中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

复杂印刷电路板表面相位保真条纹超分辨三维测量方法

吴福培 胡聪 韩强 叶玮琳

Phase-preserving fringe super-resolution 3D measurement of complex printed circuit board surfaces

WU Fu-pei, HU Cong, HAN Qiang, YE Wei-lin

引用本文:
吴福培, 胡聪, 韩强, 等. 复杂印刷电路板表面相位保真条纹超分辨三维测量方法[J]. 中国光学, 2026, 19(6): 1−17. doi: 10.3724/CO.2026−0061
WU Fu-pei, HU Cong, HAN Qiang, *et al*. Phase-preserving fringe super-resolution 3D measurement of complex printed circuit board surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(6): 1-17. doi: 10.3724/CO.2026-0061

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026−0061

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于插值超分辨的双目三维重建方法

Binocular 3D reconstruction method based on interpolation super−resolution

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 862 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0214

高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展

On−machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light

中国光学（中英文）. 2024, 17(1): 1 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0068

奇偶探测超分辨率折射率测量的理论研究

Theoretical investigation on super−resolution refractive index measurement with parity detection

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 434 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0119

彩色投影仪光强自适应高动态范围三维测量方法

Color projector light intensity adaptive high dynamic range 3D measurement method

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1219 https://doi.org/10.37188/CO.EN−2024−0038

基于双向条纹点云匹配的复杂纹理误差校正

Error correction of complex texture objects based on bidirectional fringe projection point cloud matching

中国光学（中英文）. 2025, 18(5): 1086 https://doi.org/10.37188/CO.2025−0040

抽样对三维形貌测量的影响

Influence of sampling on three−dimensional surface shape measurement

中国光学（中英文）. 2024, 17(6): 1512 https://doi.org/10.37188/CO.EN−2024−0003

文章编号 2097-1842(2026)06-0001-17

复杂印刷电路板表面相位保真条纹超分辨三维测量方法

吴福培[1*], 胡 聪[1,2], 韩 强[1], 叶玮琳[1]
（1. 汕头大学 工学院 机械工程系, 广东 汕头 515063;
2. 广东弘景光电科技股份有限公司, 广东 中山 528400）

摘要: 针对复杂反光印刷电路板(printed circuit board, PCB)表面条纹测量中统一图像插值易破坏条纹正弦性、弯曲条纹条件下插值方向与局部等相位线不一致以及低调制度区域误差易扩散的问题, 提出一种测量导向的相位保真条纹超分辨重采样方法。该方法在图像灰度域完成条纹超分辨, 并且利用相位域解算得到的载波强度指数、局部调制度和多频包裹相位作为物理约束。首先, 利用归一化载波强度指数对条纹脊线、谷线及过渡区域进行结构解耦, 并结合脊谷距离与局部调制度构建联合权重。随后, 基于多频相移信息估计二维条纹对齐位移场, 经局部相关细化与二维总变差正则化后, 将原始条纹映射至条纹对齐域并实施方向性插值。最后, 依据位移场梯度与局部相位变化率构建平坦区陡变区自适应融合策略, 实现面向相位保真的条纹重采样与三维测量。在 3 mm、6 mm 和 9 mm 量块实验中, 所提方法将平均绝对误差由 0.029 0 mm 降至 0.020 8 mm, 均方根误差由 0.042 8 mm 降至 0.029 5 mm; 在 PCB 引脚区域和晶振封装区域中, 所提方法均改善了相位连续性和三维重建稳定性。以引脚区域为例, 与图像双三次插值相比, 所提方法将平均绝对误差由 0.175 3 mm 降至 0.025 4 mm, 降幅约为 85.5%。实验结果表明, 该方法在当前 PCB 引脚区域和晶振封装局部结构中能够提高条纹重采样后的相位一致性和点云采样密度, 并降低局部重建误差。

关 键 词: 三维测量; 条纹结构光; 相位保真; 印刷电路板; 超分辨; 自适应融合
中图分类号: TP394.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/CO.2026-0061 **CSTR:** 32171.14.CO.2026-0061

Phase-preserving fringe super-resolution 3D measurement of complex printed circuit board surfaces

WU Fu-pei[1*], HU Cong[1,2], HAN Qiang[1], YE Wei-lin[1]
（1. *Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Shantou University, Shantou* 515063, *China*;
2. *Guangdong Hongjing Optoelectronic Technology Co. ltd., Zhongshan* 528400, *China*）
* *Corresponding author, E-mail: fpwu@stu.edu.cn*

Abstract: In fringe measurement on the surface of complex reflective printed circuit boards, uniform image

收稿日期: xxxx-xx-xx; **修订日期:** xxxx-xx-xx
基金项目: 国家自然科学基金(No. 61573233); 广东省自然科学基金(No. 2021A1515010661); 广东省普通高校创新团队资助项目(No. 2020KCXTD012)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61573233); National Natural Science Foundation of Guangdong, China (No. 2021A1515010661); the Guangdong Provincial University Innovation TeamProject (No. 2020KCXTD012)

