

基于 Sierra Lite 抖动算法的散焦投影光栅测量

吕江昭^{1,2} 达飞鹏^{1,2} 郑东亮^{1,2}

(¹ 东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096
² 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 投影仪散焦技术克服了实时光栅投影三维测量中的投影仪非线性问题,但散焦产生的高次谐波会大大降低散焦光栅的正弦性,带来明显的测量误差。提出了采用“S”形扫描 Sierra Lite 抖动算法生成二值抖动光栅,较大地改善了散焦后光栅的正弦性,将该抖动技术生成的散焦光栅用于传统的相移算法,基于投影仪散焦投影,得到用于三维测量的绝对相位信息。仿真结果验证了该方法的有效性,改善了散焦光栅的正弦性,提高了相位质量。实际测量实验与仿真结果相一致。与已有的 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动生成的光栅相比,所提算法运算速度快,生成光栅正弦性较好,更加适用于散焦投影测量。

关键词 测量; Sierra Lite 抖动算法; 光栅投影; 散焦; 条纹分析

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0312004

Projector Defocusing Profilometry Based on Sierra Lite Dithering Algorithm

Lü Jiangzhao^{1,2} Da Feipeng^{1,2} Zheng Dongliang^{1,2}

(¹ School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China
² Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract Projector defocusing technique can eliminate projector nonlinearity in real-time three-dimensional shape measurement. However, the high frequency harmonics brought by defocusing can weaken the sinusoidal feature of the defocused fringe pattern, which can cause obvious measurement error. The Sierra Lite dithering algorithm using a serpentine raster is proposed to generate binary dithered fringe patterns. This method improves the sinusoidality of the defocused fringe pattern. Absolute phase is retrieved by applying fringe patterns generated by this method in traditional phase-shifting algorithm with projector defocusing. Simulations and experiments are carried out to verify the proposed method. Results show that both the sinusoidality of the defocused fringe pattern and phase quality are improved greatly. Compared with the fringes generated by Bayer ordered dithering or Floyd-Steinberg dithering, the proposed method achieves higher performance and can generate fringe patterns more sinusoidally, which is more proper for projector defocusing profilometry.

Key words measurement; Sierra Lite dithering; fringe projection; defocusing; fringe analysis

OCIS codes 120.5050; 120.6650; 100.2650; 100.5088

1 引言

光栅投影三维测量方法通过向待测物体表面投

射正弦光栅条纹,根据采集到的形变光栅图像相位信息获得物体的三维形貌。该方法具有非接触、低

收稿日期: 2013-09-29; **收到修改稿日期**: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(51175081, 61107001)、江苏省自然科学基金(BK2010058)、中国博士后科学基金(2013M531248)

作者简介: 吕江昭(1989—),男,硕士研究生,主要从事三维测量及图像处理等方面的研究。

E-mail: jiangzhao_l@hotmail.com

导师简介: 达飞鹏(1968—),男,博士,教授,主要从事三维测量及三维人脸识别等方面的研究。

E-mail: dafp@seu.edu.cn(通信联系人)

成本和高精度等优点,广泛应用于光学三维测量领域^[1-6]。基于数字光处理(DLP)投影仪的数字光栅投影技术越来越多地用于高质量实时光学三维测量^[7],然而,由于DLP投影仪原理所限,投影传统正弦光栅无法满足高速测量要求。另外,投影仪非线性使得相机获取的光栅不具有良好的正弦性^[8]。在实时三维测量系统中,投影散焦二值光栅时测量系统所能达到的速度比投影正弦光栅要高,而二值光栅经过投影仪散焦投射到物体表面,条纹的正弦性好坏将会直接影响到相位的质量和测量的精度^[9]。

Lei等^[10]提出的二值光栅散焦技术相对于传统的正弦光栅投影技术具有明显的优势。投影仪接受的始终是二值(0/1)图像而非灰度图像,因此相机采集各图像通道数据时曝光时间可以设置为远小于通道的持续时间,这使得测量速度达到DLP投影仪的最大刷新频率(120 Hz)。散焦技术的另一优势就是投影仪不需要非线性校正。然而,二值方波光栅散焦时产生大量的高次谐波,极大地影响了光栅质量,加上投影仪散焦程度受到的限制,当二值方波光栅周期较大时,投影仪很难通过散焦得到近似的正弦光栅,无法进行高质量的测量^[11]。脉冲宽度调制(PWM)用来减少散焦时高频谐波对光栅质量的影响^[12],但是这种调制只是一维方向上的优化,并且在光栅周期较大时效果较差。

图像抖动技术是一种在图像处理领域中得到深入研究的技术,广泛应用于印刷领域,用0和255两个灰度级来近似显示具有更多灰度级的灰度图像^[13]。常用的图像抖动算法有随机抖动、有序抖动和误差扩散抖动等。Wang等^[14]将图像抖动技术应用于光学三维测量领域,将正弦光栅用Bayer有序抖动算法^[15]处理成为二值抖动光栅,再通过投影仪散焦生成近似的正弦光栅,成功地解决了二值方波光栅在周期较大时无法使用以及高次谐波造成影响的问题。然而Bayer有序抖动算法会产生较严重的人工纹理和细节丢失的问题,影响抖动图像的质量。为了进一步提高光栅质量,基于Bayer有序抖动和Floyd-Steinberg抖动方法^[16]的改进和优化算法先后被提出^[17-19],然而,这些算法无法同时保证速度和精度。

Sierra Lite误差扩散抖动算法是一种形式简洁、速度较快的算法,且能够生成质量优于Floyd-Steinberg算法的抖动图像^[20]。本文提出了用一种采用“S”形扫描的Sierra Lite抖动算法生成高质量抖动光栅,使其通过散焦后具有更好的正弦性,以

