

一种抑制相位测量轮廓术饱和误差的方法

赵婧¹ 王永昌² 刘凯¹

(¹ 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610064; ² KLA-Tencor, Milpitas, CA 95035, USA)

摘要 当利用相位测量轮廓术进行三维物体表面重建时,如果物体表面反射率很大,通过照相机捕获的光栅图像会发生光强度饱和现象,光栅光强度饱和会造成三维重建时的相位误差。对因光栅光强度饱和而导致的相位误差进行研究,并建立每个像素点各帧光强度值的数学模型,提出了一种利用未饱和光强值直接求解相位的新方法。通过仿真和实验分别验证了提出的算法的有效性。仿真结果表明,采用修复算法计算的相位,其误差的均方根值比修复前减小了92.5%;实验中利用该算法求得的相位误差,其均方根值比修复前的相位误差均方根值最多减小了82.8%。

关键词 测量; 相位测量轮廓术; 误差抑制算法; 光强度饱和; 相位误差

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1008001

New Method of Restraining the Saturated Error in Phase Measuring Profilometry

Zhao Jing¹ Wang Yongchang² Liu Kai¹

(¹ School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

² KLA-Tencor, Milpitas, CA 95035, USA

Abstract In three-dimensional (3D) scanning via phase measuring profilometry, if there exists saturation in captured patterned images, the accuracy of reconstructed 3D point clouds will be ruined. The phase error caused by saturated pixel values is studied, and a mathematical model for the error is derived. With such a model, a novel algorithm is proposed to minimize the phase error by employing unsaturated pixel values. The proposed method is proved by both simulation and experiment, i. e. , analysis of the root mean square error of the corrected phase will show a 92.5% reduction in phase error in simulation, and an 82.8% reduction in phase error in the experiment.

Key words measurement; phase measuring profilometry; error-restraining algorithm; light intensity saturation; phase error

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 100.2650

1 引言

相位测量轮廓术(PMP)是一种基于结构光的三维(3D)重建技术,采用正弦条纹投影和数字相移技术,具有高精度、非接触性等优点^[1-4],被广泛应用于工业制造、医学研究、文物数字化等领域。影响PMP测量精度的因素有很多,如投影仪和照相机的非线性^[5-8]、光强灰度量化误差^[9-10]、相移机构的相移误差^[11-12]、标定误差^[13-14]等。由于照相机

在采集光栅光强度时是有上限的,故光栅局部光强度饱和同样是产生相位误差的原因之一。

局部光强度饱和是指,在对物体进行扫描时,由于物体表面的反射率过大,导致部分像素点的光强度过强,超过了照相机采集卡的量化范围,过强的光强度在采集过程中被量化为采集卡的上限,即光强度饱和。光强度饱和会引起三维测量中的相位误差。目前,针对抑制光强度饱和引起的相位误差的

收稿日期: 2013-04-12; 收到修改稿日期: 2013-05-08

基金项目: 四川大学引进人才科研启动经费(2082204164059)

作者简介: 赵婧(1988-),女,硕士研究生,主要从事主动立体视觉和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: mirror_sc@126.com

导师简介: 刘凯(1973-),男,教授,硕士生导师,主要从事计算机机器视觉、主动与被动立体视觉和数字图像处理等方面的研究。E-mail: kailiu@scu.edu.cn(通信联系人)

研究有很多。现有的研究主要有两种思想:抑制光强度饱和的发生,和直接利用含有光强度饱和的光栅求解相位。

抑制光强度饱和的发生是指,通过调整被投射光栅的最大灰度值,或调整照相机的曝光时间及光圈大小,从而达到被采集的光栅不饱和的目的。Zhang 等^[15]提出通过对照相机的控制,自动调整曝光时间抑制光强饱和的发生,这种方法对硬件有很高的要求,在工业上的成本代价高。Waddington 等^[16]提出预测环境光强度,调整投射的正弦波的最大灰度值,从而避免饱和的发生,这是以牺牲非饱和区域内的信噪比为代价的。

直接利用含有光强度饱和的光栅求解相位是指,当照相机捕获的光栅中存在光强度饱和时,直接利用含有饱和值的光强度值求解相位。Hu 等^[17-19]提出基于相移技术的误差抑制算法,这种方法是利用非饱和光栅强度求得相位,但当相移量不同或饱和光栅帧数不同时,相位计算公式是不同的,算法复杂且对饱和系数^[17]有所限制。Li 等^[20]提出曲线拟合法,该方法利用像素点上的非饱和光强度值,通过迭代的方法,拟合一条完整的正弦曲线,再利用正弦曲线上的光强度值求相位,从而减少相位误差,这种方法的缺点是迭代的计算量大且精度不高。

