

文章编号:1004-4213(2010)06-1137-6

投影条纹相移法中图像饱和误差抑制算法研究*

胡而已¹,李艳²

(1 中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221116)

(2 中石化管道储运公司管道技术作业分公司,江苏 徐州 221008)

摘要:针对投影条纹相移法三维形貌测量中的图像饱和误差进行了深入研究,分析了基于条纹相移技术的图像饱和误差抑制算法的适用范围,推导了基于六步相移的饱和误差抑制算法公式.理论分析表明,相移条纹图的帧数越多,饱和误差抑制算法的适用范围越广.并通过数值模拟和实验进行了验证,基于六步相移的饱和误差抑制算法可以更加有效地抑制图像饱和引起的相位误差.

关键词:应用光学;饱和误差抑制算法;相移法;三维形貌

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103906.1137

0 引言

投影条纹相位法测量物体三维形貌具有抗干扰能力强、测量速度快、全场测量等优点^[1-6].特别随着 LCD 液晶投影技术的飞速发展,采用白光光源投影效果越来越好,该方法大量应用于工程测量中.

相对于傅里叶变换法,相移相位提取算法测量精度较高.然而在实际工程应用中,其测量精度同样会受到诸多因素的影响,如投影仪与 CCD 相机的非线性响应,图像量化误差,投影光源的稳定性,相移器误差和环境振动噪声等^[7].Brophy 等^[8]给出了相移算法中图像灰度误差导致的相位计算误差的关系式,并研究了不同的相位提取算法对图像灰度误差的抑制效果.J. Van Wingerden 等^[9]对相移算法中的相位测量误差采用线性拟合法表示,并通过比较讨论了减少测量误差的相位算法.J. Schmit 等^[10]对 CCD 探测器的非线性响应特性所导致的相位误差进行了模拟分析.P. Hariharan 等^[11-12]深入研究了一系列图像灰度误差的补偿算法.然而针对图像饱和和误差的研究较少,在对一些非漫射表面物体进行测量时,由于表面局部的镜面反射往往会导致图像局部饱和,从而引起相位误差.目前,直接应用相移图像数据来减少此种相位误差的算法研究较少.在测量中解决这类问题的途径主要是采用调整镜头光圈大小来抑制图像局部饱和,但光圈太小会导致未饱和区域图像的有效量化等级降低,同样会影响测

量精度^[13-14].Eryi Hu 等^[15]针对图像局部饱和问题提出了基于相移技术的饱和误差抑制算法,模拟和实验结果表明该算法可以有效地纠正图像饱和导致的相位误差.然而,当图像的饱和系数较大时,以四步相移为例:所拍摄的 5 幅条纹图中有部分点的未饱和光强值数目已小于 3,而基于四步相移的降阶算法不能对这些点的相位进行修正^[15],此时该算法的应用范围受到限制.

本文对前期的研究工作进行了拓展,研究了饱和误差抑制算法的适用条件,理论推导了基于六步相移的饱和误差抑制算法公式,从而进一步扩展了饱和误差抑制算法的适用范围.最后,通过模拟和实验验证了该算法的可靠性.

1 饱和误差抑制算法的适用范围

定义饱和系数 K ^[15] 描述条纹图像的饱和程度为

$$K = (a + b) / (2^n - 1) \quad (1)$$

式中 n 为量化等级,为光强的最大值.

在饱和误差抑制算法中,为了确保每个待测点的未饱和的光强值的个数大于或等于 3,饱和系数 K 的大小必须被限制在如下的范围内

$$1 < K < \frac{a + b}{a + b \cos \left[\left(1 - \frac{3}{N} \right) \pi \right]} \quad (2)$$

式中, a 为条纹背景光强, b 为条纹对比度, N 为相移条纹图的帧数.从上式可得,饱和误差抑制算法的适用范围可以随着 N 的增加得到扩展.当 $a = b$ 时,由此进一步分析可得 N 帧相移对应的所允许的最大饱和系数分布如图 1 所示.很明显,六步相移对应的饱和误差抑制算法的可允许的饱和系数的最大

* 中国矿业大学青年基金(2009A020)、中国矿业大学引进人才启动基金和中国矿业大学青年教师启航计划资助
Tel:0516-83490778 Email:horyhu@126.com
收稿日期:2009-10-01 修回日期:2010-02-25

值比四步相移对应的值要大. 且四步相移和六步相移对应的可允许最大饱和系数分别为: 1.53 和 2.57, 其对应的一个周期内的饱和区域的宽度分别为 $2/5$ 和 $4/7$ 倍条纹周期. 因此在一般的工程测量中, 基于六步相移技术的饱和误差抑制算法可以基本解决条纹饱和导致的相位波动误差问题.