降低相位误差。将其与已有的Bayer有序抖动和Floyd-Steinberg抖动算法生成的光栅质量进行比较,并应用于实际散焦测量。仿真和实验结果都显示Sierra Lite抖动算法生成的光栅质量有显著地提高,从而可以提高散焦投影测量的整体精度。

2 光栅投影三维测量系统原理概述

光栅投影测量系统主要由投影仪、相机、计算机和图像采集卡等设备组成,如图1所示。投影仪把计算机生成的数字光栅投射至物体表面,相机拍摄被调制的光栅图片,经由图像采集卡送至计算机进行处理,求解绝对相位,计算得到相位与物体表面高度的对应关系,由系统的标定参数便可得到物体三维信息。

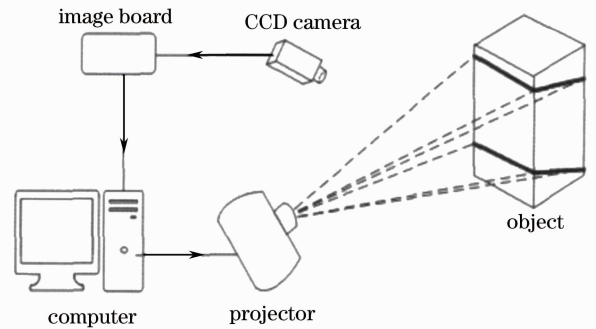


图1 光栅投影测量系统的结构图

Fig. 1 Structure of fringe projection system

相移法是一种比较成熟的求解主值相位的算法,具有较高的精度和运算速度等优势。这里使用四步相移法^[21]求解主值相位。对于四步相移法,相邻光栅的相移为 $\pi/2$,四幅相移光栅图像可以表示为

$$I_n(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi n/4], \quad (1)$$

式中 $n = 0, 1, 2, 3$, $I_n(x, y)$ 为第 n 幅图像的灰度值, $I'(x, y)$ 为条纹光强的背景值, $I''(x, y)$ 为调制强度, $\phi(x, y)$ 为待求相位场。根据(1)式可得相位主值

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^3 I_n(x, y) \sin(2\pi n/4)}{\sum_{n=0}^3 I_n(x, y) \cos(2\pi n/4)} \right]. \quad (2)$$

(2)式解出的 $\phi(x, y)$ 的值域为 $[-\pi, +\pi)$ 。连续、完整的相位值 $\theta(x, y)$ 应为

$$\theta(x, y) = \phi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (3)$$

式中 $k(x, y)$ 为整数,表示 (x, y) 点处的光栅阶次。相位展开方法有时域法和空域法,一般时域法比空

域法精度高,这里使用基于格雷编码展开相位^[22]。

图像抖动算法将传统的正弦光栅经过抖动算法处理生成二值的抖动光栅,这一过程可以在计算机中离线进行。二值抖动光栅经过投影仪散焦投射到物体表面,便会呈现近似的正弦光栅,以实现散焦光栅投影测量。由上述的测量原理可知,散焦光栅的正弦性好坏将会直接影响求解相位质量的高低。

3 Sierra Lite 误差扩散抖动算法

3.1 误差扩散抖动原理

所谓误差扩散,就是根据阈值将当前图像像素量化为 0 或 255 两个灰度级,得到输出的二值抖动像素,然后将当前像素的量化误差按一定比例扩散至相邻若干个未处理的像素^[23]。

误差扩散的原理可表示为

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

式中 $I(i,j)$ 为原图像, $\tilde{I}(i,j)$ 为原图像在 (i,j) 处加上周围像素扩散的量化误差后的灰度值,像素 (i,j) 的量化误差 $e(i,j)$ 通过一个二维权重函数 $h(m,n)$ 扩散至相邻若干个像素, $h(m,n)$ 又称为误差扩散的核函数。

根据阈值 T 把 $\tilde{I}(i,j)$ 处像素二值化,得到最终输出的抖动图像的像素 $D(i,j)$,即

$$D(i,j) = \begin{cases} 255, & \tilde{I}(i,j) \geq T \\ 0, & \tilde{I}(i,j) < T \end{cases}, \quad (4)$$

式中阈值 T 通常取 128。

而(4)式中的量化误差 $e(i,j)$ 即为 $\tilde{I}(i,j)$ 与输出像素 $D(i,j)$ 的灰度值之差

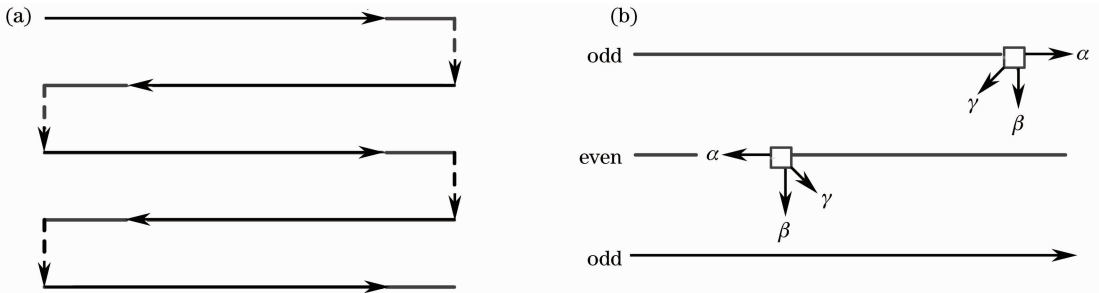


图2 “S”形扫描和误差扩散。(a)“S”形扫描的示意图;(b)“S”形扫描的误差扩散

Fig. 2 Serpentine raster and error diffusion. (a) Serpentine raster; (b) error diffusion

采用“S”形扫描的 Sierra Lite 误差扩散抖动算法避免了量化误差向特定的方向传播,消除了抖动图像中不对称的纹理图案,因此生成的抖动图像相对于传统逐行扫描具有更好的对称性和更高的质

