

离焦投影三维测量的二值光栅生成方法

赵立伟^{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 投影仪离焦技术克服了光栅投影三维测量中的投影仪非线性问题,但二值光栅存在的高次谐波会降低生成光栅的正弦性,从而引入相位误差。提出一种二值光栅图像生成方法,基于正弦光栅图像所具有的对称性和周期性,选取了尺寸较小的二值块。然后对所选块进行随机初始化,再采用多像素跳变方法对二值块进行优化,根据优化所得的二值块生成整幅二值光栅图像。最后结合相移算法,在投影仪离焦测量环境下,计算得到三维测量所需的相位信息。相较于传统二值光栅图像生成方法,所提方法能够保证高质量相位信息获取,且适用于不同程度的离焦测量环境。仿真及实验验证了所提方法更加适用于离焦投影三维测量。

关键词 测量; 三维测量; 离焦投影; 二值光栅; 条纹分析

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0812005

Method for Binary Grating Generation Using Defocused Projection for Three-Dimensional Measurement

Zhao Liwei^{1,2} Da Feipeng^{1,2} Zheng Dongliang^{1,2}

¹School of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

²Key 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 three-dimensional measurement of grating projection. However, the high frequency harmonics produced by binary grating can weaken the sinusoidal feature of grating and generate phase errors. A new method is proposed to generate binary grating patterns. Based on symmetry and periodicity of sinusoidal grating pattern, this method selects a smaller binary patch. Then the selected patch is randomly initialized, the binary patch is optimized through multi-pixels' mutation, and the binary grating pattern of full size pattern is generated according to the optimized binary patch. Finally, combined with phase-shifting algorithm, required phase information for three-dimensional measurement is retrieved under the environment of defocusing measurement for the projector. Compared with the generation method of traditional binary grating patterns, the proposed method can certify high-quality phase information acquisition and suitable for the measurement environment of different defocusing amounts. Simulations and experiments are carried out to verify that the proposed method is more proper for three-dimensional measurement of defocused projection.

Key words measurement; three-dimensional measurement; defocused projection; binary grating; fringe analysis

OCIS codes 120.5050; 120.6650; 100.2650

1 引 言

数字光栅投影技术凭借其非接触、低成本、高精度的优点广泛应用于光学三维测量领域,该技术通过向目标物体投影正弦光栅,利用计算机采集的光栅图像获取相位信息从而得到物体的三维形貌^[1-10]。但是受

收稿日期: 2016-02-01; **收到修改稿日期:** 2016-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(51475092,61405034)、高等学校博士学科点专项科研基金(20130092110027)

作者简介: 赵立伟(1992—),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: seuzlw335@sina.cn

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)

投影仪原理所限,投影传统的正弦条纹光栅无法满足高速测量的要求^[11]。此外,投影仪的非线性使得相机采集的光栅图像并不具有良好的正弦性^[12],在后续处理中会引入额外的相位误差^[13-14]。在三维测量系统中,根据数字光处理(DLP)投影仪的投影机制,离焦投影二值光栅时系统所能达到的速度比投影正弦光栅的要高,于是二值光栅离焦投影技术被提出^[15-17],因为投影仪接受的是二值图像而不是灰度图像,当投影仪处于离焦状态时,就可以投影出正弦条纹光栅。该技术的另一优势就是不存在投影仪的非线性问题^[18]。然而,二值方波光栅总是存在大量的高次谐波,极大地影响光栅的质量^[19]。脉冲宽度调制(PWM)技术用来减少高次谐波对光栅质量的影响^[20-21],但是 PWM 技术往往用来处理条纹较窄的二值光栅,在光栅周期较大时效果较差^[22]。虽然抖动技术解决了宽周期条纹质量差的问题^[23-25],但是难以处理短周期二值光栅的设计。

正弦光栅图像在一个周期内 x 方向上是对称的,在 x 和 y 方向上都具有周期性。因此,设计的二值图像也应该具有对称性和周期性。基于此特性,一种二值光栅设计方法被引入^[26],选取一个二值块并对其进行优化,然后利用对称性和周期性对优化后的二值块进行操作产生整幅二值图像。该方法极大地简化了二值光栅的设计生成过程,因为处理的对象不是整幅图像,而是二值块,只是整幅图像的一部分。该方法的最终目标是得到高质量的相位,即在投影仪不同的离焦程度下,相位误差都很小。相位误差是指使用设计的二值图像得到的相位和理想相位之间的差值。将能够解得该高质量相位信息的二值图像称为最佳匹配的二值图像。然而,该方法所选取的二值块尺寸仍然很大,而且优化过程只是基于简单的单像素跳变。因而对于较大尺寸的二值块,很难获得最佳匹配的二值图像。

本文提出了一种改进的二值光栅生成算法,根据正弦光栅图像所具有的对称性和周期性,选用了尺寸更小的二值块,再结合多像素跳变方法对选取的二值块进行优化,利用优化所得的二值块生成最佳匹配的二值图像或者近似最佳匹配的二值图像。将所提方法与传统方法应用于实际离焦测量中,比较测量得到的相位信息。仿真和实验结果证明,在不同的离焦程度下,所提出的方法均能提高相位信息的质量。此外,由于本方法所选块尺寸更小,所需运算代价较低,进而能够提高算法的运算效率。

2 一种新的二值光栅生成方法

2.1 传统的二值光栅生成方法

二值光栅离焦投影技术的目标是设计二值图像使其经过高斯滤波后尽可能地接近理想正弦光栅图像。数学上可以描述为:

$$\min_{B,G} \| I(x,y) - G(x,y) \otimes B(x,y) \|_F, \quad (1)$$

式中 $\| \cdot \|_F$ 是指 Frobenius 范数, $I(x,y)$ 表示理想正弦光栅图像, $G(x,y)$ 是二维高斯函数, \otimes 是卷积操作, $B(x,y)$ 是设计的二值图像,即图像中的每个像素值(0 或 1)都是由设计的算法所确定。这是一个多项式复杂程度非确定性难题(NP hard)。此外,在不同的离焦程度作用下,即 $G(x,y)$ 取不同值时,设计的二值图像都应该满足上式,这使得问题变得更加复杂。