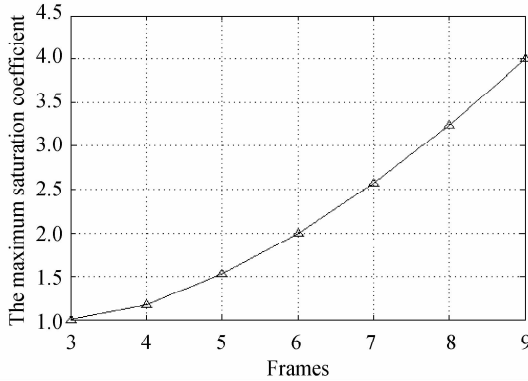


图 1 N 帧相移对应的饱和误差抑制算法的最大饱和系数

Fig. 1 The saturation coefficients corresponding to different frames

2 六步相移对应的饱和误差抑制算法

基于六步相移技术的饱和误差抑制算法的原理和基于四步相移技术的饱和误差抑制算法类似, 该算法也是通过 Carre^[15] 相移算法延伸而来. 当一个待测点的 7 个光强值中有 1 个值饱和时, 去除这些饱和的光强值, 重新排序剩下的未饱和的光强值, 且相移量为 $\frac{2\pi}{7}$. 通过 Carre 相移算法求得重新排序后的光强值对应的相位值 φ' , 再加上初始相位差项, 就可以得到正确的相位值. k 为第一个饱和光强值所对应的位置.

1) 当 $N=7, m=1$ 时

$$\varphi' = \arctan \left(\frac{2(I_1 - I_4)}{I_2 + I_3 - I_0 - I_5} \sin \frac{2\pi}{7} \right) - \frac{5\pi}{7} \quad (3)$$

此时 $\varphi' = \varphi + 2(k+1)\pi/7$. 真实相位的表达式为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{2(I_1 - I_4)}{I_2 + I_3 - I_0 - I_5} \sin \frac{2\pi}{7} \right) - \frac{5\pi}{7} - \frac{2(k+1)\pi}{7} \quad (4)$$

2) 当 $N=7, m=2$ 时,

$$\varphi' = \arctan \left(\frac{2(I_1 - I_3)}{2I_2 - (I_0 + I_4)} \sin \frac{2\pi}{7} \right) - \frac{4\pi}{7} \quad (5)$$

此时 $\varphi' = \varphi + 2(k+2)\pi/7$. 真实相位的表达式为

$$\varphi = \arctan \left(\frac{2(I_1 - I_3)}{2I_2 - (I_0 + I_4)} \sin \frac{2\pi}{7} \right) - \frac{4\pi}{7} - \frac{2(k+2)\pi}{7} \quad (6)$$

3) 当 $N=7, m=3$ 时

$$\varphi' = \arctan \left[\frac{(I_0 - I_3) + (I_1 - I_2)}{(I_1 + I_2) - (I_0 + I_3)} \tan \frac{\pi}{7} \right] - \frac{3\pi}{7} \quad (7)$$

此时 $\varphi' = \varphi + 2(k+3)\pi/7$. 真实相位的表达式为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{(I_0 - I_3) + (I_1 - I_2)}{(I_1 + I_2) - (I_0 + I_3)} \tan \frac{\pi}{7} \right] - \frac{3\pi}{7} - \frac{2(k+3)\pi}{7} \quad (8)$$

4) 当 $N=7, m=4$ 时

$$\varphi' = \arctan \left(\frac{I_2 - I_0}{I_2 - 2I_1 + I_0} \tan \frac{\pi}{7} \right) - \frac{2\pi}{7} \quad (9)$$

此时 $\varphi' = \varphi + 2(k+4)\pi/7$. 真实相位的表达式为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{I_2 - I_0}{I_2 - 2I_1 + I_0} \tan \frac{\pi}{7} \right] - \frac{2\pi}{7} - \frac{2(k+4)\pi}{7} \quad (10)$$

因此, 当物体表面出现局部反射率过大导致条纹图像饱和时, 可由式(4)、(6)、(8)和(10)计算六步相移技术得到的条纹图的真实相位.

