

基于统计逼近的 Stoilov 算法光栅参数优化设计

许幸芬^{1,2} 曹益平^{2*}

(¹ 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050)
(² 四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 基于 Stoilov 算法的相位测量轮廓术(PMP)三维测量过程中,由于其表达式中四种奇异现象的存在,致使用 Stoilov 算法时出现解相错误,所以不能很好地重构三维物体。采用统计逼近的方法补偿 Stoilov 算法表达式中出现的异常点,弥补了 Stoilov 算法的缺陷。同时 Stoilov 算法对光栅周期及条纹对比度比较敏感,当光强变化较大时,相移图像对应的像素点发生突跳,影响测量精度。因此,提出一种基于统计逼近的 Stoilov 优化算法的光栅参数优化方法以提高测量精度。实验模拟不同的物体,发现存在重构三维物体时均方差最小的光栅周期和光栅条纹对比度,验证了光栅参数优化设计的可行性。

关键词 信息光学;三维测量;Stoilov 算法;光栅参数优化;光栅周期;条纹对比度

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1112001

Design of Stoilov Algorithm Grating Parameter Optimization Based on Statistical Approach

Xu Xingfen^{1,2} Cao Yiping²

(¹ College of the Technology and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)
(² Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract In the phase measuring profilometry (PMP) three-dimensional measurement based on Stoilov algorithm, the four abnormal phenomena lead to the incorrect phase calculation or incorrect phase unwrapping, so the measured object can't be reconstructed well. The proposed method based on the statistical approach can restrain the abnormal phenomena availablely and make up Stoilov algorithm defect. Meanwhile, it is found that Stoilov algorithm is sensitive to the period and contrast of sinusoidal gratings. The pixel of phase imaging will be mutant and the measuring precision is to be influenced when the light intensity varies severely. Therefore, a method of grating parameter optimization based on the statistical approach Stoilov algorithm is proposed. The measuring precision can be improved by optimizing the period and contrast of sinusoidal gratings under the experimental simulation. Experimental result shows its feasibility and validity.

Key words information optics; three-dimensional measurement; Stoilov algorithm; grating parameters optimization; period of gratings; contrast of the grating strips

OCIS codes 100.6890; 100.0100; 100.3020; 140.3035

1 引 言

在基于 Stoilov 算法^[1-4]的相位测量轮廓术(PMP)三维测量过程中,由于 Stoilov 算法表达式本身存在四种异常现象,致使用 Stoilov 算法时出现解相错误,导致不能重构三维物体。文献[5]提出了一种基于统计逼近的方法补偿 Stoilov 算法表达式

中出现的异常点,从而能够很好地重构出三维物体,并用实验验证了该方法的可行性。表达式中 $\sin \phi_0$ 依赖采集图像的光强,对光栅参数的变化比较敏感,当光强变化比较大时,相移图像对应的像素点发生突跳;光栅投影测量系统所采用的设备有数字投影仪,CCD 相机等,由于设计的原因,投影仪和相机本

收稿日期: 2013-01-25; 收到修改稿日期: 2013-03-08

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)

作者简介: 许幸芬(1982—),女,硕士,讲师,主要从事三维光学信息处理等方面的研究。

E-mail: xuxingfen1982@163.com

* 通信联系人。E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net

身具有灰度非线性失真,使得拍摄得到的正弦光栅投影条纹不具有良好的正弦性,从而引入数值化误差^[6-7];环境光的随机噪声影响采集图像的准确性;CCD自身的非线性引入高次谐波,造成高频与低频的混叠。这些因素的存在,会影响三维测量的精度。因此,本文提出了一种基于统计逼近的 Stoilov 算法的光栅参数优化方法以提高测量精度。实验模拟不同的物体发现三维重构的精度与光栅周期和条纹对比度有关,并且存在重构三维物体均方差(MSE)最小的光栅周期和条纹对比度,从而对光栅周期和条纹对比度进行优化设计。

