

采用二元编码的正弦光栅提高PMP测量速度和精度的方法

田紫霞 陈文静 苏显渝

四川大学电子信息学院光电系, 四川 成都 610064

摘要 利用误差扩散方法产生二元编码正弦光栅可以消除数字投影仪的非线性对投影光栅正弦性的影响,且能充分利用基于数字光处理技术(DLP)投影仪中数字微镜的二元高速开关特性,高速投影二元编码正弦光栅。投影仪分辨率不足会导致电子二元编码正弦光栅正弦性下降,从而影响测量精度。先对比了两种典型误差扩散编码算法:Floyd-Steinberg距离加权和Sierra Lite“蛇”形扫描获得的光栅的正弦性。然后针对目前DLP投影仪产生频率较高的二元编码正弦光栅时,二元编码正弦光栅的正弦性较差的问题,提出了两种改善方法:1)利用柱透镜卷积作用,在栅线方向上对二元编码正弦光栅进行平滑;2)组合多帧具有不同微结构的二元编码正弦光栅,来减小二元编码正弦光栅的误差,保证相位测量轮廓术(PMP)方法的测量精度。所提方法充分利用了DLP投影二值图像的高速特性,又明显改善了由于DLP分辨率有限导致的二元编码正弦光栅的正弦性较差的问题,实验验证了这两种方法的有效性。

关键词 相位测量轮廓术; DLP投影仪; 误差扩散; 二元编码正弦光栅

中图分类号 O438 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.121201

Method for Improving Accuracy and Measurement Speed of PMP Using Error Diffusion Binary Encoded Sinusoidal Grating

Tian Zixia Chen Wenjing Su Xianyu

Opto-Electronic Department, School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract Projecting a binary encoding sinusoidal grating calculated by the error diffusion algorithm can not only solve the problem of the effect on nonlinearity of a digital projector but also improve the projection speed by taking the advantage of binary high-speed switching characteristics of digital micro-mirror in digital light processing (DLP) projectors when a digital projector is used in the optical measurement system. As insufficient resolution of projector can degrade the quality of the electronic binary encoding sinusoidal fringe pattern, it influences the measurement accuracy further. Two typical encoding algorithms of error diffusion (Floyd-Steinberg distance weighted and Serpentine raster Sierra Lite) are firstly compared. Then, aimed at the problem that the quality of sinusoidal grating is not good enough to be suitable for the high accuracy measurement when high density binary encoding grating is projected by a DLP projector with lower resolution because of the less number of the sampling points in a grating period, two resolutions are proposed: One is that a cylindrical lens is introduced in the light path of the measurement system to smooth the resulted binary encoded sinusoidal grating along the grating line direction by the optical convolution operation of the lens. The other one is that superimposing multi-frame binary encoding sinusoidal gratings with different microstructure is used to reduce the standard error of the binary encoding sinusoidal grating and guarantee the accuracy of phase-shift measurement method. The proposed method not only takes the advantage of high-speed characteristics of DLP projectors for projecting binary images, but also improves the sinusoidal characteristic of the binary encoding

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-06-30; 网络出版日期: 2014-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61177010)、国家重大仪器专项(2013YQ49087901)

作者简介: 田紫霞(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学三维测量传感方面的研究。E-mail: 969434632@qq.com

导师简介: 陈文静(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: chenwj0409@scu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

sinusoidal grating caused by the limited resolution of DLP obviously. Simulations and experiments both verify the validity of the above two methods.

Key words phase measurement profilometry; DLP projectors; error diffusion algorithm; binary encoding sinusoidal grating

OCIS codes 120.5050; 050.2770

1 引言

光栅投影光学三维测量方法利用采集到的变形光栅图像中携带的相位信息来获得物体的三维形貌。该方法具有非接触、低成本和高精度等优点。其中相位测量轮廓术(PMP)通过获取多帧具有一定相移量的条纹图形,来完成高精度的面形测量,在生物医学、实物仿形、逆向工程、虚拟现实等领域获得了广泛应用^[1-5]。随着基于数字光处理技术(DLP)投影仪的出现和性能的提高,在PMP中,可利用DLP投影仪投影相移量准确可控的正弦结构光栅,从而消除了相移误差对PMP测量的影响。由于DLP的核心元件是数字微反射镜器件(DMD)^[6]——二元型开关元件,商用投影仪由于使用需要导致直接投影灰度正弦条纹时,存在非线性,且相机必须与投影仪同步,才可以得到误差较小的重构图像。目前常用的投影仪投影灰度编码图像时只能达到120 frame/s的速度,不适合于高速测量。然而DLP作为二元型的开关元件,在投影二值编码的图像时,可以达到非常高的投影速度(大于 10^4 frame/s)。DLPDiscoveryD4100投影仪甚至可以达到 3.255×10^4 frame/s,分辨率达到 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ^[7]。如何利用DLP投影二值图像的高速特性,用于高速三维测量成为人们关注的问题。如果能用DLP投影仪投影二元编码正弦光栅图案,再配合高速图像获取设备,PMP方法也能达到高速测量要求。

