

二值条纹离焦投影技术综述

付莉娜¹, 杨静雯¹, 李雁玲¹, 张宗华^{1*}, 高楠¹, 孟召宗¹, 高峰², 蒋向前²¹河北工业大学机械工程学院, 天津 300130;²哈德斯菲尔德大学精密技术中心, 英国 哈德斯菲尔德 HD1 3DH

摘要 光学三维测量技术发展已经非常成熟,在工业制造、生物医疗、文物保护等领域都有着广泛的应用。但传统条纹投影测量中使用的正弦条纹无法避免投影仪和相机 Gamma 效应的影响,导致测量误差增加。二值条纹的出现从条纹端解决了非线性问题,其非连续灰度值规避了非线性误差对测量结果的影响。同时,随着数字投影技术的发展和成熟,相对于灰度条纹,二值条纹在投影速度上也具有绝对的优势。因此,离焦投影技术开始被广泛地研究和应用。在简述离焦投影原理和二值条纹特性的基础上,对二值条纹调制技术进行了综述,分析了不同调制技术的特点及适用场景,最后展望了二值条纹离焦投影的未来研究方向。

关键词 数字投影; 二值条纹; 离焦投影; 条纹调制; 三维测量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415011

Binary Fringe Defocused Projection Technology: A Review

Fu Lina¹, Yang Jingwen¹, Li Yanling¹, Zhang Zonghua^{1*}, Gao Nan¹, Meng Zhaozong¹,Gao Feng², Jiang Xiangqian²¹School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;²Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield HD1 3DH, UK

Abstract The development of optical 3D shape measurement has been very mature, and has a wide range of applications in industrial manufacturing, biomedical, cultural relic protection and other fields. But sinusoidal fringe used in traditional fringe projection measurement cannot avoid the Gamma effect of projector and camera, which leads to the increase of measurement error. The nonlinear problem is solved by the appearance of binary fringes from the fringe generation, whose discontinuous gray value avoids the influence of nonlinear errors on the measurement results. At the same time, with the development and maturity of digital projection technology, the binary fringes have an absolute advantage in projection speed, compared with gray stripes. Therefore, defocusing projection technology has been widely studied and applied. Based on the brief introduction of the principle of defocus projection and the characteristics of binary fringe, the binary fringe modulation techniques are summarized, and the characteristics and applicable scenarios of different modulation techniques are analyzed. Finally, the future research direction of binary fringe defocused projection is prospected.

Key words digital projection; binary fringe; defocusing projection; fringe modulation; 3D measurement

1 引言

从航天器件检测到文物保护,从工业混凝土断面扫描到室内场景数字化,从铸造模具品质测量到量体裁衣,三维测量技术不再仅仅只应用于航空航天、工业制造等行业,而是逐渐生活化。随着测量技术的不断发展和完善,其应用领域也由原本的航空航天、工业制

造逐渐扩展到虚拟现实、生物医疗、服装设计、逆向工程等领域^[1-2]。由此可见,三维测量技术的应用广泛,发展前景光明。

在三维测量领域,光学三维测量有非接触、精度高、分辨率高等优点,因此逐渐发展成主要研究方向之一。测量物体按照特性分类,可以分为漫反射物体和镜面反射物体,对应的光学三维测量方法分别为条纹

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-04; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(52075147)、河北省研究生创新资助项目(CXZZXX2022053)、河北省科学技术厅外专引才引智项目

通信作者: zhzhang@hebut.edu.cn

投影轮廓术(FPP)^[3-8]和相位测量偏折术(PMD)^[9-12]。其中,对漫反射表面物体的测量,常采用条纹投影方式获取表面信息。三角测量法^[13]是常用的一种FPP测量方法,基本原理为由待测物、相机和投影仪构成的三角化关系获取深度信息。具体操作为:首先通过计算机生成光栅条纹,由投影仪将条纹投射至待测物体表面;再由相机从另一方向捕获其变形图像,通过算法计算得到折叠相位和展开相位;最后根据标定好的系统参数,建立物体表面与相位的关系,从而得到物体形貌信息。常用的获取相位的方法有傅里叶变换法(FTP)^[14-17]和相移轮廓术(PSP)^[18-21]。FTP对变形条纹进行频域变化,在频域中通过带通滤波器提取单个条纹图像的相位值,测量速度快。但由于带通滤波的限制,FTP方法难以测量边缘、尖锐、突变、反射率不均匀的物体,因此不适用于测量非连续表面物体。PSP需要投影至少3幅图像才能获得条纹的相位信息,特点是测量精度高,测量时间随着投影图像的数量增加而增加。两种方法都可以高速获取相位信息,因此在不同的测量场景中都有着广泛的应用。

投影按照条纹类型分类,可以分为正弦条纹投影和二值条纹离焦投影。正弦条纹因包含的相位信息对传感器噪声、物体表面反射率变化有鲁棒性,并能够实现高时空分辨率,常被采用。而二值条纹则是近年才逐渐兴起的一种投影条纹。相较于正弦条纹投影,二值条纹离焦投影仅在投影方式上有所不同,却能从投影速度和精度两个方面优化测量结果。

为了帮助研究者对二值条纹离焦投影技术有更全面的理解,促进相关研究的进一步发展,本文综述了近年来二值条纹离焦投影技术在光学三维测量领域中的研究情况。首先,介绍了离焦投影的原理;其次,梳理了二值条纹调制技术近年来的发展状况;然后,分析比较了几种典型条纹调制技术的优缺点;最后,对二值条纹离焦投影技术的现状和未来的发展情况进行了总结与展望,为以后的研究方向提供参考。

2 二值条纹离焦投影

传统FPP常使用正弦条纹进行聚焦投影。因为具有相位连续性,正弦条纹可以与待测物体的深度信息建立对应关系。因此,传统FPP可将被测物体表面形貌信息转换为求解图像像素点的相位信息。然而,商用投影仪为了顺应人眼的观测惯性,在设计时通常会引入非线性误差,也称Gamma效应^[22-23]。正弦条纹的灰度值具有连续变化的特点,因此后续相位计算的精确度会受到投影仪Gamma效应的影响。为了消除非线性误差对测量结果的影响,衍生了大量的修正和补偿算法^[24-26],二值条纹离焦投影是相对于正弦条纹投影提出的一种光学三维形貌测量技术。二值图像的灰度值只有0和1两个状态,在投影时不受设备限制,规避了Gamma效应造成的非线性误差。由于独特的优势,二值条纹在条纹投影三维测量领域迅速发展起来^[27]。

2.1 离焦投影原理

正弦条纹可以通过连续的灰度值变化来表示相位变化。但二值条纹的灰度值是非连续变化的,所以条纹的相位变化无法通过灰度值表示,使相位计算的困难程度增加。对二值条纹进行离焦投影后,离焦成像可以模糊条纹边缘,使之平缓变化,解决了图像灰度值与相位不匹配的问题,这样相机捕获的变形条纹具有连续性,便于相位计算。

离焦投影原理如图1(a)所示,从P点发出的光线经透镜成像于O点, u 为物距, v 为像距, f 为焦距。当O点与成像平面不重合时,P点在成像平面的光强分布是一个直径为 D 的模糊光斑,认为此时得到的图像为离焦投影图像。虚线框内的区域称为离焦区域。 ΔZ 表示O点与成像平面的距离,随着 ΔZ 增大,离焦区域可以分为三个部分,包括近离焦区域、理想离焦区域和过离焦区域,如图1(b)所示。在近离焦区域内,条纹轻微离焦,正弦性不够;在过离焦区域,图像对比度

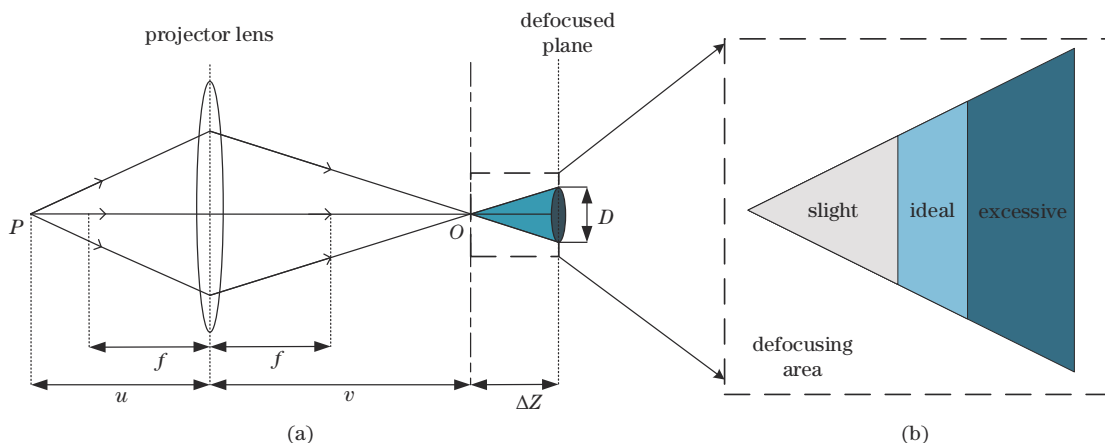


图1 离焦投影原理图。(a)离焦成像;(b)离焦区域划分

Fig. 1 Principle of defocusing projection. (a) Defocusing imaging; (b) defocusing area division