传统的方法是选取像素大小为 $S_x \times S_y$ 的二值图像作为设计的对象,称之为二值块,根据对称性和周期性,利用该二值块生成整幅光栅图像。 S_x 是光栅周期 T 的一半, S_y 表示 y 方向的长度,取值范围为 $[2, 10]$,并且在二值块选定后保持不变。该方法首先给二值块中的每个像素点随机赋值为“0”或“1”,随后对每个像素点的值依次进行跳变,即从“1”变为“0”或从“0”变为“1”。如果整幅二值图像经高斯滤波后得到的图像和理想正弦图像之间的均方根误差减小,那么此次跳变被认为是一次好的跳变,并且保留此次跳变的像素值,否则还原像素值。重复上述步骤 50~500 次,可以得到大量二值块,称之为候选块。改变 S_y 的值,再重复上述过程,可以得到对应不同 S_y 值的许多候选块。

例如,选取光栅周期 $T=18$,则二值块在 x 方向的大小为 $S_x=9$,在 y 方向的大小选取为 2,对该 9×2 的二值块进行优化的结果如图 1 所示,其中图 1(a)是优化后的二值块,利用 x 方向上的对称性拼接出一个周期的二值图像如图 1(b)所示,利用 x 和 y 方向上的周期性拼接出整幅二值图像如图 1(c)所示。整幅二值图像经高斯滤波器处理后就得到正弦条纹图像。

相移算法已经广泛地应用于光学测量中^[27],相移步数越大,测量精度越高。为了实现快速三维测量,通



图 1 用传统方法产生二值图像。(a)优化后的 9×2 二值块;(b)一个周期的二值图像;(c)完整的二值图像

Fig. 1 Binary pattern generated using traditional method. (a) Optimized 9×2 binary patch;

(b) one period of binary pattern; (c) full size binary pattern

常采用三步相移算法,因为它只需要最少数目的光栅图像来获取相位。对于三步相移算法,相邻光栅的相移为 $2\pi/3$,三幅相移光栅图像可以表示为:

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) - 2\pi/3], \quad (2)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)], \quad (3)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2\pi/3], \quad (4)$$

式中 $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 分别为第 1、2、3 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,由(2)~(4)式可得:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{3} [I_1(x, y) - I_3(x, y)]}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (5)$$

上式解得的包裹相位值域为 $[-\pi, +\pi]$,对于多周期条纹而言,每个周期内的相位连续分布,而相邻周期间的相位存在明显的跳变。为了获取被测物体连续的相位,需要对包裹相位进行展开。连续、完整的相位值 $\Phi(x, y)$ 可以通过下式得到:

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (6)$$

式中 $k(x, y)$ 为整数,表示 (x, y) 点处的光栅阶次。相位解包裹的方法有时域法和空域法,这里使用基于格雷编码展开相位^[28]。

分别使用理想正弦图像和高斯滤波后的二值图像,通过(5)、(6)式可以得到最终的相位分布 $\Phi_1(x, y)$ 和 $\Phi_B(x, y)$,相位误差可以表示为: $\Delta\Phi(x, y) = \Phi_1(x, y) - \Phi_B(x, y)$ 。为了能够从候选块中选出最佳二值块,该方法提供了两条二值块的评价标准:1)相位误差整体较小;2)能够适用于不同的高斯滤波环境。

该方法可以得到高精度的窄周期正弦条纹图像,却难以处理条纹较宽的二值光栅图像,因为当条纹变宽后,所需设计的二值块相应变大,而该方法采用单像素跳变进行优化,单个像素经高斯滤波后其邻域内的像素值都会受到影响,所以传统的方法容易陷入局部最优解,难以获取全局最优解。此外,该方法需要重复执行 50~500 次才能得到较好的候选块,效率较低。

2.2 新的二值块选取方法

为了更好地说明正弦光栅图像的对称性和周期性,选择两幅不同周期的图像进行分析。当光栅周期 $T=18$ 时,正弦分布如图 2 中蓝线所示,一个周期内 18 个像素的强度值表示为 I_i ,其中 $i=1, 2, \dots, 18$, $[2, 9]$ 范围内像素的强度分布和 $[11, 18]$ 是对称的,将 $[2, 9]$ 范围内的像素左右倒置就得到 $[11, 18]$ 的像素。然后,通过操作 $1 - I_i$ 改变 $[1, 5]$ 范围内像素的强度值,其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$,结果如图 2 中红线所示,和 $[6, 10]$ 范围内像素的强度值分布是对称的,即左右倒置这些像素就得到 $[6, 10]$ 的像素。因此, $[1, 5]$ 范围内的像素可以用来生成一个周期内的 18 个像素。

当光栅周期 $T=16$ 时,正弦分布如图 3 中蓝线所示, $[2, 8]$ 范围里像素的强度分布和 $[10, 16]$ 是对称的,将 $[2, 8]$ 范围内的像素左右倒置就得到 $[10, 16]$ 。然后,通过操作 $1 - I_i$ 改变 $[1, 4]$ 范围内像素的强度值,其中 $i=1, 2, 3, 4$,结果如图 3 中红线所示,和 $[6, 9]$ 范围内像素的强度值分布是对称的,即左右倒置这些像素就得到 $[6, 9]$ 的像素。因此, $[1, 5]$ 范围内的像素可以用来生成一个周期内的 16 个像素。

对于周期为 18 个和 16 个像素的正弦条纹,选取其中的 5 个像素就足以生成一个周期的条纹,即 $S_x = 5$ 。而传统方法中,二值块在 x 方向上分别需要选取 9 个和 8 个像素,所以所提方法选取的二值块的 S_x 值减小。 S_x 和 T 的关系归纳表示为:

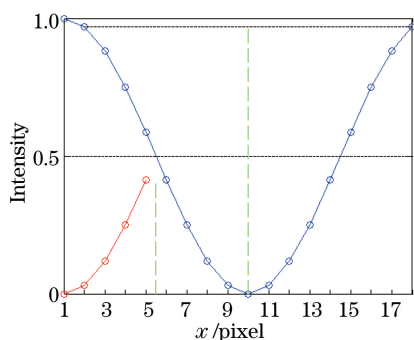


图 2 周期 $T=18$ 时正弦条纹分布图
Fig. 2 Distribution of sinusoidal fringe pattern when period $T=18$

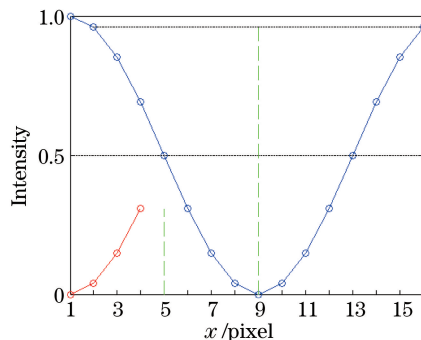


图 3 周期 $T=16$ 时正弦条纹分布图
Fig. 3 Distribution of sinusoidal fringe pattern when period $T=16$

$$S_x = \begin{cases} (T/2 + 1)/2, & \text{if } T/2 + 1 \in \text{even} \\ (T/2 + 2)/2, & \text{if } T/2 + 1 \in \text{odd} \end{cases} \quad (7)$$

下面举例说明如何用二值块生成整幅二值图像。当周期 $T=18$ 时, $S_x=5$, 选取 $S_y=4$, 一个优化后得到的 5×4 二值块如图 4(a) 所示。改变二值块的像素值(即“1”变为“0”, “0”变为“1”), 如图 4(b) 所示, 再左右倒置二值块的各列, 如图 4(c) 所示。沿 x 方向将图 4(a) 和 (c) 的二值块拼接起来, 得到 10×4 的二值块如图 4(d) 所示, 选取其中的 $[2, 9]$ 各列得到 8×4 的二值块, 如图 4(e) 所示, 再将其各列左右倒置得到二值块如图 4(f) 所示。沿 x 方向将图 4(d) 和 (f) 的二值块拼接起来, 得到 18×4 的二值块如图 4(g) 所示, 即一个周期的二值图像。然后根据周期性, 用该 18×4 二值块拼接出整幅二值图像, 如图 5 所示。

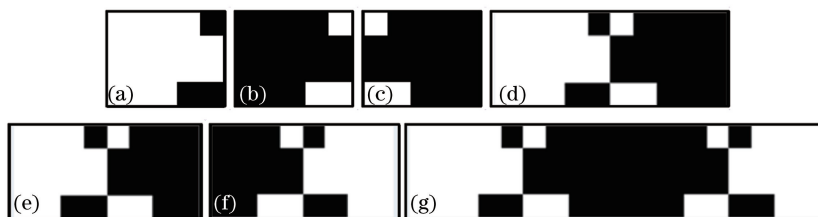


图 4 周期 $T=18$ 时一个周期的二值图像的生成方法
Fig. 4 Method of generating one period of binary pattern when period $T=18$

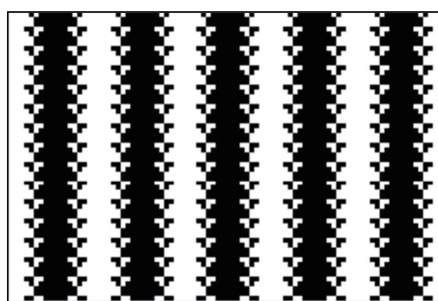
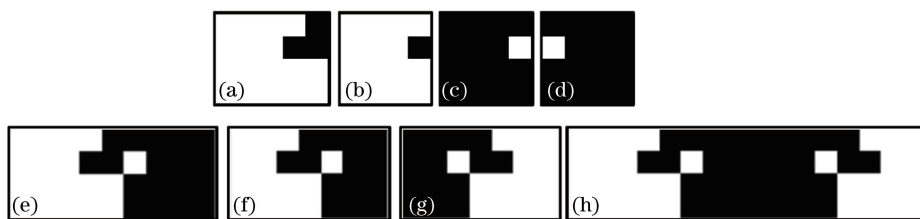
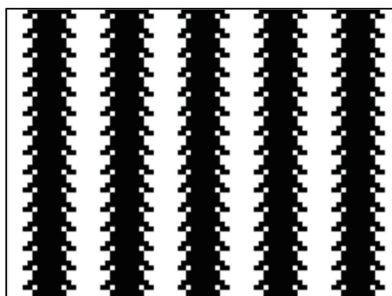


图 5 周期 $T=18$ 时完整大小的二值图像
Fig. 5 Full size binary pattern when period $T=18$

当周期 $T=16$ 时, $S_x=5$, 选取 $S_y=4$ 。一个优化后得到的 5×4 二值块如图 6(a) 所示, 沿 x 方向选取其中的 $[1, 4]$ 各列如图 6(b) 所示, 改变该 4×4 二值块的像素值(即“1”变为“0”, “0”变为“1”), 结果如图 6(c) 所示。左右倒置该二值块的各列, 如图 6(d) 所示。沿 x 方向将图 6(a) 和 (d) 的二值块拼接起来, 得到 9×4 的二值块如图 6(e) 所示。选取其中的 $[2, 8]$ 各列得到 7×4 的二值块如图 6(f) 所示, 再将其各列左右倒置得到二值块如图 6(g) 所示。沿 x 方向将图 6(e) 和 (g) 的二值块拼接起来, 得到的 16×4 二值块如图 6(h) 所示, 即一个周期的二值图像。然后根据周期性, 用该 16×4 二值块拼接出整幅二值图像, 如图 7 所示。

一般而言, 为了得到周期为 T 的二值图像, 如果 $T/2+1$ 是偶数, 选取大小为 $S_x \times S_y$ 的二值块 B_1 , 改

图 6 周期 $T=16$ 时一个周期的二值图像的生成方法Fig. 6 Method of generating one period of binary pattern when period $T=16$ 图 7 周期 $T=16$ 时完整大小的二值图像Fig. 7 Full size binary pattern when period $T=16$