interpolation may distroy sinusoidal property of fringes, the interpolation direction is in consistent with local iso-phase lines under curved fringe conditions, and errors in low-modulation regions tend to diffuse. According to these problems, a measurement-oriented phase-preserving fringe super-resolution resampling method is proposed. The super-resolution operation is performed in the gray-image domain, phase-domain quantities are used as physical constraints. First, a normalized carrier intensity index is used to perform structural decoupling on fringe ridges, valleys, and transition regions. Moreover, ridge-valley distance and local modulation are then combined to construct a joint weight. Next, a two-dimensional fringe-alignment displacement field is estimated from multi-frequency phase-shifting data. After local correlation refinement and two-dimensional total variation regularization, the original fringe images are mapped to the fringe alignment domain for directional interpolation. Finally, a flat/steep-region adaptive fusion strategy is constructed using the displacement-field gradient and local phase variation rate. In the 3 mm, 6 mm, and 9 mm gauge-block experiments, the proposed method reduced the mean absolute error from 0.029 0 mm to 0.020 8 mm, the root mean square error from 0.042 8 mm to 0.029 5 mm. In the high-reflective PCB pin region and the crystal oscillator package region, the proposed method improved phase continuity and three-dimensional reconstruction stability. In the pin region, compared with image-domain bicubic interpolation, the proposed method reduced the mean absolute error from 0.175 3 mm to 0.025 4 mm, corresponding to a reduction of about 85.5%. The error standard deviation was reduced to 0.012 6 mm. The proposed method improves phase consistency after fringe resampling, increases point-cloud sampling density, and reduces local reconstruction errors in the selected PCB regions. This super-resolution process should be interpreted as sampling-grid densification and interpolation-induced phase-error reduction, rather than as exceeding the true lateral resolution limited by the optical system. The current conclusions are limited to the tested PCB local ROIs and imaging conditions.

Key words: three-dimensional measurement; fringe structured light; phase preservation; printed circuit board; super-resolution; adaptive fusion

1 引 言

印刷电路板（PCB）作为电子电路系统的实体支撑件，其表面元器件的贴装质量直接影响产品的整体性能和可靠性[1]。随着电子器件不断向微型化、高密度化发展，如何在成本受限条件下获取高精度几何信息，已成为工业计量领域的关键挑战。在此背景下，基于机器视觉的检测技术已成为实现 PCB 精密测量的主流方案[2]。

视觉检测包括二维光学检测（AOI）和三维光学测量[3]。二维 AOI 虽然效率高、覆盖广，但其本质上依赖图像的外观和几何先验进行缺陷识别，难以提供完整的三维深度信息，因此在需要对细微高度变化或复杂装配偏差进行精确量化判断时有一定局限性[4-5]。三维光学测量方法则能提供包括深度、体积和倾斜度等在内的全维度几何信息，为结构性缺陷检测提供了更坚实的数据基础[6]。

现有的三维测量方法从原理上可以分为被动视觉方法[7-9]与主动视觉方法[10-12]两类。以立体视觉为代表的被动方法，其性能高度依赖场景自身的丰富纹理。当面对 PCB 上常见弱纹理阻焊层或高反光金属引脚时，这类方法的测量稳定性和结果鲁棒性往往不足[13-14]。光度立体法受限于其朗伯体反射模型假设以及繁琐的多角度照明与标定流程，在实际在线检测中应用较为困难[15]。在主动视觉方法中，激光三角法存在扫描效率和机械振动误差的局限[16]。飞行时间（ToF）技术则易受环境中多径效应干扰，在复杂的室内反射环境下测量误差较大[17]。而光学干涉与共焦技术虽然能达到纳米级精度，但视场有限、成本高昂，难以在工业现场大规模推广[18]。综合精度、效率与成本等因素，基于面结构光的条纹投影轮廓术

(FPP)凭借其高信噪比、全视场、高精度等特点,逐步成为在线三维检测的主流选择[19-20]。

在 FPP 系统中,横向分辨率理论上由相机像素密度决定。然而,直接采用高分辨率相机不仅显著增加成本,还会因像素尺寸减小导致单位像素感光面积下降,在相同曝光时间下信噪比(SNR)随之降低。而基于条纹物理约束的重采样与超分辨处理可作为缓解硬件采样限制、降低插值相位误差并提高点云采样密度的有效途径。然而现有通用超分辨算法大多以提高图像视觉感知质量为优化目标,普遍忽略了结构光条纹图像的物理约束,在超分辨过程中破坏条纹灰度原本严格的正弦分布特性,引入非线性畸变。这些畸变在后续的相位解算环节中被进一步放大,最终导致重建出的三维点云表面出现周期性的波纹噪声或严重的高度失真。因此,如何在提升图像空间采样率的同时保持条纹信号的相位保真度,是提升 FPP 测量精度的关键。

复杂印刷电路板表面的测量难点主要来自多材料、多反射率和多尺度几何结构的耦合影响。例如,阻焊层区域通常纹理较弱,金属引脚和焊盘区域容易产生强反光或局部饱和,丝印、通孔和器件边缘会导致条纹调制度下降、相位突变和局部遮挡。上述因素使统一插值策略难以同时兼顾平坦区域的稳健性和边缘区域的相位连续性。针对复杂 PCB 表面测量中低分辨率条纹插值易引入相位畸变、弯曲条纹条件下插值方向与局部等相位线不一致,以及低调制度区域噪声易被放大的问题,本文提出一种面向相位保真的条纹超分辨三维测量方法。该方法首先依据归一化载波强度指数和局部调制度构建脊谷联合权重,在不同条纹区域实施差异化插值;随后利用多频相移信息估计条纹对齐位移场,并结合局部相关细化与二维总变差正则化建立条纹对齐域;最后依据位移场梯度和局部相位变化率构建平坦/陡变自适应融合策略,实现超分辨条纹重建与三维测量。

2　相位保真条纹超分辨方法

2.1　总体流程

本文三维重建的目标是在不升级硬件配置的前提下提升条纹相位保真度与点云密度。如图 1 所示,整体处理链路包含图像采集、信号解耦、结构感知超分辨、相位解算、系统标定及坐标映射 6 个环节。其中,超分辨模块进一步由脊谷联合权重构建、二维位移场校正以及平坦区/陡变自适应融合 3 个子单元组成。

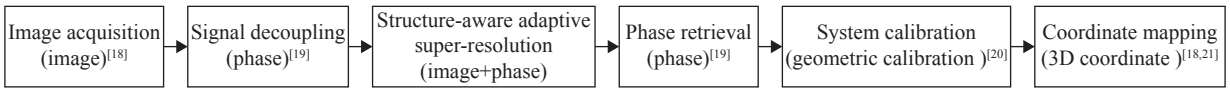


图 1　三维重建流程(括号中标明各模块的主要操作域)