尽管很多学者研究了饱和对相位误差的影响及其误差抑制的方法,但是,对于普遍的运用 PMP 进行三维测量的工程中,仍没有一个统一的公式来计算饱和时的相位。本文分析了光强度饱和对传统的相位测量轮廓术的影响,根据饱和和像素点上各帧光栅光强度值,建立数学模型,进而改进了传统的 PMP 相位计算公式。利用新的相位计算公式能直接求解发生光强度饱和时的相位,亦能计算未饱和时的相位。仿真结果及实验验证了该算法能较精准地计算饱和时的相位,很好地修复了饱和引起的相位误差,具有可行性。

2 基本原理与方法

2.1 相位测量轮廓术原理

PMP 系统由投影仪、照相机和处理单元(普通计算机)组成,投影仪投射一组相移一定的正弦波光栅条纹到被测物体表面^[21-22],光栅经被测物体表面的深度信息调制,由照相机同步捕获调制后的光栅图像,当不考虑饱和和光强时,被捕获第 n 帧光栅的 (x^c, y^c) 像素点的光强度值 I_n^c 为

$$I_n^c(x^c, y^c) = A^c + B^c \cos\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (1)$$

式中上标 c 表示从照相机捕获的图像中直接或间接得到的物理值, A^c 是该像素点的平均光强,可通过如下公式计算:

$$A^c = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c. \quad (2)$$

B^c 是该像素点的光强调制幅值,表达式为

$$B^c = \frac{2}{N} \sqrt{(B_R^c)^2 + (B_I^c)^2}, \quad (3)$$

式中 $B_R^c = \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$, $B_I^c = \sum_{n=0}^{N-1} I_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$ 。 ϕ 是相位值,包含了被测物体表面的深度信息,在光栅总帧数 $N \geq 3$ 时,可以由光强度 I_n^c 计算得到:

$$\phi = \arctan\left(\frac{B_I^c}{B_R^c}\right), \quad (4)$$

被测物体的三维坐标可以由 (x^c, y^c, ϕ) 得到,如文献^[23]中所述。

2.2 饱和引起相位误差的分析

然而,由于照相机采集卡对光强度的量化是有上限的,若物体表面反射率过大,导致部分像素点的某一帧或者某几帧的 I_n^c 过大,大于照相机的量化上限,则在采集过程中,大于量化上限的光强被量化为采集卡的最大值 M_0 ($M_0 = 2^H - 1$, H 是照相机量化等级),造成光强度饱和。当只考虑饱和对照相机采集过程的影响时,照相机的采集过程可以被描述为

$$\bar{I}_n^c(x^c, y^c) = \begin{cases} I_n^c(x^c, y^c), & I_n^c < M_0 \\ M_0, & I_n^c \geq M_0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 \bar{I}_n^c 是照相机采集到的像素点 (x^c, y^c) 上的第 n 帧光强度值; I_n^c 是该像素点第 n 帧的实际光强度值, I_n^c 和 \bar{I}_n^c 在时域上均是含有 N 个元素的一维数组。那么该像素点上,照相机采集到的光栅光强和实际光强的光强误差为

$$\Delta I_n^c(x^c, y^c) = \bar{I}_n^c(x^c, y^c) - I_n^c(x^c, y^c), \quad (6)$$

式中 ΔI_n^c 是光强误差。那么,由饱和引起的光强误差可以表示为

$$\Delta I_n^c(x^c, y^c) = \begin{cases} 0, & I_n^c < M_0 \\ M_0 - I_n^c(x^c, y^c), & I_n^c \geq M_0 \end{cases}. \quad (7)$$

ΔI_n^c 可以表示光强度饱和的程度。结合(4)式和(6)式,可以求得因光强误差导致的相位误差为

$$\Delta\phi = \frac{2}{NB^c} \sum_{n=0}^{N-1} \sin\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right) \Delta I_n^c. \quad (8)$$

可以看出,相位误差随光栅总帧数 N 的增加而减小,与光强调制 B^c 成反比。当发生光强度饱和时,光强误差 ΔI_n^c 不为零,导致了相位误差,相位误差的大

小与光强饱和的程度有关,即被测物体表面反射率很大引起的光强饱和所导致的相位误差,比反射率相对较小引起的光强饱和导致的相位误差要小。

虽然增加被投射光栅总数可以有效减小因光强误差引起的相位误差,但为了保证实际测量的实时性和准确性,不能投射大量的光栅到被测物体,且抑制饱和引起的相位误差来提高测量精度是必不可少的。

