1375(0.0132)	0.087725(0.0055764)
5-step(double 5-step)	0.0441(0.0046)	0.024803(0.0016445)

可以基本去除相位误差。

基于实验室用于测量的塑料制护板,对比传统相移算法及其相应的双步相移算法测量效果。通过将放置物体后获取的相位信息与未放置物体获取的参考相位信息相减,得到塑料制护板相位分布图。图 7 为三步相移算法及双三步相移算法得到的测量相位分布图,图 8 和图 9 分别对应四步和五步相移算法得到的相位分布图。可以看出,传统相移算法获取的相位图中含有较明显的皱褶和周期性的纹路,与相移算法周期性相位误差分布相一致。尤其是图 7(a)所对应的三步相移算法的相位分布图粗糙,且出现明显的皱褶,图 7(b)对应的双三步相移算法相位分布图中依然存在一些呈现细小的周期性分布波纹及皱褶。图 8(b)和图 9(b)非常平滑,对应于双四步相移算法和双五步相移算法的测量相位分布图,几乎没有了明显的皱褶和波纹。可见在实际测量中,双四步和双五步相移算法可以得到相较于双三步相移算法更准确的相位信息,提高了测量精度。

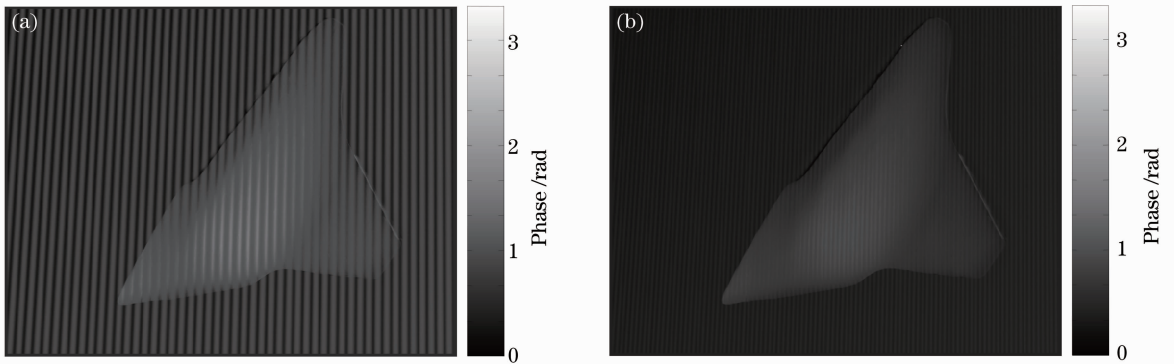


图 7 塑料制护板相位分布图。(a)三步相移算法；(b)双三步相移算法

Fig. 7 Phase distribution of a plastic board achieved by three-step PSA (a) and double three-step PSA (b)

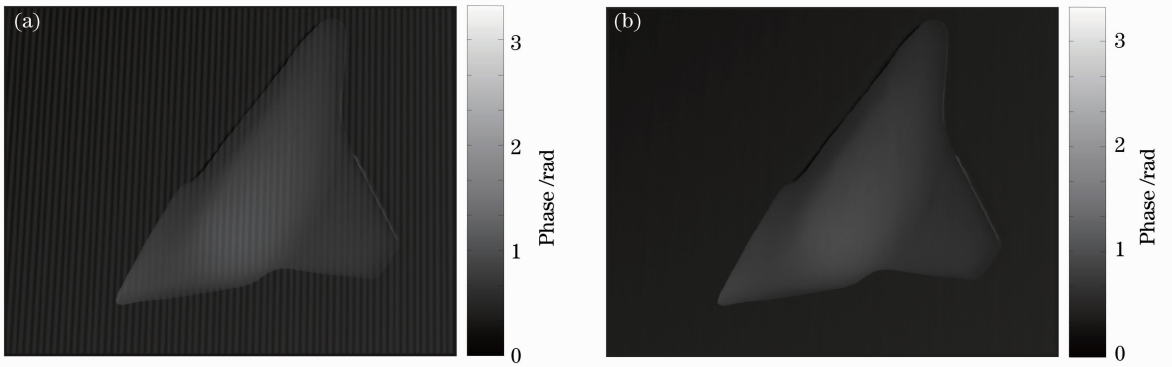


图 8 塑料制护板相位分布图。(a)四步相移算法;(b)双四步相移算法

Fig. 8 Phase distribution of a plastic board achieved by four-step PSA (a) and double four-step PSA (b) (in radians)

