

## DLP 投影任意比特数条纹实现三维面形测量

李训仁, 郭文博, 张启灿\*, 吴周杰\*\*, 陈正东, 王浩然, 陈照升

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 数字光投影仪(DLP)已被广泛使用在条纹投影三维测量领域,投影条纹图的比特位深以 8 bit 居多,限制了可投影图案的数目与速率,也局限了三维重建的可用算法且造成相机速率冗余。为解决该问题,提出一种灵活使用比特位深的条纹投影方法,研究了不同比特数条纹图案的生成与投影方式,分析了比特数降低对条纹投影测量的影响,并总结了不同比特数下对应适用的编码测量方法和应用场景。实验从测量精度、抗噪性和抗运动模糊能力 3 个方面着重对比了 8 bit 和 6 bit 条纹投影方法的测量性能,证明了 6 bit 条纹投影方法具有编码方式灵活和重建速率快的优势。对比了 6 bit 和 1 bit 条纹投影方法的测量深度范围,发现 6 bit 条纹投影方法是一种高鲁棒、大景深的低速动态三维测量方案。该方法有效拓展了条纹投影方法的灵活性,充分利用了相机的冗余速率,扩大了对应三维重建可选择算法的范围,可适用于更多的基于条纹投影的三维测量系统。

**关键词** 测量; 条纹投影轮廓术; 比特位深; DLP 投影仪  
**中图分类号** TN247 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221690

## 1 引言

光学三维测量在工业质量检测、智能识别、文物保护等领域中发挥着不可或缺的作用<sup>[1-5]</sup>。光学三维测量可以分为接触式和非接触式测量,近年来非接触式测量方法中条纹投影技术因其在测量精度、测量速率和灵活性方面的优势而受到广泛的关注<sup>[6-7]</sup>。

基于条纹投影的三维测量系统主要由相机和投影仪组成,目前主流投影仪是商用 DMD 和 LCD 投影仪,其中基于 DMD 微透镜阵列的 DLP 投影仪因其灵活、可编辑而广受欢迎。常见 DLP 投影仪多可投影 8~1 bit 的条纹图案,但某些投影仪在使用中存在一些问题,以常用的 DLP4500 投影仪为例,其内部控制器中只有 48 Mbit 的高速缓存器,待投影的总图案空间不能超过该缓存器大小,即至多可投影 6 幅不同的 8 bit 图案。同时,不同位深图案允许的最小投影积分时间不同,对应的最大投影速率也不同,比如 8 bit 图案投影速率仅有 120 Hz,而 1 bit 图案投影速率理论上可达 4225 Hz。目前绝大部分结构光投影三维测量系统使用的投影图案比特位深为 8 bit 和 1 bit,存在局限。在一些特殊的测量场景,需使用多帧算法,如经典的三频三步相移<sup>[8]</sup>需要 9 幅图案,用于消除运动误差的双频四步相移<sup>[9]</sup>也需要 8 幅图案,而传统的 8 bit 图案受到最大投影图案数量为 6 的限制,因此不能使用上述算法

完成图案一次装载后快速投影。另外,不同的测量系统具有不同的拍摄速率,其中高速相机的拍摄速率可达数百赫兹,如 Photron 公司的 FASTCAM Mini AX200 相机在成像分辨率为 1024 pixel×1024 pixel 时最大速率可达 6000 Hz,此时投影 8 bit 图案会明显浪费相机速率。

为了提升投影端的图案刷新速率,使用 1 bit 图案投影的二值离焦技术<sup>[10-11]</sup>被提出并被广泛使用,但在此方式下,测量的深度范围和精度会受到很大的限制。另外,除了这两种比特数外,中间比特数(2~7 bit)少有学者关注,合理使用它们可以为测量提供更多的选择方案,灵活构建不同系统、满足结构光三维测量的不同需求。

针对 DLP 投影仪和工业相机组成的条纹投影三维测量系统可能存在的编码方式受限、相机速率冗余浪费、二值离焦测量景深小、条纹图比特数可选性少以及缺乏相应的最佳比特数确定方式等问题,本文提出基于 DLP 投影仪的任意比特数条纹图的生成和投影方式,并在其基础上使用 6 bit 条纹投影方法进行三维面形测量,通过降低条纹图的比特位深,换取更多的可投影图案和更快的投影切换速率,为低速动态三维测量提供了高鲁棒、大测量深度范围的方案。同时总结了条纹投影三维测量系统工作参数之间的权衡关系,提出了条纹图比特数的选取方法,以期对不同测量系

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-10-08; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(62075143, 62205226)、博士后创新人才支持计划(BX2021199)

通信作者: \*zqc@scu.edu.cn; \*\*zhoujiwu@scu.edu.cn

统最佳比特数的选择提供参考。

本文首先回顾了条纹投影测量典型系统以及相应的关键技术原理,介绍了不同比特数图案的生成和投影方式,并总结了条纹投影测量系统中比特数的选择和使用;然后,比较和分析了使用 8、6、1 bit 条纹投影方法进行三维测量的性能,并讨论了可在条纹投影三维测量系统中使用的其他比特位深图案。

## 2 基本原理

### 2.1 条纹投影测量技术

典型的条纹投影系统由 DLP 投影仪和摄像机组成,如图 1 所示。投影仪投影预先设计好的图案,照亮被测物体,摄像机捕捉受被测物体表面高度调制的变形图案。利用条纹分析算法从捕获的变形条纹中获取相位信息,其中,相移算法因其高精度的优点而被广泛应用在基于条纹投影的三维测量中。

对于  $N$  步相移而言,摄像机捕获到的多帧条纹强度可写成

$$I_n = I_a + I_b \cos[\phi + 2\pi(n-1)/N], \quad (1)$$

式中: $I_a$  为图案的背景; $I_b$  为图案的调制度; $n$  为相移步数, $n=1,2,\dots,N$ ;  $N$  为总相移步数; $\phi$  为包含物体信息的相位。通过式(2)可计算得到对应的截断相位:

$$\phi = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi n/N)}. \quad (2)$$

由于相移算法中使用了反正切运算,相位被截断在  $[-\pi, \pi)$  内,相位信息存在歧义,需要利用条纹级次信息对截断相位进行展开,得到

$$\Phi = \phi + 2\pi k, \quad (3)$$

式中: $\Phi$  表示展开后的连续相位; $k$  表示利用相位展开算法计算得到的条纹级次。在众多相位展开方法中,鲁棒性最强的是时间相位展开方法,典型的相位展开方法有多频相移方法<sup>[12]</sup>和格雷码辅助相移方法<sup>[13]</sup>。

图 2 总结了上述时间相位展开方法在不同条纹频率和相移步数下所需的投影图案数, $N$  表示相移步数, $T$  表示条纹周期, $f_h$  表示高频条纹频率,加粗标绿的数字表示多频相移方法中用于辅助相位展开的条纹相移步数,淡蓝色和淡粉色背景分别用来区分标注总投影图案数不多于或者多于 6 幅。可以看到,大多数时间相位展开方法需要的投影图案数多于 6 幅,所以需要研究除 8 bit 投影外的更多比特数投影方式,确保可投影图案总数能满足更多的测量需求。

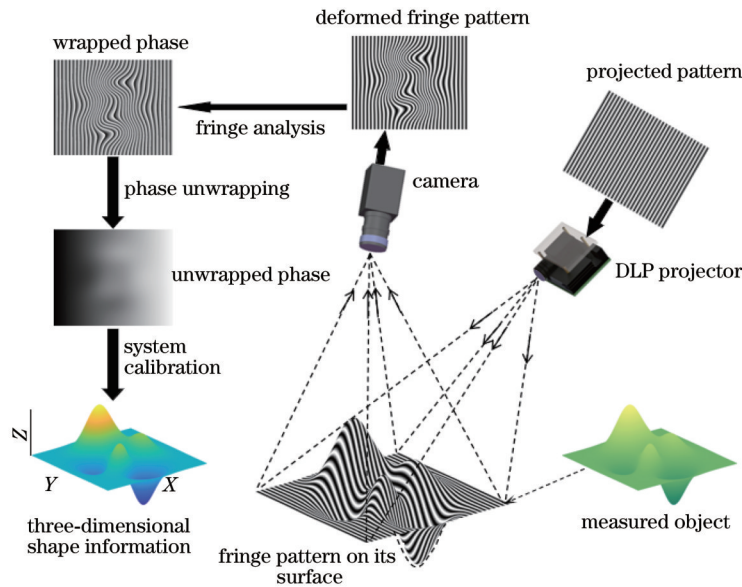


图 1 条纹投影三维测量典型系统的测量原理示意图

Fig. 1 Schematic of measurement principle of typical 3D shape measurement system

完成相位展开之后,使用四平面系统标定<sup>[14]</sup>和基于平面标靶的相机标定<sup>[15]</sup>方法,最终可得到物体的三维形貌信息。

### 2.2 不同比特数条纹图案的生成与投影

典型的条纹投影三维测量通过 DLP 投影仪投影条纹图案到待测物体上,所投影条纹图案的比特位深大多是 8 bit 和 1 bit。其实,其他比特位深的条纹图也可以用到条纹投影三维测量方法中,且部分位深条纹