下降,信噪比降低。近离焦区域和过离焦区域成像质量差,难以从中提取有用的相位信息,但是在理想离焦区域内成像后可以得到高质量的类正弦条纹。

不同离焦水平下的二值条纹如图 2 所示。随着离焦程度逐渐变大,图像条纹边缘开始模糊,灰度值呈正

弦化。但当离焦程度持续变大超出理想离焦区域时,图像质量开始下降,表现为条纹亮度低,图像对比度低。这与不同离焦区域成像结果分析一致,二值图像质量会受到离焦程度的限制。因此,如何选择合适的离焦程度是二值条纹离焦投影的关键问题。

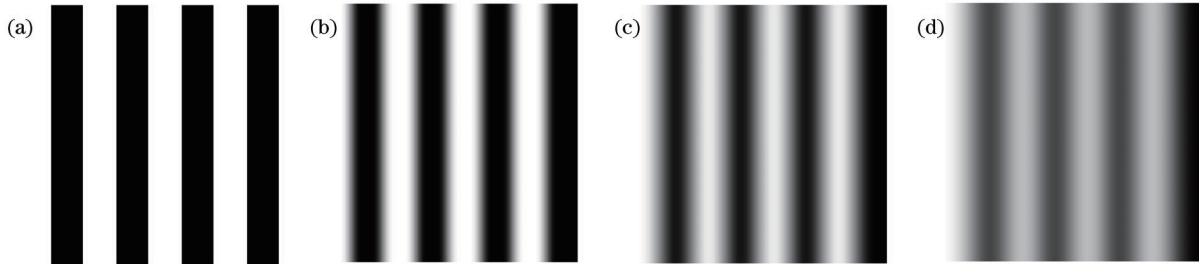


图 2 不同离焦程度的二值条纹。(a)初始图像;(b)~(d)离焦程度递增的二值图像

Fig. 2 Binary fringe with different defocusing level. (a) Original fringe; (b)-(d) binary images with increasing defocusing level

2.2 方波二值条纹

2.2.1 二值条纹的特性

标准二值条纹是由多个不同频率的正弦信号叠加而成的,因此可以从方波信号中提取出具有连续性特征的正弦信号。图 3(a)为方波信号谐波分布情况,横坐标表示谐波级次,纵坐标表示各级次谐波信号的时

域强度。提取有效的正弦信号后仅需要保留方波的基频信号和一次谐波。图 3(b)为方波谐波幅值变化情况, a_1 和 a_2 分别代表一次和三次谐波的幅值。可以看出谐波的幅值在高频段远低于低频段,即随着谐波次数增加,谐波幅值呈衰减态势,而高次谐波可以通过设置的滤波器滤除。

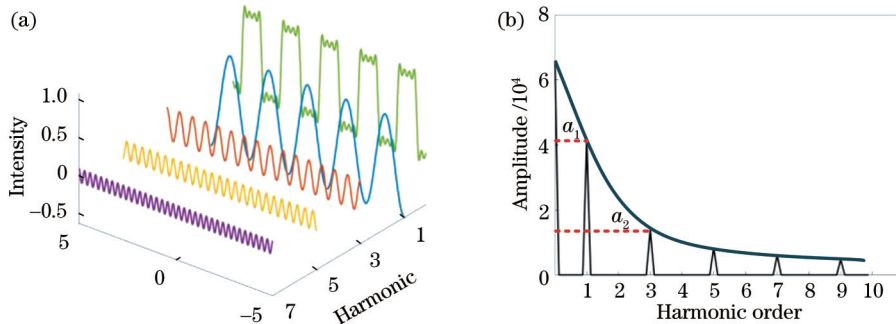


图 3 方波信号的性质。(a)谐波分布;(b)谐波衰减情况

Fig. 3 Property of square wave signal. (a) Harmonic distribution; (b) harmonic attenuation

离焦的过程可以视作目标函数与点扩散函数进行卷积的过程。点扩散函数 $G(x, y)$ 可以用高斯低通滤波器表示为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中: σ 表示滤波器的标准差,与离焦程度有关。仿真过程中可通过调整参数 σ 的大小模拟不同离焦程度。用 $f(x, y)$ 表示二值函数,离焦后得到的信号表示为

$$I(x, y) = f(x, y) \otimes G(x, y). \quad (2)$$

对于高斯滤波器,高斯核决定了滤波器的作用范围。以一维高斯分布函数图像为例,如图 4 所示,曲线代表滤波函数,曲线与 x 轴围成的区域表示滤波后得到的信号。 σ 越大,高斯滤波器的频带越宽,平滑程度越好。换言之,用高斯低通滤波器模拟离焦过程时,标准差越大对应的离焦程度越高。

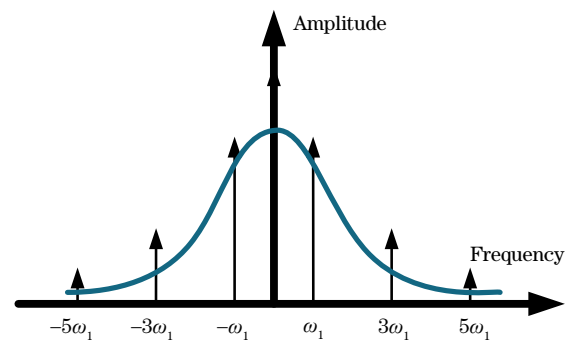


图 4 高斯核不同的滤波器

Fig. 4 Fliter with different Guassian kernels

图 5 表示经滤波器处理前后的信号对比情况。图 5(a)和图 5(b)分别表示离焦前后的时域信号,离焦后信号呈正弦性,但条纹强度被削弱。图 5(c)和图 5(d)分别对应图 5(a)和图 5(b)信号的频域分布情

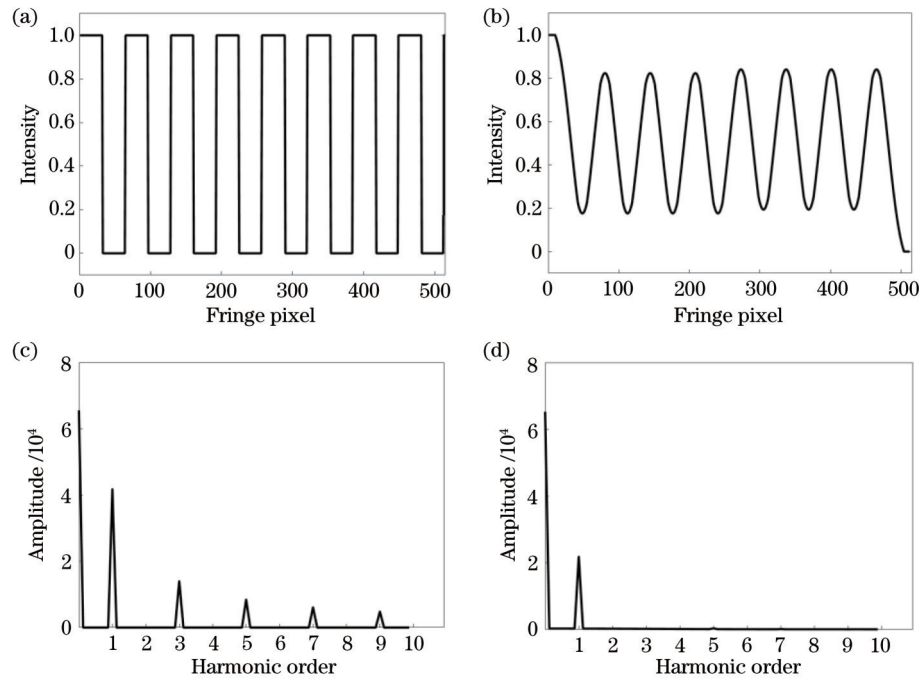


图5 滤波前后的对比。(a)滤波前的信号;(b)滤波后的信号;(c)图5(a)的频域图;(d)图5(b)的频域图
Fig. 5 Comparison before and after filtering. (a) Pre-defocus signal; (b) defocused signal; (c) frequency spectrum of Fig. 5 (a); (d) frequency spectrum of Fig. 5 (b)

况,从图5(d)可以看出,除基频信号和一次谐波外,高次谐波已经被完全滤除。所以离焦可以消除谐波的影响,得到理想的类正弦信号。

2.2.2 二值离焦的起源

在国内,四川大学苏显渝团队^[28]最早将二值条纹应用于光学测量,并提出了一种基于龙基光栅^[29]离焦投影的相位测量轮廓术。龙基光栅(Ronchi Rulings)又称朗奇刻线,在目标区域内以线宽为1/2线距的标准形成等距线条,满足此条件的光栅称为龙基光栅。它主要用于检测光学分辨率、长畸变和等焦距稳定性等。苏显渝团队研究发现商用低分辨率液晶屏得到的离焦龙基光栅条纹可以被近似看作正弦条纹。但二值条纹的高次谐波无法直接通过离焦完全滤除。PSP在对正弦条纹进行计算时,增加相移步数可以减小相位误差,所以对二值条纹使用相移法时,应该考虑到条纹的特性选取特定的 N 步相移进行计算,进一步消除谐波的影响。

通过对标准正弦条纹添加特定的谐波分量,比较两次相位计算结果,可以分析得到 N 步相移算法($N=3,4,\dots,9$)对不同阶次谐波的敏感程度,分析比较结果如表1所示,其中“√”代表算法对相应阶次谐波敏感。由于高频段谐波衰减严重,幅值大幅下降且易被滤波器滤除,故这里只列举了阶次10以内的敏感度对照情况。由表1可得:4步相移算法对奇次谐波敏感。但方波信号只存在奇次谐波,如果对标准方波条纹采用4步相移法进行相位展开,方波的所有谐波都会对条纹的相位计算产生影响,使得相位展开结果存在误差。