2 基于 Stoilov 算法的三维测量原理

基于 Stoilov 算法的三维测量原理^[8-10]如图 1 所示。投影的正弦光栅相位为 $\phi = -2\Phi_0 + (n-1)\Phi_0$, ($n=1,2,3,4,5$)。相移量为 Φ_0 , 相移步长相等。由 CCD 采集对应的五帧变形条纹 $I_n(x,y)$ 为^[11-12]

$$I_n(x,y) = R(x,y)\{A(x,y) + B(x,y)\cos[\Phi(x,y) + \phi]\}, \quad n = 1,2,3,4,5, \quad (1)$$

式中 $R(x,y)$ 表示物体表面反射率, $A(x,y)$ 表示背景光强度, $B(x,y)$ 表示条纹对比度。从(1)式表征的五帧相移条纹中计算出相位函数,即

$$\Phi = \arctan\left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_1 - I_5} \sin \Phi_0\right], \quad (2)$$

$$\sin \Phi_0 = \sqrt{1 - \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)}\right]^2}. \quad (3)$$

通过对截断相位的展开,采用校准方法建立起相位与高度之间的映射关系^[13],就可以重构物体高度分布 $h(x,y)$ 。

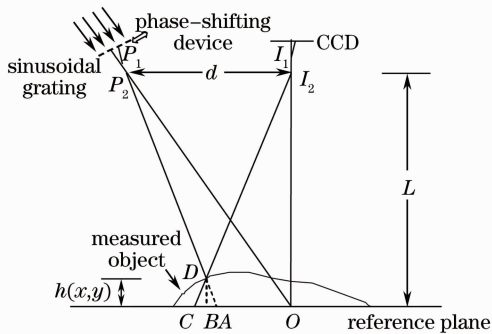


图 1 PMP 原理图

Fig. 1 PMP principle

3 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法思想

从 Stoilov 算法的表达式可以看出,表达式本身

过分依赖采集的变形条纹图像的光强,存在对光强的减法、除法和开方等运算,使相位计算时在某些位置会出现分子分母为零,开方出现复数等奇异现象,导致算法算错或者相位展开出错,从而使三维重构表面会出现畸变、失真,甚至无法进行三维重构。采用基于统计逼近的方法对 Stoilov 算法进行修正,即从 $\sin \Phi_0$ 分布中逐步排除上述特征的奇异点,并对剩余大部分接近真值的数进行统计逼近,用这些数的平均值作为逼真值去补偿 $\sin \Phi_0$ 分布中各点值,就可以有效避开上述异常情况带来的解相误差,也在一定程度上抑制环境光噪声的影响。具体算法如下:

1) 计算 $\Delta_1 = I_2 - I_4$ 。如果 $\Delta_1 = 0$, $\sin \Phi_0$ 就标示为一个已知的超出其值域的数 100(表征奇异点 1)。

2) 计算 $s = \left[\frac{I_1 - I_5}{2(I_2 - I_4)}\right]^2$ 的值。如果 $s > 1$, $\sin \Phi_0$ 标示为另外已知的超出其值域的数 200(表征奇异点 2)。

3) 计算 $I_1 - I_5$ 。如果其值等于 0, $\sin \Phi_0$ 标示为一个已知的超出其值域的数 300(表征奇异点 3)。

4) 由(3)式计算 $\sin \Phi_0$ 。

5) 依次扫描 $M \times N$ 维的 $\sin \Phi_0$ 数组,将 $0 \leq \sin \Phi_0 \leq 1$ 的元素分别列入一个一维数组 A_0 ,并记录这些元素的个数 K_0 。

6) 计算数组 A_0 中各个元素的平均值 \bar{a}_0 和均方差 δ ,如果 δ 大于预先设置的某一小量 ϵ ,表明数组 A_0 中存在超大误差。将数组 A_0 中与 \bar{a}_0 的差大于 δ 的元素重新标示为一个已知的超出其值域的数 400(表征奇异点 4)。

7) 判断 A_0 中各个元素中的值是否有 400,如果有,则从中排除并重排 A_0 ,重置有效元素的个数 K_0 ,返回到 6);否则说明以上四种奇异点均被排除。将最终的 \bar{a}_0 取代 $\sin \Phi_0$ 数组的所有元素。