Fig. 1　Flow chart of the proposed 3D reconstruction framework. The terms in parentheses indicate the main operation domain of each module

从数据流看,2.2 节输出背景项、调制度、包裹相位和归一化载波强度指数;2.3 节在图像灰度域根据载波强度指数和调制度生成列向结构权重;2.4 节在相位域估计并正则化二维对齐位移场;2.5 节将原始灰度条纹映射至对齐域完成 1D/2D 插值融合,并经逆映射返回原始几何坐标系,用于后续相位解算和三维重建。

本文所称的“超分辨”主要指面向结构光测量链路的条纹采样网格加密和相位保真重采样,而非突破光学系统真实横向分辨率。与直接相位域插值不同,本文在灰度条纹图像域完成重采样,并利用相位域信息进行几何对齐和权重调控,以降低插值诱导的相位畸变。本文方法的主要新增点包括:基于归一化载波强度指数的脊谷结构权重、基于多频相位信息的二维条纹对齐位移场,以及结合调制度、位移场梯度和局部相位变化率的平坦区/陡变区自适应融合。

图 1 中各基础环节的参考关系已在流程图中标注。其中,图像采集与 FPP 测量精度链路参考文献 [20];信号解耦和相位解算参考相移轮廓术及相位提取研究[21];系统标定参考 FPP 标定研究[22];坐标映射参考相位到三维坐标转换及空间点计算研究[20,23]。

2.2 条纹信号模型与特征解耦

在结构光条纹投影轮廓术中，相移轮廓术(PSP)通常用于编码视场。将 n 阶相移模式投影到物体上进行编码[19]，编码后图像的灰度可以定义为:

$$I_k(x,y)=A+B\cos\left(\phi(x,y)+\frac{2\pi k}{N}\right),\quad k=1,2,\ldots,N\quad,\tag{1}$$

式中，A为背景光强，反映物体表面反射率；B为调制强度，表征条纹对比度与信噪比，$\phi(x,y)$为包裹相位，蕴含了物体的三维几何信息；k为第 k 幅相移图像的索引，N 为相移步数

为精准提取条纹拓扑结构，须消除背景光与反射率不均的干扰，实现几何信号与光度信号的解耦。在利用最小二乘法解算出相位 φ 后，本文构建了归一化的载波强度指数 J_k:

$$J_k(x,y)=\frac{I_k(x,y)-A}{\max\{B,\varepsilon\}}=\cos(\phi+\delta_k)+\eta_k\quad.\tag{2}$$

理想状态下，J_k为单位幅值的纯余弦信号。式中，I_k为公式(1)所得灰度值，$\delta_k=\dfrac{2\pi k}{N}$为第 k 幅图像的相移量，ε 为防止低调制度区域分母为零的稳定常数，本文取 $\varepsilon=10^{-6}$，η_k为第 k 幅图像的随机噪声项，该参数仅用于数值稳定，不参与权重调节。该特征量剥离了光照环境影响，仅保留了条纹的形态特征(脊线与谷线)，为后续区分“相位极值区”与“线性过渡区”提供物理意义清晰且度量统一的基准。

因此，$J(x,y)$ 不是新的相位估计量，而是由已解算相位和调制度共同得到的结构指示量。J 的局部极大值对应条纹脊线，局部极小值对应条纹谷线，二者之间的区域用于构建从方向性插值到各向同性插值的连续过渡。

2.3 结构感知的混合插值模型

图 2 展示了一幅典型的调制条纹图像，其中包括：条纹中心(脊线)、非条纹中心(谷线)，以及两者之间的过渡区。同时，由于被测物体表面高度的变化，条纹呈现出明显的局部几何弯曲。这些区域承载的信息特性截然不同，若采用单一的插值策略，则难以在“相位连续性”与“纹理细节恢复之间取得最佳平衡。

为兼顾相位连续性与局部细节恢复，本文构建了一种空间自适应的混合插值模型，在不同区域采用最适合的插值方法。

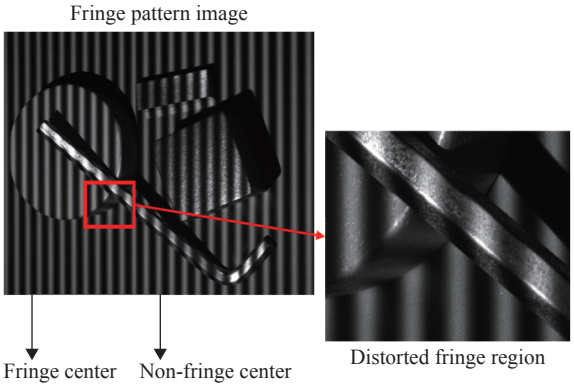


图 2 调制条纹图像

Fig. 2 Fringe pattern image

本节操作域为原始相移条纹的图像灰度域。输入为低分辨率相移条纹、2.2 节得到的 $J(x,y)$ 和 $B(x,y)$；输出为用于后续融合的结构权重 $w_c(x)$。这样处理的目的是在不直接对包裹相位进行全局平滑的情况下，将条纹方向性约束引入灰度插值过程。

双三次插值是一种常用的二维插值方法，它依赖于插值点周围的 4×4 采样点。计算过程中，首先确定采样点与插值点之间的距离，然后在水平方向和垂直方向构造三次多项式来计算采样点的权重。最终的结果是两个一维空间(1D)内插值结果的加权和。其一维插值函数表示为:

$$I^v(y,x_c)=\sum_{k=0}^{3}I(r_k,x_c)\,h_a(y-r_k)\quad,\tag{3}$$

式中，I^v为输出，h_a为三次插值核，y是固定列，取最近的条纹中心列或当前列，r_k是围绕 y 的相邻 4 个行索引，即从上到下的 4 个整数行。而采样点需要计算三次插值核，该核可以表示为:

$$h_\alpha(u)=\begin{cases}(\alpha+2)|u|^3-(\alpha+3)|u|^2+1, & 0\le|u|<1\\ \alpha|u|^3-5\alpha|u|^2+8\alpha|u|-4\alpha, & 1\le|u|<2\\ 0, & |u|\ge2\end{cases}\quad,\tag{4}$$