变其像素值得到二值块 B_2 。左右倒置 B_2 各列得到二值块 B_3 ，沿 x 方向将 B_1 和 B_2 拼接起来得到二值块 B_4 ，选取其中的 $[2, T/2]$ 各列得到二值块 B_5 ，左右倒置 B_5 各列得到二值块 B_6 ，沿 x 方向将 B_4 和 B_6 拼接起来得到二值块 B_7 ，即一个周期的二值图像。然后根据周期性，用该二值块 B_7 拼接出整幅二值图像。

如果 $T/2+1$ 是奇数，选取大小为 $S_x \times S_y$ 的二值块 B_1 ，选取其中的 $[1, (T/2+2)/2-1]$ 各列得到二值块 B_2 ，改变其像素值得到二值块 B_3 。左右倒置 B_3 各列得到二值块 B_4 ，沿 x 方向将 B_1 和 B_4 拼接起来得到二值块 B_5 ，选取其中的 $[2, T/2]$ 各列得到二值块 B_6 ，左右倒置各列得到二值块 B_7 ，沿 x 方向将 B_5 和 B_7 拼接起来得到二值块 B_8 ，即一个周期的二值图像。然后根据周期性，用该二值块 B_8 拼接出整幅二值图像。

2.3 多像素跳变的优化方法

本文提出通过多像素跳变的方法优化二值块，更容易得到最优解或接近最优解。在多像素跳变方法中，仍然保留传统方法的单像素跳变。当二值块中当前像素的跳变完成后，从当前像素之后的所有像素中随机选择多个像素进行跳变。如果均方根误差减小，那么此次多像素跳变被视作好的跳变，并保留跳变的结果，否则还原像素值。跳变多像素的个数用参数 k 表示，取值范围为 $[2, 7]$ 。在尺寸较小的二值块优化过程中， k 可以取较小的值；而当二值块的尺寸较大时， k 需要取较大的值。对二值块中每一个像素，像素跳变会执行 k 次。例如， $k=2$ 时，当前像素首先发生跳变，然后从当前像素之后的所有像素中随机选取两个像素进行跳变。 $k=3$ 时，在当前像素跳变和两个像素跳变都完成以后，再在当前像素之后的所有像素中随机选取 3 个像素进行跳变。

若二值块的像素个数为 $N = S_x \times S_y$ ，当前像素的序号用 m 表示，即 $m = 1, 2, \dots, N-1, N$ 。某次跳变像素的个数用 n 表示，即 $n = 2, 3, \dots, k-1, k$ 。多像素跳变方法的流程图如图 8 所示。参数初始化为 $m=1$ ，对当前像素 m ，第一步就是跳变其二值状态并且保留好的跳变。第 2 步，参数 n 初始化为 $n=2$ ，从序号范围在 $[m+1, N]$ 的像素中随机选取 n 个像素，跳变二值状态并且保留好的跳变。然后， $n=n+1$ ，重复执行第 2 步直到 $n > k$ 。第 3 步， $m=m+1$ ，重复执行第一步和第 2 步直到 $m > N-k$ ，对剩下的 k 个像素只执行第一步的优化过程，这样就可以得到一个候选块。

3 仿真与分析

为了得到不同周期的光栅图像，选取周期 $T=18, 30, 42, 54, 66$ 进行仿真，相应二值块的 S_x 值由(7)式可以计算得到，即 $S_x=5, 8, 11, 14, 17$ ，而传统方法二值块的 S_x 值分别为 $S_x=9, 15, 21, 27, 33$ ，所以这里选

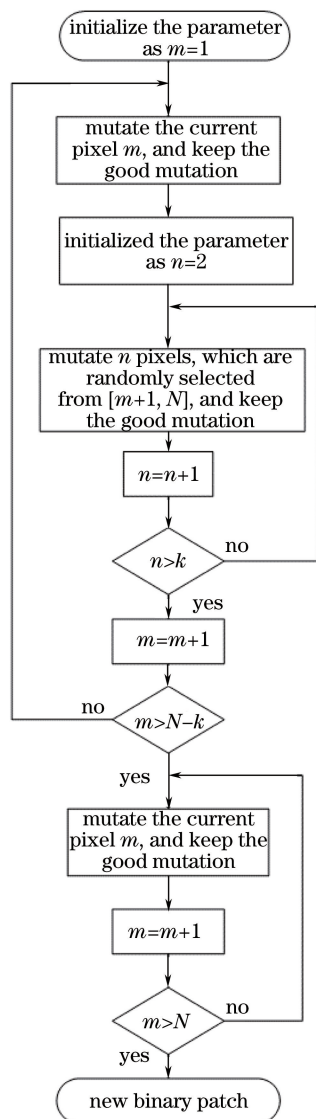


图 8 多像素点跳变方法的流程图

Fig. 8 Flow chart of multi-pixels' mutation method

取二值块的尺寸更小。 S_y 的取值范围为 $[2, 10]$ 。参数 k 设置为 7。高斯滤波器的大小设定为 5×5 且相应的标准差为 $5/3$ 。对每一种大小的二值块,重复执行多次优化过程,就可以得到许多候选块,再根据二值块的评价标准寻找最佳二值块。

