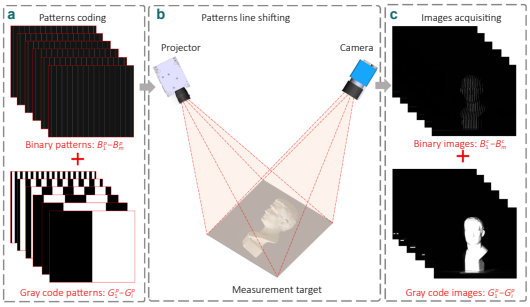
OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

Article

2026 年 5 月, 第 53 卷, 第 5 期

基于线移二值聚焦投影的正弦条纹图像获取方法



邱建城[1], 黎章生[1], 熊雨扬[1], 郑常椿[1], 吴高旭[1,2*]

[1]江西理工大学机电工程学院，江西 赣州 341000；

[2]上海大学材料科学与工程学院，上海 200444

摘要：在条纹投影轮廓术中，条纹图像的投影与采集速度是决定三维测量效率的核心参数，因此如何快速获取条纹图像已成为目前的研究热点。基于 DLP 投影仪的传统方法需要投影仪占用 255 个脉冲周期进行投影，并依赖相机时间积分成像，以获取单帧 8 位正弦条纹图像。对于至少需要三帧图像的相移算法，该过程耗时显著，未充分发挥投影仪刷新率的极限，难以满足动态三维测量的需求。此外，传统方法中投影仪与相机的非线性响应会引入明显的测量误差，从而降低整体测量精度。针对上述问题，本文提出一种基于线移二值聚焦投影的正弦条纹图像获取方法。该方法仅需 16 个脉冲周期，即可获取任意相移步数的正弦图案，并在此基础上提取相位信息，实现三维形貌测量。通过静态和动态的综合实验对比，结果表明所提方法不但显著提高了三维测量速度，而且有效抑制了三维测量系统的非线性误差，进一步提高了测量精度。

关键词：三维测量；二值线移；聚焦投影；正弦条纹

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.250342 | CSTR: 32245.14.oee.2026.250342 | 中图分类号：TN274 | 文献标识码：A

邱建城，黎章生，熊雨扬，等. 基于线移二值聚焦投影的正弦条纹图像获取方法 [J]. 光电工程，2026，**53**(5): 250342

Qiu J C, Li Z S, Xiong Y Y, et al. Sinusoidal fringe image acquisition method based on line shifted binary focused projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(5): 250342

1 引　言

结构光三维测量技术以其非接触、低成本和高精度等优势，在工业检测、逆向工程、生物医学及机器视觉等领域得到了广泛应用[1-4]。作为结构光三维测量技术中的重要分支，条纹投影轮廓术 (fringe projection profilometry, FPP) 因其技术成熟、适用性广而成为目前应用最为广泛的方法之一。该技术通过投影仪向被测物体表面投射特定条纹，由相机同步采集经物体表面形貌调制的变形条纹图像，从而建立投影仪、物体与相机之间的几何关系，最终实现三维形貌的重建[5]。在这一过程中，条纹的投影与采集速度直接决定了测量效率，因此如何实现条纹图像的快速获取已成为当前研究的重点。

在众多的条纹图像中，正弦条纹因其在相位提取中的优良特性而被广泛采用[6]。例如，在相移轮廓术[7]中常使用正弦相移条纹进行测量，其中 8 位的正弦条纹最为常见[8]。该技术的典型流程包括首先由计算机生成正弦条纹图案，通过投影仪将其投射至待测物体表面；相机同步采集受物体表面调制而产生的变形条纹；随后，

收稿日期：2025-11-09；修回日期：2026-03-13；录用日期：2026-03-20；网络出版日期：2026-05-25

基金项目：国家自然科学基金 (52565059)；赣鄱俊才支持计划 (20232BCJ25052)；江西省科技创新计划 (20252BAC200322)；赣州市科技创新计划 (2023CYZ26969)；高层次人才研究启动计划 (205200100664)；江西省研究生创新基金项目 (YC2024-S525)

*通信作者：吴高旭，gaoxu_wu@jxust.edu.cn

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

利用相移算法或其他相位提取方法，从采集到的条纹图像中解析出包含物体高度信息的相位分布；最后，结合系统标定参数，实现物体的三维重建。在此过程中，相机采集的变形条纹图像可表示为

$$I_n(u^c,v^c)=A(u^c,v^c)+B(u^c,v^c)\cos[\varphi(u^c,v^c)+2\pi n/N], \quad (1)$$

式中：$I_n(u^c,v^c)$是变形条纹在像素(u^c,v^c)上的灰度值，上标 c 表征与相机相关的参数，$n=1,2,3,\cdots,N$代表相移步数；$A(u^c,v^c)$是平均灰度；$B(u^c,v^c)$是调制灰度；$\varphi(u^c,v^c)$是相位。通过 arctan 函数可以将相位从变形条纹中提取出来

$$\varphi(u^c,v^c)=\arctan\frac{\sum_{n=1}^{N}I_n(u^c,v^c)\sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^{N}I_n(u^c,v^c)\cos(2\pi n/N)}. \quad (2)$$

由 arctan 函数的特点可知包裹相位$\varphi(u^c,v^c)$被截断在$[-\pi,\pi)$范围内。

以 8 位为例的高位深正弦条纹在测量精度方面具有显著优势，但较低的投影速度是实现高速三维测量的主要瓶颈。在基于数字微镜器件 (digital micromirror device, DMD) 的 FPP 系统中，正弦条纹图案通常被分解为多个 1 位二值图案进行投影，并通过控制每个二值图案对应的曝光时间比例，在相机传感器上以时间积分方式合成为一幅高位深条纹图像[9]。因此，在投影 8 位的正弦条纹图案时，基于 DMD 的投影仪最大投影速度通常限制在 120 Hz，严重制约了条纹投影轮廓术的测量效率，也限制了该技术在动态场景测量中的进一步应用。如何实现三维测量效率与精度之间的平衡，已成为当前研究中的一个关键问题。

相对 8 位的正弦条纹，二值图案的投影速度可以达到 4225 Hz。然而，由于二值图案所包含的灰度信息有限，通常仅用于辅助解算条纹级次[10]。为了提升测量效率，二值离焦技术[11-14]逐渐受到关注。正弦条纹通过连续的灰度变化反映相位变化，而二值图案的灰度变化不连续，难以直接表征相位变化，这增加了相位计算的难度。通过对二值图案进行离焦投影，成像系统的离焦效应可使条纹边缘模糊化，从而实现灰度值的平滑变化，解决灰度与相位不匹配的问题，使相机采集的条纹图像具备连续性，便于后续相位解析[15]。William 等[16]提出一种基于二维区域调制的二值图案投影仪技术，通过优化了二值图案的生成方式，提升了离焦投影下的条纹质量。然而，该方法依赖于 16 个像素周期的条纹设计，对条纹周期的灵活性造成一定限制。Hu 等[17]将一维方形二值条纹调制与改进蛇形扫描的二维 Stucki 误差扩散抖动调制相结合，并通过双三步相移法针对性补偿二值条纹高次谐波引入的相位误差，有效提升了 3D 测量精度。但该方案需投影 12 帧条纹，较传统离焦方法帧数有所增加，在一定程度上制约了其在高速动态场景中的适配性。尽管二值离焦技术已取得显著进展，但仍面临离焦程度控制困难、有效测量范围有限等问题。