式中，u是相对偏移，α是核参数，本文取$\alpha=-0.5$。三次插值核参数取$\alpha=-0.5$，对应常用 Catmull-Rom 形式。该取值可均衡在边缘保持与振铃抑制。本文保持所有对比方法中的插值核参数一致，以避免由核函数差异引入额外偏差。

由于本文采用的是垂直条纹，需对载波强度

指数沿列方向进行分析。其准周期波形的波峰和波谷, 对应本文定义的“条纹中心”和“非条纹中心”。

在条纹中心处, 条纹的正弦结构最为完整且方向一致。沿该处的条纹方向执行一维三次插值以最大程度保持相位连续性。在非条纹中心处, 受条纹信号影响最弱, 更多地反映物体本底的细节信息。因此, 本文采用标准的二维双三次插值, 以稳健地恢复表面细节:

$$I^{bi}(y,x)=\sum_{p=0}^{3}\sum_{q=0}^{3}I(r_p,c_q)h_a(y-r_p)h_a(x-c_q)\quad , \tag{5}$$

式中, I^{bi}为二维双三次插值结果; r_p围绕 y 的相邻 4 个行索引; c_q围绕 x 的相邻 4 个列索引。

在条纹中心与非条纹中心之间的过渡区域, 论文构建一个自适应的权重函数$\tilde{w}_c(x)$以平滑地融合上述两种插值结果。该权重由以下两个因素共同决定。

(1)几何距离权重: 计算每个像素列 x 到最近条纹中心线的归一化距离 $\tilde{d}(x)\in[0,1]$, 将其映射为“条纹中心度”权重:

$$w_c(x)=w_{\min}+(w_{\max}-w_{\min})\cdot\frac{1}{1+\exp\left\{-\kappa\left(0.5-\tilde{d}(x)\right)\right\}}\quad , \tag{6}$$

式中: $w_{\max}$和$w_{\min}$分别表示方向性插值权重的物理下限与上限, 用于控制一维/二维插值成分的边界融合比例; κ为 Logistic 函数映射边缘衰减趋向的平滑系数。式(6)表明, 越靠近条纹中心, 越倾向采用沿条纹方向的一维插值; 越靠近非条纹中心, 则越倾向采用各向均衡的二维插值。

(2)调制度门控权重: 以该列的平均调制度$\overline{B}(x)$作为置信度。在阴影、强反光等低调制度区域, 条纹信息不可靠, 强行进行一维方向插值会放大噪声。因此, 本文设计一个门控机制, 当$\overline{B}(x)$低于自适应阈值时, 强制降低一维插值的权重, 使算法回退到更稳健的二维插值。例如可取:

$$g_B(x)=\min\left(1,\max\left(0,\frac{\overline{B}(x)}{\tau_B}\right)\right)\quad , \tag{7}$$

其中阈值τ_B由中位数自适应设定, 取整幅图像调制度 B 的中值乘以一个系数 η。结合本文实验数据, 取 η=0.6 时能够在保留高对比度区域方向性信息的同时, 有效抑制低调制度区域的噪声放大。因此, 本文在后续实验中固定采用 η=0.6。

最终的列权重 $\tilde{w}_c(x)$ 结合了上述两点, 确保了在高质量条纹区域充分利用方向信息, 在低质量区域则保持稳健:

$$\tilde{w}_c(x)=w_c(x)\cdot g_B(x),\quad g_B(x)\in[0,1]\quad , \tag{8}$$

其中g_B由列均值调制度的归一化与阈值给出。

2.4　二维位移场估计与几何校正

在真实测量场景中, 物体表面高度起伏会导致投影条纹产生二维非线性弯曲。若仍在原始图像域直接实施方向性插值, 插值路径往往无法与局部等相位线保持一致, 从而引入几何失真。为减小弯曲条纹条件下直接插值带来的几何失配, 本文采用“二维位移场估计—对齐域定向插值—逆映射重建”的处理流程。具体为先由多频相移信息估计条纹弯曲对应的二维位移场, 再在条纹对齐域中完成定向插值, 最后将超分辨结果映射回原始几何坐标系。

本节的输入为多频包裹相位、调制度和原始灰度条纹, 输出为二维位移场 $D(x,y)=[u(x,y),v(x,y)]$。与仅依据局部相位梯度或条纹方向场进行重采样不同, 本文位移场通过多频相位与参考模板之间的相位一致性估计获得, 并进一步用局部相关进行亚像素细化。因此, 该位移场不仅描述局部法向方向, 还显式给出将弯曲条纹映射至对齐域所需的二维坐标偏移。数学上, 本文位移场直接定义了从原始条纹域到条纹对齐域的坐标映射: $(x',y')=(x+u(x,y),y+v(x,y))$.