2.3 光强饱和模型及抑制相位误差算法

在实际中,当采集到的光强度值为 M_0 时,无法准确地分辨这是真实的光强度值,还是由于饱和而被量化为 M_0 的饱和光强度。实际测量中真实光强度值恰好为 M_0 的情况很少,为了方便研究,认为当采集到的光强度值为 M_0 时,即发生光强度饱和。

针对每个像素点 (x^c, y^c) 均定义一个离散函数 $f(n)$ 和一个系数 λ 为

$$f(n) = \begin{cases} 0, & \bar{I}_n^c < M_0 \\ 1, & \bar{I}_n^c = M_0 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0, & f(n) = 0 \\ 1, & f(n) \neq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

$f(n)$ 是长度为 N 的一维数组; λ 表示该像素点上是否发生光强度饱和。当 $\lambda = 0$ 时表示该像素点上各帧光强度值未发生饱和; $\lambda = 1$ 表示该像素点上发生了光强度饱和现象。例如投射 5 帧正弦波光栅到物体表面,照相机捕获的图像中,像素点 (x^c, y^c) 上第 2 帧和第 3 帧的光强度值为 M_0 , 那么该像素点的 $f(n) = [0, 1, 1, 0, 0], \lambda = 1$ 。

这样,结合(1)式和(9)、(10)式,(5)式中照相机采集到的像素点 (x^c, y^c) 上其各帧光强度值 \bar{I}_n^c 可以被描述为

$$\bar{I}_n^c = I_n^c - \lambda f(n)(I_n^c - M_0) = I_n^c + \lambda f(n)(M_0 - A^c) - \lambda f(n)B^c \cos\left(\phi - \frac{2\pi n}{N}\right). \quad (11)$$

因投影仪与照相机在计算机的控制下同步地投射光栅与捕获光栅,且投射光栅的初始相位值为零,故被捕获的光栅不存在非零初始相位,因此记

$$I_{CN} = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}_n^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) = B_R^c + \lambda \sum_{i=1}^k (M_0 - A^c) \cos \theta_i - \lambda \sum_{i=1}^k B^c \cos(\phi - \theta_i) \cos \theta_i, \quad (12)$$

式中 k 表示这一像素点上光强度饱和的总帧数; θ_i 表示光强度饱和帧的相移值,是一个数组,记为 $\theta_i = 2\pi n_i/N, i = 1, 2, \dots, k, n_i$ 是饱和帧的相移索引值。按上例假设,像素点 (x^c, y^c) 上第 2, 3 帧图像光强值饱和,那么 $k = 2, \theta = [2\pi/5, 4\pi/5]$ 。

同样,记

$$I_{SN} = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}_n^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) = B_I^c + \lambda \sum_{i=1}^k (M_0 - A^c) \sin \theta_i - \lambda \sum_{i=1}^k B^c \cos(\phi - \theta_i) \sin \theta_i, \quad (13)$$

$$I_N = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{I}_n^c = NA^c + \lambda k (M_0 - A^c) - \lambda \sum_{i=1}^k B^c \cos(\phi - \theta_i). \quad (14)$$

为了简化(12)~(14)式,定义如下系数:

$$\alpha = 1 + \frac{2\lambda}{Nk} \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right)^2 - \frac{k}{N} - \frac{\lambda}{N} \sum_{i=1}^k \cos 2\theta_i - \frac{2\lambda}{(N-k)k} \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right)^2, \quad (15)$$

$$\beta = \frac{2\lambda}{Nk} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right) - \frac{\lambda}{N} \left(\sum_{i=1}^k \sin 2\theta_i \right) - \frac{2\lambda}{(N-k)k} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right), \quad (16)$$

$$\gamma = -\frac{\lambda N}{(N-k)k} I_N \cdot \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right) + \frac{\lambda}{k} \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right) + \frac{\lambda M_0 N}{N-k} \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right), \quad (17)$$

$$\sigma = 1 + \frac{2\lambda}{Nk} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right)^2 - \frac{k}{N} + \frac{\lambda}{N} \left(\sum_{i=1}^k \cos 2\theta_i \right) - \frac{2\lambda}{(N-k)k} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right)^2, \quad (18)$$

$$\omega = -\frac{\lambda N}{(N-k)k} I_N \cdot \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right) + \frac{\lambda}{k} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right) + \frac{\lambda M_0 N}{N-k} \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right), \quad (19)$$

如此,(12)~(14)式可写为

$$\begin{bmatrix} \alpha & \beta & 0 \\ \beta & \sigma & 0 \\ \frac{2\lambda}{N} \sum_{i=1}^k \cos \theta_i & \frac{2\lambda}{N} \sum_{i=1}^k \sin \theta_i & k - N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_R^c \\ B_I^c \\ A^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{CN} - \gamma \\ I_{SN} - \omega \\ -I_N + kM_0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