近年来，基于二值图案聚焦投影的方法受到广泛关注。该技术的核心在于如何对二值图案进行编码，使其能够按特定规律合成高质量的正弦条纹。严飞等[18]依据正弦条纹单周期内的强度规律对二值图案进行编码，再对编码后的二值图案进行处理，生成了可用实际测量的正弦相移条纹。该方法避免了离焦投影的缺陷，但合成的正弦条纹灰度连续性略低于直接投影的正弦条纹。刘佳等[19]提出一种分位投影再合成正弦条纹的聚焦投影方法，该方法通过对传统正弦条纹一个周期内呈正弦变化的光强值进行二进制编码，将所有二进制编码的每一位分别组合生成二值图案。这种分位编码方式更精准，正弦条纹还原度更高，但所需的二值图案数量也相应增加。总的来说，二值聚焦投影继承了二值图案离焦投影在投影速度和不受非线性影响的优势，同时避免了离焦程度难以控制和测量范围有限的局限性。

基于二值图案聚焦投影的上述优势，本文提出一种基于线移编码的二值聚焦投影方法，以实现正弦条纹图像的高效获取。该方法提出的二值线移编码策略，可以设计出偶数幅二值图案，并构建了一种正弦条纹合成模型。该模型能够将线移编码的二值图案合成为任意相移步数的正弦条纹。在此基础上，采用相移算法精确提取相位信息，同时结合互补格雷码辅助完成相位展开[20]，实现高精度、高速度的三维测量。

2 基本原理

2.1 二值线移原理

相比传统高位深图像，二值图案在投影效率方面具有显著优势。以 DLP 4500 型投影仪为例，其在投影 8 位正弦图像时的帧率仅为 120 Hz，而在投影二值图案时可达 4225 Hz[21]。此外，由于二值图案仅包含 0 和 1 两种强度等级，能够有效避免三维测量系统中非线性响应引入的误差，从而提高测量精度。基于二值图案在投影效率与抗非线性误差方面的优势，本文提出一种线移

编码的二值聚焦投影方法，以实现正弦条纹图像的高效获取。

图 1 显示了二值图像的获取过程，主要由三部分组成：图案编码、图案线移、图像采集。需要说明的是，本文在相位展开阶段采用互补格雷码作为辅助手段，因此互补格雷码图案在二值线移过程中与二值图案一起投影至被测物体表面，并由相机同步采集。如图 1 所示，图 1(a) 为图案编码，包括二值图案 $(B_1^{\mathrm{p}}-B_m^{\mathrm{p}})$ 和格雷码图案 $(G_1^{\mathrm{p}}-G_i^{\mathrm{p}})$ 的编码。图 1(b) 为图案线移，编码图案经投影仪被投影到测量目标表面，相机同步采集。图 1(c) 为采集到的变形图像，包括二值图像 $(B_1^{\mathrm{c}}-B_m^{\mathrm{c}})$ 和格雷码图像 $(G_1^{\mathrm{c}}-G_i^{\mathrm{c}})$。

二值图案的编码策略如图 2 所示，水平方向表示投影图案水平方向上的像素 u^{p}，垂直方向表示行扫描图案的数量 m。在二值图案的任意一个周期内，只有一列被编码为归一化灰度值 1。随着投影步数的增加，逐个投射垂直方向的不同图案，同时被设为灰度值 1 的编码列会沿水平方向逐列切换，直至覆盖投影仪成像平面中的所有水平列。在这种情况下，图案的周期和图案的数量在数值上是相等的。图案的周期越小，意味着图案的数量越少，这就更容易受到噪声的影响，抗干扰能力也较弱；图案的周期越大，意味着图案的数量越多，能够提供更强的稳定性，但同时会显著增加图像采集时间，降低整体测量效率。编码策略可以表示为式 (3)。值得注意的是，我们只显示了一个周期包含 16 个像素 (即 T=16) 的情况。实际应用中，也可根据需求采用任意其他偶数像素周期构建二值图案。

$$B_m^{\mathrm{p}}(u^{\mathrm{p}},v^{\mathrm{p}})=\begin{cases}1, & \dfrac{u^{\mathrm{p}}-m}{T}\in\mathbb{Z}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases}, \tag{3}$$

式中：B_m^{p} 代表编码的 m 幅线移图案，上标 p 表征与投影仪相关的参数，$m=1,2,3,\cdots,M$。

2.2 正弦图像合成模型

相机采集到的变形二值图像可以表示为 B_m^{c}，后续将对其进行正弦合成处理。为实现二值图像到正弦图像的转变，本文构建了一个正弦条纹合成模型。该模型依据每幅二值图像在合成中所占的权重进行灰度叠加，从而将 m 幅二值图像合成为任意步数的 n 幅正弦图像。合成过程可以表示为：

$$I_n(u^{\mathrm{c}},v^{\mathrm{c}})=\sum_{m=1}^{M}\left\{B_m^{\mathrm{c}}(u^{\mathrm{c}},v^{\mathrm{c}})\times\left[\sin\left(\frac{2\pi(m-1)}{M}+\delta_n\right)+1\right]\right\}, \tag{4}$$

式中：$I_n(u^{\mathrm{c}},v^{\mathrm{c}})$ 表示合成的正弦条纹；$B_m^{\mathrm{c}}(u^{\mathrm{c}},v^{\mathrm{c}})$ 表示第 m 幅线移条纹；$\delta_n=2\pi(n-1)/N$ 是相移量。图 3 展示了将 m 幅线移图像合称为 n 幅正弦图像的过程。

与相机传感器上的灰度积分过程不同，本方法中的正弦条纹图像直接由二值图像经正弦合成得到，其灰度分布呈阶梯状离散特性。该特性可能对包裹相位提取的准确性造成一定影响。为增强合成图像中条纹的连续性，

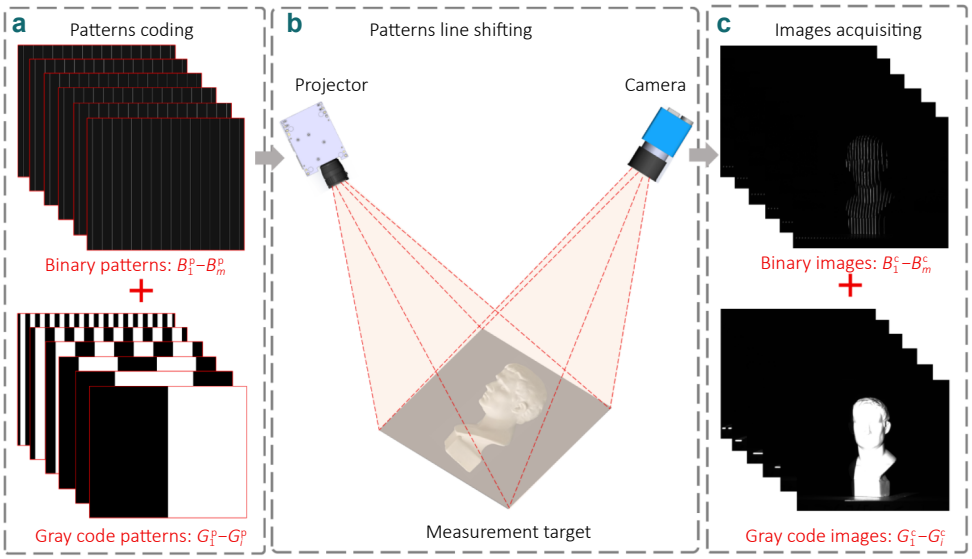


图 1 图像获取过程示意图。(a) 图案编码；(b) 图案线移；(c) 图案采集

Fig. 1 Diagram of image acquisition process. (a) Patterns coding; (b) Patterns line shifting; (c) Images acquisiting