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

重复上述步骤,逐行进行处理,最终得到二值抖动图像 D 。和 Bayer 有序抖动算法相比,误差扩散算法更加复杂,但是能得到质量更好的抖动图像。

3.2 “S”形扫描 Sierra Lite 抖动算法

核函数 $h(m,n)$ 是误差扩散中最关键的参数,选取不同的核函数,就对应着不同的误差扩散抖动算法。对于 Sierra Lite 抖动算法,它的核函数为

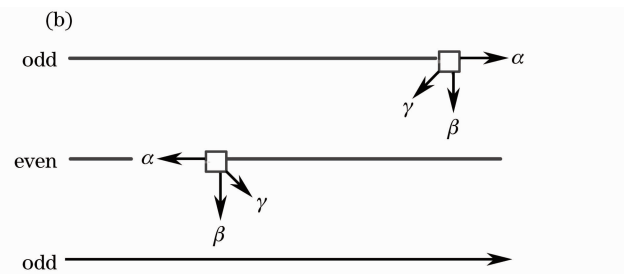
$$h(m,n) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} - & x & 2 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中“—”表示已处理过的像素, x 表示当前正在处理的像素,相邻的数字(称为权重)代表该位置分配到的误差的比例。这里,右边紧邻的像素获得 $2/4$ 的误差,正下方的像素获得 $1/4$ 的误差,左下对角线方向的像素获得 $1/4$ 的误差。可见,相比其他误差扩散算法,Sierra Lite 抖动算法的核函数十分简洁,实现起来比较简单。

传统的误差扩散为从左到右、从上往下计算,误差在扩散时会引起流水效应,即误差不断向下、向右累加传播,影响抖动图像的质量。一种改进方法是采用“S”形扫描,即奇数行为从左向右,偶数行则为从右向左扫描^[20]。相应地,偶数行的误差扩散核函数为

$$h'(m,n) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & x & - \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

采用“S”形扫描的 Sierra Lite 误差扩散过程如图 2 所示。图 2(b) 中 α 、 β 和 γ 为误差扩散系数,即核函数中所对应的参数,有 $\alpha=1/2$ 、 $\beta=1/4$ 、 $\gamma=1/4$ 。



量,第 5 节的实验将验证这一方法。这里所用的 Sierra Lite 抖动算法都采用“S”形扫描。

Sierra Lite 误差扩散抖动的算法流程图如图 3 所示。首先由计算机生成正弦光栅,从最左上角像

素开始计算抖动输出 $D(i, j)$, 然后计算该像素的量化误差 $e(i, j)$, 根据 i 选择“S”形扫描的方向和相应的核函数进行误差扩散, 并将误差叠加到相应的下一个像素, 直至整幅光栅图像处理完毕, 将最终得到抖动光栅经过投影仪散焦投影得到所需的测量光栅。

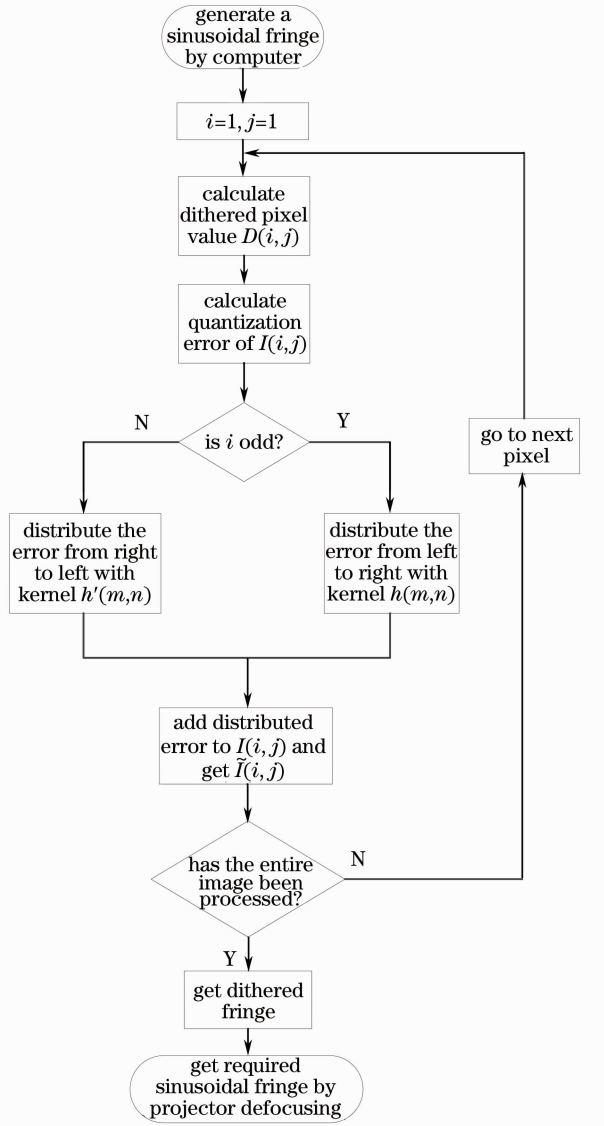


图3 Sierra Lite 误差扩散抖动的算法流程图

Fig. 3 Flow chart of Sierra Lite dithering algorithm

4 仿真与分析

4.1 “S”形扫描对 Sierra Lite 抖动光栅质量的改善

为了验证采用“S”形扫描对 Sierra Lite 抖动光栅质量的改善, 依次取高斯滤波器的大小 f_s 为 5、7、9、11、13、15 pixel, 同时滤波器的标准差为 $f_s/3$, 以此仿真投影仪不同的散焦程度。使用前述的四步相移法和基于格雷编码展开相位, 分别计算不同情况下的光栅获得的相位的相对误差。图 4(a)和(b)