求解(20)式,得到

$$B_I^c = \frac{\alpha \cdot I_{SN} - \beta \cdot I_{CN} - \alpha\omega + \gamma\beta}{\alpha\sigma - \beta^2}, \quad (21)$$

$$B_R^c = \frac{\sigma \cdot I_{CN} - \beta \cdot I_{SN} - \gamma\sigma + \beta\omega}{\alpha\sigma - \beta^2}. \quad (22)$$

计算出 B_I^c 和 B_R^c 后,由(4)式,便可得到该像素点对应的相位值 ϕ ,用(3)式得到其光强调制 B^c 。

该像素点的平均光强 A^c 为

$$A^c = \frac{I_N + \frac{2\lambda}{N} B_R^c \left(\sum_{i=1}^k \cos \theta_i \right) + \frac{2\lambda}{N} B_I^c \left(\sum_{i=1}^k \sin \theta_i \right) - kM_0}{N - k}. \quad (23)$$

文中提出的算法模型是建立在理想情况下的,即像素点上的非饱和光强度值符合正弦波变化。然而在实际应用中,很多商业投影仪会存在 Gamma 形变或镜头成像畸变,可以先利用文献[5]中的方法,进行 Gamma 校正,然后利用本文算法求解相位。该算法是对传统的 PMP 相位公式的改进,改进后的公式不仅能计算未发生光强饱和的像素点的相位,也能用于计算发生饱和时的相位。在不考虑非线性形变等噪声时,本文算法可以利用不小于 3 帧的非饱和光栅光强计算相位,算法的精度随有效光栅帧数的增加而提高。在第 4 节的实验中,验证了该算法的实际意义。

3 算法的模拟仿真

为了直观地验证本文算法的有效性,数值模拟一个三维的立体半球凸起面,如图 1 所示,半球的半径为 100 mm,设定半球底部的反射率为 0.5,反光率随着半球高度的增加而均匀增大,半球顶部的反

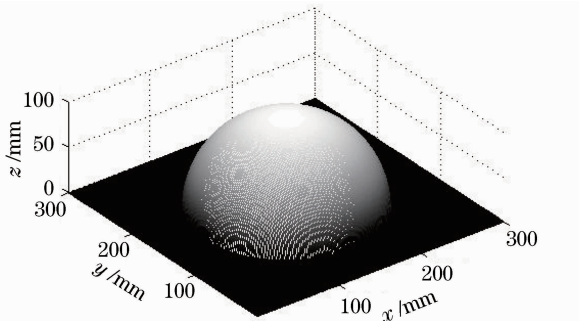


图 1 模拟半球

Fig. 1 Simulated hemisphere

射率为 0.9。

设定采集卡量化上限为 255,数值模拟投影仪投射相移量为 $\pi/4$ 频率为 1 Hz 的正弦波光栅到半球表面,仿真过程中不考虑白噪声影响,设定半球顶部的饱和系数最大值为 $K=3.18$,该最大饱和系数大于 2.57,超过了胡而已等^[19]提出的基于六步相移法的饱和抑制算法的修复范围。采用传统算法、胡氏算法和本文提出的算法,分别对半球的三维形貌进行测量,图 2(a)~(c)为采用三种不同方法后的相位误差分布情况。

图 2(a)是利用传统算法即修复前的相位误差,其均方根(RMS)值是 0.0226,从图中可以看出,该误差呈现锯齿形变化^[17],造成相位误差的主要原因是光强度饱和。图 2(b)是利用胡氏算法修复饱和后的相位误差,其 RMS 值为 0.0029,可以看出,由于半球顶部的饱和系数超过了胡氏算法的修复范围,所以该部分仍存在较大的相位误差。图 2(c)是采用本文算法求得的相位误差,误差 RMS 值为 0.0017,误差减少了 92.5%。用文中算法修复后存在相位误差的主要原因是,在模拟采集卡的数值离散化过程中,存在量化误差,当发生饱和时,用于计算相位值的有效光栅帧的个数减少,故在计算时量化误差引起的相位误差变大^[10],因此利用本文算法计算相位存在相位误差。

为了比较在光强饱和时频率对相位误差的影响,模拟投射相移量为 $\pi/4$,频率分别为 4 Hz 和 8 Hz 的光栅到同样的半球表面。表 1 中列出在频率分别为 1、4、8 Hz 时,利用文中算法和利用传统算