为了使得二值光栅具有正弦分布特性,S. Y. Lei和S. Zhang提出了二值光栅散焦技术^[7],通过数字投影仪投影二值方波图像结合散焦技术来得到正弦分布光场。该方法不需要校正投影仪非线性,然而,二值方波光栅散焦后,仍然存在大量的高次谐波,极大地影响了光栅正弦性,而且投影仪散焦量调节不当,还会导致对比度下降。脉冲宽度调制(PMW)^[9-11]可以用来减少散焦时高频谐波对光栅质量的影响,但是这种调制为一维方向上的优化,并且在光栅周期较大时效果较差。

采用误差扩散二元正弦投影模板^[12],利用光学系统的低通滤波特性在像面上可以形成高精度的正弦光场,得到正弦性较好的二元结构光场。目前存在多种误差扩散算法,本文仅考虑了两种典型误差扩散编码算法,即Floyd-Steinberg距离加权^[12-13]和Sierra Lite“蛇”形扫描^[14-16]法。当投影频率较高的二元编码正弦光栅时,由于DLP投影仪分辨率的限制,一个周期内样点数很少,二元编码正弦光栅存在正弦性较差的问题。本文提出两种改善方法:1)在投影光路上加柱透镜,利用柱透镜的一维散焦作用,在栅线方向上对二元编码正弦光栅进行高斯平滑;2)组合多帧具有相同周期、但微观编码结构不同的光栅,来减小单帧二元编码正弦光栅的误差。实验验证了这两种方法的有效性。本文所提出的方法,充分利用了DLP投影二值图像的高速特性,又明显改善了由于DLP分辨率有限导致的二元编码正弦光栅的正弦性较差的问题,提高了PMP测量时的精度。

2 PMP原理

PMP的原理如图1所示^[7],图中Grating为投影到被测物体上的多帧相移条纹,成像设备Camera(一般使用CCD)用于记录变形条纹图。投影系统的光轴 P_1P_2 与成像系统的光轴 L_1L_2 交于参考平面上的点 O , h 表示被测物体的高度, A 、 C 分别是过物面上过 D 点的入射/反射光线与参考平面的交点。被测物体的高度信息被编码在变形条纹图中,通过测量系统内存在的三角关系,就可以由解调出来的相位值计算出物体的高度分布。

投影一组相互之间存在一定相位差的正弦条纹图到被测物体表面上,CCD采集到的变形结构光场表示为

$$I_i(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + i\delta_i] \}, \quad (1)$$

这里 $i = 0, 1, 2, N - 1$, $N (\geq 3)$ 为相移次数, $R(x, y)$ 是物体表面不均匀反射率, $A(x, y)$ 是背景光强, $B(x, y)/A(x, y)$ 是条纹的对比度, $\phi(x, y)$ 是调制相位, δ_i 为相邻两帧条纹之间的相移量。

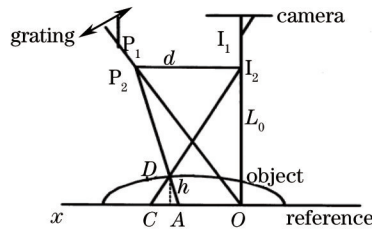


图1 PMP原理光路图

Fig.1 Light path diagram of PMP principle

用于PMP中的相移算法很多,比较常用的是满周期等步距算法^[18-19]。以标准四步相移法为例,相移移动的增量为 $\pi/2$,相应的四帧条纹图为

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= R(x,y)[A(x,y) + B(x,y)\cos\phi(x,y)], \\ I_2(x,y) &= R(x,y)\{A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) + \pi/2]\}, \\ I_3(x,y) &= R(x,y)\{A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) + \pi]\}, \\ I_4(x,y) &= R(x,y)\{A(x,y) + B(x,y)\cos[\phi(x,y) + 3\pi/2]\}. \end{aligned} \tag{2}$$

从上面的四个方程,可以得到物体表面的主值相位

$$\phi(x,y) = \arctan\left[\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)}\right]. \tag{3}$$

$\phi(x,y)$ 被截断在 $[-\pi, \pi]$,需对 $\phi(x,y)$ 进行相位展开得到连续相位图,通过相位和高度之间的对应关系计算出物体的高度分布。下面的工作,就是采用了四步相移算法。

另外,条纹的正弦性直接影响了PMP的测量精度,为了利用DLP投影正弦性好的结构条纹,可以对生成的数字正弦条纹进行误差扩散,得到二元编码正弦光栅模板,来保证投影速度和抑制投影的非线性。