图已得到运用<sup>[16-17]</sup>。本文分析归纳了不同比特数条纹图案的生成与投影方法,发现它们的基本思路都是将一个  $i$  bit 的条纹图案拆分成  $i$  幅 1 bit 图案,其中  $i=1,2,\dots,8$ 。

若比特位深为  $i$ ,则对应的量化级数为

$$Q_i = 2^i - 1. \quad (4)$$

使用  $N$  步相移算法,则其需要投影的相移条纹图中任意一行图案的灰度值可以表示为

Projected pattern number Phase-shifting number	Method	Two-frequency phase-shifting method	Three-frequency phase-shifting method	Gray-coded-aided phase-shifting method	
				Traditional Gray coding	Complementary Gray coding
$f_h=T, N$		$N+N$	$N+N+N$	$N+\log_2 T$	$N+\log_2 T+1$
$f_h=T=8, N=3$		3+3	3+3+3	3+3	3+3+1
$f_h=T=16, N=3$				3+4	3+4+1
$f_h=T=8, N=4$		4+4	4+4+4	4+3	4+3+1
$f_h=T=16, N=4$				4+4	4+4+1

图 2 不同时间相位展开方法所需的投影图案数

Fig. 2 Projected pattern number of different temporal phase unwrapping methods

$$G_i(x) = \frac{Q_i}{2} + \frac{Q_i}{2} \cos \left[ \frac{2\pi x}{T} + \frac{2(n-1)\pi}{N} \right], \quad (5)$$

式中:  $x$  表示当前像素位置值;  $T$  表示以 pixel 为单位的条纹周期。对该行数值进行量化, 将量化灰度值转化为数组得到该行中各个像素位置上用  $i$  位二进制数表示的灰度值。最后, 按照顺序提取每个位置相同位二进制数, 得到  $i$  组二进制数, 对其进行逐行复制, 生成  $i$  幅 1 bit 图案。

不同比特数条纹图案的生成流程如图 3(a) 所示。以 6 bit 条纹图案的第一幅相移条纹图对应的 6 幅 1 bit 图案生成过程为例, 如图 3(b) 所示,  $i=6(Q_i=2^6-1=63)$ , 三步相移  $N=3, T=912$  pixel, 在转化二进制数和

提取相同位二进制数操作时, 以第 102 和 103 个像素位置为例, 对应的提取方式如图 3(c) 所示, 其中相同类型方框框选区域表示相对应的内容。

对于  $i$  bit 的  $N$  步相移条纹, 利用上述方式可得到  $i \times N$  幅 1 bit 图案, 再将其按照从低位到高位顺序添加至一幅 24 位的图案中, 生成固件, 并烧录至 DLP4500 投影仪的 RAM 中。投影前选择的投影图案比特位深为  $i$ , 与生成过程保持一致。根据装载到各通道的内容和投影需求, 选择相应通道组和投影顺序进行投影与拍摄, 完成条纹投影三维测量。图 4 展示了条纹周期  $T=114$  pixel 的 6 bit 条纹投影和拍摄结果, 图 4(a)~(f) 表示针对 6 bit 条纹投影方法生成的 6 幅从低位到高位 1 bit 图案, 图 4(g) 所示为相机积分拍

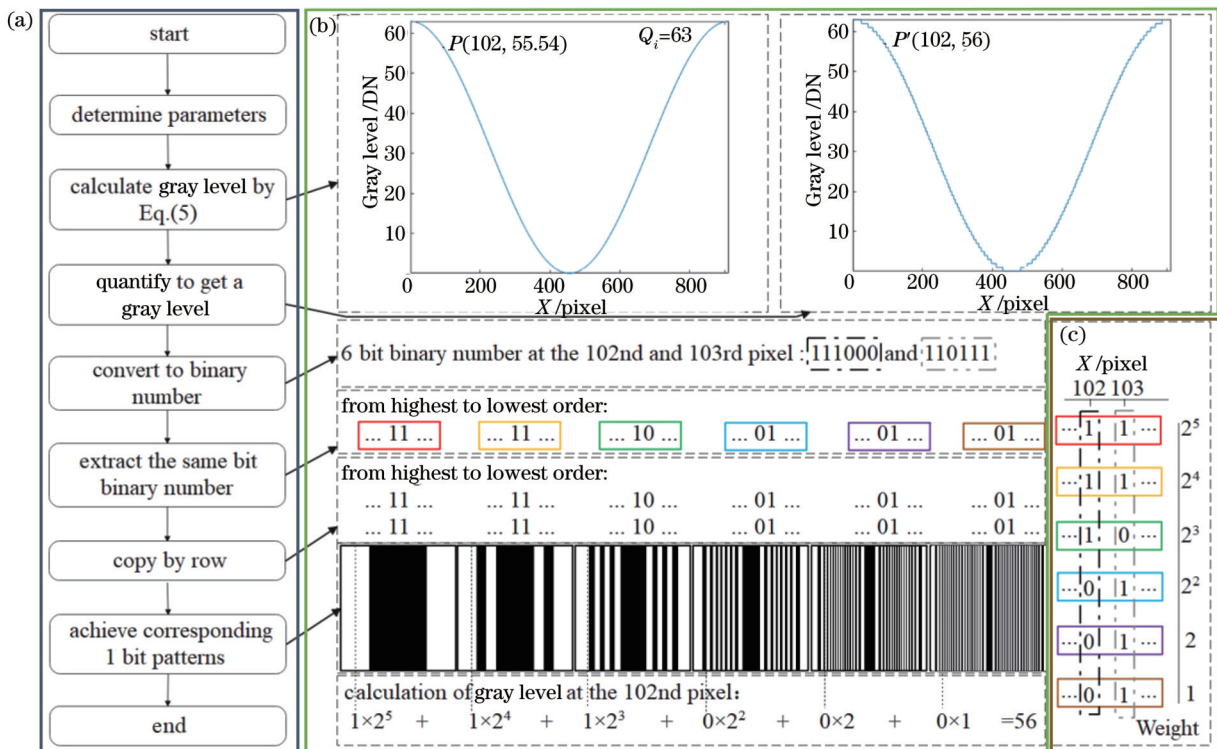


图 3 不同比特数条纹图案的生成过程。(a) 流程图; (b) 生成 6 bit 条纹图案实例 ( $i=6, N=3, n=1, T=912$  pixel); (c) 按位提取实例  
Fig. 3 Generating process of different bit number fringe patterns. (a) Flow chart; (b) examples of generating 6 bit fringe patterns ( $i=6, N=3, n=1, T=912$  pixel); (c) examples of bitwise extraction



摄到这 6 幅 1 bit 投影图案叠加后的条纹,图 4(h)所示为图 4(g)在第 230 行上的强度剖面分布。经过上述操作,实现了基于 DLP 投影仪的任意比特数条纹图案的