所得到的二值块和相应的相位误差仿真结果如图 9~图 12 所示。图 9 和图 10 表示 $T=18$ 时的结果,图 9(a)~(h)展示了 S_y 取值范围为 $[2, 5]$ 的二值块和对应 1 个周期的二值图像,图 10(a)~(j)展示了 S_y 取值范围为 $[6, 10]$ 的二值块和对应一个周期的二值图像。图 11 和图 12 表示 $T=66$ 时的结果,图 11(a)~(h)展示了 S_y 取值范围为 $[2, 5]$ 的二值块和对应一个周期的二值图像,图 12(a)~(j)展示了 S_y 取值范围为 $[6, 10]$ 的二值块和对应一个周期的二值图像。应用不同大小的高斯滤波器来仿真不同程度的离焦。最小的高斯滤波器大小为 5×5 ,最大的高斯滤波器大小为 13×13 。当引入高斯滤波器后,就可以计算出分别由理想正弦图像和高斯滤波后的二值图像得到的相位误差,如图 9(i)、图 10(k)、图 11(i)、图 12(k) 所示。根据二值块评价标准,由图可知, 5×2 二值块的相位误差整体很小,几乎没有波动,所以该二值块为 $T=18$ 时的最佳二值块; 17×7 二值块为 $T=66$ 时的最佳二值块。另外,当周期较小($T=18, 30$)时,在尺寸较小($S_y=2, 3, 4, 5$)的二值块中比较容易得到最佳二值块;而当周期较大($T=54, 66$)时,在尺寸较大($S_y=6, 7, 8, 9, 10$)的二值块中更容易得到最佳二值块。因此,所设计的二值图像可以生成高质量的窄周期

正弦条纹和宽周期正弦条纹。

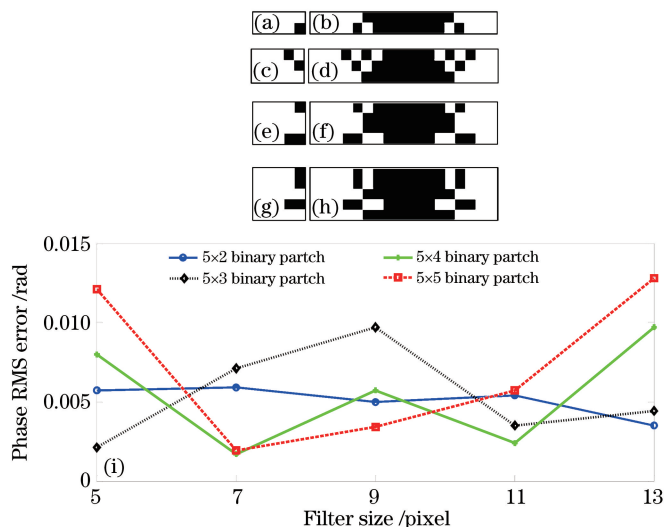


图 9 $T=18$ 时小尺寸二值块仿真结果。(a) 5×2 二值块;(b) 18×2 二值块;(c) 5×3 二值块;(d) 18×3 二值块;
(e) 5×4 二值块;(f) 18×4 二值块;(g) 5×5 二值块;(h) 18×5 二值块;(i) 不同离焦程度的相位误差

Fig. 9 Simulation results of small size binary patches when fringe period $T=18$. (a) 5×2 binary patch;
(b) 18×2 binary pattern; (c) 5×3 binary patch; (d) 18×3 binary pattern; (e) 5×4 binary patch;
(f) 18×4 binary pattern; (g) 5×5 binary patch; (h) 18×5 binary pattern; (i) phase error with different defocusing amounts

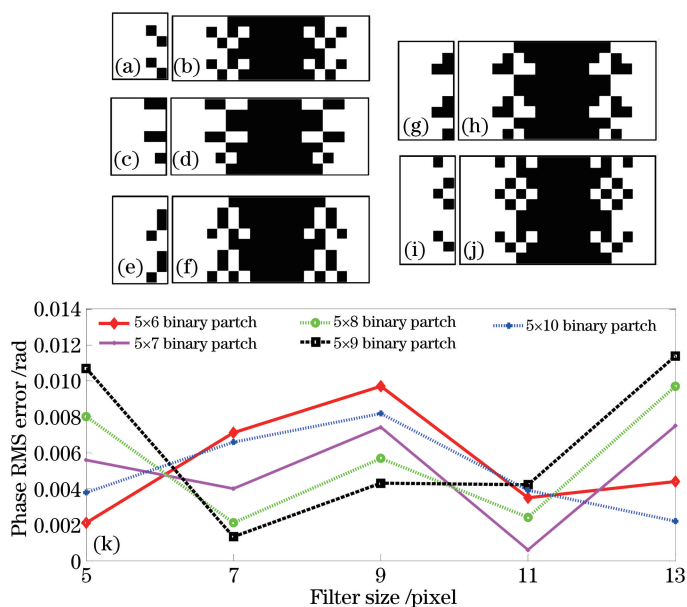


图 10 $T=18$ 时大尺寸二值块仿真结果。(a) 5×6 二值块;(b) 18×6 二值块;(c) 5×7 二值块;
(d) 18×7 二值块;(e) 5×8 二值块;(f) 18×8 二值块;(g) 5×9 二值块;
(h) 18×9 二值块;(i) 5×10 二值块;(j) 18×10 二值块;(k) 不同离焦程度的相位误差

Fig. 10 Simulation results of large size binary patches when fringe period $T=18$. (a) 5×6 binary patch;
(b) 18×6 binary pattern; (c) 5×7 binary patch; (d) 18×7 binary pattern; (e) 5×8 binary patch;
(f) 18×8 binary pattern; (g) 5×9 binary patch; (h) 18×9 binary pattern; (i) 5×10 binary patch;
(j) 18×10 binary pattern; (k) phase error with different defocusing amounts

为了说明所提方法的有效性和优越性,将其与传统的方法进行比较,仿真结果如图 13 所示,其中图 13(a)表示高斯滤波器大小为 5×5 时的相位误差,图 13(b)表示高斯滤波器大小为 13×13 时的相位误差。图中,用传统方法得到的结果由红线绘制,用所提方法得到的结果由蓝线绘制。对每个周期,分别用所