表1 N 步相移算法对谐波的灵敏度

Table 1 Sensitivity of N -step phase shifting algorithm to harmonics

N	Harmonic order								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	√		√	√		√	√		√
4		√		√		√		√	
5			√		√			√	
6				√		√			
7					√		√		
8						√		√	
9							√		√

当 N 不断增加时,低频段的谐波对计算结果的影响逐渐降低。因此相移步数 N 越大,对低频段信号敏感度越低。但是步数 N 越大,图像数量的增加问题则会导致计算速度和投影速率下降,影响测量速度。

二值条纹的特殊性提供了研究光学三维测量的新思路,相关研究者开始探究二值条纹应用于物体形貌测量的可行性。Lei等^[30]提出了平方二值离焦法(SBM),平方二值条纹离焦后产生理想的正弦波。条纹平方二值离焦法在本质上和龙基光栅离焦投影方法相同^[31-33],主要区别在于生成二值条纹时采用的方法不同。其中前者使用数字投影仪(DLP)直接生成,而后者利用光栅投影得到。DLP的使用不仅改变了条纹投影的方式,同时也加快了二值条纹投影的研究进程。

基于视觉的光学三维测量中,相机和投影仪都是常用的仪器设备。随着数字信号处理技术的发展,数

字投影技术逐渐替代了在测量领域中应用的光栅投影技术。DLP 以数字微镜器件(DMD)为光阀反射器件,通过控制 DMD 状态形成不同图像^[34-35]。DMD 实际上是互补金属氧化物半导体(CMOS)芯片工艺集成在储存器上的铝反射镜阵列^[36-38]。DMD 控制器为每个基本存储单元加载一个“1”或一个“0”。施加镜片复位脉冲后会引引起每个微镜产生偏离,从而达到相应的 $+/-^{\circ}$ 状态^[39]。TI 公司 DLP 产品系列配备了倾斜角分别为 $+/-12^{\circ}$ 和 $+/-17^{\circ}$ 两种不同状态的芯片。图 6 是倾斜角为 $+/-17^{\circ}$ 的 Tilt & Roll Pixel(TRP)微镜架构,它实现了更小的 DMD,具有更好的便携性。

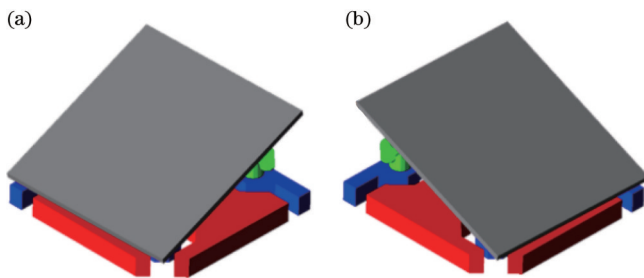


图 6 TRP 芯片示意图^[39]。(a) -17° ; (b) $+17^{\circ}$
Fig. 6 Schematic of TRP chip^[39]. (a) -17° ; (b) $+17^{\circ}$

DMD 上覆盖了数量庞大、像素间距极小的微镜,使得图像质量更平滑。相较于传统投影方式,DLP 提供了更好的投影效果,并且在投影速度、分辨率及可靠性等方面都具有更强的优势,在光学测量中起着越来越重要的作用。DMD 的切换速率与灰度级数量成反比,图像灰度级数量越少,DLP 投射速度越快,使二值条纹投影在速度上更有优势。其中 DLP 投影大小为 1024×768 ,对二值图像的帧率达 $9.7 \times 10^3 \text{ frame/s}$ ^[40],投影速率远大于正弦条纹投影测量。

2.2.3 二值条纹投影的优势

理论上,二值条纹相较于正弦条纹在测量速度、消除非线性误差两个方面都具有一定优势。Lei 等^[41]对二值条纹和正弦条纹投影进行了对比,得出二值条纹在投影中不仅能避免 Gamma 误差,在投影仪和相机的同步问题上效果也更好的结论。但是如果采用三步相移法进行相位解算,则对二值条纹的展开相位精度低于正弦条纹。此外,二值条纹也受到理想离焦区域的限制,所以采用二值条纹进行物体深度测量也存在一定的限制。Zhang 等^[42]研究发现二值条纹的应用使得图像投影速度得到了一定提高。Chen 等^[43]研究发现当相移步数 N 等于条纹周期宽度 T 时,可以准确地从条纹图中恢复出相位。Hyun 等^[44]验证了 Zhang 等和 Chen 等的结论^[42-43],并证明了在 $N = T$ 的条件下无论信噪比如何变化,投影二值条纹的测量结果都优于正弦条纹。Li 等^[45]在不同测量系统中测试证明了 Chen 等提出的方法^[43]具有广泛适用性。Ekstrand 等^[46]使用不同的相移算法对二值条纹离焦投影的影响进行了比

较,在进行 9 步相移计算时可以实现快速高精度测量,且不存在测量深度范围优先和校准困难的问题,即使在近离焦区域也能达到很好的测量效果。此外,该课题组^[47]还提出一种用于相位恢复、非连续点相位误差消除的计算框架,从而拓展了测量范围。

二值条纹应用于条纹投影测量中可以提升测量精度,但也存在一定的局限性,即提高对二值条纹的测量精度,会牺牲测量速度。为了在不增加图像数量的基础上提高测量的精确度,对二值条纹进行调制成为了新的选择。

3 二值条纹调制技术进展

方波信号生成的标准二值条纹是最具代表性的二值图像,但直接使用方波二值条纹进行投影也存在一些问题。方波二值条纹的高次谐波通过滤波器很难完全滤除,且 N 步相移法也无法完全避免谐波干扰,为解决该问题,二值条纹调制技术作为优化方法被提出。条纹调制的主要作用是使二值条纹离焦后在正弦性、图像对比度和相位展开等方面呈现更理想的效果。二值条纹调制根据条纹调制情况可以分为一维调制和二维调制。一维条纹调制是沿着图像的横向或者纵向对条纹进行改变的,主要包括脉宽调制条纹^[48-50]、编码条纹^[51-54]等调制方法。二维条纹调制则是在图像横向和纵向两个方向都进行改变的,包括抖动技术^[55-59]、遗传算法^[60]和区域调制法^[61-62]等。

3.1 一维调制技术

脉冲宽度调制(PWM)是一种模拟控制方式^[48-50],在测量、通信、功率控制与变换等领域中有着广泛的应用。这类控制方式通过改变脉冲序列的周期进行调频或者通过改变脉冲的宽度或占空比进行调压,利用适当的控制方法即可使电压与频率协调变化。该方法在三维测量中被用于对条纹周期进行脉冲宽度调制。编码调制是一种将灰度图像量化拆分后重新叠加的测量方法,得到的二值图像不受非线性误差影响,同时相机捕获图像的对比度不受影响。脉宽调制的原理是经过调制,信号的高次谐波尽可能集中分布在远离基频信号的高频段,使得在离焦程度较小的情况下可以得到较好的正弦效果。编码条纹则是通过编码规则对多幅二值条纹进行叠加得到灰度值呈周期性连续变化的图像。但两种方法在应用中都会受到条纹间距的限制,因此这类方法多用于条纹间距较小的测量场合。

3.1.1 正弦脉宽调制

正弦脉宽调制(SPWM)技术最初用于电气工程领域,对电压电流进行调节控制^[63-64]。Ayubi 等^[65]将 SPWM 技术应用到条纹投影三维测量中,用于对二值条纹进行调制。相较于方波二值条纹,调制条纹在离焦时可以在相同的条纹周期宽度范围以更低的离焦程度获得较高质量的正弦条纹。正弦脉宽调制条纹通过正弦波和三角波相减得到,表示为

$$b_{\text{PWM}}(t) = \text{sgn} [r(t) - c(t)], \quad (3)$$

式中: $c(t)$ 表示载波信号; $r(t)$ 表示参考信号。

$$r(t) = A + B \cos(2\pi f_1 t + \theta_1), \quad (4)$$

式中: f_1 代表正弦信号 $r(t)$ 的频率; θ_1 表示初始相位。 f_c 代表载波信号 $c(t)$ 的频率, 并且满足

$$f_c = k \times f_1, \quad k \in \mathbf{N}^+. \quad (5)$$

为了便于表述, 称 k 为 SPWM 条纹的调制度。设置 k 为不同值, 可以得到不同 f_c , f_c 的取值决定了谐波的位置。将高次谐波调制到远离基频信号 f_1 的高频段, 此时滤波器的标准差 σ 即使选取较小的值也可以滤除高次谐波。

SPWM 条纹 (周期宽度 $T=60$ pixel) 的频域分布如图 7 所示, 曲线表示滤波函数。图 7(a) 和图 7(b) 分别表示标准差为 σ_1 、 σ_2 的滤波器在 $k=9$ 和 $k=13$ 下的情况。虚线框标明高阶谐波集中出现的位置: 图 7(a) 中主要集中在 $9 \times f_1$ 频段; 图 7(b) 中则主要集中在 $13 \times f_1$ 频段。为了得到完整的一次谐波, 设计滤波器时应根据高次谐波集中出现的频段, 设置截止频率。对于 $k=9$ 和 $k=13$ 的条纹图像, 对于调制度较高的条纹图, 更容易消除谐波影响。由此可知, 对于正弦脉宽调制条纹, 可以通过增加调制度来减小离焦程度。离焦程度与图像对比度、图像抗噪声能力成反比关系, 故降低离焦程度可以改善条纹质量。