生成与投影,再在对应系统中搭配不同的算法,可灵活完成各种需求的条纹投影三维测量任务。

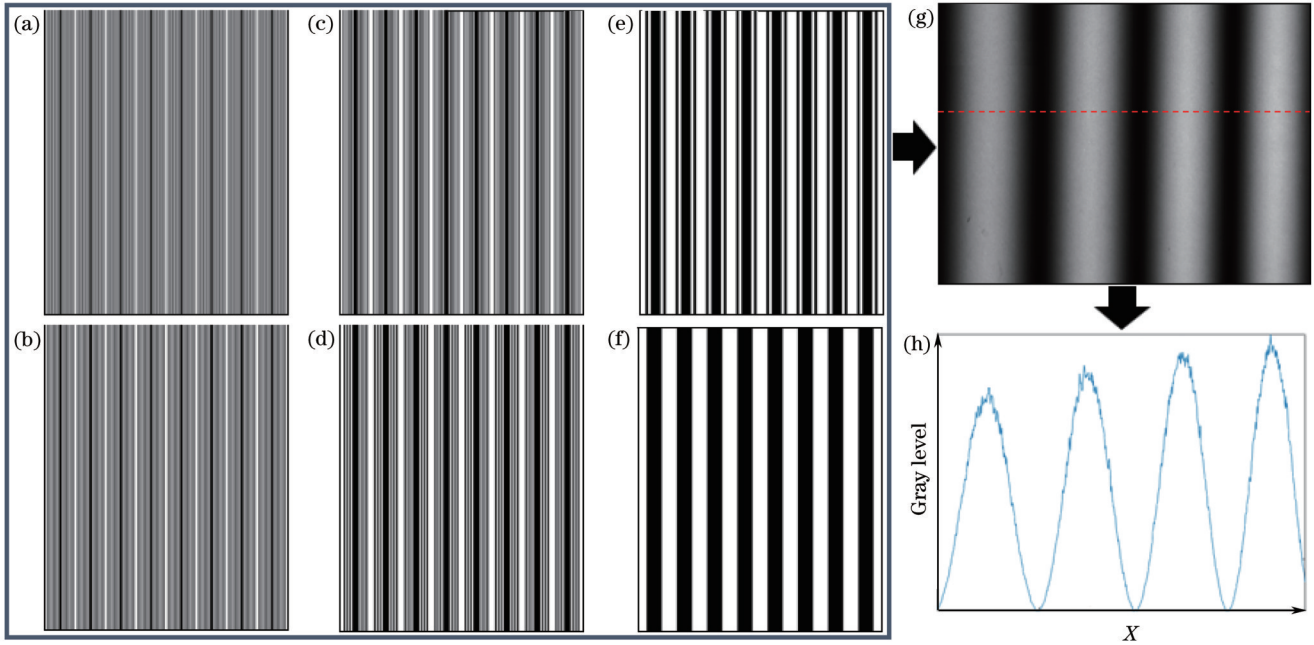


图 4 6 bit 条纹 ( $T=114$  pixel) 的投影与拍摄过程。(a)~(f)待投影的从低位到高位 1 bit 图案;(g)相机记录 6 幅图案快速投影到平面上的积分条纹图案;(h)图 4(g)中第 230 行强度剖面分布

Fig. 4 Projection and shooting process of 6 bit fringe patterns. (a)~(f) Projected 1 bit patterns from lowest to highest order; (g) captured integral fringe pattern by rapidly projecting six patterns on plane; (h) profile distribution of 230th row of Fig. 4(g)

### 2.3 条纹投影三维测量系统工作参数的选择

完成条纹投影三维测量,需要利用投影仪和相机对条纹图案进行同步投影和拍摄,因此应结合两者来确定整个测量系统的工作参数。投影仪使用不同比特位深图案时的最大投影速率不同,假设  $P_{i,max}$  表示在比特位深为  $i$  时投影仪的最大投影速率,相机的最大拍摄速率为  $C_{max}$ ,  $R(i)$  表示在当前  $i$  比特位深图案下的最大获取(成功投影并拍摄回来)速率。由于相机与投影仪同步工作,整个测量系统在比特位深为  $i$  时的图案最大获取速率取决于投影仪最大投影速率  $P_{i,max}$  和相机的最大拍摄速率  $C_{max}$  中的最小值,即

$$R(i) = \min(P_{i,max}, C_{max}), \quad (6)$$

式中:  $\min(A, B)$  返回的是  $A$  和  $B$  中的最小值; 比特数  $i=1, 2, \dots, 8$ 。

依据常用算法使用的比特位深或图案数,再加上投影仪和相机的同步配合,条纹投影三维测量系统的工作参数如图 5 所示。图 5 中从最内圈到最外圈依次为条纹图案比特数、投影速率、最大装载投影图案数、三维重建算法和测量系统的图案采集速率,空心箭头分别表示相机分辨率和投影图案比特位深从高到低的变化趋势,其指向也可以用作测量系统设计和使用时推荐和引导方向(顺时针方向),带\*号内容表示有望在该比特数下使用的算法或待研究发展的方向。

当基于 DLP 条纹投影三维测量系统的重建速率、算法和测量精度等方面的需求确定后,利用图 5 可对应确定用于该条纹投影三维测量系统的条纹图案最佳比特数;也可由已经采用的图案比特数出发,选用对应的重建算法和满足速率要求的摄像机。可见,图 5 具有明显的普适性,可用来指导测量系统与速率效率相关工作参数的选定。需要注意的是,实际测量系统参数应以实际值为准。大多数情况下,从系统已有的硬件条件出发,依照图 5 所示内容从外到内确定选用投影条纹图案的比特数,具体过程可概括如下:

第一步,确定重建速率或相机拍摄速率。根据三维重建速率需求,在图 5 的最外圈寻找能够满足条件的区域。同时,在满足该重建速率前提下,选择尽可能高的相机图案分辨率,以保证重建结果具有最好的空间分辨率。

第二步,确定所使用的算法。在图 5 中查找算法,并找到与之对应的比特数,或者依据所需投影的图案数来确定可使用的投影图案比特数及对应算法。

第三步,选择测量精度最佳的比特数。如果投影图案有多个比特数满足测量任务要求,则使用测量精度进一步约束,精度要求越高,应尽可能选择越大的比特数,从而确定最佳的条纹图案比特数。

本节对条纹投影三维测量经典系统和时间相位展



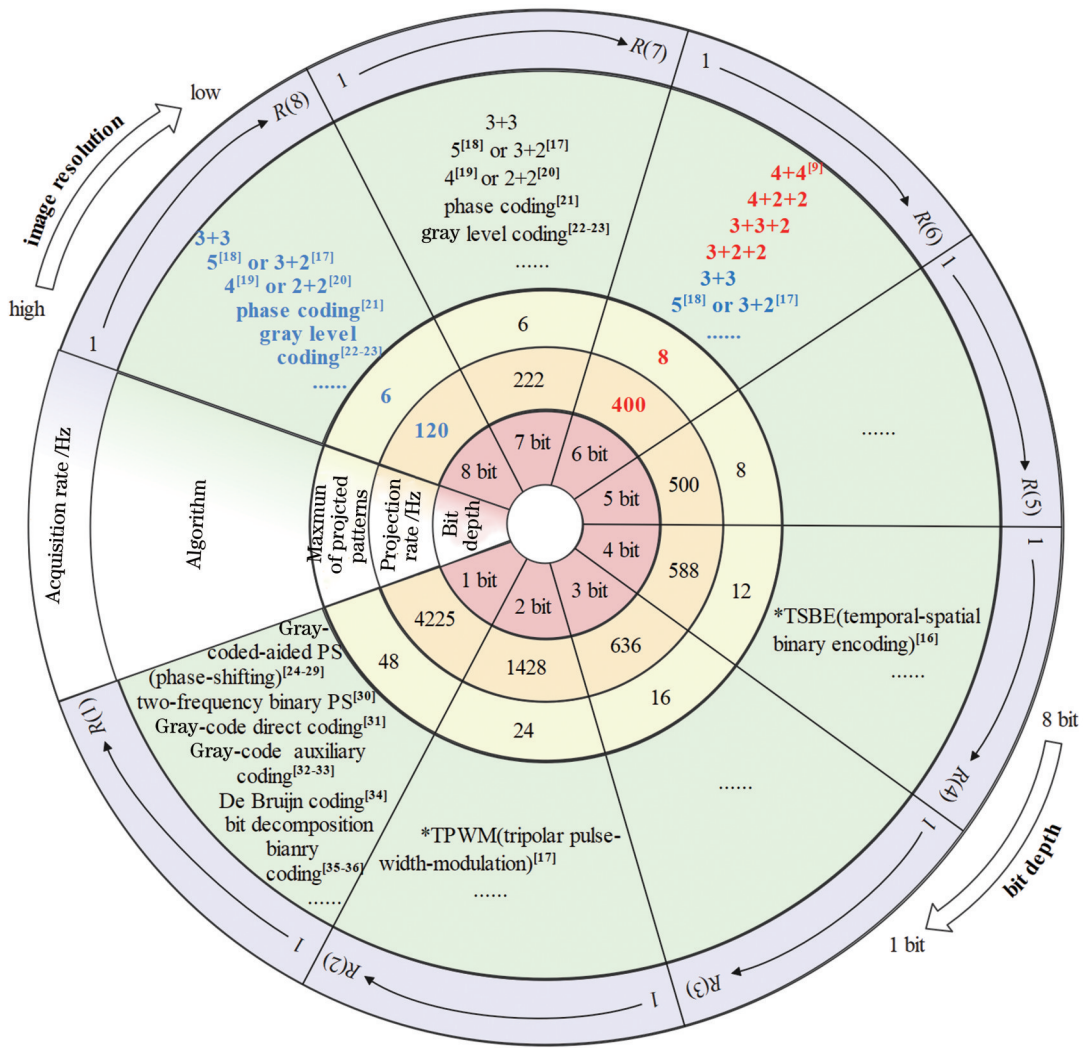


图 5 条纹投影测量系统工作参数

Fig. 5 Operational parameter of fringe projection measurement system

开不同算法所需投影图案数进行分析总结。同时结合投影仪和相机实际条件,给出条纹投影三维测量中图案比特数的选择方式,旨在为不同测量方法和系统选择最佳图案比特数提供参考。不难发现,部分基于时间相位展开的三维重建算法需要使用到更灵活的条纹图案比特数,可以使用本文提出的不同比特位深条纹图案生成方式,灵活实现任意比特数条纹图的自由生成与投影,完成不同需求的条纹投影三维测量工作。