3 二元误差扩散编码原理

误差扩散就是根据设定的阈值将当前图像像素量化为0或255两个灰度级,然后将当前像素的量化误差按一定比例扩散至相邻未处理的像素中,以减少整个编码面的量化误差,最后输出二值化图像。(4)式表示了误差扩散的原理,实质上是对当前图像的预测编码。

$$\tilde{I}(i,j) = I(i,j) + \sum_{k,l \in S} h(k,l)e(i-k,j-l), \tag{4}$$

式中 $I(i,j)$ 为原图像在 (i,j) 处的灰度值, $\tilde{I}(i,j)$ 为 $I(i,j)$ 加上周围像素扩散的量化误差后的灰度值, (i,j) 处像素的量化误差 $e(i,j)$ 通过一个二维权重函数 $h(i,j)$ 扩散至相邻未处理的像素中 $h(k,l)$ 是误差扩散的核函数, S 代表未处理的像素组成的扩散区域。如图2所示,中心像素 $d(0,0)$ 的误差向周围 $d(1,0), d(1,1), d(0,1), d(-1,1)$ 点扩散。然后根据阈值 T 把 $\tilde{I}(i,j)$ 处像素进行二值化,得到最终输出的二值化编码的图像像素的灰度值 $D(i,j)$,即

$$D(i,j) = \begin{cases} 255, & \tilde{I}(i,j) \geq T, \\ 0, & \tilde{I}(i,j) < T, \end{cases} \tag{5}$$

式中阈值 T 一般取 128。

量化误差 $e(i,j)$ 为 $\tilde{I}(i,j)$ 与输出像素的灰度值 $D(i,j)$ 之差

$$e(i,j) = \tilde{I}(i,j) - D(i,j). \tag{6}$$

上述步骤遍历整幅图像,最终得到二元编码正弦光栅图像。

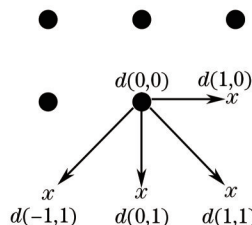


图2 二维误差扩散示意图

Fig.2 Schematic diagram of two dimensional error diffusion

选取不同的核函数 $h(m,n)$, 可以得到不同的二元编码正弦光栅图像。目前在 PMP 测量中, 两种最常用的误差扩散编码算法为 Floyd-Steinberg 距离加权算法^[18]和 Sierra Lite “蛇”形扫描算法^[16]。Floyd-Steinberg 距离加权核函数可以表示为

$$h(k,l) = \frac{1}{2(1+\sqrt{2})} \begin{bmatrix} - & x & \sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

对应的 $d(1,0) = d(0,1) = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\sqrt{2})}$, $d(-1,1) = d(1,1) = \frac{1}{2(1+\sqrt{2})}$ 。

Sierra Lite “蛇”形扫描方式, 奇数行从左到右二值化核函数和偶数行从右到左二值化核函数分别表示为

$$h(k,l) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} - & x & 2 \\ 1 & 1 & \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$h(k,l) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & x & - \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

在以上(7)~(9)式中, “-”表示已经处理过的像素, x 表示当前正在处理的像素。采用“蛇”形扫描可避免误差传递的流水效应。

随着 DLP 投影仪的广泛使用, 在 PMP 中, DLP 投影的电子正弦结构光栅的相移量可以精确控制。但 DLP 投影灰度正弦光场时, 存在非线性效应且投影速度受到限制。而 DLP 投影二值图像时, 不仅消除了投影的非线性, 部分投影仪的投影速度可高达 10^4 frame/s, 为 PMP 方法在高速测量中的应用提供了可能。为了利用 DLP 投影正弦性好的二元编码正弦光栅, 在一个正弦周期内, 二值样点数至少大于 100, 利用成像设备自身的低通滤波功能, 得到二元编码正弦光栅的正弦性很好^[12]。但是, 由于目前商用 DLP 投影仪的分辨率限制(绝大部分 DLP 分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$), 要投影密度达到测量要求的正弦光栅的二元编码图, 一个周期内样点的数目远小于 100。例如: 要投影 60 个条纹的二元编码正弦光栅, 则在栅线方向上, 每个周期不到 20 个样点, 降低了二元编码正弦光栅的正弦性, 影响到 PMP 的测量精度。为此, 提出两种提高二值光栅正弦度的方法: 1) 利用柱透镜卷积作用, 在栅线方向上对二元编码正弦光栅进行高斯平滑。在 DLP 投影仪前方添加一个柱透镜, 相当于实现了投影图像和柱透镜点扩展函数之间的卷积操作。二元编码正弦光栅由亮点和暗点构成, 旋转柱透镜, 使得柱透镜的点扩展函数引起二元编码正弦光栅的亮点和暗点均在栅线方向上弥散平滑。2) 组合多帧具有不同微观结构的光栅, 来减小误差。由于 K 幅噪声图像叠加后, 结果图像 $\bar{g}(x,y)$ 的噪声标准差与单帧图像的噪声标准差 $\sigma_{\eta(x,y)}$ 之间存在如下关系

$$\sigma_{\bar{g}(x,y)} = \frac{1}{\sqrt{K}} \sigma_{\eta(x,y)}. \quad (10)$$

下面通过模拟和实验验证这两种方法的有效性。

4 计算机模拟和分析

4.1 光栅正弦性

首先, 对比了 Floyd-Steinberg 距离加权和 Sierra Lite “蛇”形扫描误差扩散编码算法获得光栅的正弦性。

选取周期 T 分别为 16 pixel 和 60 pixel 的正弦条纹进行二元编码误差扩散。上述两种误差扩散算法得到的二元编码正弦光栅与灰度正弦光栅的差别如图 3 所示。图 3(a) 表示 $T=16 \text{ pixel}$ 时, 两种方法得到二元编码正弦光栅与灰度正弦光栅之差; 图 3(b) 表示 $T=60 \text{ pixel}$ 时的误差。可见这两种误差扩散编码算法获得的光栅正弦曲线基本吻合, 但是, 二元编码正弦光栅的正弦度的好坏依赖于一个周期内的样点数。