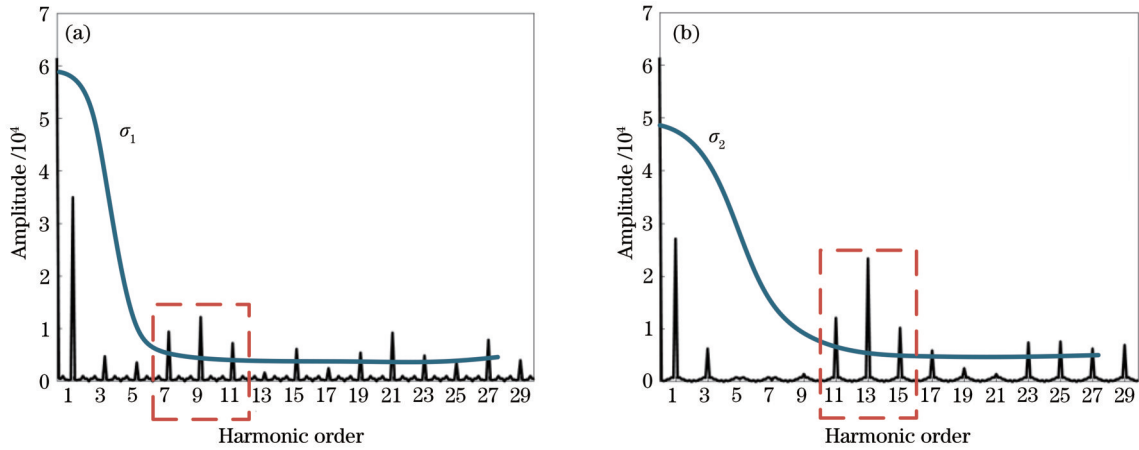


图 7 不同调制频率的 SPWM 频谱图。(a) $k=9$; (b) $k=13$

Fig. 7 Frequency-spectrum diagram of SPWM fringe with different modulation frequency. (a) $k=9$; (b) $k=13$

3.1.2 优化脉宽调制

最佳脉宽调制(OPWM)技术是 Wang 等^[66]提出的一种通过设置断点, 有目的地消除选择的高频谐波进而改进条纹的方法。其原理是消除 N 个高次谐波, 以 $1/4$ 周期对称的方波信号作为基底, 并在每 $1/4$ 周期处插入 $N+1$ 个断点。通过数学方法解非线性超越方程组^[67-69], 确定添加断点的位置, 非线性超越方程组表示为

$$\begin{cases} 1 + 2 \sum_{i=1}^{N+1} (-1)^i \cos a_i = M \\ 1 + 2 \sum_{i=1}^{N+1} (-1)^i \cos(5a_i) = 0 \\ \vdots \\ 1 + 2 \sum_{i=1}^{N+1} (-1)^i \cos(n \times a_i) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $n = 3 \times N + 1$; M 为信号的幅值, 且 $M \in [0, 1]$ 。计算出 a_i 的值且满足限定要求, 则可确定其唯一性, 限定要求为

$$0 \leq a_1 \leq \dots \leq a_i \leq \dots \leq a_{N+1} \leq 1. \quad (7)$$

Wang 等^[70]对 SBM、SPWM 和 OPWM 三种方法在测量时的优缺点进行了比较, 对比结果表明 OPWM 方法在精度和稳定性上均为最佳。理论上 OPWM 技术可以插入无穷个断点, 滤除影响测量结果的所有谐波, 得到高质量的正弦条纹图案。但随着断点个数的

增加, 所需解算的 a_i 数量也随之增加。特别是当需要消除多个高次谐波的影响时, 对于非线性超越方程组, 解算十分复杂。由于计算难度的限制, 该方法并没有得到广泛应用。

Zuo 等^[71]提出了三级 SPWM(TPWM)方法, 进一步减小了获取高质量类正弦条纹所需的离焦量。该方法利用一个正弦波和两个相差 π 个相位的高频三角波进行赋值比较得到 TPWM 波形, 进一步降低离焦程度。但这本质上并没有改变条纹宽度的适用范围, 且增加了灰度级, 在投影条纹时一定程度上会影响 DMD 的速率。

双极双边调制模式(BDEM)是 PWM 的一种特殊模式, 在该模式下所有偶次谐波的偶次边带谐波和奇次谐波的奇次边带谐波可以被消除^[48]。Silva 等^[72]利用 BDEM 产生彩色双极双边条纹。该方法将不同调制度的 BDEM 条纹调制到红、绿、蓝三通道中, 相较于单一通道的同频率条纹, 在相同频段可以有效抑制高次谐波的生成。Wang 等^[73]对 BDEM 方法进行进一步改进, 利用两个 PWM 条纹相减得到一个三级 BDEM 条纹(D-TPWM), 这是 TPWM 的一种特殊形式。此外, 文献^[73]中还讨论了周期宽度 $T=16$ pixel 至 $T=1140$ pixel 范围内不同周期宽度的条纹对应的最佳调

制度。该方法弥补了三级脉宽调制在过低或过高周期像素的情况下误差增大的缺点,扩大了 PWM 方法的适用宽度范围。

3.1.3 编码调制条纹

对二值条纹的一维调制中,另一类方法是编码调制条纹方法。二值条纹虽然可以避免投影仪的非线性误差影响,但是离焦投影会降低图像的对比度和信噪比,因此图像获取过程中可能会造成信息丢失,这会导致相位计算产生误差。为了解决这一类问题,编码二值条纹的方法被提出,编码二值条纹既避免了非线性误差,又保留了图像的高对比度,此外还不受离焦区域的限制,其测量范围与标准正弦条纹的测量范围几乎一致。编码特性降低了系统噪声和非线性误差对测量精度的影响。

Ayubi 等^[74]提出了一种将多幅二值图像叠加表示正弦图像的方法。Flores 等^[75]采用编码将多个二值图像叠加组成一幅三角条纹图,而非正弦条纹。Zhu 等^[76]采用时空二值编码(TSBE)方法将正弦条纹根据强度量化分级拆分为多个二值条纹,并根据时序进行投影。其具体操作步骤为:首先生成一个标准化的正弦条纹,其次对正弦条纹进行等间隔强度分区,得到 K 个条纹($K \geq 2$, 且 K 为整数)。等间隔强度分区的公式为

$$T^k = \frac{2k' - 1}{2K}, \quad k' = 1, 2, 3, \dots, K. \quad (8)$$

对不同强度区间的条纹进行量化,得到 K 个二值条纹。将 K 个二值条纹处理后组合得到正弦条纹。此方法中无论是投影仪还是相机都设置为聚焦状态,这使得 TSBE 方法具有相较于其他空间编码条纹离焦投影的特有优势:测量范围可以与标准正弦条纹投影时一样大。

除灰度编码外,二值条纹彩色编码的研究也取得一些成果^[77]。彩色编码图像可以通过颜色通道调制,在一定程度上减少投影图像数量,提高测量速度。彩色编码图像还可以通过改变颜色编码方式消除有色物体自身颜色对测量结果的影响,从而改善测量结果。

3.2 二维调制技术

二维条纹调制包括抖动技术、遗传算法和区域调制法等。抖动^[78-79]是指通过有限数量的灰度值得到拥有更高强度灰度级别图像的过程,在数字信号处理领域应用较为广泛,如音视频处理、打印技术等。抖动技术对图像进行处理后可以将一幅 8 位的原始图像转换成 1 位图像。抖动技术包含多种方法,但不是所有经抖动技术处理得到的二值图像都能具备理想类正弦性,经过探索后发现 Bayer 抖动算法、Floyd-Steinberg 抖动和遗传算法在处理二值图像时有较好的效果。区域调制技术区别于抖动技术,不需要对每个像素点进行处理,采用对图像分区域处理的模式进行图像调制。区域调制的原理更接近脉宽调制,不同的是区域调制

从二维的角度进行变换。

3.2.1 Bayer 抖动算法

Bayer 抖动算法依据抖动模式设置二维阈值网格,网格的值固定不变,但各阈值之间互不相同^[80]。对拟处理图像的每个像素按顺序与该网格的值进行大小比较,根据抖动模式中设定的阈值对原始图像的每个像素进行量化处理。由于抖动过程中阈值在相邻像素间不断变化,所以经过处理后实现了对量化误差的去相关。通过确定相关参数值,设置合适的抖动模式,得到有效的量化灰度图像。Bayer 抖动模式可以描述为

$$\begin{cases} \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_{n+1} = \begin{bmatrix} 4\mathbf{M}_n & 4\mathbf{M}_n + 2\mathbf{U}_n \\ 4\mathbf{M}_n + 3\mathbf{U}_n & 4\mathbf{M}_n + \mathbf{U}_n \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: \mathbf{M}_1 是最小的 2×2 矩阵; \mathbf{U}_n 为 n 维单位矩阵。选择不同的 N 可以得到不同的抖动模式。在 Bayer 抖动中,当网格大小为 2^N (N 为整数) 时,存在一个最佳抖动模式,在该模式下噪声尽可能高。