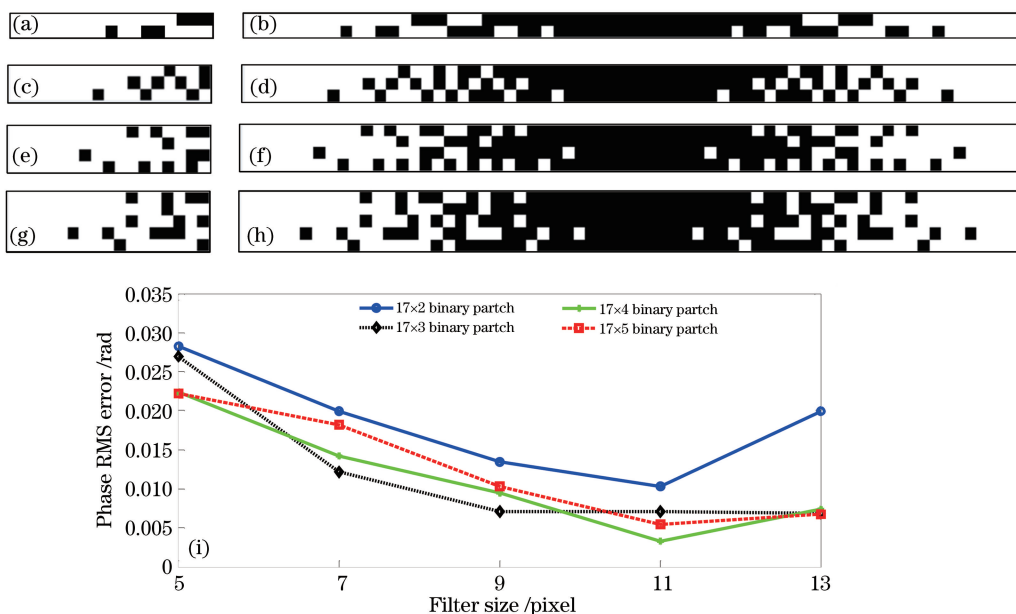


图 11 $T=66$ 时小尺寸二值块仿真结果。(a) 17×2 二值块;(b) 66×2 二值块;(c) 17×3 二值块;(d) 66×3 二值块;
(e) 17×4 二值块;(f) 66×4 二值块;(g) 17×5 二值块;(h) 66×5 二值块;(i) 不同离焦程度的相位误差

Fig. 11 Simulation results of small size binary patches when fringe period $T=66$. (a) 17×2 binary patch;
(b) 66×2 binary pattern; (c) 17×3 binary patch; (d) 66×3 binary pattern; (e) 17×4 binary patch;
(f) 66×4 binary pattern; (g) 17×5 binary patch; (h) 66×5 binary pattern; (i) phase error with different defocusing amounts

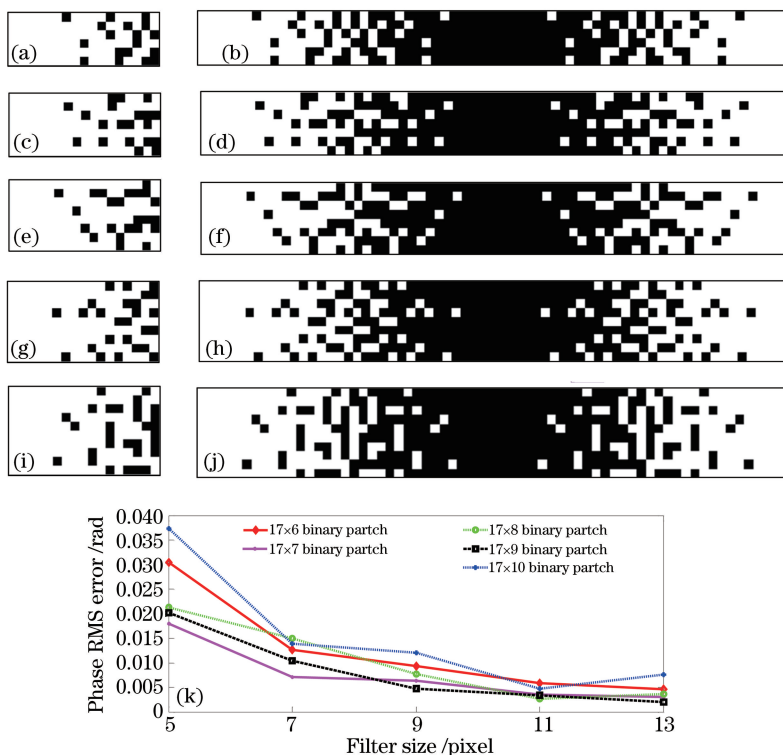


图 12 $T=66$ 大尺寸二值块仿真结果。(a) 17×6 二值块;(b) 66×6 二值块;(c) 17×7 二值块;(d) 66×7 二值块;(e) 17×8 二值块;
(f) 66×8 二值块;(g) 17×9 二值块;(h) 66×9 二值块;(i) 17×10 二值块;(j) 66×10 二值块;(k) 不同离焦程度的相位误差

Fig. 12 Simulation results of large size binary patches when fringe period $T=66$. (a) 17×6 binary patch; (b) 66×6 binary pattern;
(c) 17×7 binary patch; (d) 66×7 binary pattern; (e) 17×8 binary patch; (f) 66×8 binary pattern; (g) 17×9 binary patch;
(h) 66×9 binary pattern; (i) 17×10 binary patch; (j) 66×10 binary pattern; (k) phase error with different defocusing amounts

提方法和传统方法得到不同大小的二值块,再选取这些二值块中各个离焦程度下相位误差最小的值。大小为 5×5 的高斯滤波器表示投影仪接近聚焦的情况,大小为 13×13 的高斯滤波器表示投影仪离焦到一定程度的情况。这里不再使用更大尺寸的高斯滤波器是因为光栅条纹的对比度会降低。由图 13 可知,用所提方法比传统方法可以得到更好的结果,相位质量得到提升。