3 算法的模拟验证

为直观的验证饱和误差抑制算法的效果, 数值模拟一个球冠型凸起面三维形貌的测量过程. 球冠如图 2, 半径为 115 pixel, 球冠的高度为 22 pixel. 由于球冠顶部的反射率较大, 该区域在投影条纹后出现饱和现象, 投影角度为 15° .

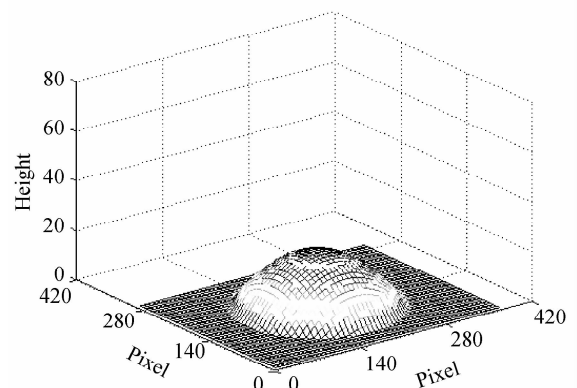


图 2 模拟试件

Fig. 2 Simulated specimen

分别采用四步相移和六步相移技术测量该模型的三维形貌. 用计算机模拟产生变形后的条纹图和背景条纹图, 条纹的相移量分别为 $2/5\pi$ 和 $2/7\pi$. 图 3 为其中一帧模拟的变形条纹图, 图像的中间区域存在局部的光强饱和. 当采用四步相移算法时, 该区

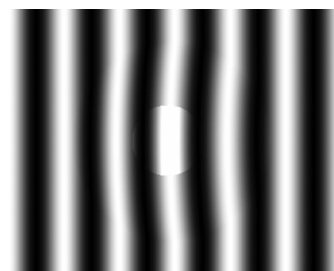


图 3 一帧模拟变形条纹图

Fig. 3 One frame deformed fringe pattern

域的饱和系数分别设置为 $K=1.3$ 和 $K=2.5$,前者在基于四步相移的饱和误差抑制算法的饱和系数允许范围内,后者超出该范围.对于六步相移算法,该区域的饱和系数设置为 $K=2.5$,仍然处于基于六步相移的饱和误差抑制算法的饱和系数允许范围

内.变形条纹图的相位分别采用传统的相移算法和本文提出的饱和误差抑制算法进行计算.相位差分布图如图 4~图 6 所示.其中图 4(c)、(d),图 5(c)、(d)和图 6(c)、(d)为单行的相位分布情况,从中可以更清楚地比较不同算法的误差抑制效果.