具体而言, 针对不同频率条纹对高度变化的敏感度和抗噪性的差异, 本文分别利用各频率包裹相位与参考余弦模板估计初始位移分量$u_0(x,y)$和$v_0(x,y)$, 并以对应调制度作为置信权重进行融合, 得到二维初始位移场$T_0(x,y)=[u_0(x,y),v_0(x,y)]$。在此基础上, 对每个像素在局部邻域内执行相关匹配细化, 在±0.1 pixel 范围内通过最大化局部互相关对位移进行亚像素修正, 从而提高边缘与弱纹理区域的对齐精度。考虑到本文实验系统以近垂直条纹为主, 融合后的二维位移场通常表现为水平分量占主导、垂直分量作为局部修正。

为抑制由噪声引起的二维位移场抖动, 并保持器件边缘处的位移突变, 对融合后的二维位移场联合施加二维总变差(TV)正则化:

$$\min_s \frac{1}{2}||s-s_0||_2^2+\lambda||Ds||_1 \quad , \qquad (9)$$

式中：s_0表示融合各频率估计得到的初始二维位移场输入分布；s为 TV 正则化优化求解后最终输出的平滑几何位移场目标函数；D表示二维梯度算子；λ为正则化强度系数，λ用于控制平滑程度。λ过小会保留由低信噪比引起的位移场抖动；λ过大又会过度平滑器件边缘处真实的位移突变。本文在$\lambda\in[0.01,0.10]$内进行经验选择，并在后续实验中固定λ=0.05。二维 TV 优化迭代次数记为I，本文默认I=50。

基于优化后的位移场$T(x,y)$，将原始图像重采样至“条纹对齐域”。在该区域中，弯曲条纹被校正为近乎竖直的局部相位等值线，此时沿局部主方向实施一维插值在物理上等价于原图中的沿条纹切线插值，因此能够同时保持几何保真度与相位连续性。

2.5 平坦/陡变自适应融合与超分辨实现

本节操作域仍为图像灰度域，但坐标系已由原始图像域变换至条纹对齐域。输入包括 2.3 节生成的结构权重$\tilde{w}_c(x)$、2.4 节输出的二维位移场 D(x,y) 及其梯度，以及局部相位变化率；输出为超分辨灰度条纹图像。

在条纹对齐域中，一维三次插值结果记为I^v；双三次插值结果记为I^{bi}。最终的像素级融合权重在列权重基础上，引入由二维位移场梯度和局部相位变化率共同构建的平坦/陡变自适应因子$r(x,y)$。其中：平坦区域位移梯度小、相位变化平缓，更强调二维插值的稳健抑噪；陡变区域位移梯度大、相位过渡陡峭，则在提高方向性插值权重以保持边缘和周期结构。最终像素权重可表示为

$$w(y,x)=r(x,y)\cdot\tilde{w}_c(x)+(1\text{-}r(y))\cdot w_{\text{plateau}} \quad , \qquad (10)$$

式中，w_{plateau}为平坦阶梯平台区赋予的各向同性基础二维插值权重常数，用于确保平坦区域的抑噪稳健性。

按像素线性融合两种插值结果：

$$I^{\text{SR}}_{\text{aligned}}(y,x)=w(y,x)I^v(y,x)+(1-w(y,x))I^{bi}(y,x) \quad . \qquad (11)$$

最终在过渡区域采用列权重$\tilde{w}_c(x)$对一维方向插值与二维双三次插值进行连续融合，从而兼顾条纹相位连续性与局部细节恢复效果。

完成超分辨计算后，经逆位移变换$T^{-1}(x,y)$，将结果从条纹对齐域精确映射回原始的图像几何坐标系，从而获得高质量的超分辨条纹图像，用于后续相位展开和三维重建。整体处理流程如图 3 所示。

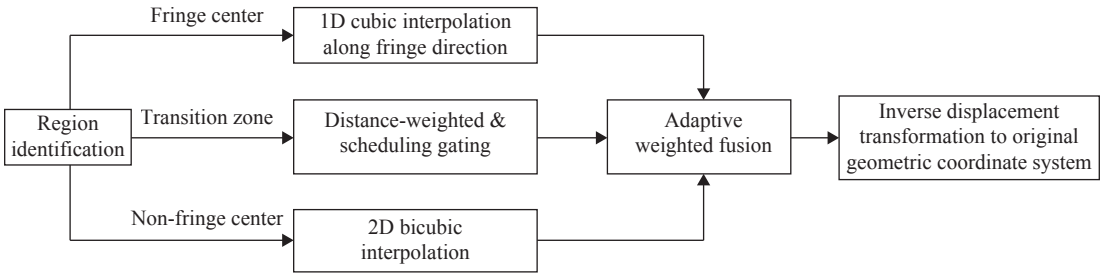


图 3 自适应插值流程图

Fig. 3 Adaptive interpolation flowchart

3 算法复杂度分析

为更准确地评估本文方法的计算代价，将整体流程划分为结构特征预计算、二维位移场构建以及对齐域超分辨与逆映射 3 个阶段。设输入条纹图像尺寸为$R\times C$，超分辨倍率为t，相移步数为N，参与位移融合的频率数为F，二维 TV 优化迭代次数为I_{TV}。相位、调制度、载波强度指数及脊谷结构提取均建立在对原始图像的线性扫描基础上，其时间复杂度为$O(N\cdot R\cdot C)$。多频位移估计与调制度加权融合的复杂度为$O(F\cdot R\cdot C)$，局部相关细化在固定搜索窗口下仍可视为$O(R\cdot C)$，二维 TV 正则化的复杂度为$O(I_{\text{TV}}\cdot R\cdot C)$。对齐域中的 1D/2D 插值融合及逆映射需要对全部高分辨输出像素执行常数时间操作，其复杂度为$O(R\cdot C\cdot t^2)$。因此，总时间复杂度可写为$O((N+F+I_{\text{TV}}\cdot R\cdot C+R\cdot C\cdot t^2)$，在$N$、$F$和$I_{\text{TV}}$取固定值时，主导项仍为$O(R\cdot C\cdot t^2)$；总空间复杂度为$O(R\cdot C\cdot t^2+R\cdot C)$。

表 1 给出了本文方法与当前主流方法的计算耗时对比。由表 1 可知, 本文方法虽然引入了多频位移融合、局部相关细化和二维 TV 正则化, 但在频率数、搜索窗口和迭代次数固定的情况下, 其计算量仍与传统插值保持同阶, 仅增加了可控的前处理常数项。相比深度学习方法, 本文方法无需离线训练和 GPU 推理, 且各处理环节均具有明确物理意义, 便于参数解释、误差溯源和工业系统集成。