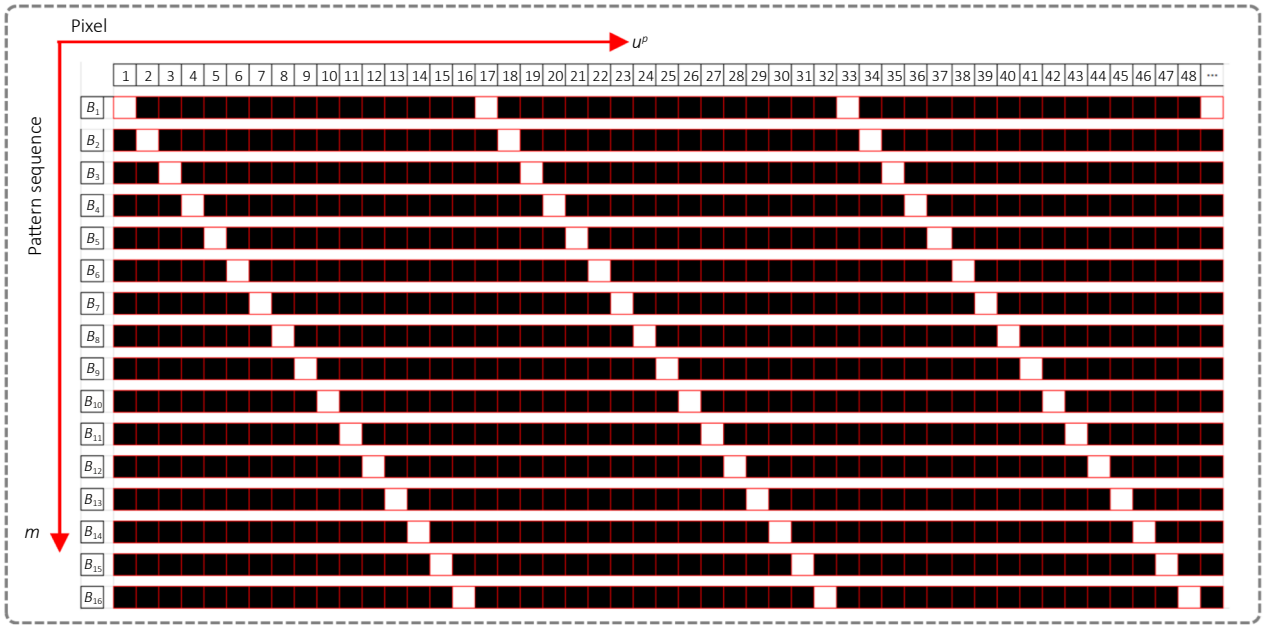


图 2 二值图案编码策略示意图

Fig. 2 Schematic diagram of binary pattern encoding strategy

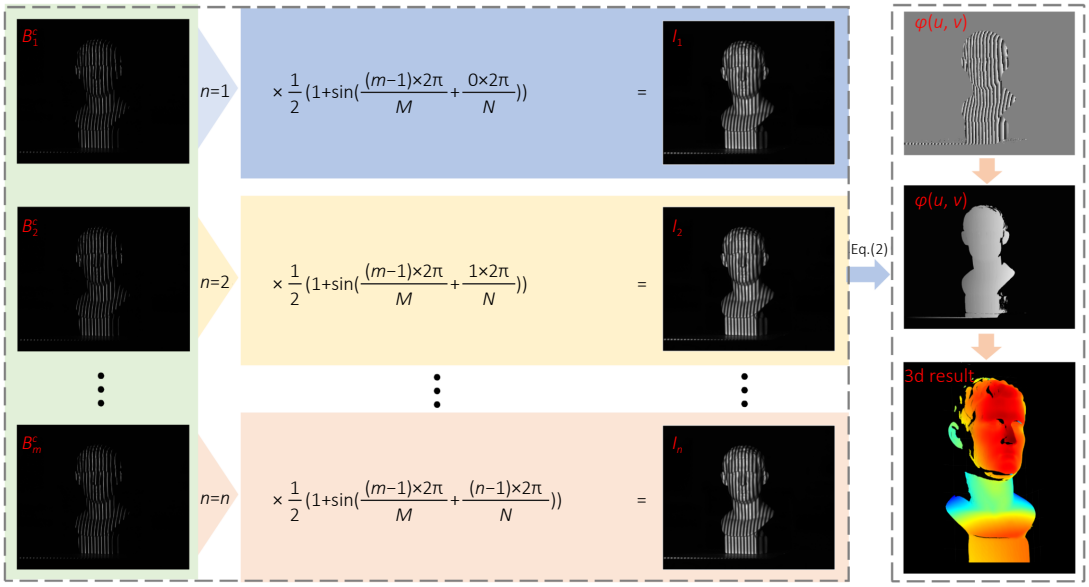


图 3 基于合成模型的正弦图像合成过程

Fig. 3 Sine image synthesis process based on synthesis model

本文对合成的正弦图像施加了小窗口高斯滤波。在本文中滤波窗口尺寸设置为 5×5，标准差设置为 1。读者可参照以下原则进行参数选择：对于窗口尺寸通常选择为奇数，以保证滤波器具有中心对称性，通常选择 5×5 的小窗口，以在去噪和细节保留之间取得平衡。若条纹本身较宽或噪声较强，可适当增大窗口。对于标准差，根据经验当窗口尺寸为 5×5 时，标准差常取 0.5 到 1.5，通常标准差与窗口尺寸要适配，窗口尺寸为$W\times W$时，标准差设置为$(W-1)/6$。尽管该处理可能略微降低表面边界处的测量精度，但对于提高整体相位计算的准确性具有重要作用。随后，利用相移算法中的式 (2) 解算包裹相位。

2.3 方法总结

本文所提出的基于线移二值聚焦投影的正弦条纹图像获取方法的实现流程可以总结为以下步骤，如图 4 所示。

步骤一：编码图案的投影和变形图像的采集。

首先，根据所设计的编码策略生成二值图案 (包括线移图案与格雷码图案)。通过投影仪将编码图案投射至待测物体表面，并由相机同步采集经物体表面形貌调制后的变形图案。采集得到的图像存储于计算机中，以供后续处理。

步骤二：正弦图像的合成和包裹相位的提取。

对采集到的变形线移图像进行处理。根据每幅线移图像在合成中的权重，将 m 幅变形线移图像合成为 n 幅正弦相移图像。随后，基于相移算法从合成的正弦图像中提取包裹相位。

步骤三：条纹级数的解算。

对变形的格雷码图像进行处理。首先对图像进行二值化，利用前 i 幅格雷码图像解算出条纹级次$k_1(u^c,v^c)$，再通过 i+1 幅格雷码解算出条纹级次$k_2(u^c,v^c)$。这两个条纹级次为后续的相位展开提供了精准的级次支持。

步骤四：相位展开和三维重建。

在解算出条纹级次后，在包裹相位$\varphi(u^c,v^c)$的不同区间内，分别用$k_1(u^c,v^c)$和$k_2(u^c,v^c)$对相位进行展开得到绝对相位$\phi(u^c,v^c)$，相位展开公式如式 (5) 所示。这种互补的方式可以从源头上消除跳变误差。最后，将绝对相位代入预先标定好的系统参数中，完成三维形貌的重建[22]。

$$\phi(u^c,v^c)=\begin{cases}\varphi(u^c,v^c)+2\pi k_2(u^c,v^c), & \varphi(u^c,v^c)\leqslant-\dfrac{\pi}{2}\\ \varphi(u^c,v^c)+2\pi k_1(u^c,v^c), & -\dfrac{\pi}{2}<\varphi(u^c,v^c)\leqslant\dfrac{\pi}{2}\\ \varphi(u^c,v^c)+2\pi k_2(u^c,v^c)-2\pi, & \varphi(u^c,v^c)>\dfrac{\pi}{2}\end{cases}. \quad (5)$$