### 3 实验

为了实现 DLP 投影任意比特数条纹的三维测量,搭建了一套测量系统,并以 8 bit 和 6 bit 条纹图案为例,着重对比研究了两者在条纹投影三维测量中的性能。测量系统主要由一台分辨率为 912 pixel × 1140 pixel 的 DLP4500 投影仪和一台最大成像分辨率为 1920 pixel × 1200 pixel 的摄像机 (Baumer VCXU-23M),配置 16 mm 成像镜头组成。投影仪发送信号同步触发摄像机工作。在该测量系统下,投影仪投影按照前述方法生成的不同位深条纹图案,摄像机选用不

同成像分辨率并保证以最大速率记录图案。当投影 8 bit 条纹图案时,摄像机在 1152 pixel × 864 pixel 和 720 pixel × 540 pixel 成像分辨率下最大拍摄速率为 116 Hz;当投影 6 bit 条纹图案时,摄像机在上述两种成像分辨率下的最大拍摄速率分别为 228 Hz 和 355 Hz。本文使用相移条纹分析方法获取截断相位,采用的相位展开方法有双频分层和三频分层方法<sup>[12, 17]</sup>。获得展开相位之后,使用四平面标定<sup>[14]</sup>和相机标定<sup>[15]</sup>方法完成系统标定,得到物体的三维形貌分布。

#### 3.1 精度评价

为了比较 8 bit 与 6 bit 条纹投影方法的测量精度,分别使用白板、标准件和复杂物体,从不同角度进行实验评价。首先,测量一块白板,初步比较使用 8 bit 条纹三步相移与 6 bit 条纹三步相移方法计算相位时的准确性。实验中使用到 4 种不同的条纹频率,分别为 1、8、32、64。以相同频率的 8 bit 条纹十二步相移得到的相位信息为真值,将 8 bit 条纹三步相移和 6 bit 条纹三步相移测量得到的结果与其进行比较分析,计算出使用不同比特数投影图案的测量误差平均值和

标准差。每组实验独立进行并重复 10 次,取其平均值作为最终结果,如表 1 所示。可以看出,8 bit 条纹三步相移方法的测量精度略高于 6 bit 条纹三步相移

方法的测量精度,但两者的相位误差平均值最大差异不超过 0.004 rad,该差异对大多数测量结果的影响不显著。

表 1 8 bit 和 6 bit 条纹在不同频率下的三步相移测量相位误差

Table 1 Phase error of three-step phase-shifting measurement for different frequency fringes of 8 bit and 6 bit

Fringe	$f=1$		$f=8$		$f=32$		$f=64$	
	Mean error / rad	STD / rad	Mean error / rad	STD / rad	Mean error / rad	STD / rad	Mean error / rad	STD / rad
8 bit	0.0085	0.0008	0.0086	0.0007	0.0092	0.0006	0.0105	0.0007
6 bit	0.0092	0.0009	0.0093	0.0011	0.0107	0.0013	0.0143	0.0011

随后,使用标准件进一步评价 8 bit 与 6 bit 条纹投影方法的测量准确性。实验中,采用 1152 pixel $\times$ 864 pixel 成像分辨率,三维重建算法选择双频分层方法,其中相移条纹图的高低频条纹分别设置为 32 和 1 个条纹周期。测量结果如图 6 所示。图 6(a)所示为哑铃规标准件(球 A 的直径为 50.7991 mm,球 B 的直径为 50.7970 mm,两球的球心距为 100.2537 mm),图 6(b)所示为 8 bit 条纹的一帧高频变形图案,图 6(c)、

(d)给出了 8 bit 和 6 bit 条纹投影的重建结果。利用两种条纹投影方法重建的球 A 直径分别为 50.4922 mm 和 50.4301 mm,球 B 直径分别为 50.7843 mm 和 50.7375 mm,球心距分别为 100.0580 mm 和 100.0800 mm。从结果可以看出,8 bit 与 6 bit 条纹投影方法重建结果中存在的最大差别仅为 0.0621 mm,表明两者的测量精度非常接近。

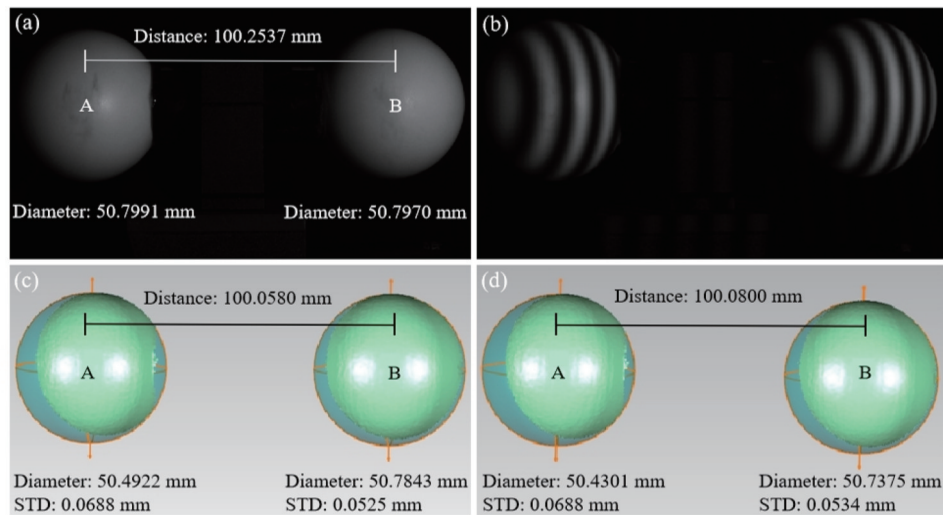


图 6 标准件测量结果精度分析。(a)标准件测试场景;(b)变形条纹图案;(c)8 bit 条纹投影三维重建结果;(d)6 bit 条纹投影三维重建结果

Fig. 6 Accuracy analysis of measurement results of standard gauges. (a) Tested scene consisting of standard gauges; (b) one deformed fringe pattern; (c) reconstructed result with 8 bit projected fringe; (d) reconstructed result with 6 bit projected fringe

最后,使用两种条纹分别对复杂物体进行三维测量实验。图 7(a)展示了待测的复杂石膏模型,图 7(b)、(c)分别为利用 8 bit 和 6 bit 条纹投影方法得到的变形条纹图案,图 7(d)、(e)是使用两种位深图案投影重建得到的结果和相应的局部放大视图。可见两种方式的测量结果局部细节相似,表明两种条纹图的测量结果相近。因此,当前硬件条件构成的实际三维测量系统,可使用 6 bit 条纹图案代替原来常用的 8 bit 图案,重建结果精度损失较小,但可装载投影更多图案,选择更灵活的编码方式,满足更多的测量需求,同时可以提升投影速率,实现更高速的三维测量。

### 3.2 抗噪性比较

为了比较 8 bit 和 6 bit 条纹投影方法的抗噪声能力,第二个实验测量了一个表面粗糙、有噪声的雕像模型。实验系统的相机采用 1152 pixel $\times$ 864 pixel 的成像分辨率,拍摄速率固定为 116 Hz。使用 8 bit 图案进行三维测量,每次可投影 6 幅条纹图,因此选择使用双频分层方法进行两组实验,高低频条纹的周期数组合分别为(8,1)和(64,1),条纹相移步数均为 3。因为使用 6 bit 图案时一次性可最多投影 8 幅图案,所以对应的重建方法使用三频分层方法,高中低频条纹周期数分别为 64、8、1,高中频相移步数为 3,低频条纹采用两步相移,低频相移和截断相位计算方式与双频 3+2