8) 由(2)式计算各点的相位。

采用以上基于统计逼近法对 Stoilov 算法计算 $\sin \Phi_0$ 所出现的异常情况进行修正,就可以有效避开上述四种异常情况带来的误差,优化了 Stoilov 算法,文献[5]用实验验证了该算法的有效性和适用性。

4 光栅周期对优化后 Stoilov 算法测量精度影响分析及优化设计

从(3)式中看出, $\sin \Phi_0$ 依赖所采集图像的光强,由于探测器 CCD 采集的光强表现为灰度值,只

能是 0~255 的整数,因而会引入数值化误差;再者,探测器 CCD 本身的非线性也会引入高次谐波,影响测量精度。因此光栅周期对优化后的 Stoilov 算法测量精度会有一些影响^[1]。为了便于分析,采用优化后的 Stoilov 算法分别模拟了光栅周期为 8 pixel 和 15 pixel,大小为 256 pixel×256 pixel,且最大高度为 20 pixel 呈 Peaks 函数形分布的物体,如图 2 所示。按照相移量 $2\pi/5$,等步距相移五次,分别采集了周期为 8 pixel 和 15 pixel 的五帧光栅变形条纹图。图 3(a)是周期为 8 pixel 的其中一帧变形条纹图,图 3(b)是 15 pixel 的其中一帧变形条纹图。采用改进后的 Stoilov 算法重构物体。重构物体的截断相位图如图 4 所示。重构结果如图 5(a)和图 5(b)所示,重构物体的误差分布如图 5(c)和图 5(d)所示。从图 5 可知,在周期为 8 pixel 和 15 pixel 时,采用优化后的 Stoilov 算法都能很好地重构出物体的三维面形,但不同周期重构物体的误差不同。图 5(c)中,重构物体的误差分布不均匀,变化比较大,毛刺现象明显,图 5(d)的误差分布比较均匀,毛刺现象不明显。经计算得:周期为 8 pixel 时,重构物体的均方差为 0.068 rad。周期为 15 pixel 时,重构物体的均方差为 0.066 rad。这说明,光栅周期对改进后的 Stoilov 算法的测量精度确实存在一定的影响,周期不同,影响 Stoilov 算法的测量精度程度也是不同的。为了找到最佳的测量周期,用改进后的 Stoilov 算法模拟不同光栅周期的 Peaks

函数形物体,得到其均方差随光栅周期 P 的总体变化趋势分布图,如图 6 所示。可以看到:1)在周期数小于 5 pixel 时,Stoilov 算法的均方差比较大,且呈跳跃式变化;2)在周期数大于 5 pixel 时,均方差随周期数的增大呈振荡变小的趋势;3)在周期为 10 pixel 时,均方差达到最小,为 0.065 rad。由此将光栅周期设计为 10 pixel 时,可以有效提高改进后的 Stoilov 算法的测量精度。

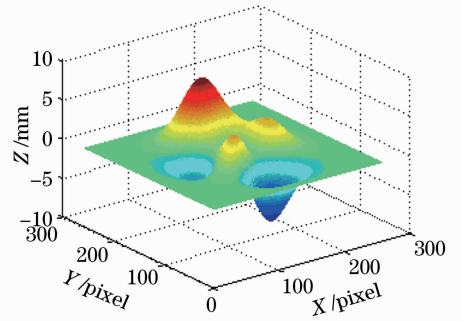


图 2 Peaks 函数形物体
Fig. 2 Object of Peaks

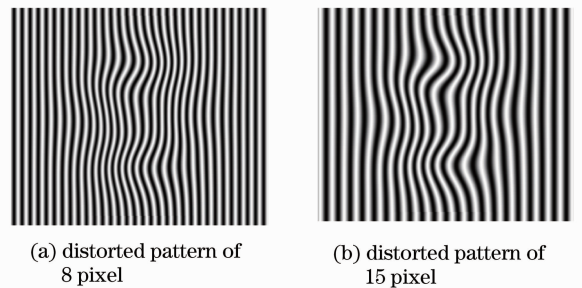


图 3 8 pixel 周期和 15 pixel 周期的变形光栅图
Fig. 3 Distorted patterns of 8 pixel and 15 pixel