4.2 误差扩散光栅的相位计算

分析二元误差扩散正弦条纹一个周期内的像素点数对 PMP 测量精度的影响。考虑仿真设计的光栅密度要适合 PMP 测量的要求和目前投影仪的分辨率 ($1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$) 限制。设计周期 T 分别为 10, 16, 30, 40, 50, 60 pixel 的正弦条纹按误差扩散方式生成二元编码正弦光栅用于平面的测量, 采用 PMP 四步相移法获取截断相位, 进行相位展开获得连续相位图。将测量结果同拟合的标准平面作对照比较。模拟中, 成像装置的低通滤波能力, 利用高斯低通滤波来实现。图 4 为重建相位的误差随着样点数的变化情况。

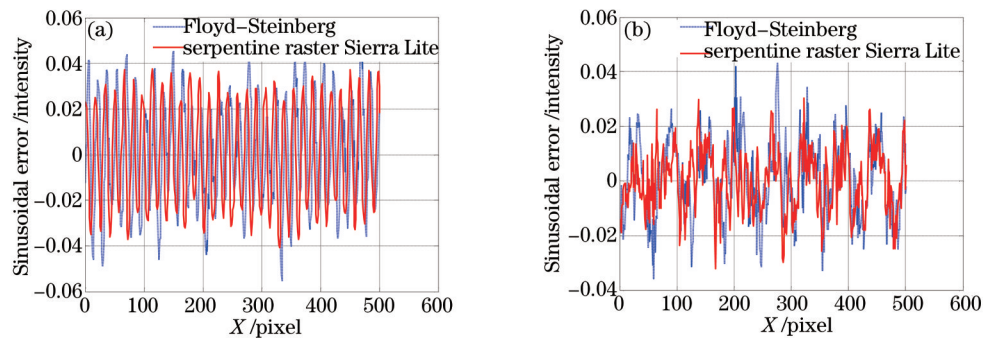


图3 Floyd-Steinberg 和 Sierra Lite 二元编码正弦光栅的正弦性误差。(a) 周期 $T=16$ pixel 时的正弦性误差;
(b) 周期 $T=60$ pixel 时的正弦性误差

Fig.3 Errors of Floyd-Steinberg and Sierra Lite algorithms. (a) Sinusoidal errors when $T=16$ pixel;
(b) sinusoidal errors when $T=60$ pixel

Floyd-Steinberg 距离加权和 Sierra Lite“蛇”形扫描这两种误差扩散编码算法获得光栅的相位标准差都在逐渐减小。Floyd-Steinberg 距离加权算法的相位标准差比 Sierra Lite“蛇”形扫描算法要小一些,但是两者没有相差很大,误差都是同一数量级上,尤其是光栅周期较大时。

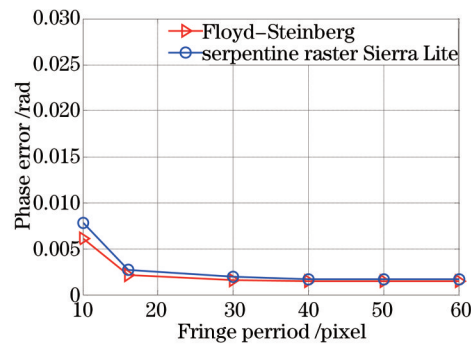


图4 Floyd-Steinberg 和 Sierra Lite 算法相位误差的比较

Fig.4 Comparison of phase standard errors using Sierra Lite algorithm and Floyd-Steinberg algorithm

由此可见误差扩散核的选取对二元编码正弦光栅正弦性的影响不大,对 PMP 方法的精度的影响也不大,所以在实际测量中,可任选一种误差扩散编码方法来实现正弦光栅二值化。以下的实验工作中,选择 Sierra Lite“蛇”形扫描误差扩散编码算法。

5 实验和分析

实验装置示意图由计算机(Computer)、投影仪(Projector)、柱透镜、CCD 组成,如图 5 所示。实验当中所使用的 CCD(MVCII-1M)、DLP 投影仪(EPSON EMP-280)均调整得到聚焦状态,计算机用于投影光栅。为了验证误差扩散方法得到的二元编码正弦光栅用于 PMP 的测量精度,对标准的平面进行了测量。将 PMP 方法测量得到的结果同拟合的标准平面作对比,计算出相位误差的标准差。