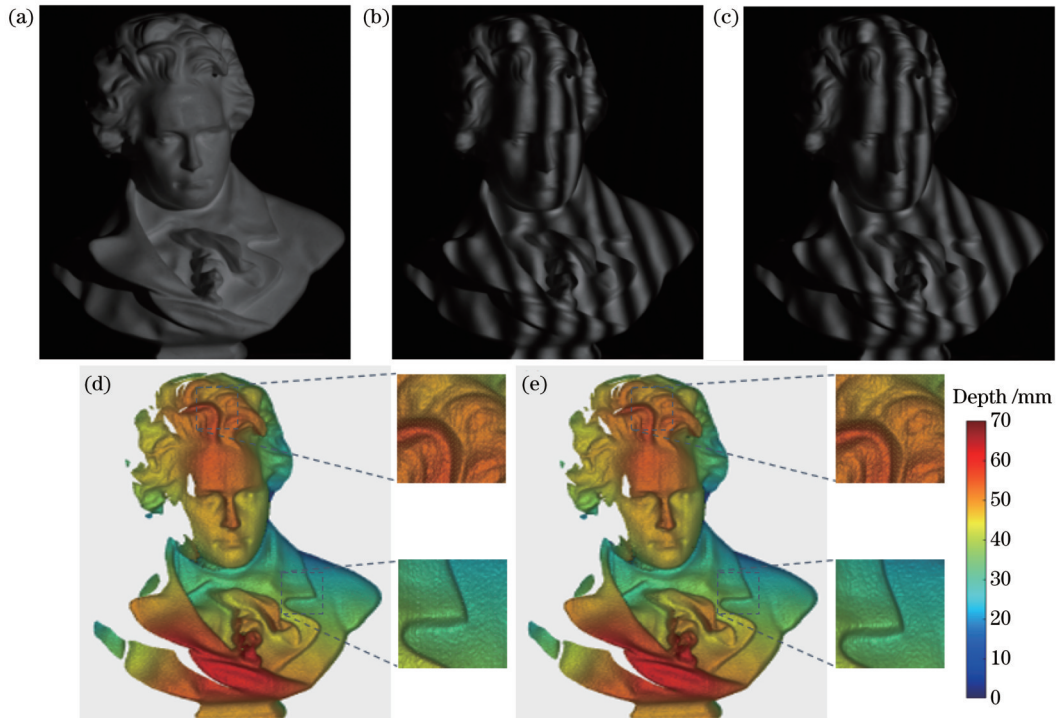


图 7 两种比特数条纹图案投影下石膏模型三维重建结果比较。(a)石膏模型;(b) 8 bit 图案投影的变形条纹;(c) 6 bit 图案投影的变形条纹;(d) 8 bit 图案投影重建结果及局部放大视图;(e) 6 bit 图案投影的重建结果及局部放大视图

Fig. 7 Comparison of 3D reconstruction results of a plaster model using two projected fringe patterns with two different bit numbers. (a) Plaster model; (b) one deformed fringe pattern of 8 bit projected fringe; (c) one deformed fringe pattern of 6 bit projected fringe; (d) reconstruction result and partial enlarged view of 8 bit projected fringe; (e) reconstruction result and partial enlarged view of 6 bit projected fringe

方法<sup>[17]</sup>一致。

图 8(a)~(c)是 6 bit 高中低频条纹图案;图 8(d)、(g)分别表示 8 bit 条纹的双频重建相位,其中图 8(d)是 8 bit 条纹高低频组合为(8, 1)的重建相位,图 8(g)是 8 bit 条纹高低频组合为(64, 1)的重建相位;图 8(j)所示为 6 bit 三频重建相位。在相位展开过程中,出现的误差跳跃范围为 $2\pi$ 或 $2\pi$ 的整数倍,而这远比中值滤波引起的相位变化大得多<sup>[37]</sup>,同时,由于 6 bit 条纹图案使用的是可同时保证测量精度和测量抗噪性的三频分层方法,得到的结果更加接近被测物体的理想真值,因此将 6 bit 条纹图案投影重建的相位使用 $3\times 3$ 大小的中值滤波去除剩余误差后得到的相位作为参考相位,再分别将上述得到的 3 个重建相位与其作差。值得注意的是,双频相移法(周期为 1 和 8)实验组的参考真值应按投影条纹频率缩小到 $1/8$ ,使得参考真值相位与该实验组中展开相位分布范围统一后再进行后续分析,并将差值大于 $\pi/2$ 的点视为错误点,错误点与有效点的比值定义为错误率。图 8(d)、(g)、(j)的重建相位错误率分别为 1.66%、5.42% 和 1.75%。它们对应的重建相位整体误差分布分别如图 8(e)、(h)、(k)所示,显然,8 bit 条纹的(8, 1)组合方法的重建相位和 6 bit 条纹投影方法重建相位误差点整体更少。随机提取 3 个重建相位的第 673 行数据,如图 8(f)、(i)、(l)所

示,8 bit 条纹(8, 1)组合方法的重建精度较低,(64, 1)组合方法的测量结果出现了较多的大跳变误差,而 6 bit 条纹投影方法的测量精度较高,且跳变误差较小。实验结果表明:8 bit 条纹(8, 1)组合方法的相位展开成功率较高,但测量精度较低;(64, 1)组合方法可以获得较高的测量精度,但相位展开成功率较低;所提 6 bit 条纹投影方法因使用了三频相位展开方法,可同时保证测量精度和相位展开成功率,具备出众的抗噪能力。8 bit 条纹投影方法每次至多可投影的图案数为 6 幅,这就限制了测量中可使用的编码方式和三维重建算法,但是 6 bit 条纹投影方法每次可投影 8 幅条纹图,增加了可投影条纹图数量,可选择的编码方式更多,可适用于更广泛的测量场景。

### 3.3 抗运动模糊能力比较

第三个实验比较了 8 bit 和 6 bit 条纹投影方法在动态场景下的抗运动模糊能力。由于投影 8 bit 和 6 bit 图案时允许的最小投影积分时间不同,投影速率也不同,8 bit 条纹投影方法的最大投影速率为 120 Hz,而 6 bit 条纹投影方法的最大投影速率可达 400 Hz。在实验中,8 bit 和 6 bit 条纹投影均采用双频分层方法重建测量结果。首先选用 $1152\text{ pixel}\times 864\text{ pixel}$ 的成像分辨率,受到相机速率和分辨率的限制,在 6 bit 条纹投影下可以达到的三维重建速率为 228 Hz,将雕像放置



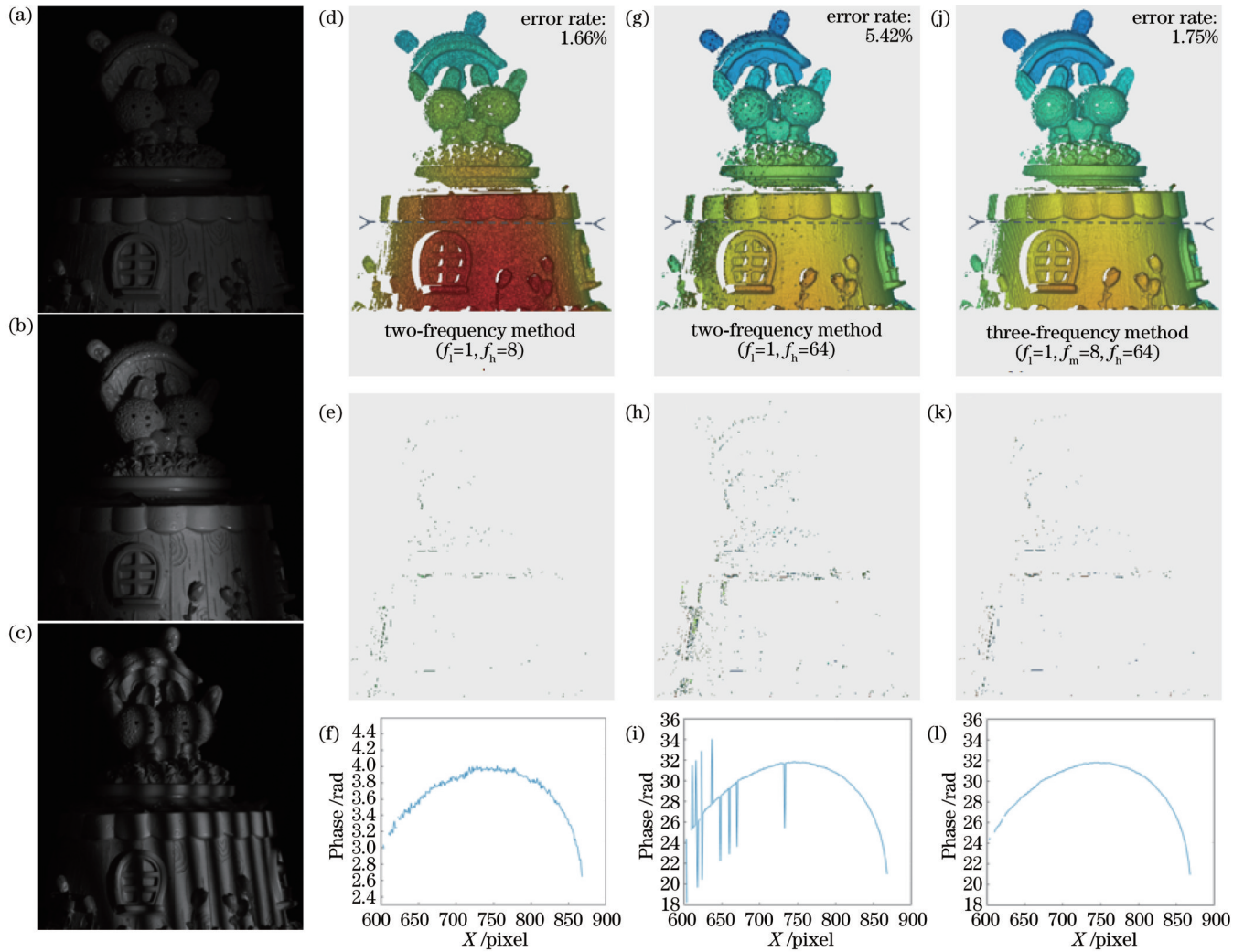


图 8 具有高噪声粗糙物体的不同比特数条纹三维重建比较实验。(a)~(c) 6 bit 高、中、低频变形条纹图;(d) 8 bit 双频重建相位 ( $f_i=1, f_h=8$ ); (e) 图 8(d) 的相位整体误差分布图; (f) 图 8(d) 的 673 行剖面分布; (g) 8 bit 双频重建相位 ( $f_i=1, f_h=64$ ); (h) 图 8(g) 的相位整体误差分布图; (i) 图 8(g) 的 673 行剖面分布; (j) 6 bit 三频重建相位 ( $f_i=1, f_m=8, f_h=64$ ); (k) 图 8(j) 的相位整体误差分布图; (l) 图 8(j) 的 673 行剖面分布