法计算相位误差的 RMS 值。

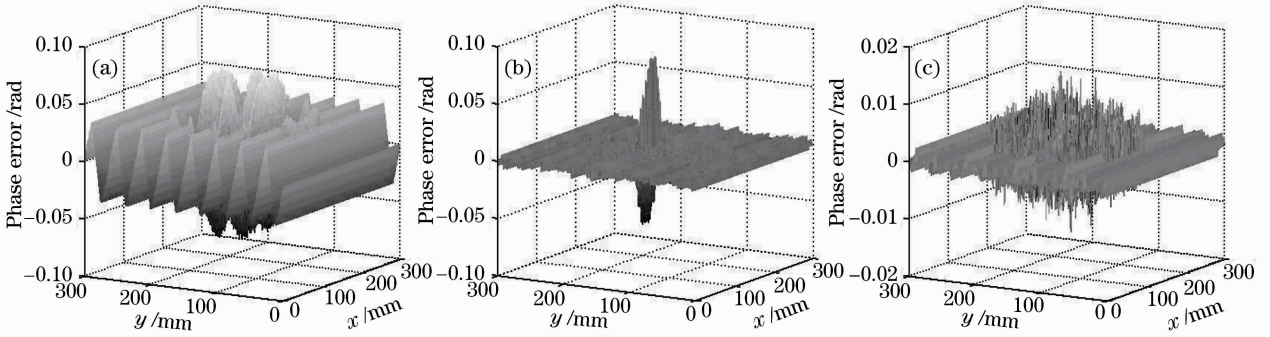


图 2 相位误差。(a) 传统算法；(b) 胡氏的抑制饱和算法^[19]；(c) 本文提出的方法

Fig. 2 Phase errors of (a) conventional algorithm, (b) Hu's^[19] phase-recovering algorithm and (c) proposed method in this paper

表 1 相位误差的均方根值

Table 1 RMS of phase error

RMS of phase error	$f=1$	$f=4$	$f=8$
Conventional algorithm	0.0226	0.0057	0.0028
Proposed method in this paper	0.0017	4.1851×10^{-4}	2.0869×10^{-4}

可以看出,随着频率的增加,传统算法计算相位的相位误差减小,即高频能减小饱和引起的相位误差;同等频率时,文中算法计算的相位误差比用传统算法计算的相位误差小很多,且该算法精度随频率的增加而提高。因高频时,光强度的信噪比高,故高频可以有效抑制光强度误差所引起的相位误差^[24],提高了算法的精度。

仿真结果表明,当发生光强度饱和时,本文算法可以有效抑制光强度饱和引起的相位误差。

4 实验验证及其结果分析

通过实验来进一步验证算法的现实意义,在 Microsoft Visual Studio 2005 环境中,利用 C++ 编程来控制投影仪和照相机,照相机型号为 Prosilica GC640M,量化等级为 8 bit,分辨率为 640 pixel ×

480 pixel,投影仪系统由 TI Discovery 1100 传感器、ALP-1 控制器和 225ANSI 照明发光二极管的光学模块组成,投影仪最大输出频率为 150 frame/s,分辨率为 1024 pixel × 768 pixel,像素灰度量化等级为 8 bit。相机和投影仪利用外部触发电路进行同步。实验前期,利用文献[5]中的方法,测定系统的 Gamma 均值为 1.01。采用一个白色的平板作为实验对象,平板表面的反射率较大,在三维重建时,发生部分光强度饱和。

因为实验主要验证在光强度饱和时该算法的有效性,所以利用取 20 组数据求平均的方法来消除白噪声等干扰^[25],投射相移量为 $\pi/2$ 频率为 4 Hz 的正弦波光栅到待测平板上,图 3(a)为第一帧的平板变形条纹图,图 3(b)是该帧图像的第 372 列的光强度值,可以看出,图像中产生部分光强度饱和。为了

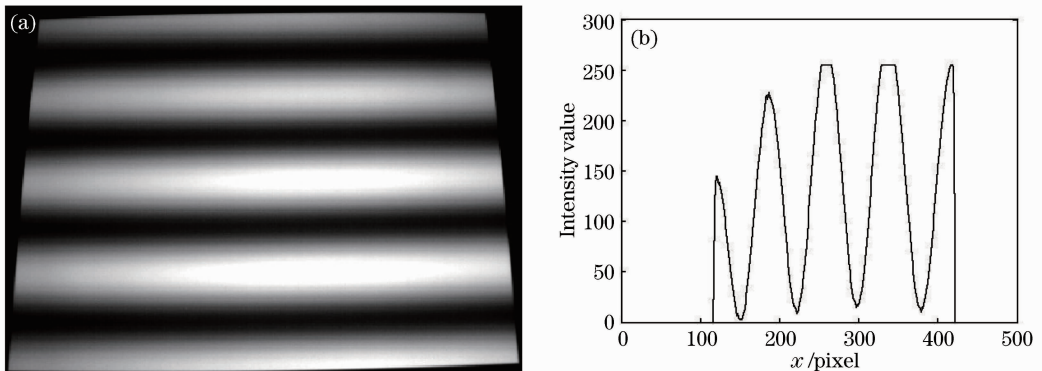


图 3 (a) 被测平板的一帧变形条纹；(b) 第 372 列的光强度值

Fig. 3 (a) One saturated image; (b) cross-section intensity value at the 372th column