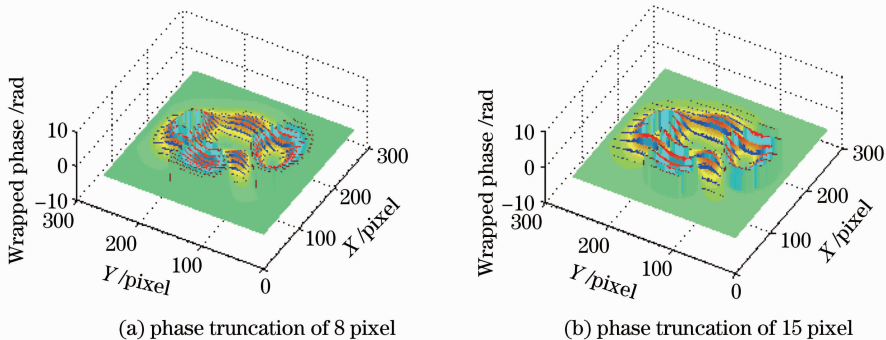


图 4 截断相位图
Fig. 4 Phase truncation

为了验证上述分析的正确性,对如图 7(a)所示的大小为 256 pixel×256 pixel,高度为 20 pixel 的圆锥形物体,在不同周期下用改进后的 Stoilov 算法进行了数字模拟。重构过程同重构 Peaks 函数形物

体过程一样,重构结果如图 7(b)所示。图 7(c)是重构的均方差随光栅周期的变化趋势图。从图中可看到,均方差在周期数小于 5 pixel 时确定较大,在周期大于 5 pixel 时,均方差随周期数的增大呈振荡变

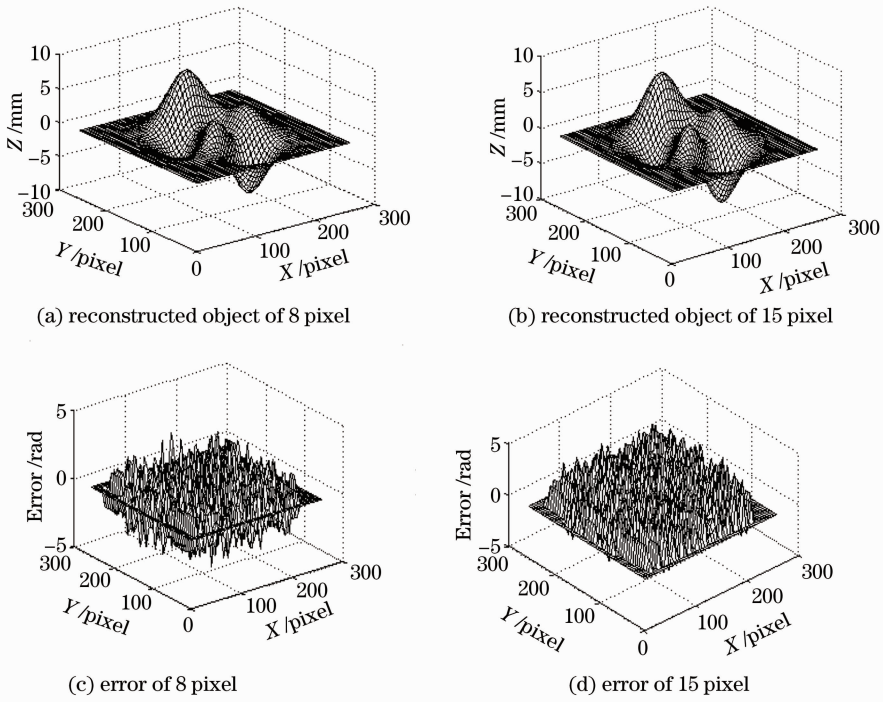


图 5 重构结果及误差分布图

Fig. 5 Reconstructed objects and error distributions

小的趋势。在周期为 10 pixel 时,均方差达到最小,为 0.067 rad。显然,将光栅周期设计为 10 pixel 时,改进后的 Stoilov 算法测量精度最高。

以上分析表明,光栅周期对改进后的 Stoilov 算法的测量精度确实存在影响,通过优化光栅周期将其设计为 10 pixel,可以有效地提高改进后的 Stoilov 算法的测量精度。