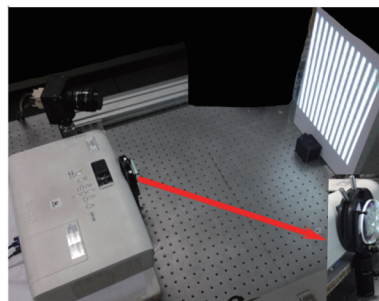


图5 实验装置图

Fig.5 Diagram of experimental apparatus

CCD采集到周期 $T=16$ pixel的条纹如图6(a)所示,光栅上存在颗粒点,影响了光栅的正弦性。图6(b)画出图6(a)中红线对应的几个周期。为了提高正弦性,采用了以下两种方法:

1) 在DLP投影仪和被测物体之间添加柱透镜,在垂直方向上通过光栅模板和柱透镜的卷积操作,实现在栅线方向上对二元编码正弦光栅进行平滑。图6(c)为加了柱透镜之后CCD采集回来周期 $T=16$ pixel的条纹,图6(d)为图6(c)中红线对应的剖面图。可以看出加了柱透镜之后采集回来的光栅质量得到了改善。图6(e)为测量光路中添加柱透镜前后对PMP测量的影响对比,加了柱透镜之后相位误差明显变小。可见利用柱透镜对二元编码正弦光栅的平滑操作来改善二元编码正弦光栅的质量,可以提高PMP的测量精度。

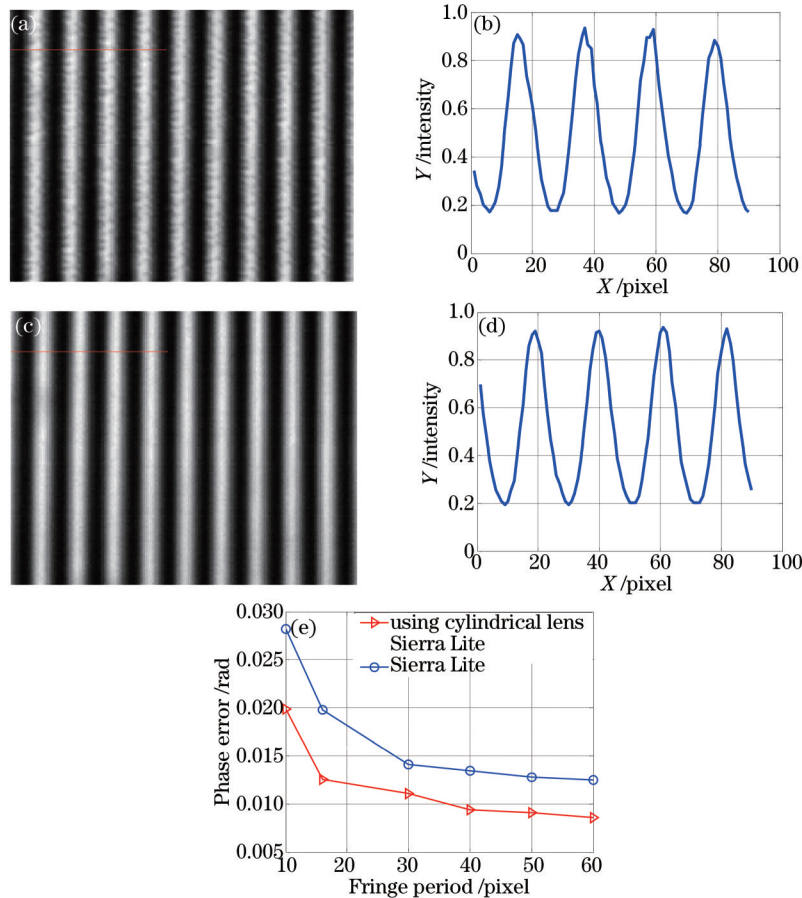


图6 添加柱透镜前后的二元编码正弦光栅对比。(a) 没有柱透镜的二元编码正弦光栅;(b)为(a)中红线对应的剖面图;(c) 加柱透镜后的二元编码正弦光栅;(d)为(c)中红线对应的剖面图;(e) 有无柱透镜之间的相位误差

Fig.6 Comparison of binary encoding sinusoidal gratings with and without cylindrical lens in the light path. (a) Gray image of binary encoding sinusoidal grating without cylindrical lens; (b) sectional view corresponding to the red line in (a); (c) gray image of binary encoding sinusoidal grating with cylindrical lens; (d) sectional view corresponding to the red line in (c); (e) phase errors with or without cylindrical lens

2) 组合多帧具有相同周期、但微观编码结构不同的光栅,来减小单帧二元编码正弦光栅的误差,提高PMP测量的精度。分别投影多帧具有不同微观结构的二元编码正弦光栅模板,CCD采集对应的条纹,对采集的多帧条纹求平均后进行相位计算。为了得到微观编码结构不同的光栅,可以采用两种方法:1) 采用不同的误差扩散核函数来得到微观结构不同的二元编码正弦光栅;2) 由于采用二维误差扩散算法,得到的二元编码正弦光栅的每一行具有不同的微结构,对得到的二值编码正弦光栅沿栅线做循环移动,可以得到微观编码结构不同的多帧二元编码正弦光栅。在下面的实验中,采用第二种方法。图7(a)是周期 $T=16$ pixel的两帧光栅组合的条纹图像,图7(b)画出图7(a)中红线对应的几个周期。图7(c)是 $T=16$ pixel的四帧光栅组合的条纹图像,图7(d)画出图7(c)中红线对应的几个周期。可见组合多帧二元编码正弦光栅有助于提高光栅质量。图7(e)画出了分别组合两帧和四帧不同微观结构的二元编码正弦光栅后的相位误差。由图7(e)可以看出组合多帧不同微观结构的二元编码正弦光栅后相位误差明显变小,且组合的帧数越多相位误差越小。可见组合多帧不同微