表 1　不同方法主导计算代价对比

Tab. 1　Comparison of dominant computational costs among different methods

方法	时间复杂度	空间复杂度	**依赖**
双三次插值	$O(R\cdot C\cdot t^2)$	$O(R\cdot C\cdot t^2)$	CPU
样条插值	$O(R\cdot C\cdot t^2)$	$O(R\cdot C\cdot t^2)$	CPU
本文方法	$O((N+F+I_{\mathrm{TV}})\cdot R\cdot C+R\cdot C\cdot t^2)$	$O(R\cdot C\cdot t^2+R\cdot C)$	CPU
深度学习	$O(k\cdot R\cdot C\cdot t^2)$, $k\gg 1$	O(Model size+ $R\cdot C\cdot t^2$)	GPU; 需预训练模型

4　实验结果与分析

为系统验证本文所提方法的有效性, 搭建了如图 4(彩图见期刊电子版)所示的结构光实验平台进行实验。该系统包括一台 TJ-X20U 结构光发生器, 分辨率为2 592 pixel×2 048 pixel; 一台 MV-CA050-20GM 工业相机, 分辨率也为 2 592 pixel×2 048 pixel, 像素为 500 万, 采集帧率为 60 fps, 相机匹配的镜头焦距为 25 mm。

所有定量实验均独立重复采集 10 次。每次实验均重新投影并采集相移条纹图像, 以保证重复实验可反映采集和重建流程的整体稳定性, 而非单次数据的重复计算。定量结果以均值±标准差(mean ± SD)表示。95% 置信区间按 $\bar{x}\pm t_{0.975\mathrm{t},9}\times \mathrm{SD}/\sqrt{10}$计算, 其中 $t_{0.975\mathrm{t},9}=2.262$。最大绝对误差(MaxAE)定义为有效 ROI 内所有点绝对误差的最大值。对于超分辨前后结果对比, 采用配对 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验。对于多方法比较, 采用重复测量单因素方差分析或 Friedman 检验, 并采用 Holm 方法进行多重比较校正。显著性水平设为 $P<0.05$。

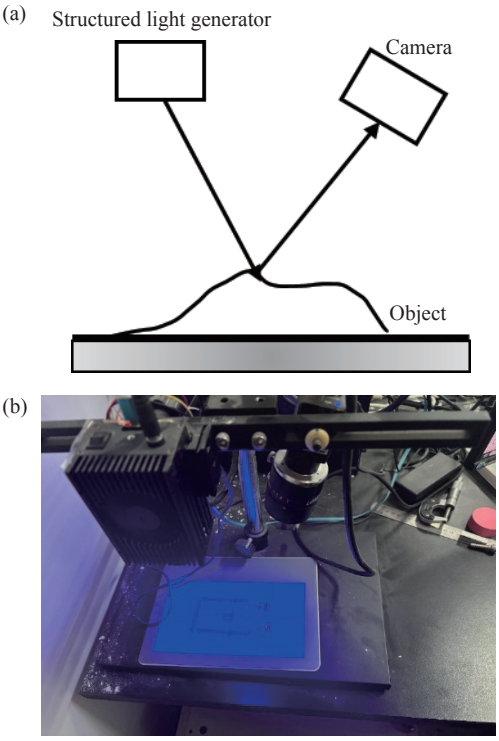


图 4　结构光系统 (a) 示意图及 (b) 实验平台实物图

Fig. 4　(a) Schematic diagram of structured light system and (b) photograph of the experimental platform

4.1　标准量块精度评价实验

将利用本文方法计算得到的高分辨率相场测量结果和原始相场进行精度评价实验。本文拍摄的原始条纹图像尺寸为 324 pixel×256 pixel。所提方法在不改变成像硬件和原始采样条件的前提下, 将条纹图像重采样至 1 296 pixel×1 024 pixel 的计算网格, 用于后续相位解算和点云重建。该过程表示采样网格加密, 而非光学系统真实横向分辨率提升。测量对象为高度分别为 3 mm、6 mm 和 9 mm的量块, 曝光时间为 40 000 μs。所有实验均独立重复采集 10 次, 结果如表 2 所示, 表中结果以均值±标准差表示。所有方法采用相同 ROI、标定参数、点云预处理和离群点剔除规则。所用 3 mm、6 mm 和 9 mm量块的标称值不确定度为 0.3 μm, 即 0.000 3 mm, 低于本文结构光系统的重建误差量级。系统标定结果显示, 相机和结构光投影器的平均重投影误差分别约为 0.06 pixels 和 0.07 pixels, 均处于亚像素水平。表中误差未单独扣除标定误差, 应理解为包含系统标定、相位解算、重采样和点云拟合误差在内的综合测量误差。所有方法均采用相同 ROI、标定参数、平面拟合和离群点剔除规则。

表 2 不同分辨率下测量结果对比

Tab. 2 Comparison of measurement results under different resolutions （mm）

量块	超分辨前		超分辨后	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
3mm	0.025 3 ± 0.001 8	0.036 1 ± 0.003 2	0.021 2 ± 0.001 5**	0.022 6 ± 0.002 0**
6mm	0.027 2 ± 0.002 0	0.047 9 ± 0.004 1	0.016 4 ± 0.001 2**	0.033 2 ± 0.003 0**
9mm	0.034 5 ± 0.002 6	0.044 3 ± 0.003 8	0.024 9 ± 0.001 9**	0.032 6 ± 0.002 8**
平均	0.029 0 ± 0.002 1	0.042 8 ± 0.003 7	0.020 8 ± 0.001 5	0.029 5 ± 0.002 6