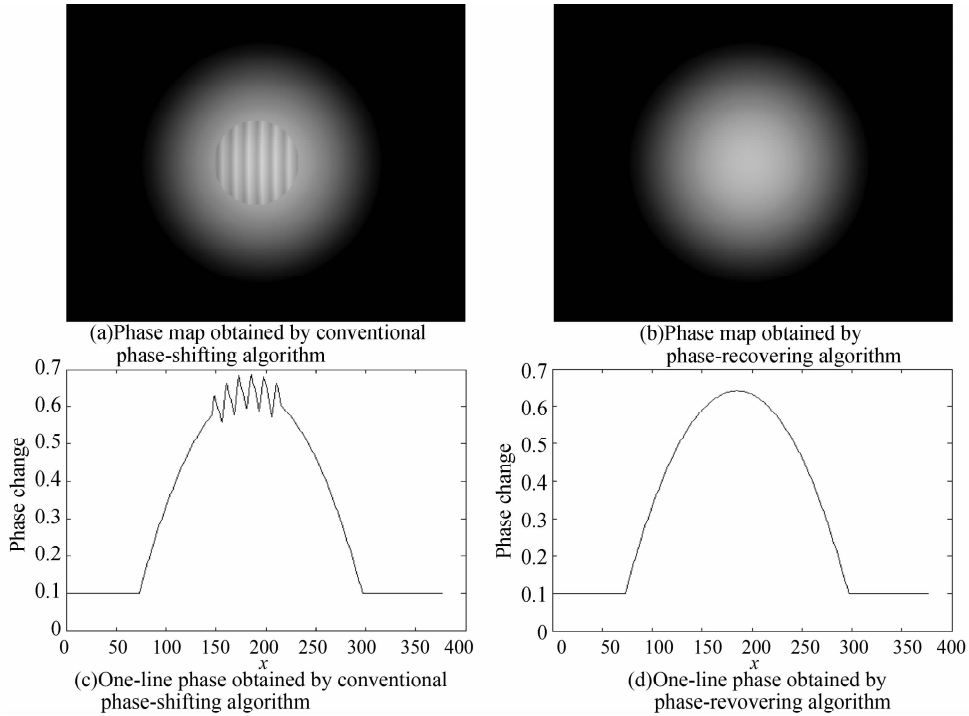


图 4 四步相移, $K=1.3$

Fig. 4 Four steps phase-shifting, $K=1.3$

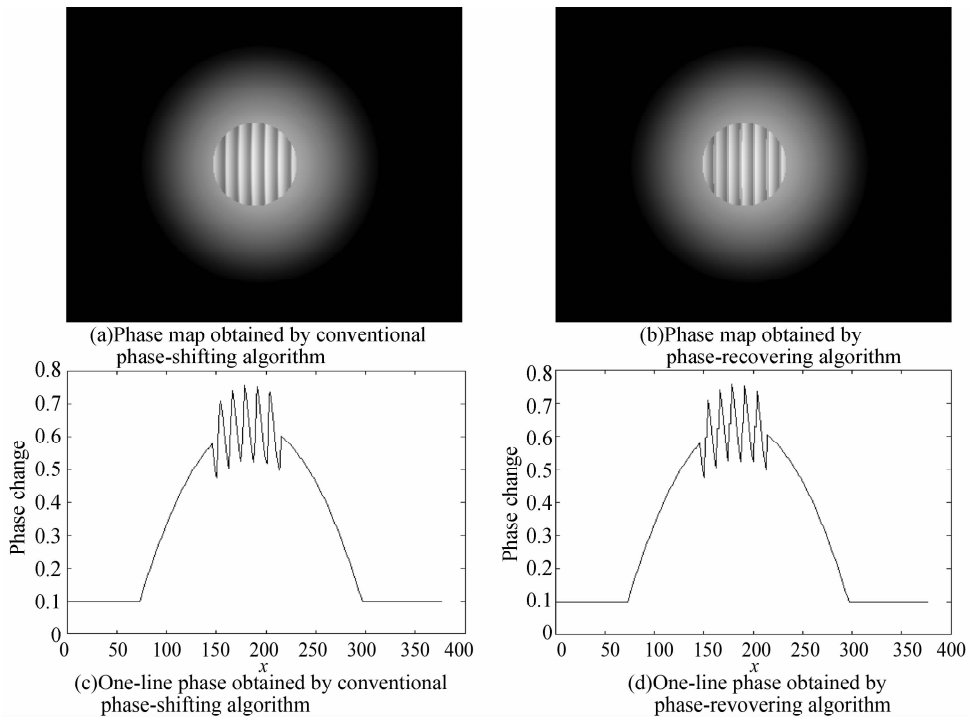
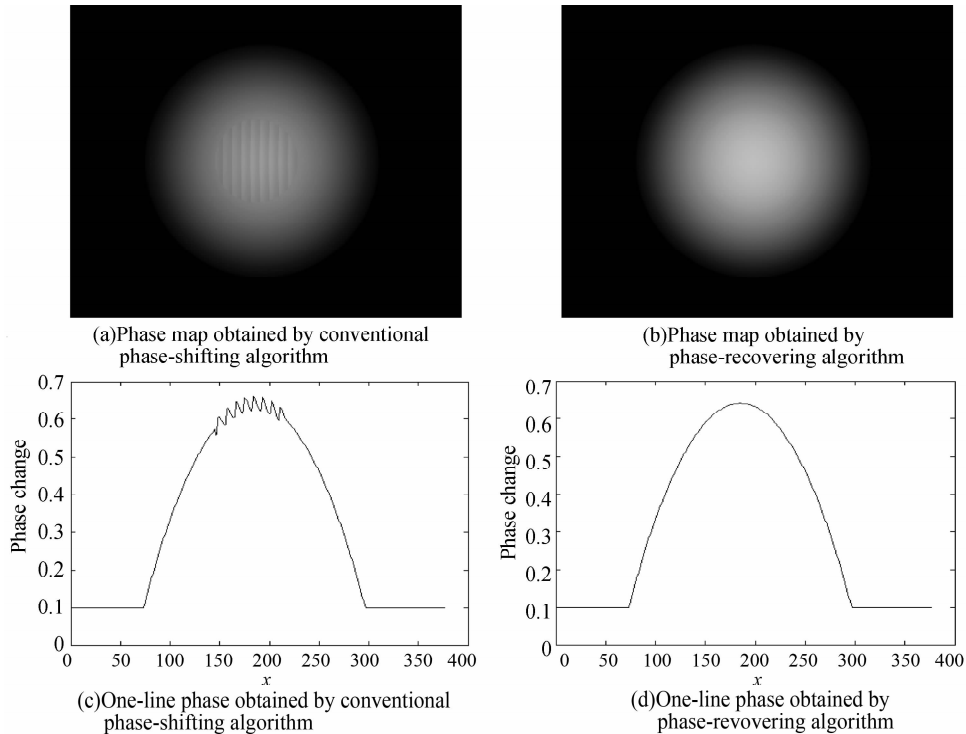