Wang 等^[81]将抖动技术首次用于三维测量领域,提出了采用 Bayer 抖动算法处理条纹的方法。Bayer 抖动技术处理正弦条纹的结果如图 8 所示。图 8(a) 是一幅标准正弦条纹,图 8(b) 是图 8(a) 经 Bayer 抖动处理后的二值条纹。结果表明经抖动处理的图像仍具有正弦条纹图像特征。二值条纹经抖动处理后由投影仪投射,即使在近离焦区域或在保持宽条纹间距的情况下仍然可以呈现较好的正弦特性,但直接使用 Bayer 抖动算法对图像进行处理时,在条纹周期宽度较窄情况下实现的改进程度较为有限。因为 Bayer 抖动技术只是简单地应用单个矩阵将 8 位灰度图像转换为 1 位二进制图像,改变了正弦条纹的周期性和对称性,因此这种方法得到的图像质量还有一定的提升空间。

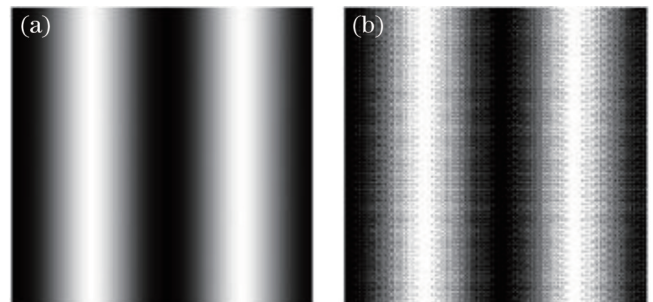


图 8 Bayer 抖动技术处理正弦条纹^[81]。(a) 正弦条纹; (b) 对图 8(a) 进行 Bayer 抖动处理后的结果

Fig. 8 Bayer dithering technique for sinusoidal image^[81]. (a) Original sinusoidal image; (b) image obtained by Bayer dithering for Fig. 8(a)

Dai 等^[82]提出了一种基于相位的 Bayer 抖动优化算法(P-Bayer),用对相位域的抖动图案进行优化后的结果取代强度域的抖动图案。迭代算法不断刷新当前

像素的状态(0或1),使得抖动图像的相位与理想相位之间的误差最小。在算法框架内定义了改进规则和收敛规则,前者控制算法是否对当前像素状态进行改变(0变1,或者1变0),后者决定迭代算法在什么时候停止。此外,Dai等^[83]还提出了基于强度的Bayer优化算法(I-Bayer),指出抖动后的图像在结构上与标准正弦条纹的接近程度可以用于判断条纹质量。Sun等^[84]也在强度优化上进行了研究,指出在三步相移中,信号的 $3 \times l$ 次谐波会增加强度误差。因此,为了消除 $3 \times l$ 次谐波,定义了一个关于强度误差的目标函数,并使其尽可能小,从而达到优化的目的。

根据目标函数不同,对Bayer抖动的改进可以分为强度优化和相位优化两类技术。这两类方法在进行相移计算时得到的结果并不相同。Dai等^[85-86]对两种优化方法进行比较,评估了不同相移算法、优化方向和初始模式对计算结果的影响。对比得到:强度域优化

可以在不同离焦程度下具有较强的鲁棒性,但不能有效地减小相位误差;虽然相位域优化在离焦后,相位呈现出线性特性,但是稳定性差。两种优化算法在单独使用时对条纹质量的改善效果都不明显。

为了兼顾稳定性和相位精确度,并且考虑到正弦结构的对称性和周期性,Xiao等^[87]提出了一种结合两种相位和强度的优化框架。在优化框架中对图像的每一个像素逐个进行处理,迭代得到一个最佳局部图像,再将其沿着 x 和 y 方向平铺。Lu等^[88]也提出了优化抖动算法框架,算法框架如图9所示。该框架引入了条纹结构相似性指数和优化强度残差两个参数,将计算结果是否收敛作为标准去评判抖动条纹在结构和强度上是否与理想正弦条纹呈趋同性,以此来判定条纹质量。经过优化框架评判后得到的条纹图同时具有基于相位和基于强度优化方法处理后图像的优点。该方法在减小相位误差的同时具有良好的鲁棒性。

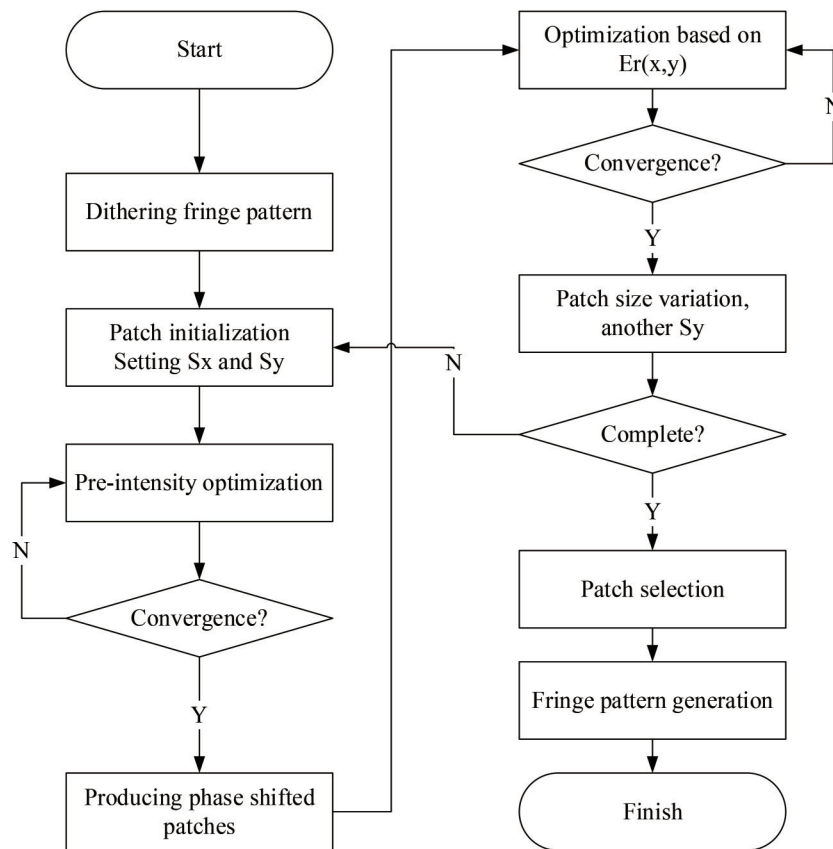


图9 Bayer抖动优化算法框架^[88]

Fig. 9 Framework of Bayer dithering optimization algorithm^[88]

3.2.2 误差扩散算法

误差扩散抖动法^[89-92]对图像进行扫描时先对灰度图像的当前像素与阈值进行比较,得到一个二值输出,然后将输入与输出的像素差按照固定比例扩散到未经处理的区域。对于误差扩散法,判断处理后图像可靠的重要依据是抖动过程中产生的量化误差尽可能小。Floyd-Steinberg抖动(FSD)^[93]是误差扩散的一种方

法,因为形式简单而受到广泛的应用。它的特点是按照“从上到下,从左到右”的顺序扫描图像,对像素点逐个进行量化,将量化误差传递到其邻近的像素点,但不影响已经量化的像素点的值。因此,如果当前像素向下舍入,则下一个像素向上舍入的可能性更大,最终使平均量化误差接近于零。采用FSD算法可以得到抖动图像。FSD的误差扩散核表示为

$$H = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} - & x & 7 \\ 3 & 5 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: x 表示当前扫描的像素; 符号“—”表示已扫描过的像素。

FSD 相较于 Bayer 抖动法更为复杂但精度有所提升, 将周期性和正弦结构纳入考虑, 还可以进一步改善测量结果^[94]。除了式(10)所示的 Floyd 误差扩散核外, 还有其他的误差扩散核分别对应不同的误差扩散方法^[95]。这些方法与 Floyd 抖动具有类似的形式, 区别在于不同方法的误差扩散核系数不同, Stucki 抖动

(SD)^[96]就是其中一种。相较于 FSD 算法, SD 算法生成的条纹质量更高, 且速度更快。但上述两种误差扩散方法对图像进行扫描时都采用了“从上到下, 从左至右”的规则, 使量化误差不断向下、向右累积。吕江昭等^[97]改变了图像处理的扫描顺序, 采用“奇数行从左至右、偶数行从右到左”的规则对二值图像进行误差扩散。这种方法的扫描轨迹呈“S”型, 且误差扩散核是在 SD 法基础上进行改进的, 因此称为 S-SD 方法, 算法示意如图 10 所示。Wang 等^[98]对 SD 改变扫描顺序, 提高了抖动的对称性。

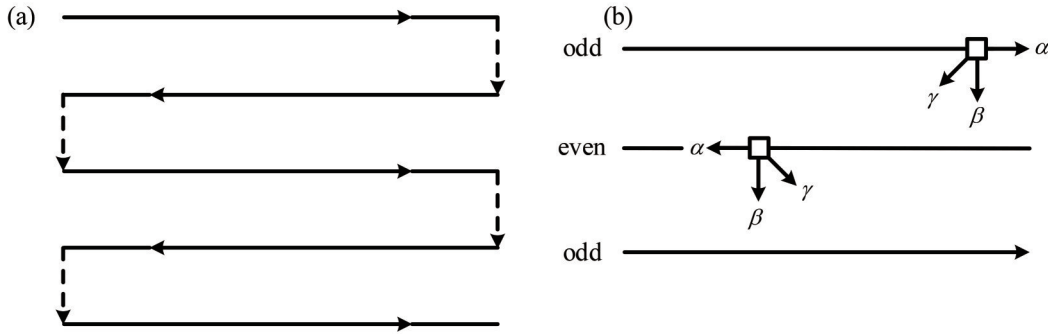


图 10 S-SD 示意图^[97]。(a) S-SD 扫描顺序; (b) 误差扩散
Fig. 10 Schematic of S-SD method^[97]. (a) Scanning sequence of S-SD; (b) error diffusion