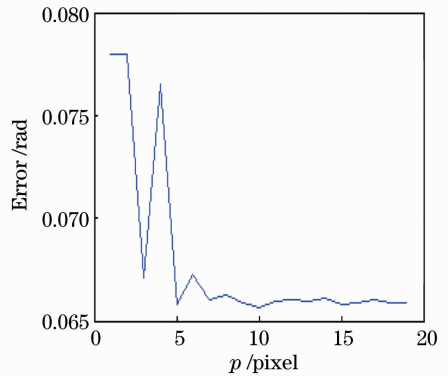


图 6 均方差与光栅周期的关系

Fig. 6 Relationship between MSE and grating

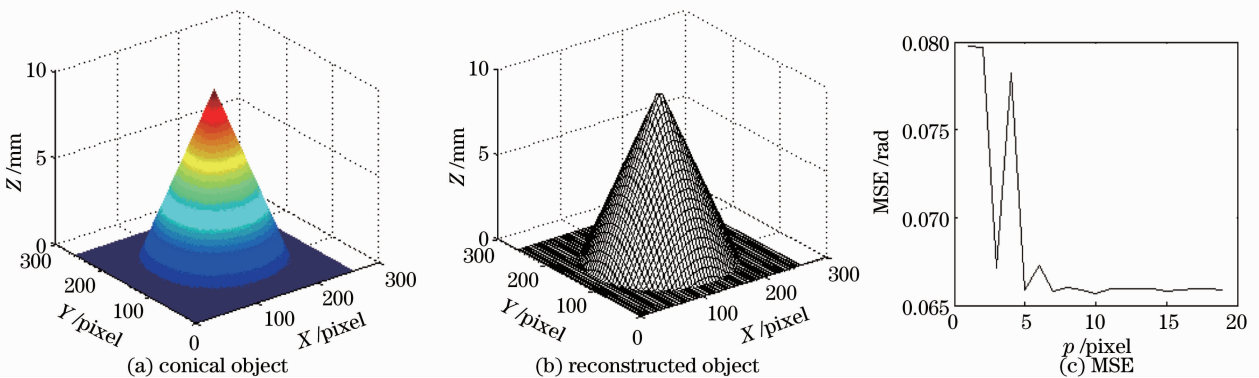


图 7 周期优化设计验证

Fig. 7 Period optimization design verification

5 条纹对比度对 Stoilov 算法测量精度影响分析及优化设计

Stoilov 算法的表达式中 $\sin \Phi_0$ 依赖采集图像的灰度,在采集过程中,条纹对比度发生变化时,采集条纹会因为物体高度的变化出现变形条纹错位现象,造成不同相移图像对应的像素点发生灰度突跳,当分母 $2(I_2 - I_4)$ 不为零但是一个相对较小的量,分子 $(I_1 - I_5)$ 出现微小变化时,会引起商出现大的变化,从而导致计算相位时引入误差^[5]。因此,条纹对比度对改进后对 Stoilov 算法测量精度也会有影响。为了便于分析,采用改进后的 Stoilov 算法模拟了周期分别为 8 pixel 和 9 pixel 时的上述 peaks 函数形分布的物体。图 8 给出了周期为 8 pixel 和 9 pixel 时重构误差随条纹对比度的变化趋势图。从图 8 中可以看到,测量误差与光栅条纹对比度存在一定的关系,有如下特点:1)周期为 8 pixel 和 9 pixel 时,条纹对比度在 0.1 附近,Stoilov 算法的测量误差急剧增大,误差达到了一个比较大的范围,最大误差超过了 0.3 rad;随着条纹对比度的增加,测量误差呈逐渐减小的趋势;2)测量误差较小的区域对应应在条纹对比度较大的区域。这说明:即使光栅条纹周期不同,Stoilov 算法的三维测量精度与光栅条纹对比度成一定的周期对应关系。由此可见,基于 Stoilov