图 5 四步相移, $K=2.5$

Fig. 5 Four steps phase-shifting, $K=2.5$

图6 六步相移, $K=2.5$ Fig. 6 Six steps phase-shifting, $K=2.5$

分析上述模拟的相位计算结果可得:采用传统相移算法得到的相位图 4 (a)、5(a)和 6(a)中存在明显的相位波动误差;分别比较图 4 (a)、4(b)和图 5(a)、5(b);当饱和系数为 1.3 时,基于四步相移技术的饱和误差抑制算法可以完全抑制饱和导致的相位误差;然而,当饱和系数为 2.5 时,图 5(b)中饱和误差不能被完全消除;比较图 6(a)和 6(b),当饱和系数较大时,基于六步相移技术的饱和误差抑制算法可以完全抑制饱和导致的相位误差。

模拟结果表明:当条纹图的饱和系数在算法允许的范围时,基于 N 帧相移技术的饱和误差抑制算法可以有效地抑制图像饱和导致的相位误差,且随着相移条纹图帧数的增加,饱和误差抑制算法的适用范围更广。

4 算法的实验验证及结果分析

实验试件为一个平板,其表面反射率较大.分别采用四步相移和六步相移技术,投影具有 $2/5\pi$ 和 $2/7\pi$ 相移量的正弦数字条纹图序列到待测物体上,投影角度为 30° ,CCD 相机(CS8620i)的光轴垂直于待测物体表面.图 7 为其中一帧拍摄的条纹图,图中亮条纹处的光强饱和,且饱和区域的宽度为条纹周期的一半,对应的饱和系数约为 2.0.此时,该饱和系数超过了基于四步相移的饱和误差抑制算法的适用范围,但是仍然小于基于六步相移的饱和误差抑制算法所允许的最大饱和系数值.分别由传统相移

算法和饱和误差抑制算法计算条纹图的相位.图 8 和图 9 分别为采用不同的相移算法计算得到的全场相位图.为了更好的比较不同算法的实验结果,图 10 为待测物体表面一行中局部的相位分布。



图7 饱和条纹图

Fig. 7 Saturated fringe pattern

由于条纹图像的局部饱和,图 8(a)中的相位存在明显的周期性波动误差.采用饱和误差抑制算法

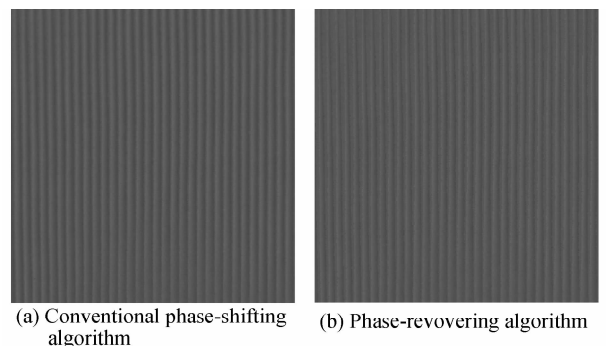


图8 四步相移相位图

Fig. 8 Phase map of four steps phase-shifting

后,该误差有所减小,但不能被完全消除.然而比较图 9(a)和图 9(b)的实验结果可得:采用六步相移时,饱和误差抑制算法可以有效地消除饱和和导致的相位波动误差.进一步从图 10 的局部相位比较结果可得:图 10(a)中四步相移时饱和误差抑制算法处理后相位误差的最大值不变,只是误差区域有所减小;但图 10(b)中六步相移时采用饱和误差抑制算法可以更加有效地降低相位误差的幅度.实验验证结果与模拟分析结果一致.