分别为条纹周期 T 为 50 和 100 时相位误差随着散焦程度增加而发生的变化。可见, 采用“S”形扫描的 Sierra Lite 抖动比传统的 Sierra Lite 抖动产生的相位误差有明显改善, 并且随着散焦程度在一定范围内增加, 相位误差呈现降低的趋势。图 4(c)和(d)分别为滤波器大小 f_s 为 7 和 13 时相位误差随着光栅条纹周期增大的变化。可以得知采用“S”形扫描相对于传统 Sierra Lite 抖动算法, 相位质量有比较明显的提高, 并且相位误差在投影仪只有略微散焦时也很低。

4.2 “S”形扫描 Sierra Lite 抖动算法生成光栅的正弦性及效率分析

直观上观察 Sierra Lite 抖动的光栅, 它和 Bayer 有序抖动以及 Floyd-Steinberg 抖动生成光栅的比较如图 5 所示, 图 5(a)为 Sierra Lite 抖动, 条纹分布比较均匀, 无明显的纹理和失真出现。图 5(b)为 Bayer 有序抖动, 光栅不对称的纹理十分严重且有大量细节丢失, 严重降低光栅质量; 图 5(c)为 Floyd-Steinberg 抖动, 可以看出条纹两侧有大面积不对称的纹理出现, 一定程度上影响了光栅质量; 图 5(d)~(f)分别对应图 5(a)~(c)经过高斯低通滤波后的图像, 可见 Bayer 有序抖动的光栅质量较差, 而 Sierra Lite 抖动和 Floyd-Steinberg 抖动则需要进一步分析。

为了定量描述 Sierra Lite 抖动算法所生成光栅的正弦性, 使用高斯低通滤波器仿真投影仪的散焦效果, 然后取散焦光栅的某一行, 绘制其灰度变化曲线, 并且与标准的正弦曲线对比, 计算两者的差值, 如图 6 所示。图 6(a)为 Sierra Lite 抖动算法的正弦性图示, 由图中可以看出, Sierra Lite 抖动算法生成光栅的横截面曲线和标准的正弦曲线基本吻合; 图 6(b)为 Bayer 有序抖动的结果, 可以看出其光栅正弦性较差, 差值比较大; 图 6(c)为 Floyd-Steinberg 抖动, 生成光栅与正弦曲线也有比较明显的差值; 图 6(d)画出了以上几种抖动算法和正弦曲线的差值, 可见 Sierra Lite 抖动的差值明显低于 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动, 并且稳定在比较小的范围内, 说明其光栅正弦性比较好, 质量较高。

表 1 为整幅散焦光栅与标准正弦光栅的均方根 (RMS) 误差。由表 1 可知, 此时 Sierra Lite 抖动算法生成的光栅具有最低的均方根误差, 进一步说明其光栅具有较好的正弦性。

由于 Sierra Lite 抖动算法的核函数十分简洁, 加上它的系数分母为 4, 可以通过寄存器移位实现,

使得它的运算速度要快于其他误差扩散算法。在 Matlab 仿真环境下,分别测量了几种抖动算法处理

一幅 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 正弦光栅平均消耗的时间,如表 2 所示。

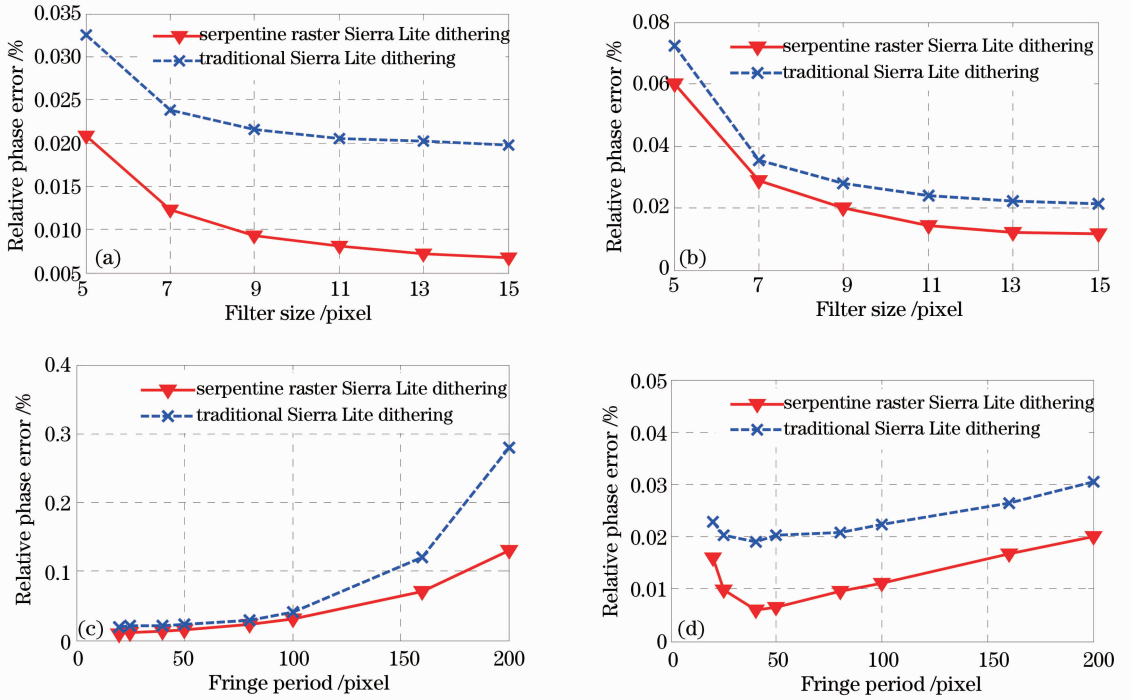


图 4 “S”形扫描 Sierra Lite 抖动和传统 Sierra Lite 抖动的比较。(a) $T=50$; (b) $T=100$; (c) $f_s=7$; (d) $f_s=13$
 Fig. 4 Comparison between Sierra Lite dithering using serpentine raster and traditional Sierra Lite dithering. (a) $T=50$;
 (b) $T=100$; (c) $f_s=7$; (d) $f_s=13$