3 实验验证

为验证所提方法的有效性与实用性，本研究搭建了一套典型的条纹投影轮廓术三维测量系统。该系统核心组件包括一台基于 DLP4500 的投影仪 (分辨率 912 pixel×1140 pixel) 和一台工业相机 (分辨率 2048 pixel×2448 pixel)，型号为 MER2-503-36U3M。如图 5 所示，相机镜头与投影仪镜头之间的基线距离为 120 mm，测量目标至相机镜头的物距为 400 mm。

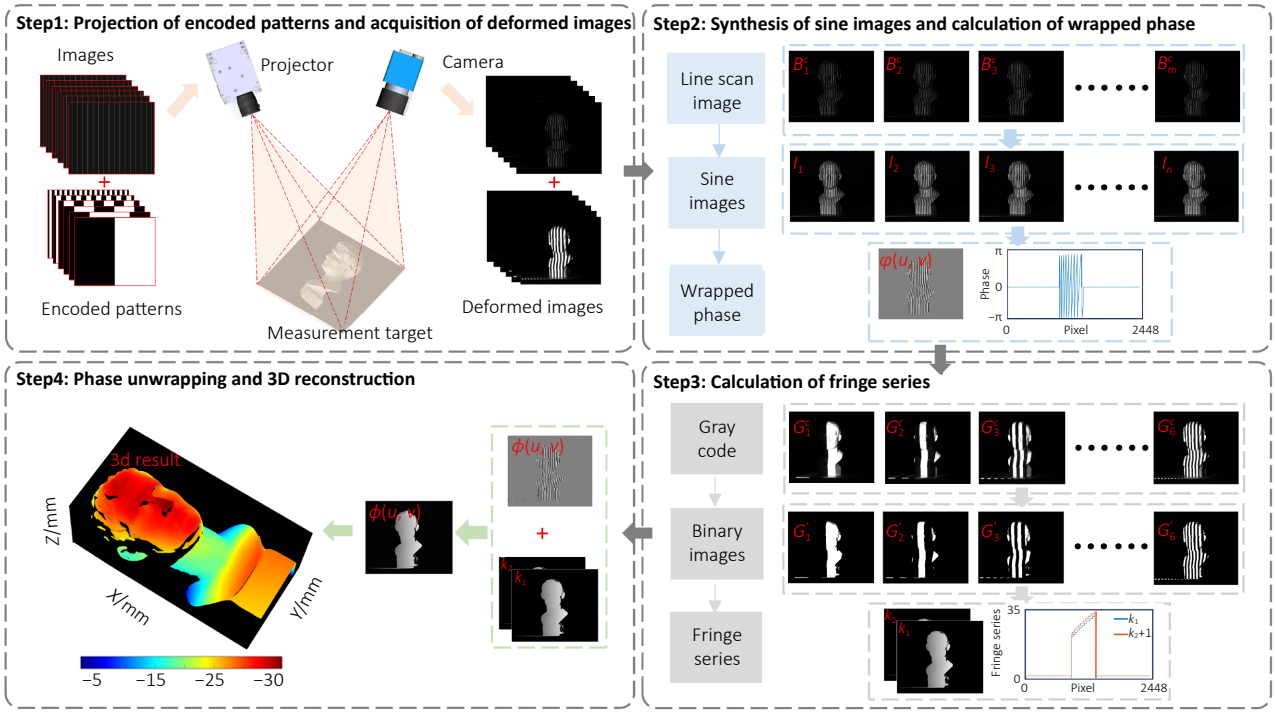


图 4 所提方法的实现流程

Fig. 4 The process of the proposed method

本文共设计了三组实验以系统评估所提方法的性能：1) 性能验证实验； 2) 静态对比实验； 3) 动态对比实验。在实验开始前，首先采用张正友标定法[23]对测量系统进行内外参数标定。相位提取过程中设定相移步数为 4，相位展开则采用前述互补格雷码辅助算法。在误差评价阶段，对于标准平板试件，以最小二乘平面拟合结果作为基准参考；对于非标准物体，则以 48 步相移算法的测量结果作为标准参考。为确保实验过程的客观性与科学性，所有实验均在保持一致的外部条件下进行，包括环境光照、被测物位置、相机焦距、光圈及曝光时间等参数。

3.1 性能验证实验

理论上，本文所提方法可以通过任意偶数幅线移图像获取正弦相移图像。第一个实验旨在验证不同周期 T 对测量精度的影响。选择了 5 组不同周期 (T=8/12/16/20/24) 的线移图案进行实验。图 6 展示了每个实验的完整过程，主要包含 4 个步骤： 1) 投影图案的编

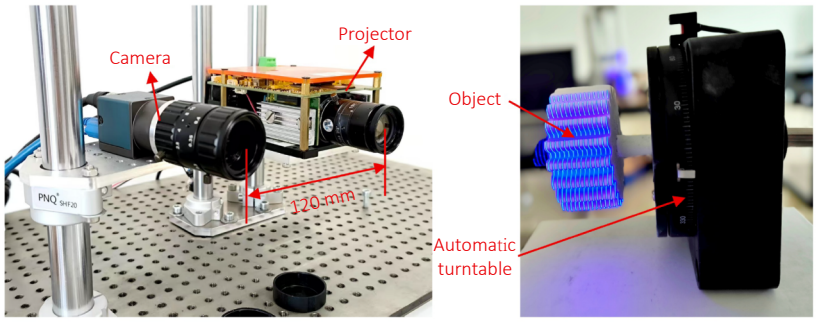


图 5 测量系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measurement system

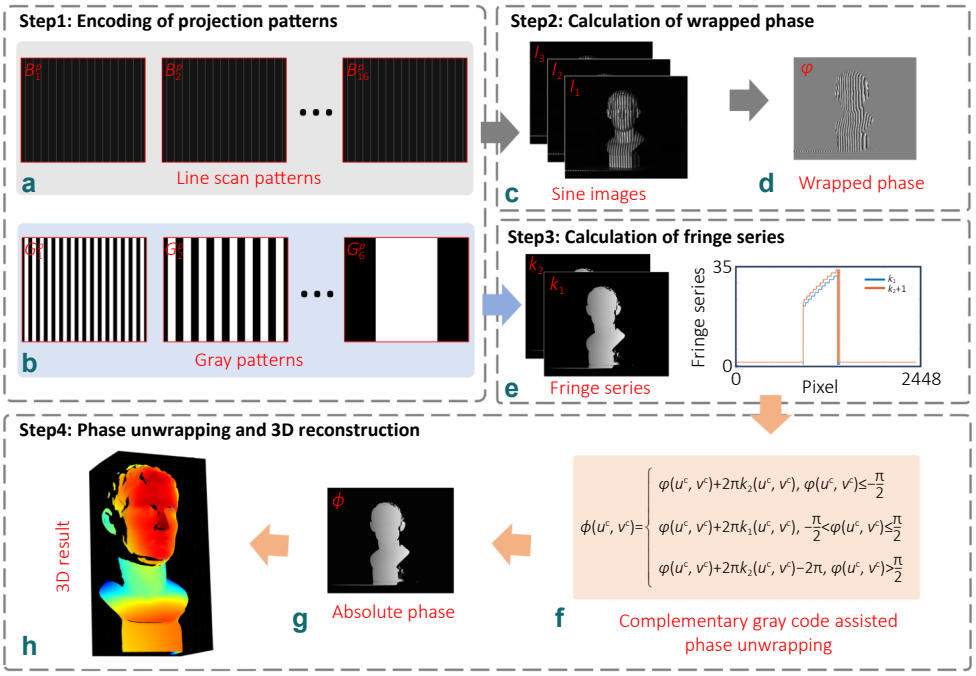


图 6 所提方法的重建过程。 (a) 线移图案； (b) 格雷码图案； (c) 正弦图像； (d) 包裹相位； (e) 条纹级数； (f) 互补格雷码辅助相位展开； (g) 绝对相位； (h) 3D 结果