观结构的二元编码正弦光栅来改善二元编码正弦光栅的质量,可以提高PMP的测量精度。

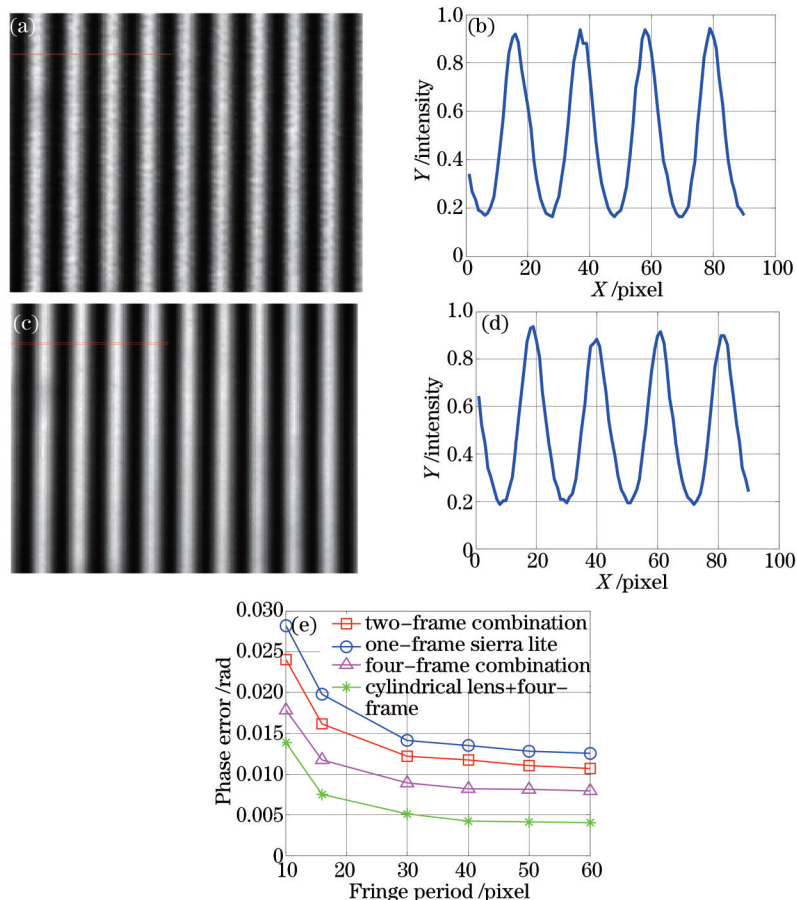


图7 叠加多帧二元编码正弦光栅得到的结果对比。(a) 两帧二元编码正弦光栅叠加图;(b)为(a)中红线对应的剖面图;(c) 四帧二元编码正弦光栅叠加图;(d)为(c)中红线对应的剖面图;(e)叠加多帧光栅、多帧加柱透镜得到的相位误差和一帧光栅的相位误差对比

Fig.7 Comparison of results of superposing multi-frame binary encoding sinusoidal gratings. (a) Result of gray image of superposing two-frame binary encoding sinusoidal gratings; (b) sectional view corresponding to the red line in (a); (c) the result of gray image of superposing four-frame binary encoding sinusoidal gratings; (d) sectional view corresponding to the red line in (c); (e) phase errors from multi-frame binary encoding sinusoidal gratings and multi-frame binary encoding sinusoidal gratings with cylindrical lens

分别对平面和一个实际物体进行测量。平面测量结果如图8所示。图8(a)画出了直接投影二元编码正弦光栅、投影系统前方加柱透镜后投出的二元编码正弦光栅、组合多帧采集到的无柱透镜的二元编码正弦光栅以及组合多帧有柱透镜的二元编码正弦光栅,采用PMP方法得到的相位分布的剖面(第100行)图的比较(上方为放大的局部剖面图)。图8(b)为采用上面方法重建的相位与拟合相位之间的误差分布剖面图。这几种方法的标准差和最大误差值见表1,可见结合柱透镜和多帧光栅组合方法可以明显减小基于二元编码正弦光栅投影的PMP的测量误差。