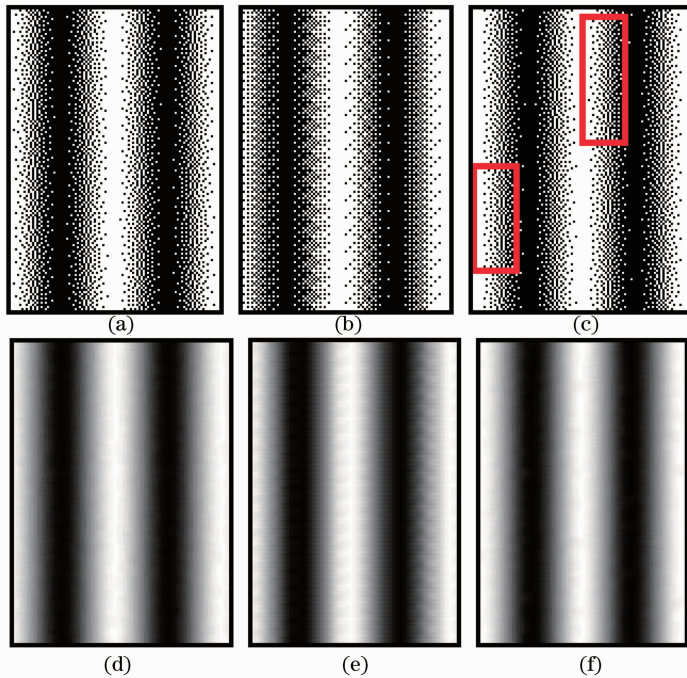


图 5 抖动光栅的直观比较。(a) Sierra Lite 抖动; (b) Bayer 有序抖动; (c) Floyd-Steinberg 抖动; (d)~(f) 分别为
 (a)~(c) 经过高斯滤波后的图像
 Fig. 5 Comparison of dithered fringe patterns by intuition. (a) Sierra Lite dithering; (b) Bayer ordered dithering;
 (c) Floyd-Steinberg dithering; (d)~(f) filtered fringe of (a)~(c)

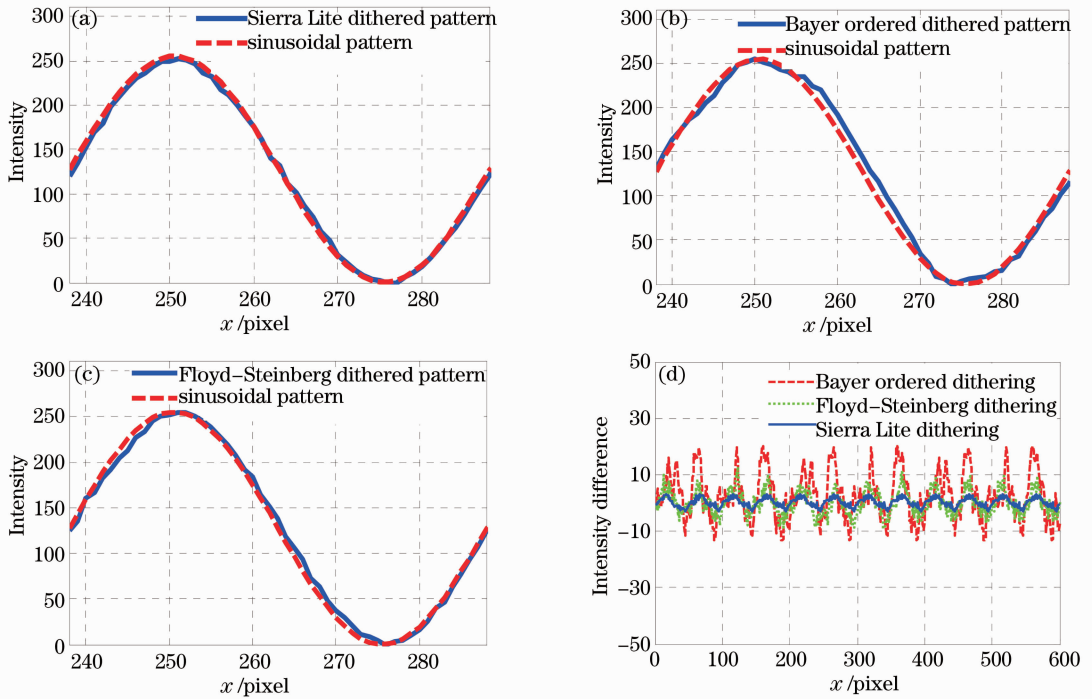


图 6 抖动光栅散焦后的正弦性(滤波器大小 $f_s=7$, 条纹周期 $T=50$)。 (a) Sierra Lite 抖动光栅; (b) Bayer 有序抖动光栅; (c) Floyd-Steinberg 抖动光栅; (d) 散焦光栅和正弦曲线的差值

Fig. 6 Sinusoidality of dithered fringe patterns after defocusing (with filter size of 7 and fringe period of 50). (a) Sierra Lite dithered fringe pattern; (b) Bayer ordered dithered fringe pattern; (c) Floyd-Steinberg dithered fringe pattern; (d) difference between defocused fringe pattern and ideal sinusoidal pattern

表 1 散焦光栅与标准正弦光栅的均方根误差

Table 1 RMS error between defocused fringe pattern and ideal sinusoidal fringe pattern

Method	RMS error of intensity
Sierra Lite dithering	2.4779
Bayer ordered dithering	6.7216
Floyd-Steinberg dithering	3.8388