Fig. 6 The reconstruction process of the proposed method. (a) Line scan patterns; (b) Gray patterns; (c) Sin images; (d) Wrapped phase; (e) Fringe series; (f) Complementary gray code assisted phase unwrapping; (f) Absolute phase; (h) 3D result

码； 2) 包裹相位的提取； 3) 条纹级数的解算； 4) 相位的展开和三维测量。

在本实验中，以精密制造的标准平板作为测量对象，将五组不同的编码图案依次投影至平板表面。测量结果如图 7 所示。图 8 进一步对相位误差与三维测量误差进行了对比分析。实验结果表明，随着编码周期的增大，测量误差逐渐减小。当周期达到 16 个像素时，相位误差降至约 0.03 rad，且随着周期进一步增大，相位误差趋于稳定，维持在 0.03 rad 左右，下降趋势明显减缓。三维误差亦呈现相同规律，在周期达到 16 个像素后稳定在 0.04 mm 左右。需要说明的是，该趋势与实验所用 DLP4500 投影仪的像素参数直接相关，16 个像素是本系统下“离散化误差-随机噪声平衡”的观测阈值，其与 DLP4500 像素参数的定量关联，将作为后续研究方向进一步探究。但在本实验相同条件下，将周期设置为 16 个像素可作为在测量效率与测量精度之间取得最佳平衡的优选方案。

3.2 静态对比实验

为了验证所提方法在精度方面的优势，本实验选取石膏模型作为测量对象，分别采用了二值离焦法、传统正弦条纹投影法、逐位投影法[17] 以及所提方法进行对比测量。实验中所有方法均采用相同的条纹周期 ($T = 16$) 与相移步数 (4 步)。二值离焦法为基于传统二值方波图案并结合离焦投影的实现方式，该方法通过直接离焦投影的二值方波图案来生成近似正弦分布的条纹图像。逐位投影法即文献 [18] 中提出的一种二值聚焦投影方法。实验结果如图 9 所示，图 9(a) 展示了四种不同方法提取

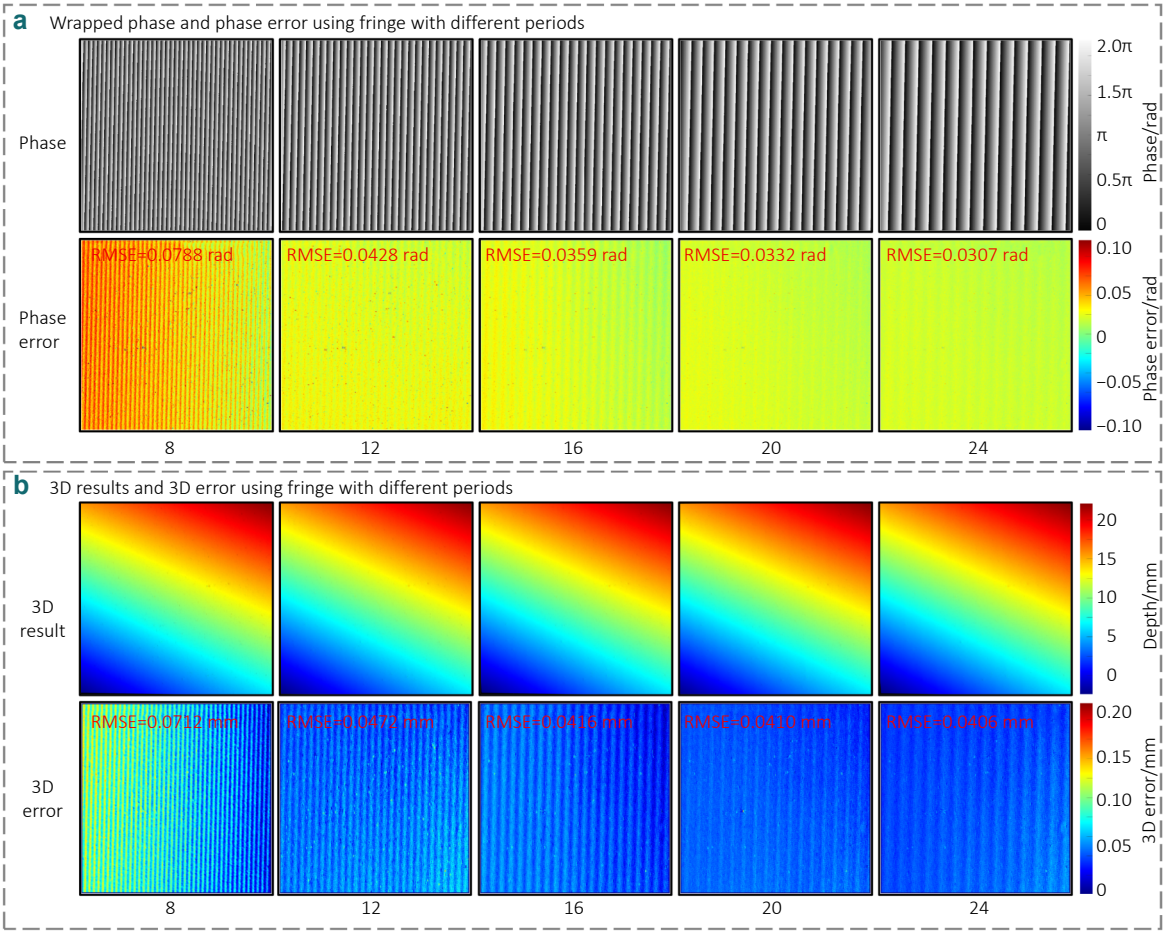


图 7 标准平板测量的实验结果。(a) 采用不同周期的条纹提取出的包裹相位及其相位误差； (b) 采用不同周期的条纹重建的 3D 结果及其 3D 误差

Fig. 7 Experimental results of standard board measurement. (a) Wrapped phase and phase error using fringes with different periods; (b) 3D results and 3D error using fringes with different periods

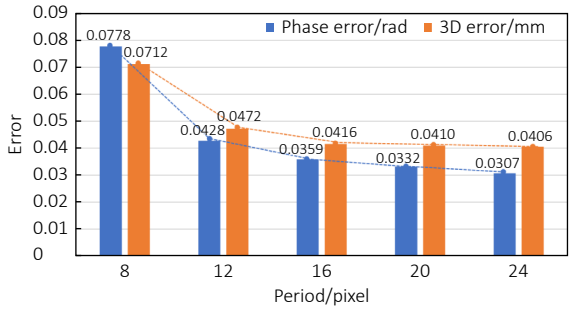


图 8 相位误差和 3D 误差的变化趋势示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the variation trends of phase error and 3D error