比较光栅总数 N 对光强饱和引起的相位误差的影响,以及光栅总数对本文算法修复效果的影响,在同等饱和程度下投射相移量为 $\pi/3$ 频率为 4 Hz 的正弦波光栅进行三维测量。然后调节光圈大小和曝光时间,抑制饱和的产生,投射同样的正弦波条纹到平板上,由这组数据求得的相位作为被测平板的理论相位值。

投射相移量为 $\pi/2$ 频率为 4 Hz 的光栅发生光强度饱和时,分别用传统算法和文中提出的算法进行三维重建。图 4(a)和(b)分别为重建三维立体平

板正面图,图中条纹颜色的深浅表示三维立体表面凹凸不平的程度。再用这两种算法计算出的相位与平板的理论相位值相比较,图 5(a)为用传统算法求平板相位的相位误差,图 5(b)是利用所提出算法求得的平板相位的相位误差,图 6 中虚线是修复前第 372 列的相位误差,实线是用文中算法修复后第 372 列的相位误差。如图 6 中所示,修复前的相位误差呈锯齿形变化,根据文献[17]可知,该部分的相位误差主要由光强度饱和所造成,修复后的相位误差比修复前减小,接近于 0 且随机分布。

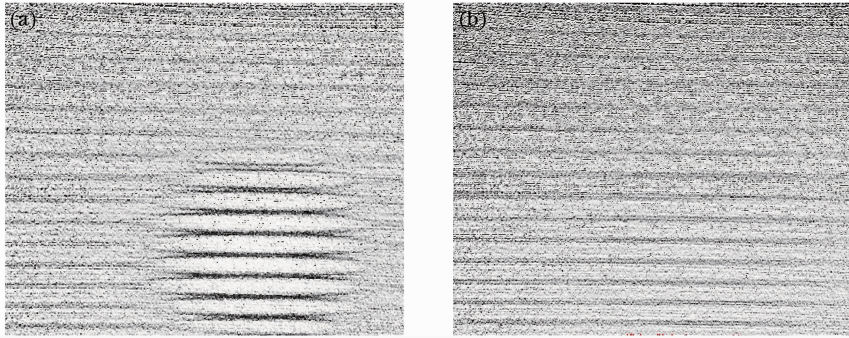


图 4 平面的三维重建图。(a) 传统算法; (b) 文中提出的方法

Fig. 4 3D reconstruction of plane using (a) conventional algorithm and (b) proposed method in this paper

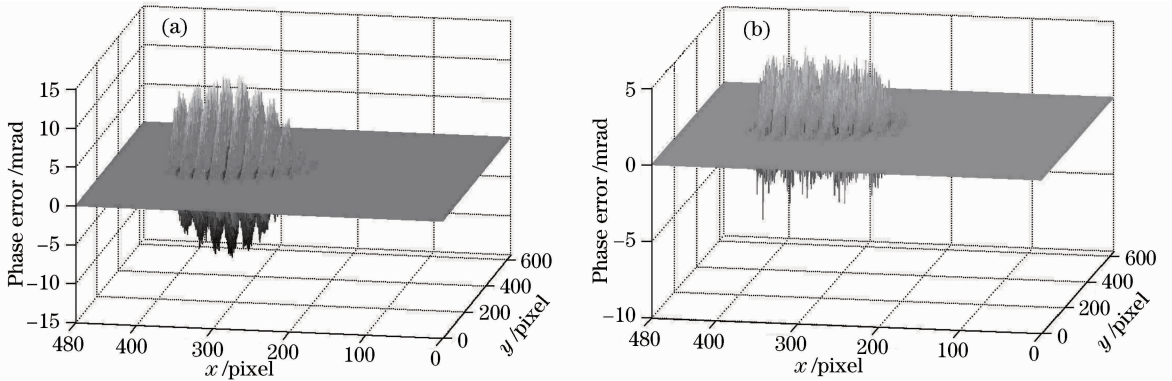


图 5 相位误差。(a) 传统算法; (b) 本文提出的方法

Fig. 5 Phase errors of (a) conventional algorithm and (b) proposed method in this paper