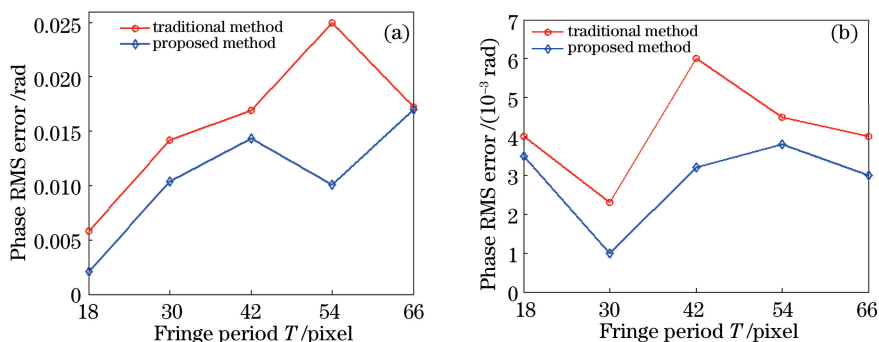


图 13 所提方法和传统方法的相位误差对比图。(a)高斯滤波器大小为 5×5 ; (b)高斯滤波器大小为 13×13
 Fig. 13 Comparing phase error between the proposed method and traditional method.
 (a) Gaussian filter size is 5 pixel \times 5 pixel; (b) Gaussian filter size is 13 pixel \times 13 pixel

4 实验结果

三维测量系统包括投影仪(DLP Light Crafter 4500)和摄像机(Basler acA2000-340km)。该系统利用标定板以及投射光栅条纹后的相位图,将投影仪当作摄像机的逆系统,通过张正友的标定方法^[29],对摄像机和投影仪进行标定,获取摄像机和投影仪的内外参数,建立图像坐标系与世界坐标系的关系,根据空间交汇法求得目标物体的三维坐标信息^[30]。

首先以白色墙面作为目标平面,使用所提方法测量过程和结果如图 14 所示,其中图 14(a)为 3 步相移法解得的主值相位的其中一行,图 14(b)为利用格雷编码展开后的相位图,可以看出解得的相位平滑,满足高质量测量的要求。分别采用所提方法、传统方法和投影灰度正弦条纹方法测量得到的相位误差,选取其中一行的结果如图 15 所示,图中红线表示使用所提方法得到的相位误差结果,蓝线表示使用传统方法得到的相位误差结果,黑线表示投影灰度正弦条纹方法得到的相位误差结果。由图可以发现,3 条线均大致在“0”值线上下波动,且所提方法的相位误差结果波动幅度相对较小。表 1 为 3 种方法测量得到的整幅相位图的均方根(RMS)误差,由表可知,所提方法测量结果具有最小的均方根误差。

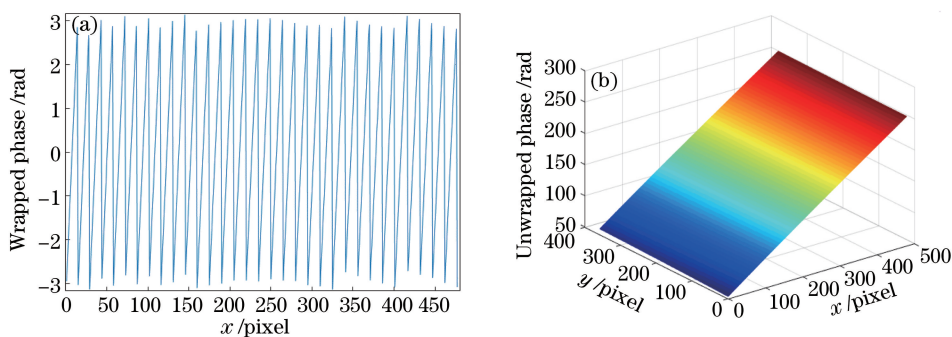


图 14 所提方法测量墙面的结果。(a)主值相位的其中一行;(b)相位展开后的绝对相位图
 Fig. 14 Measurement results of the wall with the proposed method.
 (a) Cross section of wrapped phase; (b) absolute phase diagram after unwrapping the phase

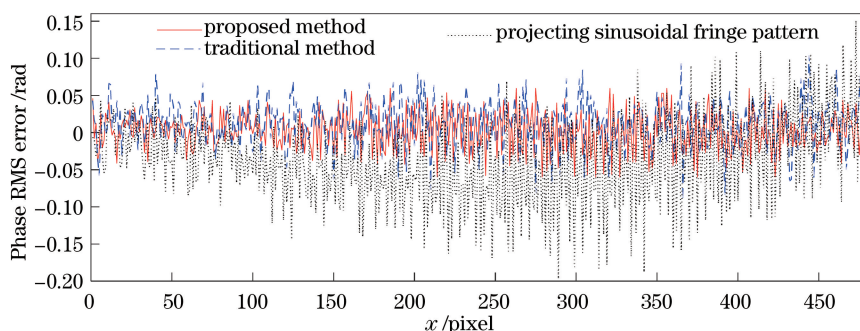


图 15 3 种方法的相位误差结果图

Fig. 15 Result of phase error of three methods

表 1 3 种方法测量得到的相位均方根误差

Table 1 Phase RMS error of three methods

Method	Phase RMS error /rad
Proposed method	0.0286
Traditional method	0.0333
Projecting sinusoidal fringe pattern	0.0682

使用条纹周期为 24 个像素的光栅,测量对象为一个石膏头像,结果如图 16 所示。图 16(a)为投影仪接近聚焦的情况,相机采集到的其中一幅相移光栅图像,图 16(b)、(c)分别为使用所提方法和传统方法得到的物体三维图像。图 16(d)为投影仪轻度离焦的情况,相机采集到的其中一幅相移光栅图像,图 16(e)、(f)分别为使用所提方法和传统方法得到的物体三维图像。由图可见,三维图像轮廓清晰可辨,满足测量要求。图 17 为嘴唇区域的放大图,可以看出所提方法得到的三维图像比传统方法得到的三维图像更加平滑,褶皱更少。在各种离焦程度下,使用所提方法得到的三维结果都优于用传统方法得到的三维结果。