的包裹相位及其相应的相位误差分布，图 9(b) 则呈现了三维结果与三维误差分布。从包裹相位上看，四种方法均能提取出完整的包裹相位，但二值离焦法的相位误差最为显著，而所提方法相位误差最小。四种方法全局有效点的均方根误差分别为 0.3193 rad、0.2052 rad、0.1915 rad 和 0.1621 rad，表明所提方法在相位提取精度方面具有明显优势。在三维重建方面，各方法均能完整重建目标形貌。二值离焦法因离焦程度难以精确控制，其三维误差最大。其余三种方法误差处于同一量级，但所提方法精度仍优于传统正弦条纹投影法和逐位投影法，其三维重建的全局有效点的均方根误差分别为 0.0996 mm、0.0310 mm、0.0307 mm 和 0.0302 mm。为进一步评估所提方法中采用的小窗口滤波对物体边缘测量精度的影响，本研究针对边缘局部区域进行了误差分析。如表 1 所示，在相位误差与三维误差的各项指标(最大值、最小值、平均值) 上，所提方法均优于其余三种方法。这表明滤波处理虽对边缘区域精度存在一定影响，但并未削弱所提方法在整体及局部细节上的精度优势。在测量效率方面，基于二值图案的方法无疑优于基于正弦条纹的方法。二值离焦法通过单幅二值图案离焦即可获取一幅正弦条纹，逐位投影法则需要投影 11 幅二值图案。以四步相移为例，完成一次相位提取，二值离焦法需要 4 幅条纹，逐位投影法需要 44 幅条纹，而所提方法仅需 16 幅。综上实验结果可知，所提方法在一定程度上结合了二值图案测量的速度优势和正弦条纹测量的精度优势。

3.3 动态对比实验

为评估所提方法在动态场景下的适应能力，本实验以旋转齿轮为测量对象 (如图 5 所示)。齿轮由自动旋转平台驱动，转速可调。受限于当前实验设备，相机帧率设定为 30 f/s，齿轮转速为 1°/s。投影仪将编码图案连续投射至运动齿轮表面，相机同步采集。在实际三维测量中，影响系统效率的主要因素包括投影速度、采集速度与所需图案数量。目前，部分高速相机型号已可实现上万帧每秒的采集能力，因此采集速度通常不再是限制测量效率的主要瓶颈。DLP4500 投影仪作为业内高速投影设备之一，其投影 8 位灰度图像的帧率为 120 Hz，而投影二值图案时可达 4225 Hz。所提方法基于二值图案投影实现，相比传统方法显著提升了投影速度。需说明的是，本实验的核心目标并非验证方法的高速测量性能，而是评估其在动态场景下的适配能力，即运动物体的三维重建完整性。实验结果如图 10 所示，图 10(a) 为不同时间采集到的变形线移图像，图 10(b) 为相应时间的正弦合成图像，图 10(c) 为提取的包裹相位，图 10(d) 为最终的重建结果。重建结果显示，各时刻齿轮齿面均能被完整重建，表明方法能有效克服运动导致的条纹模糊或编码失效问题，具备良好的动态适应能力。同时，所提方法具备明确的高速测量扩展潜力：实验所用 DLP4500 投影仪的二值图案投影帧率可达 4225 Hz，是支撑高速测量的关键硬件基础；当前 30 f/s 的相机帧率为系统性能瓶颈，而非方法本身的限制。若后续配合万帧级高速相机，齿轮转速可按“相机帧率的提升”的比例同步提升，方法的高速测量能力可进一步释放。后续研究中，我们将补充高速相机的实验验证，以完善方法的高速性能表征。

4 结 论

本文提出了一种基于线移二值聚焦投影的正弦图像获取方法。该方法通过对编码后的二值图案进行聚焦投影，并结合所构建的正弦图像合成模型，将多幅二值图像合成为高质量的正弦条纹图像，从而实现正弦图像的快速获取。在相位处理方面，采用相移算法提取包裹相位，并利用互补格雷码辅助完成相位展开，最终实现三维形貌的重建。为系统验证所提方法的性能，本文开展了三组实验研究：1) 性能验证实验。表明随着编码周期的增大，测量精度逐渐提高，并在周期为 16 个像素时趋于稳定。2) 静态对比实验。表明所提方法的测量精度显著优于二值离焦方法，并略优于传统正弦条纹投影法和逐位投影法。3) 动态对比实验。表明所提方法适用于动态测量场景。与二值离焦法相比，尽管所

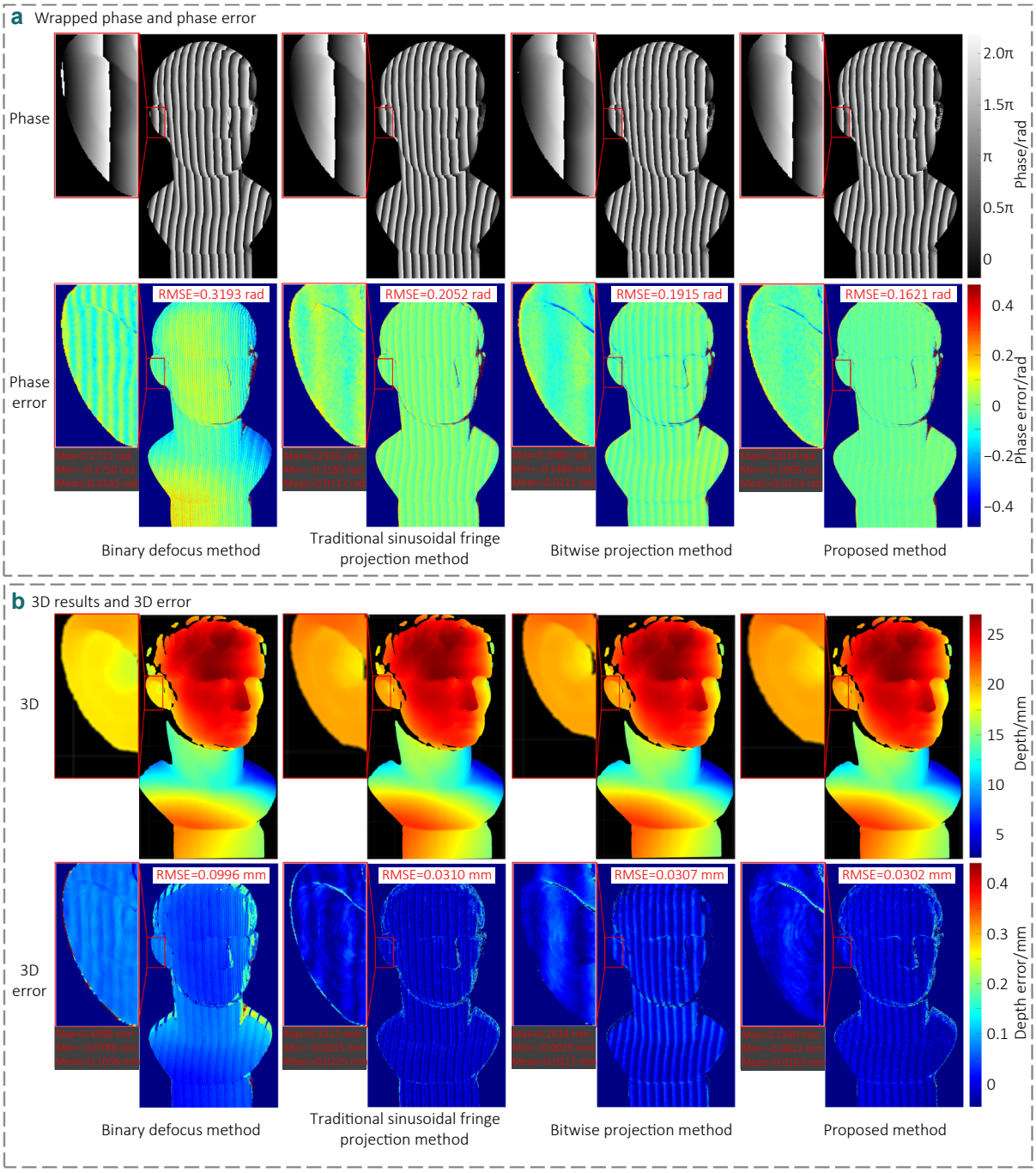


图 9 二值离焦法、传统正弦条纹投影法、逐位投影法以及所提方法的静态测量结果。(a) 包裹相位及其相位误差；(b) 3D 结果及其 3D 误差

Fig. 9 Static measurement results of binary defocus method, Traditional sinusoidal fringe projection method, bitwise projection method and proposed method. (a) Wrapped phase and phase error; (b) 3D results and 3D error