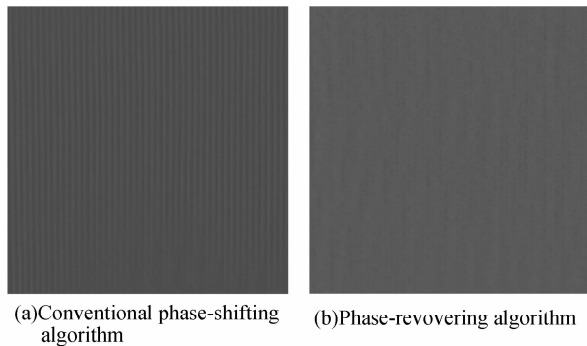


图 9 六步相移相位图

Fig. 9 Phase map of six steps phase-shifting

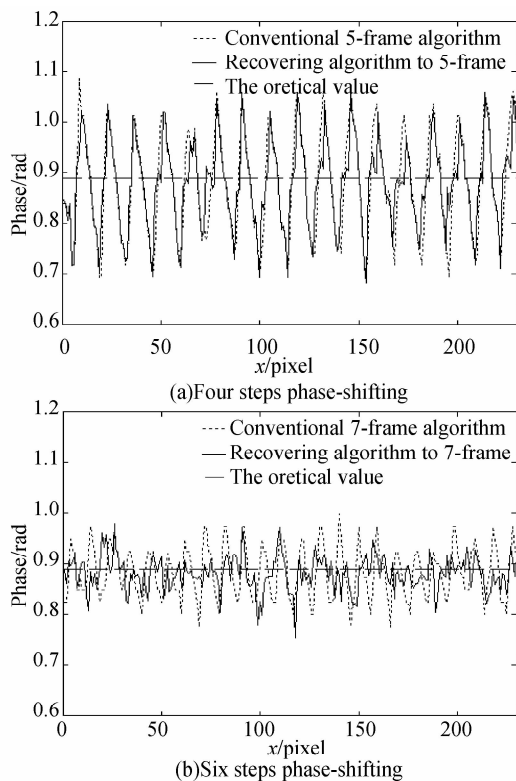


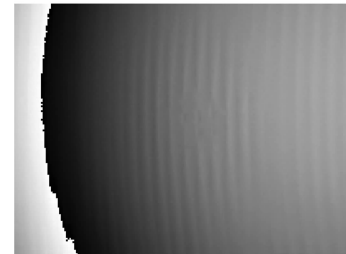
图 10 待测物体表面局部的相位分布

Fig. 10 Local phase distribution of detected specimen

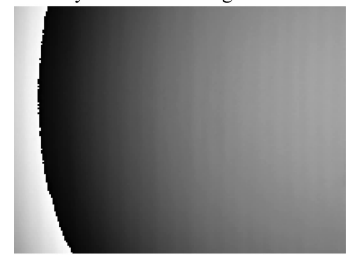
为进一步验证算法的可行性,采用基于六步相移技术的投影条纹相位法测量一鼠标表面的三维形貌.图 11(a)为其中一帧的变形条纹图,其中鼠标顶部局部条纹图的光强饱和.图 11(b)和 11(c)分别为采用传统的相移相位算法和饱和误差抑制算法计算获得的鼠标表面的局部相位分布图.从实验结



(a)The captured fringe pattern



(b)Part of the phase map computed by conventional algorithm



(c)Part of the phase map computed by recovering algorithm

图 11 鼠标表面形貌实验结果

Fig. 11 Profile measurement results of the mouse

果可得,采用饱和误差抑制算法可以很好地抑制图像饱和和导致的相位波动误差.

5 结论

本文对传统相移算法中图像饱和误差抑制算法进行了深入研究,推导了基于六步相移技术的饱和误差抑制算法的具体公式,分析了不同的饱和误差抑制算法的适用范围.理论分析、模拟和实验结果表明:当饱和系数在算法允许的范围时,基于 N 帧相移技术的饱和误差抑制算法可以有效地克服图像饱和和导致的相位误差,且随着相移条纹图帧数的增加,饱和误差抑制算法的适用范围更广.