数据以 10 次独立重复采集结果的均值±标准差表示，如表 2 所示。超分辨后结果与超分辨前结果采用配对 t 检验或 Wilcoxon 符号秩检验进行比较。

由表 2 可知，经本文方法处理后的所有量块的重建误差均明显降低。MAE 平均值由 0.029 0 mm 降低到 0.020 8 mm，降低了 28.27%；RMSE 平均值由 0.042 8 mm 降低到 0.029 5 mm，降低了 31.07%。表明该方法在提升点云密度的同时，有效降低了重建误差并改善了量块表面的几何一致性。

4.2 消融实验结果对比分析

为验证“几何校正”与“权重融合”模块的必要性，以及不同超分辨策略的效果，本文设计了消融实验，对比方法包括：图像双三次插值[24]、基于深度学习的图像超分辨[25]、相位双三次插值以及本文方法的变体。由于 3 mm 量块在当前系统下具有代表性的浅台阶边缘与平面区域，故选其作为消融实验对象，其余量块上也观察到相似趋势。同时引入平面度误差指标，即重建点云到拟合平面的均方根距离，用于评价平坦表面的重建质量。其中，深度学习基线采用 SwinIR 4×超分辨模型。由于公开预训练模型主要面向自然图像恢复任务，本文直接使用其官方公开参数作为通用图像超分辨对照实验，不针对条纹图像进行额外微调。实验数据如表 3 所示。图 5 为三种插值方法与本文方法得到的量块平面度剖面图对比。

表 3 不同方法测量结果对比

Tab. 3 Comparison of measurement results by different methods

方法	RMSE/mm	Planarity Error/mm	平均耗时/s
图像双三次	0.049 7 ± 0.003 8**	0.012 8 ± 0.001 1**	0.064 ± 0.004
深度学习	0.048 2 ± 0.004 2**	0.009 5 ± 0.000 9**	2.684 ± 0.100
相位双三次	0.028 6 ± 0.002 3**	0.007 8 ± 0.000 7**	0.071 ± 0.005
所提方法（无几何校正）	0.039 5 ± 0.003 0**	0.005 1 ± 0.000 5*	0.184 ± 0.012
所提方法（无权重融合）	0.029 1 ± 0.002 4**	0.007 3 ± 0.000 7**	0.263 ± 0.016
所提方法	0.022 6 ± 0.001 8	0.004 6 ± 0.000 4	0.342 ± 0.020

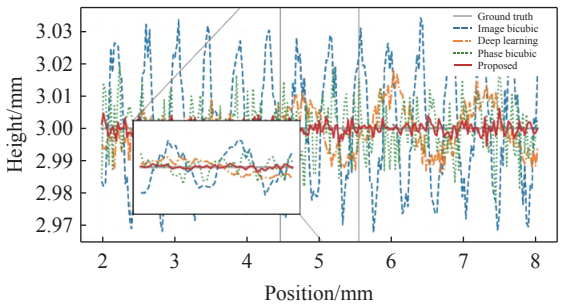


图 5 3 mm 标准量块的表面平面度剖面对比

Fig. 5 Comparison of surface flatness profiles for a 3 mm gauge block

数据以 10 次独立重复采集结果的均值±标准差形式表示。统计显著性仅针对误差评价指标进行比较，不包括平均耗时。统计分析采用重复测量单因素方差分析或 Friedman 检验，并进行 Holm 多重比较校正。*P < 0.05，**P < 0.01，与所提方法比较。

如表 3 和图 5 所示，本文方法在所比较指标上取得了更优结果，重建轮廓也最接近真实平面。从方法原理层面分析，现有方法与本文方法的本质差异在于对条纹物理结构的处理方式：图

像双三次插值直接在光强域进行二维平滑, 其数学本质是构建一个连续的二维插值曲面, 但该方法完全忽略了条纹的方向性与周期性, 导致插值后的条纹灰度不再满足正弦分布, 从而在相位解调时引入与条纹频率相关的周期性误差。相位双三次插值将插值操作移至相位域, 避免了光强域的正弦破坏问题, 但其采用的各向同性插值核无法区分相位变化的方向性, 在相位梯度较大的区域会产生过平滑效应, 导致边缘模糊。深度学习基线采用公开预训练 SwinIR 模型, 未针对条纹图像进行额外微调, 因此其结果主要反映通用自然图像超分辨先验在条纹测量任务中的直接适用性, 并不代表所有深度学习 FPP 超分辨方法的性能上限。从计算效率看, 所提方法由于包含二维位移场估计、TV 正则化和区域自适应融合, 平均耗时高于普通双三次插值和相位双三次插值, 但单个 ROI 处理时间仍处于亚秒级, 说明该方法适用于当前离线高精度检测场景。若进一步用于在线检测, 仍需通过 GPU 并行化、位移场估计加速和参数简化做进一步优化。

实验结果表明, 相较于以视觉感知恢复为目标的通用方法, 本文所采用的测量导向插值与几何校正策略在当前实验条件下更有利于保持条纹相位结构与几何的一致性。本文方法的主要创新点在于: 首先通过脊线检测显式提取条纹的局部方向信息, 将物理约束引入插值过程; 其次采用区域差异化插值策略, 在条纹中心区强制保持方向一致性; 最后通过几何校正模块将弯曲条纹映射至对齐域, 使一维插值在物理上等同于沿条纹切线方向。上述设计使插值方向与局部条纹结构更加一致, 并通过几何校正减少了弯曲条纹条件下的方向失配, 从而有助于缓解相位失真问题。

4.3　PCB 典型局部结构三维重建实验

为评价所提方法在典型 PCB 局部结构中的测量性能, 本文选取同一 PCB 上的高密度金属引脚区域和晶振封装区域作为测量对象。引脚区域具有细小周期结构、陡峭边缘、局部高反光和低调制度特征; 晶振封装区域具有较大面积封装平面、封装边缘和局部反射率突变特征。