FSD、SD 及 S-SD 方法的误差扩散系数均为直接给定, 这些方法在对二值条纹进行处理时, 都没有考虑三维测量中的投影条纹要求二值图像在离焦后具备正弦结构这一因素, 因此直接采用上述抖动方式处理后的图像缺乏正弦性。为了让抖动图像具有正弦结构, Zhou 等^[99]参照 FSD 算法的格式对误差扩散核进行改写, 不是直接给定误差扩散系数, 而是设定初始总误差值为 1, 并初始化误差扩散系数; 再将各初始值代入计算, 得到相位和强度误差值, 对计算值与预设值进行比较; 不断循环这个过程。当总误差值最小时, 将此时的系数代入矩阵对图像进行处理, 得到最后的抖动图像。与传统的 FSD 算法相比, 该方法得到的图像与正弦图的误差在相位和强度方面均有不同程度的提高。

3.2.3 遗传算法

遗传算法(GA)^[100-102]是一种非确定性全局优化拟合方法, 是一种通过选择、交叉和变异阶段获得最优解的抖动方法。Lohry 等^[103]针对条纹投影需要图像携带正弦特性的需求, 将遗传算法用于抖动优化。误差扩散抖动算法与路径和起点相关, 这为遗传算法的应用提供了多种可能性。根据正弦条纹的固有结构, 遗传算法充分利用了像素点突变的特点, 优化了二值图像的 0 和 1 分布。相较于 Bayer 抖动和误差扩散算法, 遗传算法可以生成更接近理想正弦性的条纹, 提高条纹质量, 但耗时较长。Cai 等^[104]对耗时较长的问题进行了改进, 建立了一个优化遗传算法框架(O-GA)。为了兼顾图像对称性和周期性, 根据需求先选择一个小

尺寸的二值条纹进行遗传算法处理; 之后再按照整幅图像的大小对处理后的二值条纹进行周期平铺, 最终得到完整图像。该框架既缩短了处理时间, 也被验证可用于基于相位和基于强度的多目标优化测量^[105]。

3.2.4 区域调制技术

与抖动技术类似, 区域调制技术对二维图像的两个方向进行调制。二者的区别是抖动技术对每个像素进行处理, 而区域调制技术以一个预设的区域范围为单位进行处理。Xian 等^[61]提出了面积调制的概念, 通过适当设计单元尺寸, 控制基频在水平或垂直方向上的位置, 实现水平和垂直基频的分离, 滤除不需要的垂直频率。面积调制与脉宽调制的作用类似, 都可以将影响相位计算的无用信号从低频部分转移到高频部分。Zhao 等^[62]采用二进制编码的三角形图案进行投影和垂直抖动, 将相机捕捉到的图像模糊为灰度强度的三角形图案, 用于相位展开和三维重建。

区域调制技术从本质上讲属于二值条纹二维调制的一类分支。区域调制的特点是对二值图像进行小范围切割, 在划定的范围内调制出不同形状的二值图像, 并使其按一定规律排列。区域调制条纹的优劣仍然以其离焦后与标准正弦条纹的差距大小来判断。因此, 使用这类方法设计二值图像时仍然遵循正弦结构的规律, 在投影时也同样受到离焦程度的限制。

3.3 多方法组合调制

一维和二维条纹调制方法虽然各有优点, 但是也存在不同程度的限制。对于限制条件, 前者的使用范

围和测量精度受限于条纹周期宽度,而后者的测量速度受限于确定条纹灰度值的迭代计算。因此,可以将两类调制方法融合,以克服两种方法各自的缺点。组合调制方法结合了一维和二维调制的优点和特性,不仅拓宽了可测量物体深度范围,也提高了对二值图像在不同离焦程度下成像的鲁棒性。

Tang 等^[106]提出结合了 OPWM 和蛇形 FSD 的方法(S-FSD),并对比了组合投影方法与单一模式投影的测量情况。投影流程如图 11 所示,通过 OPWM 处理高频条纹,通过蛇形 FSD 处理低频条纹,将处理后的图像离焦投影至待测物体表面,对捕获的变形条纹图进行分析,再根据双波长相位展开法恢复相位。

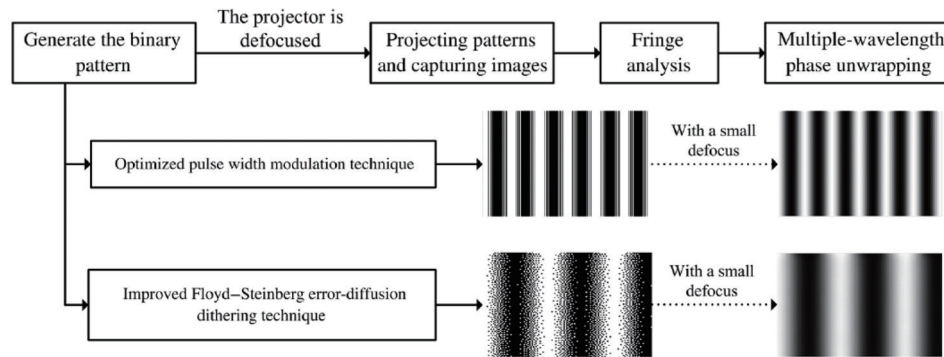


图 11 组合二值条纹投影流程^[106]

Fig. 11 Combining binary fringe projection process^[106]

组合测量方法对现有的一维和二维调制技术进行组合,根据被测物体、应用场景的不同,选择多幅图像或是复合图像^[110-113]投影。根据研究结果分析,组合方法的测量结果相较于单一调制法或是在测量速度,或是在测量精度上有所提高。但是存在的问题是快速测量和高精度测量难以同时满足。

4 典型技术比较与分析

为了更加直观地对比典型条纹调制技术,从速度、测量精度、调制复杂程度三个方面对不同的调制方法进行了比较。离焦程度的变化是一个动态过程,且不同调制方法适用的范围不同,难以在同一指标下直接比较。因此,本文仅对每种方法在最佳条件下的测量结果进行评价,比较结果如表 2 所示。

根据现有的研究可知,与正弦条纹相比,标准二值条纹在投影速度上有所提升,且在理想情况下测量精度可以达到与正弦条纹测量同等程度,甚至优于正弦条纹^[41-46]。但二值条纹的离焦程度会影响相位误差和测量范围,调制技术的复杂度也会影响图像处理时间。

SBM 条纹调制简单,投影时速度更快但精度低。相较于 SBM 条纹,四种脉宽调制技术对二值条纹沿横向或纵向进行不同方式调制,在不同程度上提升了测量精度。其中,SPWM 复杂度低但速度更快;OPWM 和 D-TPWM 复杂度高但速度慢;TPWM 复杂度和速

Wang 等^[107]采用 OPWM 生成高频条纹,采用 SD 方法生成低频条纹,分别对活兔心脏进行投影,根据双频相位展开得到相位信息。Hu 等^[108]提出了一种融合调制技术生成二值投影条纹的方法,利用 SBM 生成低频条纹,利用 S-SD 生成高频条纹,采用双三步相移法对 SBM 条纹高次谐波影响下产生的相位误差进行补偿,得到补偿后的折叠相位,最后利用多频相移法进行相位展开。该方法在测量精度和速度方面均有提高,且在不同离焦程度下均具有鲁棒性。Hyun 等^[109]用 3 幅高频二值抖动图像和 2 幅额外的低频编码图像进行组合测量,设计出一种降低噪声的计算框架,实现了超快速高精度测量。

表 2 不同条纹调制方法的性能比较

Table 2 Performance comparison of different fringe modulation methods

Mode	Method	Reference	Speed	Accuracy	Complexity
1D	SBM	[30]	High	Low	Low
	SPWM	[65]	High	Medium	Medium
	OPWM	[66]	Medium	High	High
	TPWM	[71]	Medium	High	Medium
	D-TPWM	[73]	Medium	High	High
2D	Bayer	[81]	High	Low	Low
	P-Bayer	[82]	Medium	Medium	Medium
	I-Bayer	[83]	Medium	Low	Medium
	FSD	[94]	Medium	Medium	Medium
	S-FSD	[106]	Medium	High	High
	SD	[96]	Medium	Medium	Medium
	S-SD	[97]	Medium	High	High
	GA	[103]	Low	High	High
O-GA	[104]	Medium	High	High	

度都处于中等水平。

Bayer 条纹是经典的二值抖动条纹,Bayer 抖动算法的特点是简单、速度快,但是测量精度较低。相较于 Bayer 抖动算法,FSD、SD 和 GA 测量精度和调制复杂度依次提高,速度则依次降低,无法同时做到快速、高

精度测量。后续研究提出的优化技术通过增加调制复杂度对四种基础抖动方法的单一性能进行改善, I-Bayer 和 P-Bayer 分别提升了 Bayer 抖动算法的稳定性和测量精度; S-FSD 和 S-SD 分别提升了 FSD 和 SD 方法的测量精度; O-GA 改善了 GA 耗时长的问题。