表 2 不同抖动算法的运行时间对比

Table 2 Comparison of running time of different dithering algorithms

Method	Average time/s
Sierra Lite dithering	2.987
Bayer ordered dithering	4.442
Floyd-Steinberg dithering	3.947

由表 2 中数据可知, Sierra Lite 抖动算法的运行速度比 Bayer 有序抖动算法和 Floyd-Steinberg 抖动算法有明显提高。

4.3 所提方法对相位质量的提升

以理想正弦光栅解出的平面相位作为参考, 计算 Sierra Lite 抖动光栅解出相位的相对均方根误差, 和 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动比较, 给出

Sierra Lite 抖动算法生成光栅的合理化建议。

图 7 是不同条件下 Sierra Lite 抖动算法产生的相位误差, 与 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动相比, 相位误差有较大的改善。图 7(a) 和 (b) 为条纹周期分别为 50 和 100 时的情况。根据图 7(a) 和 (b), Sierra Lite 抖动算法得到的相位误差比 Floyd-Steinberg 抖动和 Bayer 有序抖动有明显改善, 尤其在散焦程度较低时 Sierra Lite 抖动则比 Floyd-Steinberg 抖动相位质量的提升十分显著。

同时, 为了验证 Sierra Lite 抖动算法的适用范围, 进行了一系列不同条纹周期的抖动实验。图 8 是滤波器大小 f_s 分别为 7 和 13 时, 不同条纹周期下的抖动算法的对应的相位误差。可见, Sierra Lite 抖动算法在各个条纹周期下均能保持较低的误差, 尤其在条纹周期较大的时候, 相对于 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动, 相位质量有比较显著的提升。值得一提的是, 在条纹周期较小 ($T=20$) 和较大 ($T=200$) 时, Sierra Lite 抖动算法的相位误差都很低 (不超过 0.2%), 这说明 Sierra Lite 抖动算法的适应性很强。

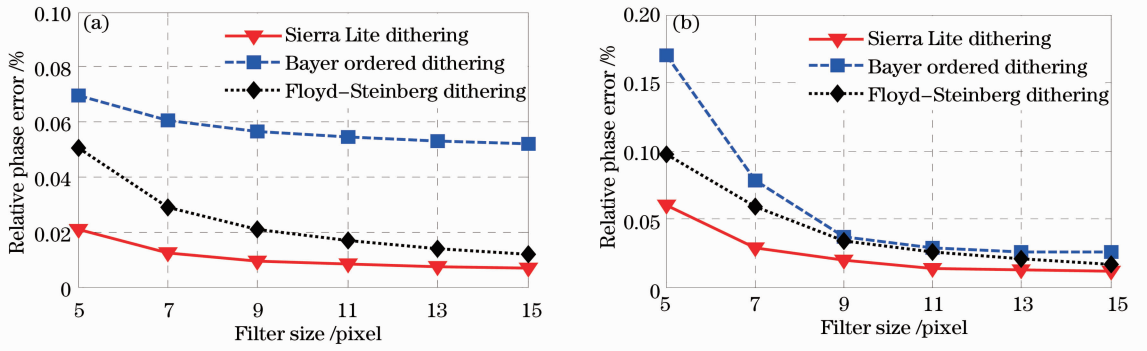


图 7 不同散焦程度的相位误差。(a) $T=50$ ；(b) $T=100$

Fig. 7 Relative phase errors with different defocusing degrees. (a) $T=50$ ；(b) $T=100$

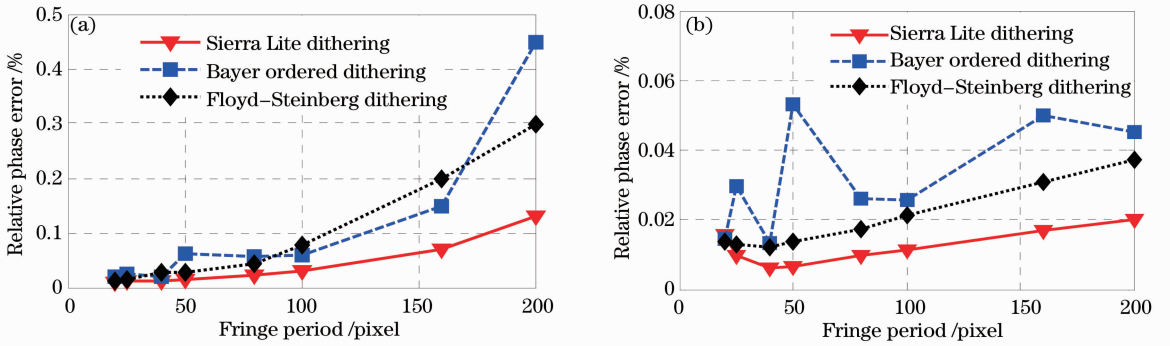


图 8 不同条纹周期下的相位误差。(a) $f_s=7$ ；(b) $f_s=13$

Fig. 8 Relative phase errors with different fringe periods. (a) $f_s=7$ ；(b) $f_s=13$