Fig. 8 Comparative experiment of 3D reconstruction with different fringes in a statue with high noise. (a)-(c) 6 bit high, medium, and low frequency deformation fringe patterns; (d) 8 bit reconstruction phase of two-frequency ( $f_i=1, f_h=8$ ); (e) overall phase error distribution diagram of Fig. 8(d); (f) profile distribution of 673rd row of Fig. 8(d); (g) 8 bit reconstruction phase of two-frequency ( $f_i=1, f_h=64$ ); (h) overall phase error distribution diagram of Fig. 8(g); (i) profile distribution of 673rd row of Fig. 8(g); (j) 6 bit reconstruction phase of three-frequency ( $f_i=1, f_m=8, f_h=64$ ); (k) overall phase error distribution diagram of Fig. 8(j); (l) profile distribution of 673rd row of Fig. 8(j)

在旋转台边缘,以不同的转速带动雕像运动,雕像在旋转台边缘具有不同的线速率(0.004 m/s、0.011 m/s 和 0.033 m/s),在 8 bit 和 6 bit 图案投影过程中均记录 3 种速率下完整旋转一周,并进行对应的三维重建,以各个位置下静态测量结果为参考,将动态场景下测量结果与参考结果作差,差值大于  $\pi/2$  的点视为错误点,错误点与有效点的比值定义为相位展开错误率。图 9 展示出在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  位置下的重建结果及相位展开错误率。结果表明,6 bit 条纹投影方法的错误率比 8 bit 条纹投影方法小,具有更好的抗运动模糊能力。

为了进一步证明上述结论,加快了运动速率,通过

在原实验旋转台上增大雕像与旋转轴的距离(即旋转半径),以此来达到 0.007 m/s、0.021 m/s 和 0.062 m/s 的线速率,并改变拍摄图案的分辨率至  $720 \text{ pixel} \times 540 \text{ pixel}$ ,在这种情况下,8 bit 和 6 bit 条纹投影方法同步拍摄速率分别可达 116 Hz 和 355 Hz,仅选择  $0^\circ$  视角下结果进行对比,得到的重建相位与相位展开错误率如图 10 所示。结果表明:随着运动速率的增加,相位展开错误率增加;在相同运动速率下,6 bit 条纹重建的结果明显优于 8 bit 条纹重建的结果,这说明使用 6 bit 条纹图案进行三维重建拥有更高的重建速率、更好的抗运动模糊能力,可适用于更快的测量系

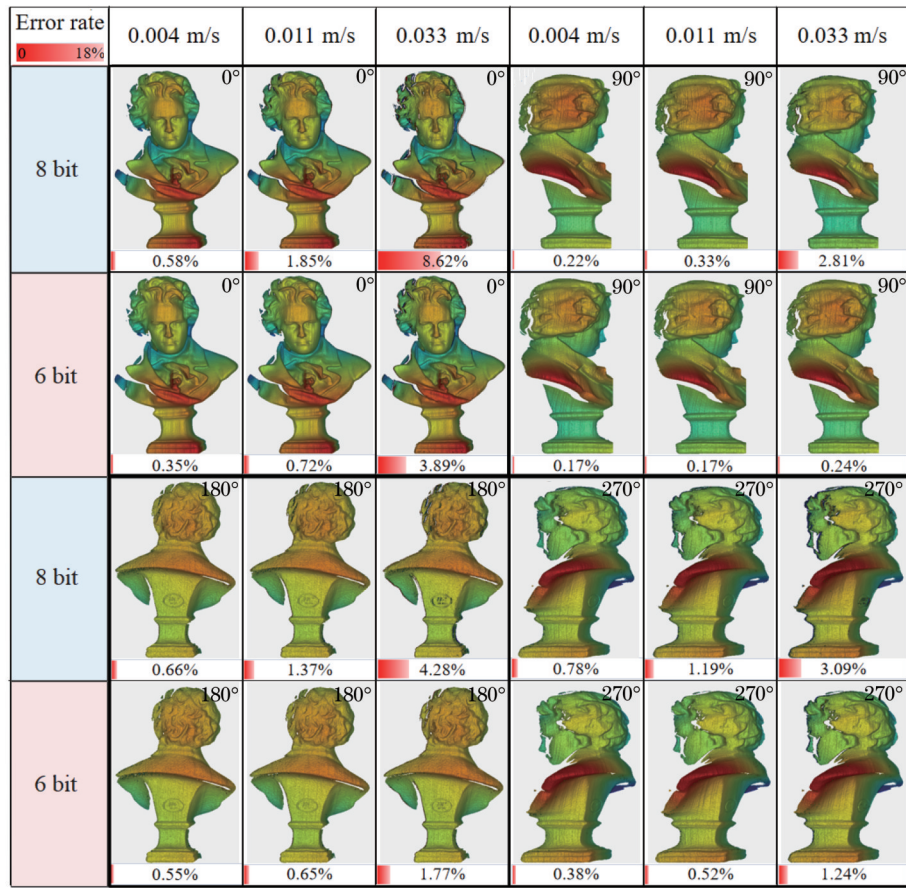


图 9 8 bit 和 6 bit 条纹投影在不同旋转速率下不同角度位置的三维重建结果及相位展开错误率

Fig. 9 3D reconstruction results and phase error rate using 8 bit and 6 bit projected fringes at different positions and rotation speeds

统,解决相机速率资源冗余浪费问题。

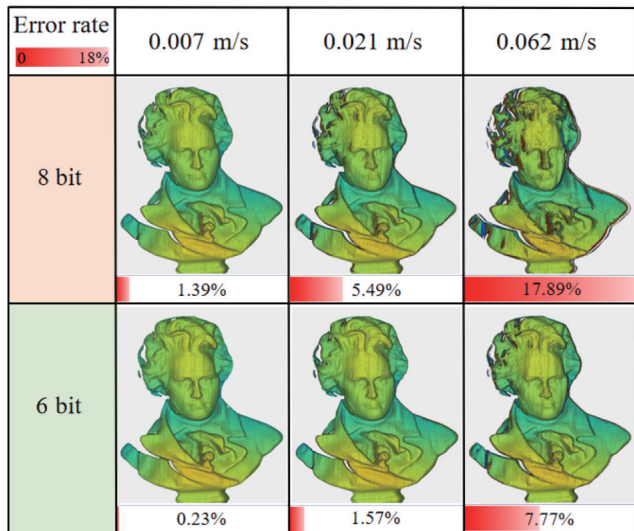


图 10 8 bit 和 6 bit 条纹投影在不同旋转速率下三维重建结果及错误率分析

Fig. 10 3D reconstruction results and error rate analysis of 8 bit and 6 bit projected fringes at different rotating speeds

### 3.4 测量深度比较

第四个实验着重对比了使用 6 bit 条纹图案与经典 1 bit 二值离焦条纹图案进行条纹投影三维测量的深度差异。6 bit 条纹图案在投影仪聚焦条件下进行投

影,1 bit 二值离焦条纹图案则在离焦条件下完成投影,均采用双频分层方法,相机选用 1152 pixel×864 pixel 的成像分辨率,以第一个位置为原点,使用步进电机带动物体每次向后(远离测量系统方向)均匀移动 45 mm,并在各个位置分别使用 6 bit 条纹图案和 1 bit 二值离焦条纹图案进行物体的三维面形测量,得到的结果如图 11 所示。实验结果表明,使用 6 bit 条纹图案投影在各个测量深度范围均可很好地完成测量,而 1 bit 条纹方法结合二值离焦技术的投影因在投影仪离焦情况下进行,测量结果会随着测量深度的增加而变差。这说明在测量深度方面,使用 6 bit 条纹投影方法相比 1 bit 条纹投影方法具有明显的优势,更适用于完成低速、高鲁棒、大景深的动态三维测量。