对于测量范围, 一维调制条纹技术的测量误差随着条纹周期宽度的增大而增大, 因此这类调制技术只在条纹间距较小的条件下才能得到精准的测量结果。脉宽调制方法可以在不同程度上减小离焦程度, 提高图像质量, 且在适用条纹间距范围内, 相位误差不会随着离焦程度的增加出现大幅度波动, 可以维持在稳定的水平。二维调制技术弥补了一维调制技术在周期宽度较大时测量精度低的短板, 适用于条纹间距较大条件下进行精准测量。此外, 二维抖动得到的二值条纹兼具正弦条纹对称性和周期性特点, 能够得到结构更接近理想正弦的调制图像。

5 总结与展望

自数字投影技术成熟以来, 光学三维测量领域中二值条纹投影技术的优势愈发凸显, 这使得二值条纹得以迅速发展。近年来, 二值条纹的应用领域也在不断拓展, 如快速测量^[114-118]、大深度物体测量^[119-120]、微观三维测量^[121-122]等领域。虽然二值条纹离焦投影技术已经得到了一定程度的发展, 但是随着测量需求的不断提高, 测量技术及方法在精度、速度和稳定性等方面仍需要继续提升。为了进一步优化测量结果, 多种二值图像调制技术被陆续提出。本文对二值条纹离焦投影技术进行了综述, 首先概述了二值条纹的投影原理, 其次重点介绍了二值条纹调制技术的进展, 最后分析了典型调制技术的特点及适用场景。

标准二值条纹离焦投影时受到离焦程度的限制, 测量精度较低。因此, 对标准二值条纹沿一维和二维方向进行调制后, 可以分别在条纹间距较窄和较宽的应用场景中优化离焦投影图像质量, 从而提高测量精度。组合投影为大深度物体测量提供了一种新的思路, 融合调制技术可以弥补单一方法的不足, 能一定程度上扩大理想离焦区域, 从而增大可测量深度范围。

虽然二值离焦投影技术已经取得了一些成果, 但仍然存在很大的提升空间。例如, 现有的量化二值条纹离焦程度的方法包括建立查找表、计算离焦估计, 但是这些方法存在工作量大、计算框架复杂等问题。离焦投影限制了物体可测量深度范围, 通过投影不同频率条纹可以一定程度上扩展测量范围, 但有关对大深度物体的测量方法仍待进一步研究。此外, 传统的系统标定方法并不适用离焦投影系统标定, 关于离焦投影系统标定方法的相关研究还不够充分, 如何优化离焦系统标定方法也是未来的研究方向之一。二值条纹在对有色物体的形貌获取、运动物体的轨迹抓捕等应用方向的研究还不够完善, 在实时测量领域, 精度和速

度无法兼顾的问题也仍待解决。二值条纹离焦投影技术在投影速度上的优势是实现快速测量的保障之一, 提高图像调制的效率从而减少整体工作时间是进一步提高测量速度的关键。

参 考 文 献

- [1] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [2] Wang Z Z. Review of real-time three-dimensional shape measurement techniques[J]. *Measurement*, 2020, 156: 107624.
- [3] Wang Z Y, Du H, Park S, et al. Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(6): 1052-1061.
- [4] Zhang S, Huang P S. High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(12): 123601.
- [5] Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.
- [6] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 106: 119-131.
- [8] Reich C, Ritter R, Thesing J. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 224-231.
- [9] Zhang Z H, Chang C X, Liu X H, et al. Phase measuring deflectometry for obtaining 3D shape of specular surface: a review of the state-of-the-art[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(2): 020903.
- [10] 王月敏, 张宗华, 高锋, 等. 基于特征匹配的非连续镜面物体三维测量[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1612004. Wang Y M, Zhang Z H, Gao F, et al. Three-dimensional measurement of discontinuous specular object based on feature matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1612004.
- [11] Shi Y Q, Chang C X, Liu X H, et al. Infrared phase measuring deflectometry by using defocused binary fringe [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3091-3094.
- [12] Chang C X, Shi Y Q, Liu X H, et al. Binary fringe pattern in infrared phase measuring deflectometry[C]// 2021 International Conference of Optical Imaging and Measurement (ICOIM), August 27-29, 2021, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2021: 207-210.
- [13] Petitgrand S, Yahiaoui R, Danaie K, et al. 3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes with a stroboscopic interferometric microscope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36(2): 77-101.
- [14] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical*

- Society of America, 1982, 72(1): 156-160.
- [15] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [16] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 35(5): 263-284.
- [17] Liu X R, Kofman J. Real-time 3D surface-shape measurement using background-modulated modified Fourier transform profilometry with geometry-constraint [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115: 217-224.
- [18] 郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0800001.
- Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0800001.
- [19] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [20] Tay C J, Quan C G, Chen L J. Phase retrieval with a three-frame phase-shifting algorithm with an unknown phase shift[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(8): 1401-1409.
- [21] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [22] Huang P S, Zhang C P, Chiang F P. High-speed 3-D shape measurement based on digital fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1): 163-168.
- [23] Zhang W Z, Chen Z B, Xia B F, et al. Nonlinear effect of the structured light profilometry in the phase-shifting method and error correction[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(4): 044212.
- [24] Lü F, Xing S, Guo H W. Self-correction of projector nonlinearity in phase-shifting fringe projection profilometry [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(25): 7204-7216.
- [25] Zhang S, Huang P S. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 063601.
- [26] Zhang S, Yau S T. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [27] Li B W, Wang Y J, Dai J F, et al. Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 54: 236-246.
- [28] 苏显渝, 周文胜. 采用龙基光栅离焦投影的位相测量轮廓术[J]. *光电工程*, 1993, 20(4): 8-16.
- Su X Y, Zhou W S. Phase-measuring profilometry using defocused projection of the Ronchi grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1993, 20(4): 8-16.
- [29] Su X Y, Zhou W S, von Bally G, et al. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Optics Communications*, 1992, 94(6): 561-573.
- [30] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [31] Zhao H, Chen W Y, Tan Y S. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4497-4500.
- [32] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping [J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.
- [33] Huntley J M, Saldner H. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [34] Hornbeck L J. Digital Light Processing for high-brightness high-resolution applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3013: 27-40.
- [35] Hoefling R, Ahl E. ALP: universal DMD controller for metrology and testing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5289: 322-329.
- [36] Hornbeck L J. 128×128 deformable mirror device[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, 30(5): 539-545.
- [37] Pape D R, Hornbeck L J. Characteristics of the deformable mirror device for optical information processing[J]. *Optical Engineering*, 1983, 22(6): 226675.
- [38] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4985: 14-25.
- [39] TI. DLP products[EB/OL]. (2018-07) [2022-04-30]. <https://www.ti.com/dlp-chip/getting-started.html>.
- [40] Bell T, Zhang S. Toward superfast three-dimensional optical metrology with digital micromirror device platforms[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(11): 112206.
- [41] Lei S Y, Zhang S. Digital sinusoidal fringe pattern generation: defocusing binary patterns VS focusing sinusoidal patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(5): 561-569.
- [42] Zhang S, van der Weide D, Oliver J. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9684-9689.
- [43] Chen B, Zhang S. High-quality 3D shape measurement using saturated fringe patterns[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 87: 83-89.
- [44] Hyun J S, Li B W, Zhang S. High-speed high-accuracy three-dimensional shape measurement using digital binary defocusing method versus sinusoidal method[J]. *Optics Engineering*, 2017, 56(7): 074102.
- [45] Li B W, Zhang S. Microscopic structured light 3D profilometry: binary defocusing technique vs. sinusoidal fringe projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 96: 117-123.
- [46] Ekstrand L, Zhang S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4518-4520.