提方法需要投影更多图案，但测量精度得到了显著提升。相较于逐位投影法，所提方法在条纹图案数量减少 63.64% 的条件下，仍能实现精度的进一步提高。相对于传统正弦条纹投影法，虽然所需图案数量有所增加，但由于数字投影仪在投影二值图案时可达每秒数千帧的速率，远高于投影 8 位正弦条纹的百帧级速度，因此系统整体投影效率仍得到有效提升，同时保证了重建精度。综上所述，本文提出的基于线移二值聚焦投影的正弦图像获取方法，在保持较高测量精度的前提下，显著提升了三维测量效率，并展现出良好的动态场景适应性。

表 1 四种方法的边缘误差的对比

Table 1 Comparison of edge errors among the four methods

Item		Binary defocus method	Traditional sinusoidal fringe projection method	Bitwise projection method	Proposed method
Phase error/rad	Maximum error	0.2712	0.2303	0.2085	0.2014
	Minimum error	−0.1750	−0.1585	−0.1486	−0.1068
	Average error	0.0145	0.0127	0.0211	0.0114
Depth error/mm	Maximum error	0.4589	0.3317	0.2614	0.1930
	Minimum error	−0.0789	−0.0025	−0.0029	−0.0012
	Average error	0.1056	0.0225	0.0217	0.0163

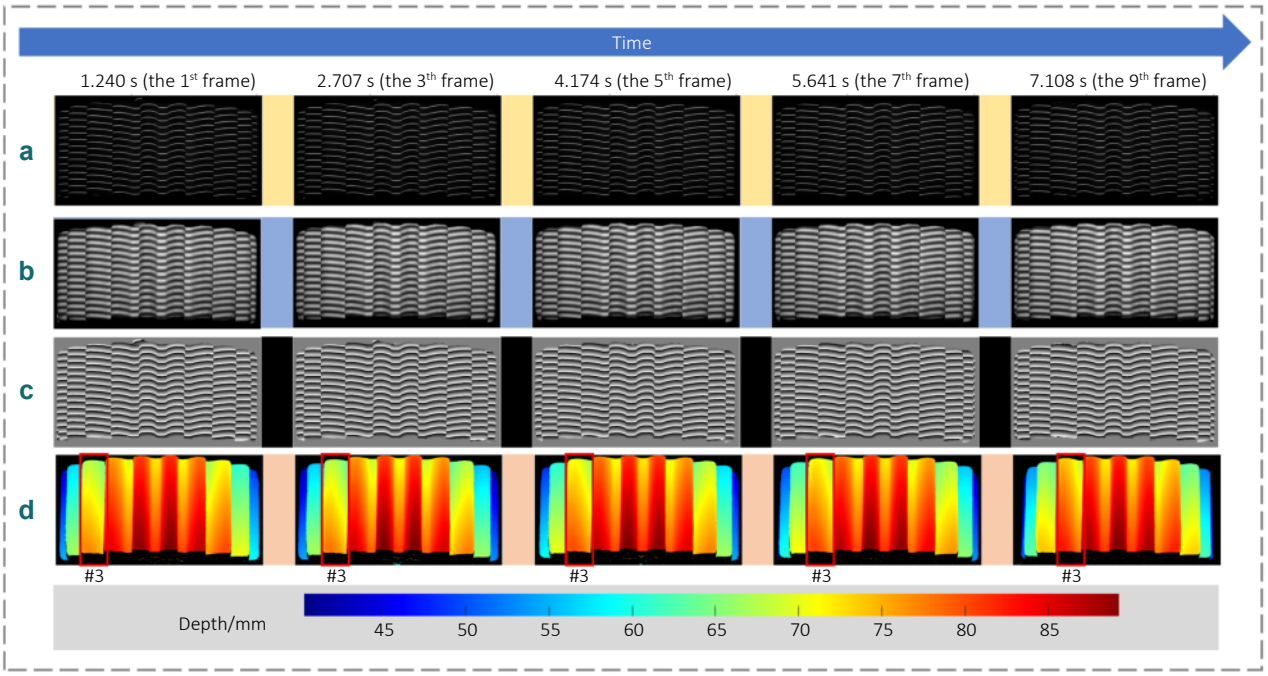


图 10 齿轮运行的测量结果。(a) 二值线移图像; (b) 正弦图像; (c) 包裹相位; (d) 三维重建结果

Fig. 10 Measurement results of gear operation. (a) The binary line shift images; (b) Sine images; (c) The wrapped phase; (d) 3D reconstructed results

作者贡献

邱建城：负责方法研究与可行性分析，实验方案设计，完成动态对比实验，论文写作；黎章生：负责文献的调研，测量系统搭建，二值图案编码程序的撰写；熊雨扬：负责文献调研和分析，完成性能验证实验；郑常椿：负责文献调研和分析，静态对比实验；吴高旭：指导论文选题、论文修改。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. Marrugo A G, Gao F, Zhang S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review [invited][J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2020, **37**(9): B60−B77.
2. 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]. *Opt Express*, 2022, **30**(13): 22467−22486.
3. Jia L L, Fu S, Lv Y M, et al. Chromatic aberration calibration and correction method for color fringe projection three-dimensional measurement system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2025, **52**(8): 250043.
贾璐璐, 付帅, 吕艳敏, 等. 彩色条纹投影三维测量系统色差标定与校正方法[J]. 光电工程, 2025, **52**(8): 250043.
4. Zhang Z H, Li Y L, Gao F, et al. Phase unwrapping technology for structured light three-dimensional measurement: A review (*invited*)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2023, **52**(8): 202301.
张宗华, 李雁玲, 高峰, 等. 面向结构光三维测量的相位展开技术综述(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, **52**(8): 202301.
5. Zhao Y, Yu H T, Bai L F, et al. Accurate fringe projection profilometry using instable projection light source[J]. *Opt Commun*,