猫脸面具的测量结果如图9所示。图9(a)为拍摄到在系统中添加了柱透镜的四步相移变形二元编码条纹图像之一,图9(b)~(d)分别是加柱透镜、叠加多帧二元编码正弦光栅和叠加多帧由添加了柱透镜的系统中采集的二元编码正弦光栅图像中恢复出来的相位。为了清楚对比重建的结果,图9(e)画出了采用上述几种方法重建的相位分布的第400列的剖面图与直接由Sierra Lite误差扩散算法得到的二元编码正弦光栅重建结果的相同剖面的比较,可以看出直接由Sierra Lite误差扩散算法得到的二元编码正弦光栅重建结果的剖面有很多毛刺,改善之后很明显毛刺减少了。可见,在DLP投影仪和被测物体之间添加柱透镜和叠加多帧具有不同微观编码结构的二元编码正弦光栅均可以提高编码光栅质量,满足PMP测量要求。且这两种方法同时使用,效果更好。

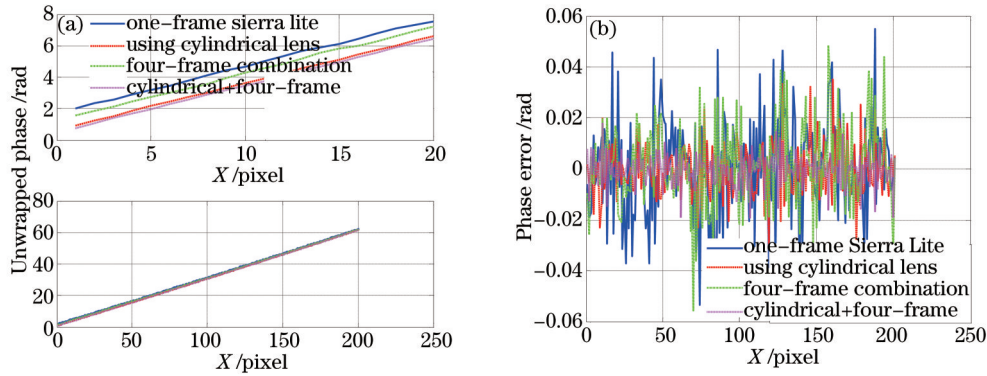


图8 PMP方法测量平面结果。(a)对采用不同方法得到的条纹图解相得到的相位分布剖面图;(b)相位误差分布剖面图
Fig.8 Results of measuring the plane using different binary encoding sinusoidal gratings by PMP method.

(a) Reconstructed phase distribution of the 100th row from binary encoding sinusoidal gratings by different methods;
(b) phase errors distribution of the 100th row

表1 不同方法的标准差和最大误差

Table 1 Standard and max error of different methods

Methods ($T=16$ pixel)	One-frame	Two-frame	Four-frame	Cylindrical lens	Cylindrical lens + Four-frame
Standard	0.019753	0.01616	0.0117	0.012567	0.0074814
Max	0.11263	0.10132	0.0698	0.08036	0.047493

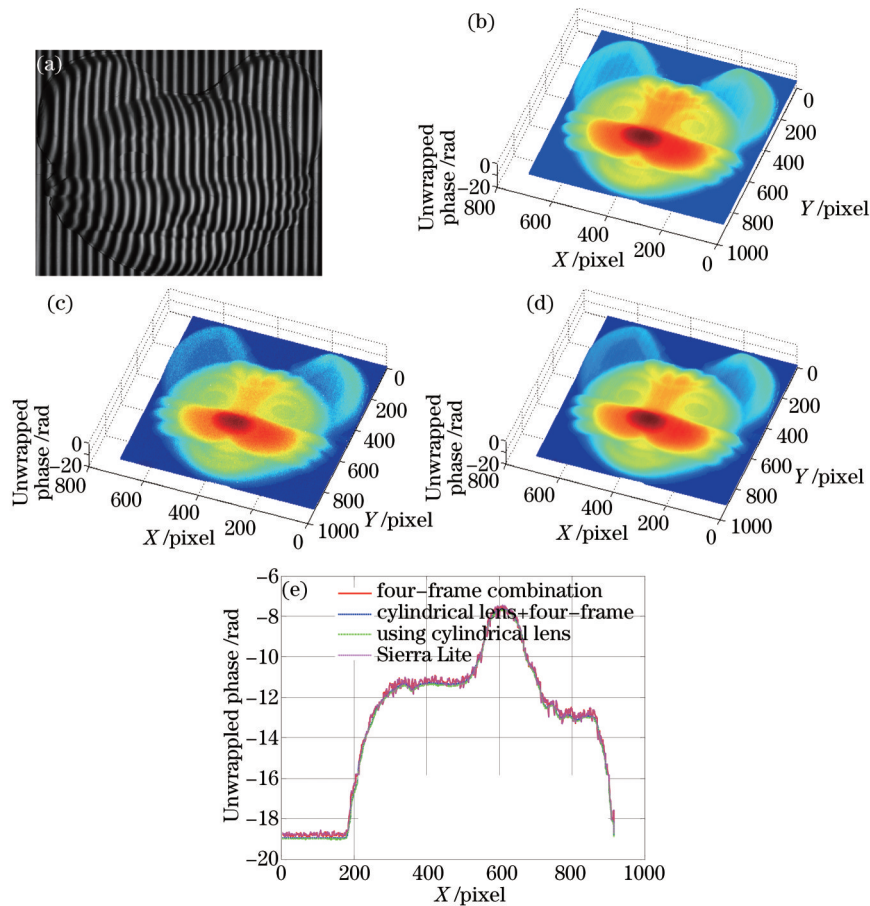


图9 实物测量的结果。(a)二元编码变形条纹;(b)加了柱透镜后重建的相位;(c)多帧光栅叠加后重建的相位;(d)加了柱透镜多帧二元编码正弦光栅叠加后重建的相位;(e)第400列的相位剖面分布