- [47] Zhang S. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: extended measurement range[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 934-936.
- [48] Sun J. Pulse-width modulation[M]//Vasca F, Iannelli L. Dynamics and control of switched electronic systems. Advances in industrial control. London: Springer, 2012: 25-61.
- [49] Kelly J W, Strangas E G, Miller J M. Multiphase space vector pulse width modulation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18(2): 259-264.
- [50] Bruckner T, Holmes D G. Optimal pulse-width modulation for three-level inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, 20(1): 82-89.
- [51] Zhou P, Zhu J P, Su X Y, et al. Experimental study of temporal-spatial binary pattern projection for 3D shape acquisition[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 2995-3003.
- [52] Ayubi G A, Martino J M D, Flores J L, et al. Binary coded linear fringes for three-dimensional shape profiling [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(10): 103601.
- [53] Ayubi G A, di Martino J M, Alonso J R, et al. Color encoding of binary fringes for Gamma correction in 3-D profiling[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(8): 1325-1327.
- [54] Pan J H, Huang P S, Chiang F P. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(2): 023606.
- [55] Lu F, Wu C D, Yang J K. Three-dimensional shape measurement of complex surfaces based on optimized dithering fringe patterns[J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2018, 14(1): 26.
- [56] Adler R L, Kitchens B P, Martens M, et al. The mathematics of halftoning[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 2003, 47(1): 5-15.
- [57] Purgathofer W, Tobler R F, Geiler M. Forced random dithering: improved threshold matrices for ordered dithering[C]//Proceedings of 1st International Conference on Image Processing, November 13-16, 1994, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 1994: 1032-1035.
- [58] Li Q, Li F, Shi G M, et al. One-shot depth acquisition with a random binary pattern[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(30): 7095-7102.
- [59] Kite T D, Evans B L, Bovik A C. Modeling and quality assessment of halftoning by error diffusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(5): 909-922.
- [60] Konak A, Coit D W, Smith A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91(9): 992-1007.
- [61] Xian T, Su X Y. Area modulation grating for sinusoidal structure illumination on phase-measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(8): 1201-1206.
- [62] Zhao H J, Diao X C, Jiang H Z, et al. High-speed triangular pattern phase-shifting 3D measurement based on the motion blur method[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9171-9185.
- [63] Zhao Z, Lai J S, Cho Y. Dual-mode double-carrier-based sinusoidal pulse width modulation inverter with adaptive smooth transition control between modes[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(5): 2094-2103.
- [64] Colak I, Kabalci E. Developing a novel sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technique to eliminate side band harmonics[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, 44(1): 861-871.
- [65] Ayubi G A, Ayubi J A, di Martino J M, et al. Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [66] Wang Y J, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4121-4123.
- [67] Agelidis V G, Balouktsis A, Balouktsis I. On applying a minimization technique to the harmonic elimination PWM control: the bipolar waveform[J]. *IEEE Power Electronics Letters*, 2004, 2(2): 41-44.
- [68] Chiasson J N, Tolbert L M, McKenzie K J, et al. A unified approach to solving the harmonic elimination equations in multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(2): 478-490.
- [69] Chiasson J N, Tolbert L M, McKenzie K J, et al. A complete solution to the harmonic elimination problem[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(2): 491-499.
- [70] Wang Y J, Zhang S. Comparison of the squared binary, sinusoidal pulse width modulation, and optimal pulse width modulation methods for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): 861-872.
- [71] Zuo C, Chen Q, Feng S J, et al. Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(19): 4477-4490.
- [72] Silva A, Flores J L, Muñoz A, et al. Three-dimensional shape profiling by out-of-focus projection of colored pulse width modulation fringe patterns[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5198-5203.
- [73] Wang Y J, Jiang C F, Zhang S. Double-pattern triangular pulse width modulation technique for high-accuracy high-speed 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30177-30188.
- [74] Ayubi G A, di Martino J M, Alonso J R, et al. Three-dimensional profiling with binary fringes using phase-shifting interferometry algorithms[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(2): 147-154.
- [75] Flores J L, Torales G, Ferrari J A, et al. Binary coded triangular fringes for 3-D surface-shape measurement[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(15): 3576-3582.
- [76] Zhu J P, Su X Y, You Z S, et al. Temporal-spatial encoding binary fringes toward three-dimensional shape measurement without projector nonlinearity[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(5): 054108.
- [77] Da F P, Wang L Y, Hu L Y. Fringe projection profilometry based on complementary color-encoded fringe patterns[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(8): 2332-2339.
- [78] Schuchman L. Dither signals and their effect on

- quantization noise[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1964, 12(4): 162-165.
- [79] Chen Y T, Cao Y P, Yuan H, et al. A stroboscopic online three-dimensional measurement for fast rotating object with binary dithered patterns[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(8): 2660-2668.
- [80] Kundu P, Pal A K. Some novel methods of ordered dither[J]. Acta Graphica, 2015, 26: 5-10.
- [81] Wang Y J, Zhang S. Three-dimensional shape measurement with binary dithered patterns[J]. Applied Optics, 2012, 51(27): 6631-6636.
- [82] Dai J F, Zhang S. Phase-optimized dithering technique for high-quality 3D shape measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(6): 790-795.
- [83] Dai J F, Li B W, Zhang S. Intensity-optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 53: 79-85.
- [84] Sun J S, Zuo C, Feng S J, et al. Improved intensity-optimized dithering technique for 3D shape measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 158-164.
- [85] Dai J F, Zhang S. Optimizing binary dithering patterns to improve phase quality[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9276: 92760C.
- [86] Dai J F, Li B W, Zhang S. Improve dithering technique for 3D shape measurement: phase vs intensity optimization [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8839: 883904.
- [87] Xiao Y, Li Y F. High-quality binary fringe generation via joint optimization on intensity and phase[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 97: 19-26.
- [88] Lu F, Wu C D, Yang J K. Optimized dithering technique for three-dimensional shape measurement with projector defocusing[J]. Optics Communications, 2019, 430: 246-255.
- [89] Tian Z X, Chen W J, Su X Y. Method for improving sinusoidal quality of error diffusion binary encoded fringe used in phase measurement profilometry[J]. Optica Applicata, 2016, 46(2): 291-303.
- [90] Evans B L, Monga V, Damara-Venkata N. Variations on error diffusion: retrospectives and future trends[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5008: 371-389.
- [91] Jarvis J F, Judice C N, Ninke W H. A survey of techniques for the display of continuous tone pictures on bilevel displays[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1976, 5(1): 13-40.
- [92] Knox K T. Error diffusion: a theoretical view[J]. Proceedings of SPIE, 1913: 326-331.
- [93] Floyd R W, Steinberg L. An adaptive algorithm for spatial gray scale[J]. Proceedings of the Society for Information Display, 1975, 17(2): 75-77.
- [94] Dai J F, Li B W, Zhang S. High-quality fringe pattern generation using binary pattern optimization through symmetry and periodicity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52: 195-200.
- [95] Singh Y K. Generalized error diffusion method for halftoning[C]//2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies, March 5-7, 2015, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2015: 15402897.
- [96] Ulichney R. Digital halftoning[M]. Cambridge: The MIT Press, 1987.
- [97] 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. Lü J Z, Da F P, Zheng D L. Projector defocusing profilometry based on Sierra Lite dithering algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312004.
- [98] Wang T, Lin B, Zhang W Z, et al. High-accuracy three-dimensional measurement by improving the asymmetry of dithered patterns[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1229(1): 012029.
- [99] Zhou P, Cai N, Wang T, et al. High-quality 3D shape measurement by kernel-optimized high sinusoidal similarity dither patterns[J]. Applied Optics, 2020, 59(34): 10645-10650.
- [100] Alander J T, Mantere T J, Pyylampi T. Threshold matrix for digital halftoning by genetic algorithm optimization[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3522: 204-212.
- [101] 朱昌会, 周佩, 朱江平, 等. 利用遗传算法优化误差扩散核参数的条纹二值编码方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2110002. Zhu C H, Zhou P, Zhu J P, et al. Stripe binary encoding method using genetic algorithms to optimize kernel parameters of error diffusion[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2110002.
- [102] Zhu J P, Zhu C H, Zhou P, et al. An optimizing diffusion kernel-based binary encoding strategy with genetic algorithm for fringe projection profilometry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 7003708.
- [103] Lohry W, Zhang S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 540-542.
- [104] Cai N, Chen Z B, Cao X Q, et al. Optimized dithering technique in frequency domain for high-quality three-dimensional depth data acquisition[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(8): 084202.
- [105] Cai N, Chen Z B, Cao X Q, et al. Multi-objective strategy to optimize dithering technique for high-quality three-dimensional shape measurement[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(10): 104210.
- [106] Tang S M, Zhang X, Tu D W, et al. Three-dimensional profilometry with mixed binary defocusing technique[J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 104106.
- [107] Wang Y J, Laughner J I, Efimov I R, et al. 3D absolute shape measurement of live rabbit hearts with a superfast two-frequency phase-shifting technique[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5822-5832.
- [108] Hu H H, Gao J, Zhou H Y, et al. A combined binary defocusing technique with multi-frequency phase error compensation in 3D shape measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124: 105806.
- [109] Hyun J S, Zhang S. Superfast 3D absolute shape measurement using five binary patterns[J]. Optics and

- Lasers in Engineering, 2017, 90: 217-224.
- [110] Li X X, Zhang W H. Reconstruction method for binary defocusing technique based on complementary decoding with dual projectors[J]. IEEE Access, 2021, 9: 29200-29206.
- [111] Fu G K, Cao Y P, Wang Y P, et al. Real-time three-dimensional shape measurement based on color binary fringe projection[J]. Optical Engineering, 2019, 58(4): 044102.
- [112] Guan C, Hassebrook L G, Lau D L. Composite structured light pattern for three-dimensional video[J]. Optics Express, 2003, 11(5): 406-417.
- [113] Yue H M, Su X Y, Liu Y Z. Fourier transform profilometry based on composite structured light pattern [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(6): 1170-1175.
- [114] Xu J, Gao B T, Han J H, et al. Realtime 3D profile measurement by using the composite pattern based on the binary stripe pattern[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(3): 587-593.
- [115] Xu J, Xi N, Zhang C, et al. Rapid 3D surface profile measurement of industrial parts using two-level structured light patterns[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(7): 907-914.
- [116] Wang Y J, Suresh V, Li B W. Motion-induced error reduction for binary defocusing profilometry via additional temporal sampling[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 23948-23958.
- [117] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement based on fringe projection[C]//2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, August 31-September 3, 2009, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2009: 10950422.
- [118] Fu G K, Cao Y P, Wang Y P, et al. Dynamic phase measuring profilometry based on tricolor binary fringe encoding combined time-division multiplexing[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 813.
- [119] Yu Y, Da F P. Defocused projection model for phase-shifting profilometry with a large depth range[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23597-23610.
- [120] Zhang J, Luo B, Su X, et al. Depth range enhancement of binary defocusing technique based on multi-frequency phase merging[J]. Optics Express, 2019, 27(25): 36717-36730.
- [121] 尚明皓, 余飞鸿. 变焦显微三维测量系统的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(16): 1600002. Shang M H, Yu F H. Research on microscopic 3D measurement system based on focus variation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(16): 1600002.
- [122] Hu Y, Chen Q, Feng S J, et al. Real-time microscopic 3D shape measurement based on optimized pulse-width-modulation binary fringe projection[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7): 075010.