## 4 分析与讨论

实验证明了 6 bit 条纹投影方法拥有与 8 bit 条纹投影方法非常接近的测量精度,同时还具备编码方式更加灵活和重建速率更快的优点,且相对于 1 bit 二值离焦条纹投影在测量深度范围上具有优势。对本研究的内容,有几个方面需要说明和讨论:

1) DLP4500 投影仪作为一款成本低、性能好的 DLP 投影仪,广受条纹投影三维测量研究者的欢迎,所以本文主要以 DLP4500 型号投影仪为例进行阐述。



Method	X=0 mm	X=45 mm	X=90 mm	X=135 mm
6 bit patterns using our method				
1 bit patterns using dithering technique				

图 11 6 bit 聚焦投影和 1 bit 二值离焦条纹投影在不同深度位置下的三维重建结果

Fig. 11 3D reconstruction results using 6 bit in-focus projection and 1 bit binary defocusing projection at different depth positions

其他常见 DLP 投影仪大多数也可投影 8~1 bit 条纹图案,如 DLP6500 等;也有部分投影仪仅可投影 8 bit 和 1 bit 条纹图案,如 DLP7000 等,但它们也可通过控制投影积分时间和相机曝光时间完成基于任意比特数条纹图的三维面形测量。

2) 7 bit 图案作为 8 bit 和 6 bit 图案中间的一个比特位深图案,也可替换 8 bit 和 6 bit 图案,但是相比之下,7 bit 图案投影只在速率上相较 8 bit 图案有优势。

3) 4 bit 图案投影思想在 Zhu 等<sup>[16]</sup>提出的时空二进制编码策略中已有类似体现,将标准 8 bit 正弦图案编码为 4 个二进制图案,通过均等的时间积分成像获得一幅正弦图案。而 2 bit 图案投影思想也有体现在 Zuo 等<sup>[17]</sup>提出的三级脉宽调制技术中,他们将合成的三级脉宽调制模式编码为 2 个二进制图案,并对每幅图设置相同的积分时间进行拍摄。与这些工作不同的是,本文方法在生成和投影 4 bit 和 2 bit 图案时,每幅 1 bit 图案的权重是不同的,而且没有将其拆分成 1 bit 图案再进行投影,而是以整个 4 bit 或 2 bit 图案的

形式直接投影。两类方法之间存在一定的相似性,可相互借鉴。

4) 针对 4 bit 条纹图案,使用 2.2 节的方法分别生成 8、6、4 bit 的双频分层条纹图案,并尝试使用它们对图 7 所示的石膏模型进行相位重建,得到的结果如图 12 所示。可以看出,8 bit 和 6 bit 条纹投影方法均有着较好的重建结果,虽然 4 bit 条纹投影方法的重建精度不如前两者,其主要原因在于 4 bit 条纹图案量化级数不足,导致条纹图解算出的相位质量不佳,但在一定程度上,4 bit 条纹投影方法也完成了相位计算和三维重建。一方面,4 bit 条纹投影方法测量精度有望结合二值离焦技术得到提高,但也应注意因此引入的离焦操作通常会使测量深度受到限制;另一方面,相比 8 bit 和 6 bit 条纹投影方法,4 bit 条纹投影方法还有速率更快、允许投影图案数更多、可使用算法范围更广的优点,具有很大的潜在研究空间和很高的应用价值,尤其是对其测量性能的提升需要进一步研究,目前可直接用于对精度要求不高的一些高速测量场合。

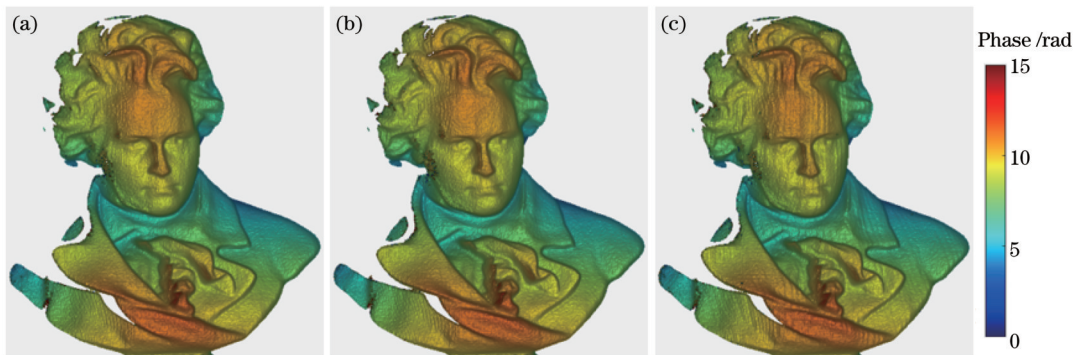


图 12 不同比特数条纹投影三维重建结果。(a) 8 bit; (b) 6 bit; (c) 4 bit

Fig. 12 3D reconstruction results of projected fringe with different bits. (a) 8 bit; (b) 6 bit; (c) 4 bit

5) 使用其他比特数条纹图进行条纹投影三维测量,并不是完全替代常用的 8 bit 和 1 bit 条纹图,而是能够在不同的应用场景中选择最适用的条纹图比特数。1 bit 条纹图案适合使用在超高速动态测量中,速率是第一要求,但会适当牺牲测量精度和测量深度范

围;6 bit 条纹图案适合使用在低速、高鲁棒的测量中,在保证测量深度范围和精度的同时,提升测量系统的投影速率和相位展开方法的鲁棒性;8 bit 条纹图案则适合使用在静态、慢速高精度测量中,测量精度是第一要求,对测量速率和相位展开方法没有严格要求。基



于本文的研究结果,对使用所提及的 3 种比特数条纹图的三维测量性能和适用场景进行总结,如图 13 所

示,其中五角星的数量表征对应方法测量性能的优劣。

Bit of projected fringe	Measuring speed	Measuring accuracy	Measuring depth range	More suitable application scenes
1 bit	★★★★★	★★★★	★★	High-speed dynamic measurement
6 bit	★★	★★★★	★★★★★	Low-speed and robust dynamic measurement with large depth range
8 bit	★	★★★★★	★★★★★	Static measurement with high accuracy

图 13 3 种比特数条纹投影性能和适用场景总结

Fig. 13 Summary of performance and suitable application scenes for fringe projection with three kinds of bits

## 5 结 论

研究了 DLP 投影仪投影任意比特数条纹实现三维面形测量,以满足更多的条纹投影测量方法和系统的要求,并着重对利用 8 bit 和 6 bit 条纹图完成条纹投影三维测量的精度、抗噪性和抗运动模糊能力以及 6 bit 聚焦条纹图和 1 bit 二值离焦条纹图的测量深度范围进行了详细的比较研究。首先回顾了条纹投影三维测量系统及其关键技术,然后介绍了不同比特数图案的生成和投影方法,最后给出了条纹投影三维测量系统中比特数的选择方式。实验部分进行了平板、标准件和复杂物体的精度评价与比较,使用表面粗糙、有噪声的物体和旋转台带动物体运动,对不同位深条纹投影的抗噪性和抗运动模糊能力进行了对比,并使用位于不同深度的物体对 6 bit 和 1 bit 条纹投影方法的测量深度范围进行了比较。

实验结果表明:1) 8 bit 条纹投影方法相比 6 bit 条纹投影方法的测量精度稍佳,但是两者之间差异较小,在需求允许下可以进行替换;2) 6 bit 条纹投影方法因其允许最大投影图案数和投影速率不同,在抗噪性和抗运动模糊能力上均优于 8 bit 条纹投影方法,可在一定程度上解决 8 bit 条纹投影方法的编码方式受限和相机速率冗余问题;3) 使用 6 bit 条纹相比 1 bit 二值离焦条纹在测量深度范围上具有明显的优势,可完成大测量深度范围的低速动态三维测量。上述结论为条纹投影三维测量中条纹图比特数增添了可选方案,可使用除 8 bit 和 1 bit 条纹图以外的 6 bit 条纹图,甚至 4 bit 等其他比特位深的更多条纹图进行条纹投影三维测量,最终实现基于 DLP 投影任意比特数条纹的三维面形测量,以满足不同测量场景下的实际应用需求。同时,分析与条纹投影三维测量系统效率相关的工作参数之间的关系,对条纹投影三维测量在不同系统和不同工程需求下条纹图最佳比特数的选择具有指导意义和参考价值,可实现在同一套硬件系统条件下,充分利用其硬件性能,灵活搭配不同三维重建算法,适配更多实际测量场景的应用需求。