参考文献

- [1] ROBINSON D W, TEID G T. Interferogram analysis: digital fringe pattern measurement methods [M]. London: Institute of Physics Publishing, 1993: 105-109.
- [2] SHOUGH D. Beyond fringe analysis[C]. SPIE, 2003: 208.
- [3] HE Y M, TAY C J, SHANG H M. Deformation and profile measurement using the digital projection grating method[J]. Opt Laser Eng, 1998, 30(5): 367-377.
- [4] KINSTAETTER K, LOHMANN A W, SCHWIDERV J, et al. Accuracy of phase shifting interferometry[J]. Appl Opt, 1988, 27(24): 5082-5089.
- [5] KANG Xin, DONG E-liang, HE Xiao-yuan. The measurement of rotation angle of micro-mirror using fringe projection[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(12): 1500-1503. 康新,董粤良,何小元.显微栅线投影法用于微镜转角测量[J].

- 光子学报,2004,**33**(12):1500-1503.
- [6] SUN Ping, ZHANG Li, TAO Chun-xian. 3-D shape measurement with Fourier transform based on LCD projector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8):1250-1252.
孙平,张丽,陶春先. 基于LCD数字投影技术的傅里叶变换法测量物体三维形貌[J]. 光子学报,2005, **34**(8):1250-1252.
- [7] SCHWIDER J, BUROW R, ELSSNER K E, *et al.* Digital wave-front measuring interferometry; some systematic error sources [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(21):3421-3432.
- [8] BROPHY C. Effect of intensity error correlation on the computed phase of phase-shifting interferometry[J]. *JOSA A*, 1990, **7**(4):537-541.
- [9] WINGERDEN J, FRANKENA H J, SMORENBURG C. Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry[J]. *Appl Opt*, 1991, **30**(19):2718-2729.
- [10] SCHMIT J, CREATH K, KUJAWINSKA M. Spatial and temporal phase-measurement techniques; a comparison of major error sources in one-dimension[C]. *SPIE*, 1993, **1775**:202-211.
- [11] HARIHARAN P, OREB B F, EIJU T. Digital phase-shifting interferometry; a simple error-compensating phase calculation algorithm[J]. *Appl Opt*, 1987, **26**(13):2504-2506.
- [12] ZHANG H, LALOR Michael J, BURTON David R. Error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry: a comparison by error analysis [J]. *Opt Laser Eng*, 1999, **31**(5):381-400.
- [13] ZHAO B. A statistical method for fringe intensity-correlated error in phase-shifting measurement; the effect of quantization error on the N-bucket algorithm[J]. *Meas Sci Technol*, 1997, **8**(2):147-153.
- [14] SKYDAN O A, LILLEY F, LALOR M J, *et al.* Quantization error of CCD cameras and their influence on phase calculation in fringe pattern analysis[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**(26):5302-5307.
- [15] HU Er-yi, HE Yu-ming, CHEN Yan-ming. Study on phase error with periodic wave behavior and a new algorithm in projected grating phase-shifting profilometry[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, **23**(4):345-352.
胡而已,何玉明,陈炎明. 投影栅相移法中的相位波动误差及修正算法研究[J]. 实验力学, 2008, **23**(4):345-352.

Study of the Phase-recovering Algorithm for Saturated Fringe Patterns in the Projection Grating Phase-shifting Profilometry

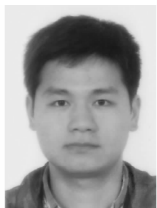
HU Er-yi¹, LI Yan²

(1School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

(2 Sinopec Pipeline Storage and Transportation Company in Xuzhou Branch Pipeline Operations, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The phase error caused by intensity saturation in the projection grating phase-shifting profilometry is studied. The applicability ranges of phase-recovering algorithms corresponding to different intensity saturation coefficients of N frame phase-shifting technique are studied. The formula of the phase-recovering algorithm corresponding to seven-frame phase-shifting method is deduced. The theoretical analysis indicates that the applicability range of the phase-recovering algorithm will be extended with the increasing of phase-shifting steps. Finally, some Simulative and experimental results are presented to prove the availability of the phase-recovering algorithm. The phase error caused by the image intensity saturation can be effectively decreased by the phase-recovering algorithm based on seven-step phase-shifting technique.

Key words: Applied optics; Phase-recovering algorithm; Phase-shifting method; 3D profile



Hu Er-yi was born in 1982. He received his Ph. D. degree from Department of Mechanics from Huazhong University of Science and Technology in 2009. Now, he is a teacher at China University of Mining & Technology. His research interests focus on nondestructive testing and shape measurement techniques using computer vision.