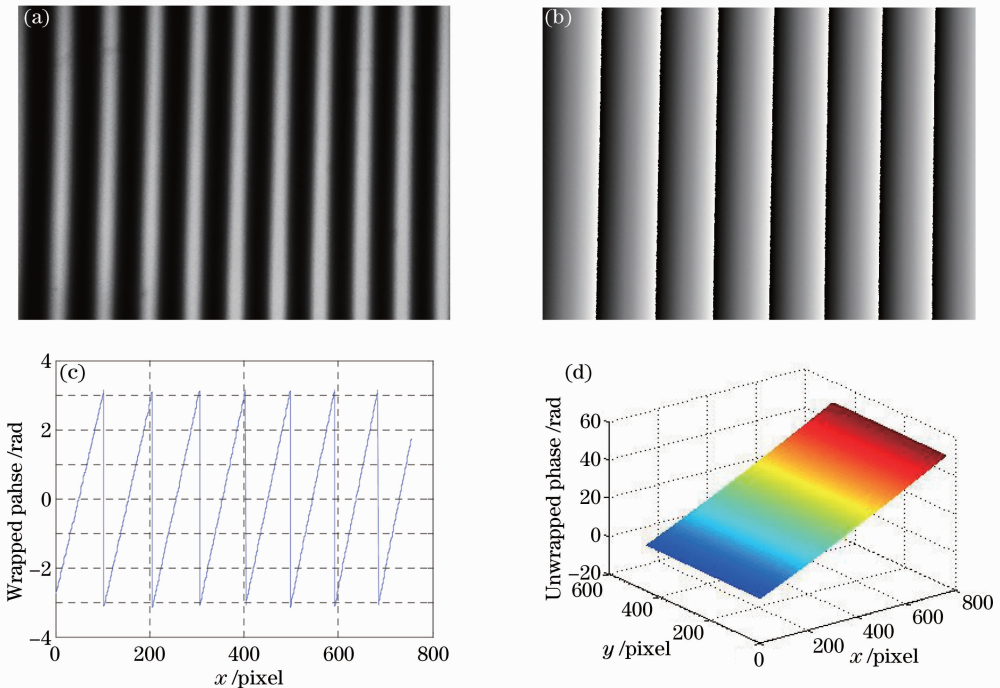


图 9 用 Sierra Lite 抖动光栅的测量结果。(a) Sierra Lite 散焦光栅；(b) 解出的主值相位；(c) 主值相位的某一行；
(d) 用基于格雷编码得到的绝对相位

Fig. 9 Measurement with Sierra Lite dithered fringe pattern. (a) Sierra Lite dithered fringe pattern；(b) wrapped phase；
(c) cross section of wrapped phase；(d) unwrapped phase

根据以上分析,在实际测量中,由于投影仪的散焦程度过高容易造成失真和对比度下降,不宜使散焦程度过大;同时建议使用周期为 50~150 pixel 的 Sierra Lite 抖动光栅,此时光栅的质量要明显优于其他常用的抖动算法,能够取得较为理想的测量结果。

5 实 验

为了计算相对相位误差,以一块竖直白板为参考平面,测量其相位并计算相对相位误差。实验当中所使用的相机(Basler acA2000-340 km)为聚焦状态,DLP 投影仪(PHYLINA PD-L800)处于较低散焦程度的状态。图 9(a)为相机采集到的周期为 100 的 Sierra Lite 散焦光栅图像,图 9(b)为四步相移法解得的主值相位,图 9(c)为主值相位的其中一行,利用基于格雷编码展开后的相位如图 9(d)所示。图 9 可以看出散焦后的 Sierra Lite 抖动光栅的质量比较高,解得的相位较为光滑。

在投影仪散焦程度较低的情况下,测量并计算了 Sierra Lite 抖动算法生成的不同周期光栅的相位误差,如图 10 所示。可以看出,Sierra Lite 抖动算法不仅在条纹周期较小时能得到较高的相位质量,在周期比较大的时候也能保持较低的相位误差。从

图中可知,Sierra Lite 抖动算法的相位误差总体上低于 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动算法,并且波动较小,说明其具有较强的适应性。实验结果与仿真结果相一致。

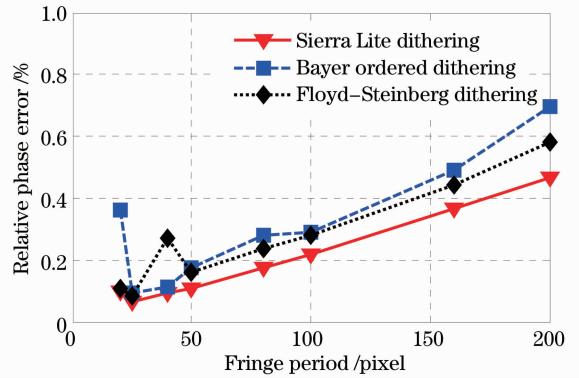


图 10 Sierra Lite 抖动算法不同条纹周期下的相位误差
Fig. 10 Relative phase errors of Sierra Lite dithering with different fringe periods

用 Sierra Lite 抖动的光栅测量实际物体,以验证其实际的可行性。使用条纹周期为 50 的光栅,测量对象为一个包含孔洞的白色塑料板,如图 11(a)所示。图 11(b)为拍摄到的其中一幅四步相移光栅图像,图 11(c)为利用四步相移法求解的主值相位,图 11(d)为基于格雷编码展开后的相位图,最终获