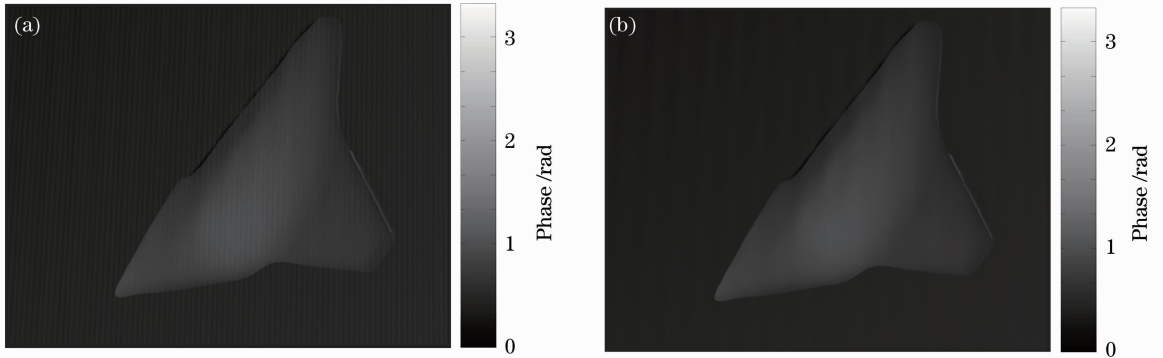


图 9 塑料制护板相位分布图。(a)五步相移算法;(b)双五步相移算法

Fig. 9 Phase distribution of a plastic board achieved by five-step PSA (a) and double five-step PSA (b) (in radians)

5 结 论

基于对常用三步、四步和五步相移算法的测量相位误差分布规律的分析,通过理论分析与实验验证,提出了双四步和双五步相移算法。设置初始相位差为 45° ,两次执行传统四步相移算法,融合两组主值相位信息削弱相位误差,最终得到高精度的相位信息。对于双五步相移算法,初始相位差设置为 36° ,与双三步相移算法的初始相位差 60° 相异。另外,提出一种直接融合两组主值相位信息方法,比双三步相移算法对展开相位信息进行融合更为简单有效。实验结果表明,双四步和双五步相移算法比双三步相移算法能获得更高精度的相位信息。本文主要目的是削弱数字光栅投影测量系统中非线性响应产生的测量误差,多步相移算法虽能较好地解决该问题,但是四步和五步相移算法有其固有的优点,例如四步相移算法具有的抗噪性,五步相移算法对相移机构产生的相移误差的免疫性。本文所提的双四步和双五步相移算法同样需要投影 2 倍于传统相移

算法的相移光栅,但是可以保持四步和五步相移算法的优点。因此可知,双步相移算法是一种有意义的研究思路,且能较好地应用于实际测量。

参 考 文 献

- 1 Sikun Li, Xianyu Su, Wenjing Chen. Spatial carrier fringe pattern phase demodulation by use of a two-dimensional real wavelet [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(36): 6893~6906
- 2 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Generalized Fourier analysis for phase retrieval of fringe pattern [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(26): 26806~26820
- 3 Feipeng Da, Shaoyan Gai. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(3): 377~385
- 4 Zou Haihua, Zhao Hong, Zhou Xiang. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812009
邹海华, 赵宏, 周翔. 基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812009
- 5 Peng Xiang, Qiu Wenjie, Wei Binbin *et al.*. Phase decoding based on temporal-spatial phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 43~48
彭翔, 邱文杰, 韦彬彬等. 相位解码的时-空重建算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 43~48
- 6 Liu Yufeng, Cao Yiping, He Yuhang. An improved algorithm to

- three-unequal step length for PMP [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1): 83~86
- 刘玉凤, 曹益平, 何宇航. 新改进型三步非等步相位测量轮廓术算法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1): 83~86
- 7 Dai Meiling, Yang Fujun, Du Xiaolei *et al.*. Three-dimensional shape measurement based on single-shot color fringe projection of sinusoidal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0712002
- 戴美玲, 杨福俊, 杜晓磊 等. 基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0712002
- 8 Eun-Hee Kim, Joonku Hahn, Hwi Kim *et al.*. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 7818~7830
- 9 Huimin Xie, Haixia Shang, Fulong Dai *et al.*. Phase shifting SEM moiré method [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **36**(4): 291~297
- 10 Shaoyan Gai, Feipeng Da. A novel phase-shifting method based on strip marker [J]. *Opt. & Laser in Engng.*, 2010, **48**(2): 205~211
- 11 Peisen S. Huang, Song Zhang. Fast three-step phase-shifting algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(21): 5086~5091
- 12 James C. Wyant. Phase-Shifting Interferometry [C]. University of Arizona, Optical Sciences Center, 1998
- 13 Jiri Noavk. Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift [J]. *Optik*, 2003, **114**(2): 63~68
- 14 Bing Pan, Qian Kemao, Lei Huang *et al.*. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(4): 416~418
- 15 Liudong Xiong, Shuhai Jia. Phase-error analysis and elimination for nonsinusoidal waveforms in Hilbert transform digital-fringe projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(15): 2363~2365
- 16 Hongwei Guo, Haitao He, Mingyi Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914
- 17 Kai Liu, Yongchang Wang, Daniel L. Lau *et al.*. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2010, **27**(3): 553~562
- 18 Thang Hoang, Bing Pan, Dung Nguyen *et al.*. Generic gamma correction for accuracy enhancement in fringe-projection profilometry [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(12): 1992~1994
- 19 Song Zhang, Shing-Tung Yau. Generic non-sinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 36~43
- 20 Sun Xuezheng, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1947~1951
- 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1947~1951

栏目编辑：何卓铭