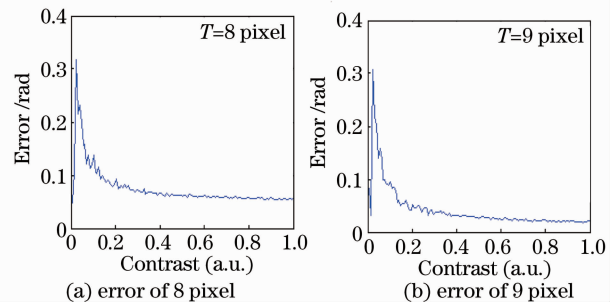


图 8 对比度与误差关系图

Fig. 8 Picture of contrast and error

算法的测量精度与光栅条纹对比度之间确实有一定的关系。

为了研究条纹对比度与不同物体三维重构时的误差关系,将条纹对比度的范围进一步缩小,使其在 0.8~1.0 之间,用优化后的 Stoilov 算法分别模拟光栅周期为 8 pixel 的上述圆锥形物体和 Peaks 函数形分布的物体,模拟结果如图 9(a)、(b)所示,图 9(c)、(d)分别是对应的测量误差随条纹对比度的分布曲线图。从图中可以看到:1)随对比度的增大,测量误差呈振荡变小的趋势;2)在 A 点(0.96)时,测量误差最小。得到的圆锥形物体的测量误差为 0.0553 rad,Peaks 函数形物体的误差为 0.008 rad。

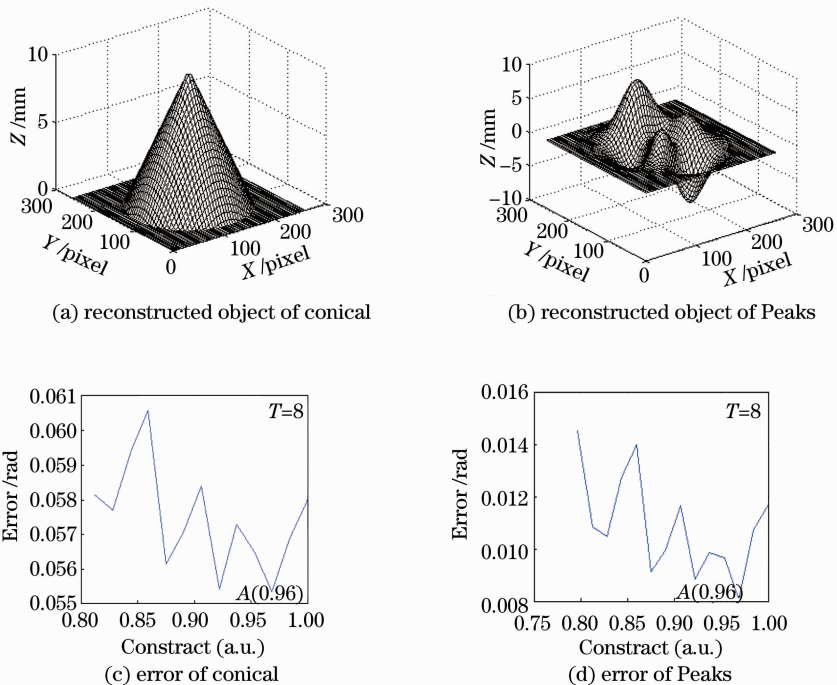


图 9 条纹对比度优化过程

Fig. 9 Optimization of contrast

以上分析表明,Stoilov 算法客观上存在的一些异常现象,采用统计逼近的方法优化 Stoilov 算法异常现象被抑制,完整的三维重构得以实现^[5],算法表达式本身依赖采集的光强,对光栅周期和条纹对比度的变化比较敏感,在测量中影响测量精度,采用优化后的 Stoilov 算法进行三维测量时,将光栅周期设为 10 pixel,条纹对比度设为 0.96 时,可以有效提高 Stoilov 算法的测量精度。

6 实验及结果分析

为了验证优化后的光栅结构参数的有效性和实用性,建立了一套基于优化后的 Stoilov 算法的 PMP 三维测量实验装置,编制了相应的光栅周期和不同条纹对比度的 Stoilov 算法的程序,对如图 10(a)的心形