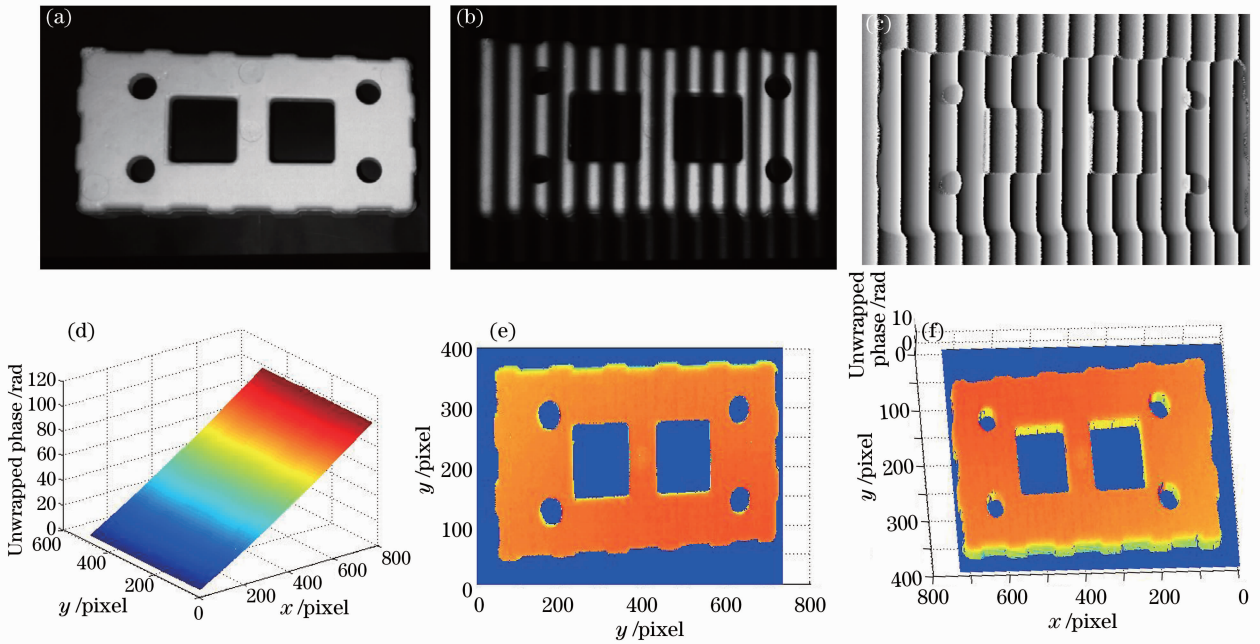


图 11 Sierra Lite 抖动光栅测量物体。(a)被测物体;(b)一幅四步相移图像;(c)解出的主值相位;(d)基于格雷编码展开的相位;(e)被测物体的最终相位平面视图;(f)被测物体的最终相位立体视图

Fig. 11 Measurement of an object with Sierra Lite dithered fringe pattern. (a) Object to be measured; (b) one of four-step phase-shifting fringe pattern; (c) wrapped phase; (d) unwrapped phase; (e) plane view for final phase of the object; (f) stereo view for final phase of the object

得的相位如图 11(e)和图 11(f)所示,用于恢复物体三维形貌的最终相位正确并且较为光滑。可见, Sierra Lite 抖动光栅用于实际测量时解出的相位质量比较高,满足测量要求。

6 结 论

投影仪散焦技术逐渐应用于高速、实时三维测量系统,图像抖动技术能解决散焦中的一系列问题,如减少高次谐波的影响、克服投影仪非线性问题等。提出采用“S”形扫描 Sierra Lite 抖动算法生成投影光栅,显著提高了抖动光栅的质量,正弦性较为理想。在投影仪散焦程度较低时, Sierra Lite 抖动算法相对于 Bayer 有序抖动和 Floyd-Steinberg 抖动算法能够明显提高抖动光栅的质量、更大程度地降低相位误差,因而可以提高系统的整体测量精度。仿真和实验结果均证明了 Sierra Lite 抖动算法的优势。

参 考 文 献

- 1 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 133–140.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 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]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 061202.
- 5 Shen Qiuju, Chen Wenjing, Zhong Min, *et al.*. Method for improving the accuracy of S-transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612009.
湛秋菊, 陈文静, 钟敏, 等. 提高 S 变换轮廓术测量精度的方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612009.
- 6 Dong Fuqiang, Da Feipeng, Huang Hao. Windowed Fourier transform profilometry based on advanced S-transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512008.
董富强, 达飞鹏, 黄昊. 基于 S 变换的改进窗口傅里叶三维测

- 量法[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512008.
- 7 Da Feipeng, Gai Shaoyan. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(3): 377–385.
- 8 S Zhang, P S Huang. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement [J]. *Opt Eng*, 2006, 45(12): 123601.
- 9 S Zhang. Recent progresses on real-time 3-D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 149–158.
- 10 S Y Lei, S Zhang. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3080–3082.
- 11 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.
- 12 Y Wang, S Zhang. Optimum pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(24): 4121–4123.
- 13 Y Pinhasi, D Peri. A generalized analysis of binary halftone representation of images [J]. *Opt Commun*, 1993, 101(3-4): 277–285.
- 14 Y Wang, S Zhang. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(27): 6631–6636.
- 15 B E Bayer. An optimum method for two-level rendition of continuous-tone pictures [C]. *Proceedings of the IEEE 1973 International Conference on Communications*, 1973, 1: 11–15.
- 16 R Floyd, L Steinberg. An adaptive algorithm for spatial gray scale [J]. *Proceedings of Society for Information Display*, 1976, 17(2): 75–77.
- 17 J Dai, B Li, S Zhang. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2014, 52(1): 195–200.
- 18 W Lohry, S Zhang. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 540–542.
- 19 J Dai, S Zhang. Phase-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement [J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2013, 51(6): 790–795.
- 20 R Ulichney. *Digital Halftoning* [M]. USA: MIT Press, 1997.
- 21 Xiao Dan, Chen Liangzhou, Gan Jianghong. 3D reconstruction based on digital grating phase-shifting electro-optic [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(5): 12–20.
肖丹, 陈良洲, 干江红. 基于数字光栅相移法的三维重构[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5): 12–20.
- 22 Yu Xiaoyang, Wu Haibin, Yin Liping, *et al.*. 3D measurement technology based on structured light by combining gray code with phase-shift [J]. *Chinese J Scientific Instrument*, 2007, 28(12): 2152–2157.
于晓洋, 吴海滨, 尹丽萍, 等. 格雷码与相移结合的结构光三维测量技术[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(12): 2152–2157.
- 23 Knox Keith T. Error diffusion: a theoretical view [C]. *SPIE*, 1993, 1913: 326–331.

栏目编辑: 何卓铭