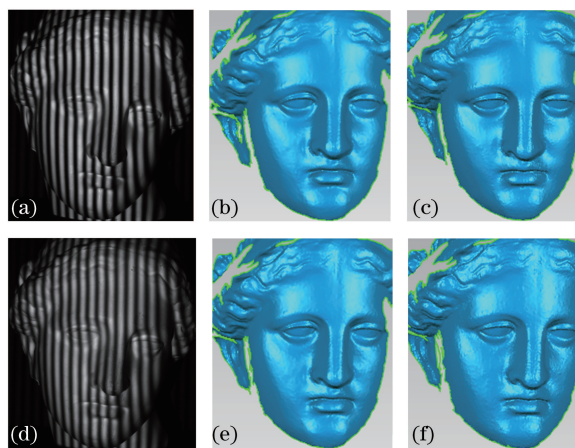


图 16 石膏头像的三维测量结果。(a)接近聚焦投影下的一幅相移图像;(b),(c)分别为接近聚焦投影下用所提方法、传统方法得到的物体三维图像;(d)轻度离焦投影下的一幅相移图像;(e),(f)分别为轻度离焦投影下用所提方法、传统方法得到的物体三维图像

Fig. 16 Three-dimensional measurement results of gypsum head statue. (a) One nearly focused fringe pattern;

(b), (c) 3D results of the proposed method and the traditional method when the projector is nearly focused; (d) one slightly defocused fringe pattern; (e), (f) 3D result of the proposed method and the traditional method when the projector is slightly defocused

5 结 论

提出了一种新的基于离焦投影三维测量的二值光栅图像生成方法,由改进的二值块选取方法和多像素跳变的优化方法相结合。选取的二值块尺寸更小,只经过几次多像素跳变的优化过程就可以得到最佳二值

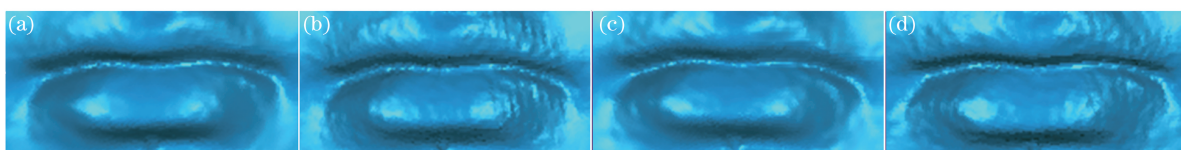


图 17 三维测量结果嘴唇区域的放大图。(a),(b)分别为接近聚焦投影下用所提方法、传统方法得到的结果；
(c),(d)分别为轻度离焦投影下用所提方法、传统方法得到的结果

Fig. 17 Zoom-in view around mouth areas for three-dimensional measurement results.

(a),(b) Results of the proposed method and traditional method when projector is nearly focused;

(c),(d) results of the proposed method and traditional method when projector is slightly defocused

块或者近似最佳的二值块,解决了传统方法选取二值块尺寸较大、难以得到全局最优解、效率低下的问题。基于对称性和周期性,利用得到的二值块生成整幅二值光栅图像。实际测量中在投影仪不同的离焦程度下,用所提方法设计的二值光栅图像都可以获得高质量的相位信息。

参 考 文 献

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
谌秋菊, 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.
- 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.
- Liu Huiqiang, Chen Wenjing, Su Xianyu, *et al.* Fast Fourier transform profilometry based on two-frequency grating projection[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(10): 39-42.
刘慧强, 陈文静, 苏显渝, 等. 采用双频光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光电工程, 2004, 31(10): 39-42.
- Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- An Dong, Gai Shaoyan, Da Pengfei. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512004.
安 冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512004.
- Wang Z Y, Nguyen D A, Barnes J C. Some practical considerations in fringe projection profilometry[J]. Opt Lasers Eng, 2010, 48(2): 218-225.
- Bing P, Qian K, Lei H, *et al.* Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry[J]. Opt Lett, 2009, 34(4): 416-418.
- Da F P, Gai S Y. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector[J]. Applied Optics, 2008, 47(3): 377-385.
- Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 123601.
- Li Z, Li Y. Gamma-distorted fringe image modeling and accurate gamma correction for fast phase measuring profilometry [J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 154-156.

- 14 Guo H W, He H T, Chen M Y. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. Appl Opt, 2004, 43(14): 2906-2914.
- 15 Su Xianyu, Zhou Wensheng. Phase-measuring profilometry using defocused projection of the ronchi grating[J]. Opto-Electronic Engineering, 1993, 20(4): 8-16.
苏显渝, 周文胜. 采用罗奇光栅离焦投影的位相测量轮廓术[J]. 光电工程, 1993, 20(4): 8-16.
- 16 Li Pingping, Zhang Qican. New method of sinusoidal grating generation based on area encoding [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2011, 9(1): 36-41.
李平平, 张启灿. 产生正弦光栅的二值化面积编码新方法[J]. 光学与光电技术, 2011, 9(1): 36-41.
- 17 Lei S, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Opt Lett, 2009, 34(20): 3080-3082.
- 18 Gong Y Z, Zhang S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the shelf DLP projector[J]. Opt Express, 2010, 18(19): 19743-19754.
- 19 Ekstrand L, Zhang S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms[J]. Opt Lett, 2011, 36(23): 4518-4520.
- 20 Ayubi G A, Ayubi J A, di Martino J M, *et al.* Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection [J]. Opt Lett, 2010, 35(21): 3682-3684.
- 21 Wang Y, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. Opt Lett, 2010, 35(24): 4121-4123.
- 22 Wang Y, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. Appl Opt, 2012, 51(27): 6631-6636.
- 23 Cheng Ju, Su Xianyu. Study on error diffusion algorithm of binary encode grating[J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 0322.
程 菊, 苏显渝. 二元编码光栅的误差扩散算法研究[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 0322.
- 24 Lü Jiangzhao, Da Feipeng, Zheng Dongliang. Projector 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.
- 25 Lohry W, Zhang S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. Opt Lett, 2013, 38(4): 540-542.
- 26 Dai J, Li B, Zhang S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. Opt Lasers Eng, 2013, 52: 195-200.
- 27 Malacara D. Optical shop testing[M]. New York: John Wiley and Sons, 2007.
- 28 Yu Xiaoyang, Wu Haibin, Yin Liping, *et al.* 3D measurement technology based on structured light by combining Gray code with phase-shift[J]. Chinese Journal of 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.
- 29 Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 30 Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083601.