物体进行了实物测量实验。实验中投影系统采用 HCP-70X 型数字投影仪,图像传感器采用 1881EXCCD 型摄像头,图像采集卡采用 DT3152 型采集卡。由计算机控制投影仪分别投影五帧具有等步长相移量的正弦光栅到工件表面,由摄像头同步采集相应的变形条纹,经图像采集卡存于计算机内。按照相移量为 $2\pi/5$,等步长采集周期为 8 pixel,对比度为 0.8 和周期为 10 pixel,对比度为 0.96 时的五帧变形条纹图,如图 10(b)所示的是周期为 8 pixel,对比度为 0.8 时的其中一帧变形条纹图。图 10(c)是周期为 10 pixel,对比度为 0.96 的其中一帧变形条纹图。在周期为 8 pixel,对比度为 0.8 时,采用改进后的 Stoilov 算法对心形物体重构。重构结果如图 11(a)所示,误差分布如图 11(c)所示。

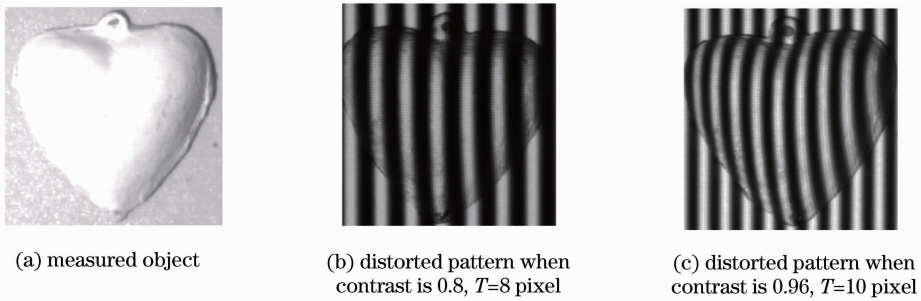


图 10 被测物体的变形光栅图

Fig. 10 Distorted patterns of measured object

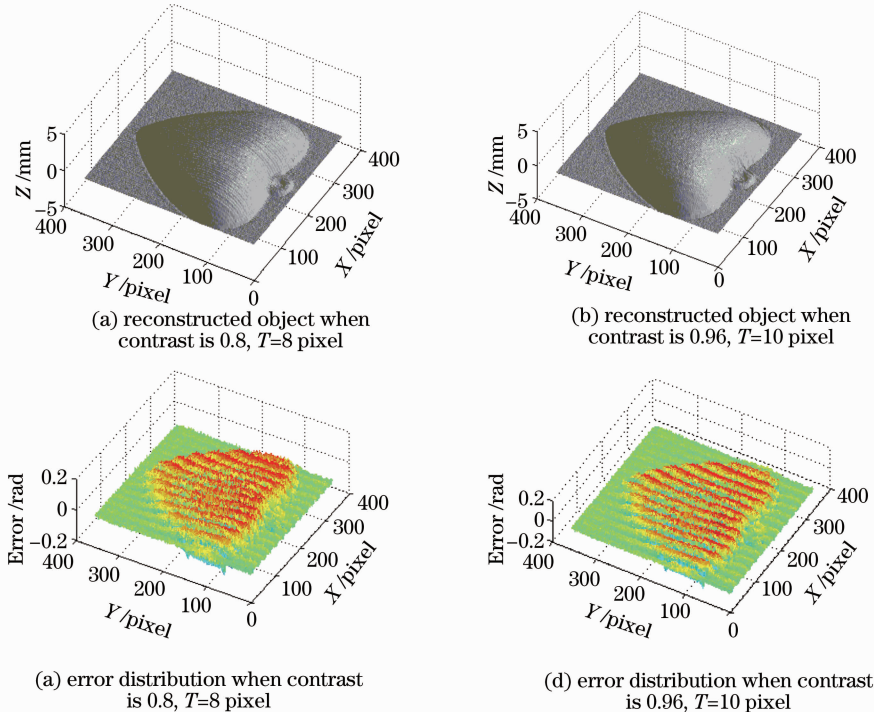


图 11 实验结果

Fig. 11 Experimental results

周期为 10 pixel, 对比度为 0.96 时的重构图如图 11(b)所示, 图 11(d)为误差分布图。从重构图中看到, 两种不同条件下, 物体都能重构出来, 但是图 11(a)中, 重构物体表面某些地方出现毛刺现象, 图 11(b)却没有毛刺现象, 重构物体表面很光滑。图 11(c)的相位误差分布图中, 相位误差在某些地方变化比较大, 经过计算可得其均方差为 0.076 rad。图 10(d)的相位误差分布图中, 相位误差变化比较平稳, 没有明显的起伏现象。经计算得到的均方差为 0.058 rad。由此可知, 将光栅周期设定为 10 pixel, 条纹对比度设定为 0.96 时, Stoilov 算法的测量精度比将光栅参数设为其他值时的测量精度高。实验结果验证了优化后的光栅参数的有效性和实用性。这对于提高 Stoilov 算法的测量精度具有一定的参考价值。

7 结 论

在优化 Stoilov 算法的基础上, 对光栅参数进行优化了设计。通过模拟圆锥形物体和呈 Peaks 函数形分布的物体, 分别得到它们的光栅周期与物体重构误差的曲线图, 以及光栅条纹对比度与物体重构误差的曲线图。通过分析得到: Stoilov 算法的测量误差随光栅周期数增加呈振荡变小的趋势, 且在周期为 10 pixel 时, 测量误差最小, 在对比度为 0.8~1.0 之间时, 测量误差随对比度的增大呈振荡变小的趋势, 且在对比度为 0.96 时, 测量误差最小。因此将 10 pixel 的光栅周期和 0.96 的光栅条纹对比度作为光栅的优化参数, 可以有效地提高 Stoilov 算法的测量精度。最后, 实验结果也验证了该方法的可行性。该优化设计对提高 Stoilov 算法的测量精度有一定的参考价值。

参 考 文 献

- 1 G Stiolov, T Dragostinov. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 1997, 28(1): 61-69.
- 2 Jiang Zhenyu, Miao Hong, Zhang Qingchuan, et al.. Weighted phase unwrapping based on analysis of intensity modulation for

- phase-shifting interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1032-1035.
- 蒋震宇, 缪泓, 张青川, 等. 调制度分析在等步长相移法相位展开中的应用[J]. *光学学报*, 2004, 24(8): 1032-1035.
- 3 Luo Zhiyong, Chen Zhaohui, Gu Yingzi, et al.. Five-bucket phase-shifting algorithm based on numerical simulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1687-1690.