2022, **507**: 127643.
6. Wu Z J, Zhang Q C. Recent progress on 3D shape and deformation measurement based on fringe projection[J]. *Chin J Liquid Cryst Disp*, 2023, **38**(6): 730−747.
吴周杰, 张启灿. 基于条纹投影的三维形貌与形变测量技术研究进展[J]. 液晶与显示, 2023, **38**(6): 730−747.
7. Liu F, Li J X, Lai J L, et al. Full-frequency phase unwrapping algorithm basedon multi-frequency heterodyne principle[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2019, **56**(1): 011202.
刘飞, 李佳鑫, 赖俊霖, 等. 基于多频外差的全频解相方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, **56**(1): 011202.
8. Zhu S J, Cao Y P, Zhang Q C, et al. High-efficiency and robust binary fringe optimization for superfast 3D shape measurement[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(20): 35539−35553.
9. Shi Y C, Zhang L M, Cheng F, et al. Progress in spectral imaging technology of digital micromirror devices[J]. *Opt Precis Eng*, 2023, **31**(21): 3096−3110.
石颖超, 张路明, 陈飞, 等. 数字微镜器件光谱成像技术进展[J]. 光学 精密工程, 2023, **31**(21): 3096−3110.
10. Li Y, Li Y, Zhao A G, et al. Fast phase unwrapping of four-step phase shift combined with complementary gray code[J]. *Laser J*, 2022, **43**(2): 36−41.
李洋, 李岩, 赵爱国, 等. 四步相移结合互补格雷码的快速相位展开[J]. 激光杂志, 2022, **43**(2): 36−41.
11. 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.
12. Silva A, Antonio Muñoz A, Flores J L, et al. Three-dimensional shape profiling by projection of binary patterns: Generated by a deterministic optimization approach[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10403**: 1040312.
13. Shao J F, Ni Y B, Meng Z Z, et al. Three-dimensional shape measurement of composite surface based on defocused binary display and fringe projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(4): 240024.
邵金凤, 倪育博, 孟召宗, 等. 基于离焦二值显示和条纹投影的复合表面三维测量方法[J]. 光电工程, 2024, **51**(4): 240024.
14. Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(8): 0812005.
赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法[J]. 光学学报, 2016, **36**(8): 0812005.
15. Fu L N, Yang J W, Li Y L, et al. Binary fringe defocused projection technology: a review[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2022, **59**(14): 1415011.
付莉娜, 杨静雯, 李雁玲, 等. 二值条纹离焦投影技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, **59**(14): 1415011.
16. Lohry W, Zhang S. 3D shape measurement with 2D area modulated binary patterns[J]. *Opt Lasers Eng*, 2012, **50**(7): 917−921.
17. 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]. *Opt Lasers Eng*, 2020, **124**: 105806.
18. Yan F, Qi J, Liu Y P, et al. Three-dimensional measurement method for binary-coded fringe focus projection[J]. *Acta Opt Sin*, 2022, **42**(22): 2212002.
严飞, 祁健, 刘银萍, 等. 一种二值编码条纹聚焦投影的三维测量方法[J]. 光学学报, 2022, **42**(22): 2212002.
19. Liu J, Lu C Q, Wen J, et al. Three-dimensional measurement method based on binary coded fringes[J]. *Acta Opt Sin*, 2023, **43**(1): 0112004.
刘佳, 路长秋, 文杰, 等. 基于二进制编码条纹的三维测量方法[J]. 光学学报, 2023, **43**(1): 0112004.
20. Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, et al. 3-D shape measurement based on complementary gray-code light[J]. *Opt Lasers Eng*, 2012, **50**(4): 574−579.
21. Wu Z J, Li X R, Guo W B, et al. Fast and high-accuracy three-dimensional shape measurement using intermediate-bit projection[J]. *Opt Express*, 2024, **32**(18): 31797−31808.
22. Li Z X, Zhou Z H, Chen L, et al. A method for calibrating the light plane of the linear structured light[J]. *Laser Technol*, 2023, **47**(6): 795−802.
李忠祥, 周哲海, 陈丽, 等. 一种线结构光平面的标定方法[J]. 激光技术, 2023, **47**(6): 795−802.
23. Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//*Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, **1**: 666–673. https://doi.org/10.1109/ICCV.1999.791289.

作者简介



邱建城 (2000-)，男，硕士研究生，主要从事光学三维测量方面的研究。

E-mail：3135007614@qq.com



【通信作者】吴高旭 (1994-)，男，博士，硕士研究生导师，主要从事光学精密测量方面的研究。

E-mail：gaoxu_wu@jxust.edu.cn

Sinusoidal fringe image acquisition method based on line shifted binary focused projection

Qiu Jiancheng[1], Li Zhangsheng[1], Xiong Yuyang[1], Zheng Changchun[1], Wu Gaoxu[1,2*]

[1] School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of science and technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
[2] School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract

Objective In fringe projection profilometry (FPP), the speed of fringe projection and image acquisition is a critical parameter determining the efficiency of three-dimensional measurement. Therefore, the rapid acquisition of fringe images has become an important research focus. Conventional methods based on DLP typically require a projector to occupy 255 pulse cycles for projection and rely on temporal integration imaging with a camera to obtain a single 8-bit sinusoidal fringe image. For phase-shifting (PS) algorithms that require at least three fringe images, this process is considerably time-consuming and fails to fully utilize the maximum refresh rate of the projector, making it difficult to meet the demands of dynamic 3D measurement. Moreover, the nonlinear responses of the projector and camera in traditional method introduce significant measurement errors, thereby reducing the overall measurement accuracy. To address these issues, this paper proposes a sinusoidal fringe image acquisition method based on line-shifted binary focusing projection.

Methods The core of this paper is to propose a binary focused projection method based on line-shifted encoding to achieve efficient acquisition of sinusoidal fringe images. First, a line-shifted encoding strategy adapted to binary focused projection is proposed to realize the refined design of even-numbered binary encoded patterns. Within any period of the binary pattern, only one column is encoded as a normalized grayscale value of 1, and all other columns are assigned a value of 0. As the number of projection steps increases, different vertical patterns are projected one by one, and the encoded column set to a grayscale value of 1 switches column by column along the horizontal direction until it covers all horizontal columns in the projector's imaging plane. Second, a targeted sinusoidal fringe synthesis model is constructed to complete the accurate conversion of binary patterns into standard sinusoidal fringe images. This model is based on the principle of weighted grayscale superposition, assigns corresponding weights according to the contribution of each binary image in fringe synthesis, and synthesizes m binary encoded patterns into n standard sinusoidal fringe images with arbitrary steps through grayscale superposition operations. On this basis, a phase-shift algorithm is used to accurately extract phase information, and complementary gray codes are combined to assist in phase unwrapping, achieving high-precision and high-speed three-dimensional measurement.

Results and Discussions To systematically verify the performance of the proposed method, three groups of controlled experiments are designed and conducted in this paper, with detailed experimental contents and results as follows: i) Performance verification experiment; it shows that as the coding period increases, the measurement accuracy gradually improves and tends to be stable when the period is 16 pixels. ii) Static comparison experiment; it shows that the measurement accuracy of the proposed method is significantly better than that of the binary defocus method, and slightly better than that of the traditional sinusoidal fringe projection method and the bitwise projection method. iii) Dynamic comparison experiment; it shows that the proposed method is suitable for dynamic measurement scenarios. Compared with the binary defocus method, although the proposed method needs to project more patterns, the measurement accuracy is significantly improved. Compared with the bitwise projection method, the proposed method can still achieve further improvement in accuracy under the condition that the number of fringe patterns is reduced by 63.64%. Compared with the traditional sinusoidal fringe projection method, although the number of required patterns is increased, since the digital projector can project binary patterns at a rate of thousands of frames per second, which is much higher than the hundred-frame level speed of projecting 8-bit sinusoidal fringes, the overall projection efficiency of the system is still effectively improved while ensuring the reconstruction accuracy.

Conclusions In conclusion, this paper proposes a method for acquiring sinusoidal images based on line-shifted binary focused projection. This method performs focused projection on the encoded binary patterns and combines the constructed sinusoidal image synthesis model to synthesize multiple binary images into high-quality sinusoidal fringe images, thereby achieving the rapid acquisition of sinusoidal images. Verified by comprehensive comparative experiments under both static and dynamic scenarios, the proposed method can fully exploit the limit of the projector’s refresh rate and meet the application requirements of dynamic three-dimensional (3D) measurement. It not only

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52565059), Ganpo Talented Support Program (20232BCJ25052), Jiangxi Provincial Department of Science and Technology (20252BAC200322), Bureau of Science and Technology of Ganzhou Municipality (2023CYZ26969), Research Initiation Program for High-Level Talents (205200100664), Jiangxi Province Graduate Innovation Fund Project (YC2024-S525)

*Correspondence: Wu G X, E-mail: gaoxu_wu@jxust.edu.cn

significantly improves the 3D measurement speed, but also effectively suppresses the nonlinear errors of the measurement system, thereby further optimizing the measurement accuracy.

Keywords: 3D measurement; binary line-shift; focused projection; sinusoidal fringe

Qiu J C, Li Z S, Xiong Y Y, et al. Sinusoidal fringe image acquisition method based on line shifted binary focused projection[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(5): 250342; DOI: 10.12086/oee.2026.250342

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文