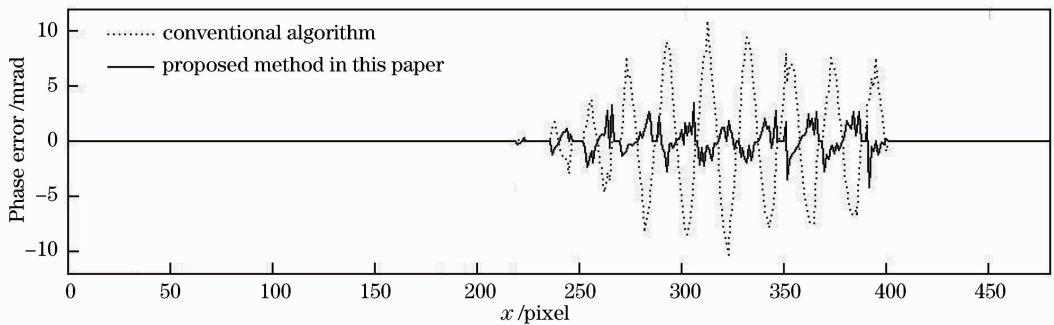


图 6 第 372 列的相位误差

Fig. 6 Cross-section phase error at the 372th column

从图 5(b)和图 6 中的实线部分可以看出,利用提出的算法,并没有完全消除相位误差。如图 5(b)所示,中间区域存在相位误差分布,而边缘部分的误差较小,其主要原因是饱和光强区主要集中在中间部分。从结果可以看出,利用该算法进行相位计算,当光强非饱和时,该算法能较为精准的计算相位;而当光强饱和时,本文算法亦能显著降低因饱和而产生的相位误差。

投射相移量为 $\pi/3$ 频率为 4 Hz 的光栅并发生光强饱和时,分别用传统算法和文中算法计算平板的相位值。表 2 中列出了投射 4 帧光栅和投射 6 帧

表 2 修复前后相位误差值
Table 2 Phase errors before and after recovery

	$N = 4$, before/after correction	$N = 6$, before/after correction
RMS of phase error	0.0041/0.0012	0.0023/3.9532 $\times 10^{-4}$
Maximum phase error	0.0118/0.0063	0.0063/0.0027

从表 2 中可以看出,用传统算法计算的相位误差随投射的光栅总数 N 的增加而减小;利用本文算法计算的相位仍存在相位误差,但算法的精度随 N 的增加而提高。本文算法计算相位的相位误差非零的原因是,在实际测量中,存在其他一些噪声会造成相位误差,相位误差随着用于计算相位的光栅帧数的增加而减小,当发生饱和时,用于计算相位的有效光栅帧数必定小于总光栅帧数,因此,饱和时用本文算法计算的相位有非零误差。同样本文算法精度随 N 的增加而提高的原因在于,随着光栅总数 N 的增加,在同等饱和程度下,用于计算该像素点相位的有效光栅帧数增加,因此算法精度提高。例如当增加光栅总帧数,投射 6 帧正弦波光栅进行三维重建时,像素点(370,372)有 2 帧光强度饱和,那么该像素点的有效光栅帧数为 4 帧,利用这 4 帧有效光强计算得该点相位值为 5.3555;而投射 4 帧正弦波光栅时,相同像素点(370,372)有 1 帧光强饱和,有效光强为 3 帧,计算该点的相位值为 5.3559,该点的理论相位值为 5.3553,可以看出,用 4 帧有效光强计算得的相位值,比用 3 帧有效光强计算得的相位值更精准。故本文算法精度随光栅总帧数 N 的增加而提高。

5 结 论

对 PMP 中部分光强饱和导致的相位误差进行研究,根据照相机捕获的一个像素点上各帧的光强值的波形特征,建立数学模型,利用统一的公式解决饱和和引起相位误差的问题。理论分析、模拟仿真和

光栅发生光强饱和时,利用本文算法修复前后的相位误差 RMS 值和最大值。当投射 4 帧光栅时,修复前相位误差的 RMS 值是 0.0041,最大值是 0.0118;利用本文算法修复后的相位误差的 RMS 值是 0.0012,最大值是 0.0063。修复后比修复前相位误差的 RMS 值减小了 72.1%,最大误差减小了 46.6%。当投射 6 帧光栅时,修复前后相位误差的 RMS 值分别为 0.0023 和 3.9532×10^{-4} ,相位误差最大值分别为 0.0063 和 0.0027。修复后比修复前相位误差的 RMS 值减小了 82.8%,最大误差减小了 57.1%。