- 罗志勇, 陈朝晖, 顾英姿, 等. 基于数值模拟的高准确度五步相移算法研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1687-1690.
- 4 Lü Xiaoxu, Zhong Liyun, Zhang Yimo. A method of phase-shifting measurement by the difference of phase-shifting interferograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(4): 604-605.
- 吕晓旭, 钟丽云, 张以谟. 通过相移条纹图差分测定相移量的方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(4): 604-605.
- 5 Xu Xingfen, Cao Yiping. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 733-737.
- 许幸芬, 曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 733-737.
- 6 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512003.
- 郑东亮, 达飞鹏. 提高光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术[J]. *光学学报*, 2012, 31(5): 0512003.
- 7 Zheng Dongliang, Da Feipeng. Double-step phase-shifting algorithm for fringe projection measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512004.
- 郑东亮, 达飞鹏. 双步相移光栅投影测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512004.
- 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): 1162-1163.
- 李勇, 苏显渝. 一种大视场相位轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(8): 1162-1163.
- 9 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): 226-227.
- 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): 226-227.
- 10 Yuankun Liu, Xianyu Su, Meihua Jiang. Shape measurement for reflector based on phase-shift and incoherent imaging [J]. *J Optoelectronics Laser*, 2006, 17(4): 458-463.
- 11 Libing Zhou, Xianyu Su. Effect of the digital camera focusing error on measurement precision of the PMP[J]. *J Optoelectronics Laser*, 2003, 14(6): 616-620.
- 12 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(2): 260-261.
- 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(2): 260-261.
- 13 Qian Kemao, Wu Xiaoping. Theoretical analysis of Stoilov algorithm in phase shifting interferometry [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(1): 13-16.
- 钱克矛, 伍小平. 相移技术中五步等步长 Stoilov 算法的性能分析[J]. *光学技术*, 2001, 27(1): 13-16.

栏目编辑: 何卓铭