Fig.9 Measurement results. (a) Deformed binary encoding sinusoidal fringe pattern; (b) the reconstructed phase after adding cylindrical lens in the system; (c) the reconstructed phase after superposing multi-frame gratings;
(d) the reconstructed phase after superposing multi-frame gratings with cylindrical lens;
(e) phases of the 400th column of the object by different methods

6 结 论

讨论了利用DLP的高速特性,投影二元编码正弦光栅图像的问题。针对DLP投影仪用于基于结构光照明光学三维面形测量系统的投影装置时遇到的投影非线性影响和提高投影速度问题,采用误差扩散算法建立了二元编码正弦光栅投影模板,利用光学系统的低通滤波特性,得到正弦性较好的二元编码正弦光栅。论文对比了Floyd-Steinberg距离加权和Sierra Lite“蛇”形扫描两种典型误差扩散算法获得的光栅的正弦性,针对DLP投影仪分辨率的限制,提出两种改善方法:1)利用柱透镜卷积作用,在栅线方向上对二元编码正弦光栅进行高斯平滑;2)组合多帧具有不同微观结构的光栅,来减小误差扩散的误差。实验验证了这两种方法的有效性。该方法充分利用了DLP投影二值图像的高速特性,又明显改善由于DLP分辨率有限导致的二元编码正弦光栅的正弦性较差的问题,提高了PMP测量的精度。

参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 306-338.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 306-338.
- 2 Frank Chen, Gordon M Brown, Mumin Song. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods [J]. Opt Eng, 2000, 39 (1): 10-22.
- 3 Da Feipeng, Gai Shaoyan. Grating Projection 3D Precision Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2011. 130-146.
达飞鹏, 盖绍彦. 光栅投影三维精密测量[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 130-146.
- 4 Zhai Aiping, Cao Yiping, He Yuhang. 3D measurement with orthogonal composite structure light based on two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208003.
翟爱平, 曹益平, 何宇航. 基于“2+1”相移算法的正交复合光三维测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208003.
- 5 Tian Miao, Zhang Chunlin, Quan Weilong. Correction of height measurement error arised from coordinate confusion in FTP[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 061202.
田 苗, 张春林, 权伟龙. 傅里叶变换轮廓术中由于坐标混淆而产生的高度测量误差的修正[J]. 激光与光电子进展, 2013, 50 (6): 061202.
- 6 Chao Yiping, Su Xianyu, Xiang Liqun. The spatio-temporal characteristic of DMD[J]. Laser Journal, 2002, 23(5): 16-18.
曹益平, 苏显渝, 向立群. 数字微镜器件的时空特性[J]. 激光杂志, 2002, 23(5): 16-18.
- 7 S Zhang, D V Weide, J Oliver. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement[J]. Opt Express, 2010, 18 (9): 9684-9689.
- 8 S Y Lei, S Zhang. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Opt Lett, 2009, 34(20): 3080-3082.
- 9 Y Wang, S Zhang. Comparison among square binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement[J]. Appl Opt, 2012, 51(7): 861-872.
- 10 Y Wang, S Zhang. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing [J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4121-4123.
- 11 G A Ayubi, J A Ayubi, J M Di Martino, *et al.*. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection [J]. Opt Lett, 2010, 35(21): 3682-3684.
- 12 Cheng Ju, Su Xianyu, Xian Tao. Study and application of binary error diffusion grating in phase measuring profilometry [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2006, 43(3): 555-560.
程 菊, 苏显渝, 羡 涛. 位相测量轮廓术中二元误差扩散光栅的研究及应用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2006, 43(3): 555-560.
- 13 Floyd R, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale[J]. Proceedings of Society for Information Display, 1976, 17(2): 75-77.
- 14 Knox, Keith T. Error diffusion: a theoretical view[C]. SPIE, 1993, 1913: 326-331.
- 15 R Ulichney. Digital Halftoning[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
- 16 Lü Jiangzhao, Da Feipeng, Zheng Dongliang. Projeter defocusing profilometry based on sierra lite dithering algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312004.
吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于Sierra Lite抖动算法的散焦投影光栅测量[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312004.
- 17 V Srinivasan, H C Liu, M Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Appl Opt, 1984, 23(18): 3105-3108.

- 18 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing, *et al.*. A new method for phase-shifting interferometry: a four-step overlap average method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(12): 1288-1293.
朱日宏, 陈进榜, 王青, 等. 移相干涉术的一种新方法: 重叠四步平均法[J]. *光学学报*, 1994, 14(12): 1288-1293.
- 19 Yves Surrel. Design of algorithms for phase measurements by the of phase stepping[J]. *Appl Opt*, 1996, 35(1): 51-60.