实验结果均表明:本文提出的算法能有效抑制图像光强饱和和导致的相位误差,且算法精度随频率的增加及有效光栅帧数的增加而提高。

参 考 文 献

- 1 M Halioua, H Liu. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry[J]. Opt & Lasers in Eng, 1989,11(3): 185-215.
- 2 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 792-796.
李万松,苏礼坤,苏显渝. 位相检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 792-796.
- 3 F Chen, G Brown, M Song. Overview for the three-dimensional shape measurement using optical method[J]. Opt Eng, 2000, 39(1): 10-22.
- 4 Zhang Rui, Cao Yiping, He Dinggao. New method for improving the accuracy of real-time three-dimensional measurement based on a composite grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008005.
张睿,曹益平,何定高. 一种提高复合光栅实时三维测量精度的方法[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008005.
- 5 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.
- 6 Suodong Ma, Chenggen Quan, Rihong Zhu, et al.. A fast and accurate gamma correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry[J]. Opt Commun, 2012, 285(5): 533-538.
- 7 Suodong Ma, Rihong Zhu, Chenggen Quan, et al.. Flexible structured-light-based three-dimensional profile reconstruction method considering lens projection-imaging distortion[J]. Appl Opt, 2012, 51(13): 2419-2428.
- 8 Zhang Xu, Zhu Limin. Phase error model from Gamma distortion and Gamma calibration[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412006.
张旭,朱利民. Gamma 畸变的相位误差模型与 Gamma 标定技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412006.

- 9 Oleksandr A Skydan, Francis Lilley, Michael J Lalor, *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.
- 10 Zhao Bing, Guo Bin, Fang Ruhua, *et al.*. Effect of quantization error on the computed phase of phase-shifting measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(12): 1767–1772.
赵兵, 郭彬, 方如华, 等. 相位移法中的量化误差效应 [J]. *光学学报*, 1996, 16(12): 1767–1772.
- 11 Wang Liwu, Su Xianyu, Zhou Libin. Correction algorithm of random phase shifting errors in phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 614–618
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.
- 12 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Two error analyses of grating projection profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(3): 376–379.
郝煜栋, 赵洋, 李达成. 光栅投影式轮廓测量中两种误差的分析 [J]. *光学学报*, 2000, 20(3): 376–379.
- 13 Xiao Yanshan, Cao Yiping, Wu Yingchun, *et al.*. A fast calibration method for the phase measuring profilometry [J]. *J Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(1): 164–168.
肖焱山, 曹益平, 武迎春, 等. 相位测量轮廓术中一种快速的系统标定方法 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(1): 164–168.
- 14 Xue Junpeng, Su Xianyu. Camera calibration with single image based on two orthogonal one-dimensional objects [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 32(1): 0115001.
薛俊鹏, 苏显渝. 基于两个正交一维物体的单幅图像相机标定 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115001.
- 15 S Zhang, S T Yau. High dynamic range scanning technique [C]. *SPIE*, 2008, 7066: 70660A.
- 16 Waddington C, Kofman J. Sinusoidal fringe-pattern projection for 3-D surface measurement with variable illuminance [C]. 2010 International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT), 2010.
- 17 E Hu, Y He, Y Chen. Study on a novel phase-recovering algorithm for partial intensity saturation in digital projection grating phase-shifting profilometry [J]. *Optik*, 2010, 121(1): 23–28.
- 18 Y Chen, Y He, E Hu. Phase deviation analysis and phase retrieval for partial intensity saturation in phase-shifting projected fringe profilometry [J]. *Opt Commun*, 2008, 281(11): 3087–3090.
- 19 Hu Eryi, Li Yan. Study of the phase-recovering algorithm for saturated fringe patterns in the projection grating phase-shifting profilometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 1137–1142.
胡而已, 李艳. 投影条纹相移法中图像饱和和误差抑制算法研究 [J]. *光子学报*, 2010, 39(6): 1137–1142.
- 20 Li Wansong, Su Xianyu. Phase unwrapping algorithm based on phase fitting reliability in structured light projection [J]. *Opt Eng*, 2002, 41(6): 1365–1372.
- 21 Kang Xin, He Xiaoyuan, Quan C. 3-D sensing using sinusoidal fringe projection and phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(12): 1444–1447.
康新, 何小元, Quan C. 基于正弦条纹投影的三维传感及其去包裹处理 [J]. *光学学报*, 2001, 21(12): 1444–1447.
- 22 Ye Hongna, Cao Yiping. Phase measuring profilometry based on triangular pattern grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(11): 1108001.
叶虹呐, 曹益平. 基于三角形分布光栅的相位测量轮廓术 [J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1108001.
- 23 K Liu, Y Wang, D L Lau, *et al.*. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5229–5244.
- 24 J Li, L G Hassebrook, C Guan. Optimized two-frequency phase-measuring-profilometry light-sensor temporal-noise sensitivity [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(1): 106–115.
- 25 P S Huang, Q J Hu, F Chiang. Double three-step phase-shifting algorithm [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(22): 4503–4509.

栏目编辑: 何卓铭