## 参 考 文 献

- [1] 余佳杰, 周建平, 薛瑞雷, 等. 基于结构光视觉和光照模型的焊缝表面质量检测[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 1602019.  
Yu J J, Zhou J P, Xue R L, et al. Weld surface quality detection based on structured light and illumination model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 1602019.
- [2] 吴军, 李鑫, 刘少禹, 等. 基于后方定位的飞机蒙皮损伤视觉检测全局三维重建方法[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1115002.  
Wu J, Li X, Liu S Y, et al. Global three-dimensional reconstruction method for visual detection of aircraft skin damage based on rear positioning[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1115002.
- [3] 陈亦麟, 王发宇, 刘建阳. 基于双目立体视觉与结构光的便携式非接触三维掌纹采集系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0410016.  
Chen Y L, Wang F Y, Liu J Y. Non-contact portable three-dimensional palmprint acquisition system based on binocular stereo vision and structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0410016.
- [4] Sansoni G, Docchio F. 3-D optical measurements in the field of cultural heritage: the case of the Vittoria Alata of Brescia[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1): 359-368.
- [5] Xu J, Zhang S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106193.
- [6] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- [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] Li L, Zheng Y, Yang K, et al. Modified three-wavelength phase unwrapping algorithm for dynamic three-dimensional shape measurement[J]. Optics Communications, 2021, 480: 126409.
- [9] Guo W B, Wu Z J, Zhang Q C, et al. Real-time motion-induced error compensation for 4-step phase-shifting profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(15): 23822-23834.
- [10] 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.
- [11] Lei S Y, Zhang S. Flexible 3-D shape measurement using projector defocusing[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3080-3082.
- [12] Zuo C, Huang L, Zhang M L, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.

- [13] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 0303004.  
Zhang Q C, Wu Z J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 0303004.
- [14] Li W S, Su X Y, Liu Z B. Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method[J]. Applied Optics, 2001, 40(20): 3326-3333.
- [15] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [16] Zhu J P, Zhou P, Su X Y, et al. Accurate and fast 3D surface measurement with temporal-spatial binary encoding structured illumination[J]. Optics Express, 2016, 24(25): 28549-28560.
- [17] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using bi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.
- [18] Liu K, Wang Y C, Lau D L, et al. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5229-5244.
- [19] Wu J, Zhou Z H, Liu Q, et al. Two-wavelength phase-shifting method with four patterns for three-dimensional shape measurement[J]. Optical Engineering, 2020, 59(2): 024107.
- [20] Zuo C, Chen Q, Gu G H, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. Optics Express, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [21] Wang Y J, Zhang S. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2067-2069.
- [22] Zheng D L, Kemao Q, Da F P, et al. Ternary Gray code-based phase unwrapping for 3D measurement using binary patterns with projector defocusing[J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3660-3665.
- [23] He X Y, Zheng D L, Qian K M, et al. Quaternary Gray-code phase unwrapping for binary fringe projection profilometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 358-368.
- [24] Wu Z J, Zuo C, Guo W B, et al. High-speed three-dimensional shape measurement based on cyclic complementary Gray-code light[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1283-1297.
- [25] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. High-speed three-dimensional shape measurement based on shifting Gray-code light[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 22631-22644.
- [26] Wu Z J, Guo W B, Li Y Y, et al. High-speed and high-efficiency three-dimensional shape measurement based on Gray-coded light[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 819-829.
- [27] Wu Z J, Guo W B, Lu L L, et al. Generalized phase unwrapping method that avoids jump errors for fringe projection profilometry[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27181-27192.
- [28] 陆丽莲, 吴周杰, 张启灿. 基于错位格雷码的动态三维形貌测量方法[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0512005.  
Lu L L, Wu Z J, Zhang Q C. Dynamic three-dimensional shape measurement method based on misaligned Gray code[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0512005.
- [29] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C, et al. Time-overlapping structured-light projection: high performance on 3D shape measurement for complex dynamic scenes[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22467-22486.
- [30] 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.
- [31] Inokuchi S. Range-imaging system for 3-D object recognition[J]. ICPR, 1984, 1984: 806-808.
- [32] Guehring J. Dense 3D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4309: 220-231.
- [33] Song Z, Chung R, Zhang X T. An accurate and robust strip-edge-based structured light means for shiny surface micromerement in 3-D[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(3): 1023-1032.
- [34] Pagès J, Salvi J, Collewet C, et al. Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(8): 707-720.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Wu Z J, Guo W B, Zhang Q C. Two-frequency phase-shifting method *vs.* Gray-coded-based method in dynamic fringe projection profilometry: a comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 153: 106995.

## Three-Dimensional Shape Measurement by Arbitrary-Bit Fringe Projection Using DLP Projector

Li Xunren, Guo Wenbo, Zhang Qican\*, Wu Zhoujie\*\*, Chen Zhengdong, Wang Haoran, Chen Zhaosheng

*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China*

### Abstract

**Objective** The digital light processing (DLP) projector has been widely used in fringe projection profilometry (FPP) for three-dimensional (3D) shape measurement. The mostly used bit depth of projected fringe patterns in FPP is 8 bit. It limits the number and switching speed of projected patterns and leads to the limitation of available algorithms for the 3D reconstruction and the redundancy of the camera rate due to the inherent constraints of some DLP projectors. Meanwhile, the binary defocusing projection technique with 1 bit fringe patterns that can obtain a faster refresh rate of patterns is greatly limited in measurement accuracy and the measurement depth range because of the down-sampling of patterns and the

defocusing of projectors. In addition to the commonly used 8 bit and 1 bit fringe patterns, there is a lack of research on fringe patterns of 2-7 bit and no selection scheme for the optimal bit depth of projected fringe patterns in different application scenes. To balance the measurement performance in terms of measurement accuracy, speed, and depth range, this study proposes a 3D shape measurement method by projecting arbitrary-bit fringes using DLP projectors and a strategy of determining the optimal bit depth in different application scenes.

**Methods** The basic idea of the method of projecting arbitrary-bit fringe patterns for 3D shape measurement is to split arbitrary-bit fringe patterns into several 1 bit patterns, load them into the DLP projector in order, and select the corresponding bit depth of fringe patterns for projection. Firstly, the bit depth of the used fringe patterns is determined by the actual measurement system and requirements, and the gray level of a line of the corresponding sinusoidal fringe pattern is calculated. Then, the quantified gray level is converted into a binary number. After that, the same bit binary number is extracted and expanded by row to several 1 bit patterns according to the spatial characteristics of the fringe patterns. Next, these 1 bit patterns are loaded into the DLP projector for projection and shooting, and the suitable 3D reconstruction algorithms in the corresponding systems are used to reconstruct objects' information. As a result, arbitrary-bit fringe patterns can be used in 3D measurement based on FPP. Meanwhile, according to the analytical strategy considering the reconstruction speed or camera shooting speed, the used algorithm, measurement accuracy, and other conditions, the optimal bit depth can be selected.

**Results and Discussions** The results of the measurement for the whiteboard, standard gauges, and complex plaster model demonstrate that the measurement accuracy of the 6 bit fringe projection is close to that of the 8 bit fringe projection (Table 1, Figs. 6 and 7). As the number of allowed projected 6 bit fringe patterns is more than that of 8 bit fringe patterns, 6 bit fringe patterns have the advantages of flexible coding and anti-noise ability in the measurement scene with high noise and can be applied in more 3D measurement scenes (Fig. 8). In addition, they are more resistant to motion-induced errors due to their faster refresh rates in the projector than 8 bit fringe patterns (Figs. 9 and 10). Meanwhile, the measurement depth range of the 6 bit fringe projection method with the focused projector is larger than that of the 1 bit fringe projection method with the defocusing projecting (Fig. 11). Moreover, the 4 bit fringe patterns obtained by the proposed method can be used in 3D measurement based on FPP (Fig. 12), but the measurement performance needs to be improved. Finally, the measurement performance and applicable scenes of fringe projection using different bits are given (Fig. 13), and the corresponding operational parameters of the fringe projection measurement system are summarized to guide the selection of the optimal bit depth of fringe patterns in different application scenes (Fig. 5).

**Conclusions** This study proposes a 3D shape measurement method by projecting arbitrary-bit fringes using the DLP projector, which offers diverse options for the bit depth of projection and coding strategies. It demonstrates that 6 bit fringe patterns have the advantages of flexible fringe projection, and they can make full use of the redundancy of the camera rate and expand the range of available algorithms for 3D reconstruction compared with 8 bit fringe patterns. The measurement depth range of the 6 bit fringe projection is larger than that of the 1 bit fringe projection. Considering the characteristics of the DLP projector and the camera, the relationship between the operational parameters of the 3D measurement system based on fringe projection is summarized. On this basis, a method for selecting the bit depth of fringe patterns is proposed, providing a valuable reference for the selection of the optimal bit depth in different measurement systems. The method can make full use of the hardware's performance in the actual applications and enable the flexible usage of different 3D reconstruction algorithms and can be applied to more measurement scenes.

**Key words** measurement; fringe projection profilometry; bit depth; DLP projector