PCB 局部结构的参考测量数据由委托 LSCM 检测获得。检测报告显示, LSCM 系统型号为 Olympus LEXT OLS5000-EMF, 采用 MPLFLN5× 物镜, X/Y 方向的采样间隔均为 2.5 μm, Z 方向分辨率约为 0.033 μm。FPP 重建结果与 LSCM 参考数据裁剪至相同公共 ROI 后, 统一坐标方向、尺度和高度基准, 并采用相同离群点剔除和误差统计流程。由于检测报告未提供完整高度测量不确定度和 ICP 配准残差, 表中误差未单独扣除参考测量误差和配准误差, 应理解为综合测量误差。

4.3.1　整体重建质量与点云密度评估

为了直观验证所提方法对点云采样密度和局部重建连续性的改善效果, 本文对 PCB 板的整体三维点云进行了可视化对比, 如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

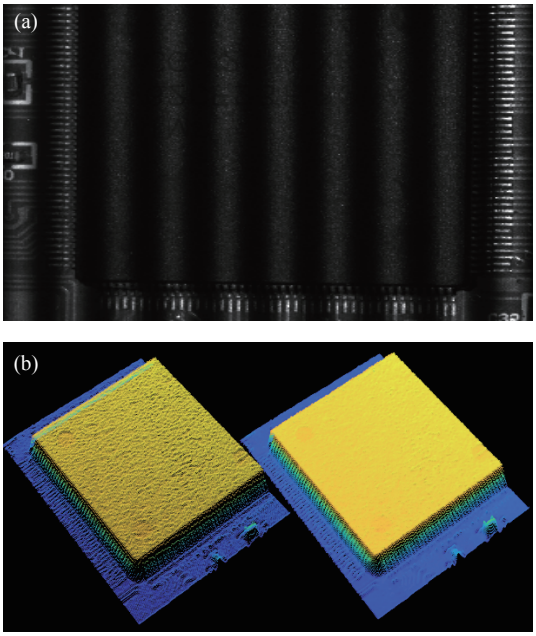


图 6　本文方法对 PCB 表面重建效果。(a) 原始条纹图像; (b) 点云超分辨前后对比

Fig. 6　PCB surface reconstruction results of the proposed method. (a) Original fringe image; (b) point cloud before and after super-resolution

可见, 经本文方法处理后, PCB 表面的高度连续性得到改善, 边缘轮廓也更为清晰。该结果说明, 本文算法在增加有效点云采样密度的同时, 其区域自适应机制能够在一定程度上抑制因表面反射不均带来的重建噪声。与原始重建结果相比, 超分辨重建在相同 ROI 内获得了更高的点云密度, 并减弱了边缘台阶效应。需要强调的是, 这里的“点云密度提高”不等同于光学系统真实横向分辨率的突破。

4.3.2 引脚区域与晶振封装区域的相位保真及三维重建分析

为进一步验证所提方法在不同类型 PCB 局部结构中的适用性，本文选取高密度金属引脚区域和晶振封装区域作为两类代表性 ROI 进行分析。两类区域分别代表细小高反光结构和封装类局部结构。

为避免基线选择不当造成不公平比较，所有方法均使用同一组低分辨率相移条纹作为输入，采用相同的相位展开、系统标定映射、坐标基准统一、ROI 选择、离群点处理和误差统计流程。LSCM 参考数据仅用于三维几何误差评价，不参与各重采样方法的计算过程。因此，不同方法之间的误差差异主要来自重采样策略对条纹相位结构和局部几何一致性的影响，而非来自参考数据、ROI 选择或异常点剔除流程的差异。图像双三次插值与相位双三次插值分别在灰度域和相位域实施；深度学习方法采用公开预训练模型，不进行条纹数据微调，以作为后续通用图像先验的对照方法。

图 7（彩图见期刊电子版）展示了两类区域的原始图像、原始相位结果以及所提方法处理后的相位结果。可以看出：在原始相位结果中，引脚区域由于周期性细小结构和边缘反光影响，局部相位曲面存在一定起伏；晶振封装区域则在封装边缘和反射率突变区域出现相位过渡不够平滑的问题。经所提方法处理后，两类区域的相位曲面连续性均得到改善。对于引脚区域，处理后的相位结果在周期结构方向上表现出更稳定的条纹相位变化；对于晶振封装区域，封装平面区域的相位曲面更加平整，边缘过渡区域的相位变化也更加连续。该结果说明，所提方法不仅能够改善细小引脚结构中的相位一致性，也可在封装类局部结构中降低重采样引起的相位扰动。

为进一步比较不同方法在两类 PCB 局部结构三维重建中的表现，本文分别对引脚区域和晶振封装区域进行点云重建，如图 8（彩图见期刊电子版）所示。对于引脚区域，原始重建结果受采样密度不足、局部反光和边缘相位变化影响，在引脚边缘和周期结构上存在一定起伏与不连续。图像双三次插值方法虽然增加了计算网格密度，但其直接在灰度域进行各向同性插值，容易破坏条纹局部正弦结构，并在引脚边缘处引入局部波纹和平滑偏差。基于深度学习的图像超分辨方法在部分区域虽能够改善视觉连续性，但由于其采用自然图像预训练模型，未针对条纹图像进行专门微调，在高反光和低调制度区域仍可能产生与真实条纹物理结构不一致的伪细节。相位双三次插值将插值操作转移至相位域，可在一定程度上避免灰度域插值对条纹正弦性的直接破坏，但其采用各向同性插值核，难以适应引脚边缘处较大的局部相位梯度，因此在边缘和周期结构区域仍存在过平滑和局部几何失真。相比之下，所提方法通过二维位移场对齐和相位保真自适应融合，使插值方向与局部条纹结构更加一致，因此在引脚周期结构和边缘区域表现出更连续的点云分布和更稳定的高度变化。

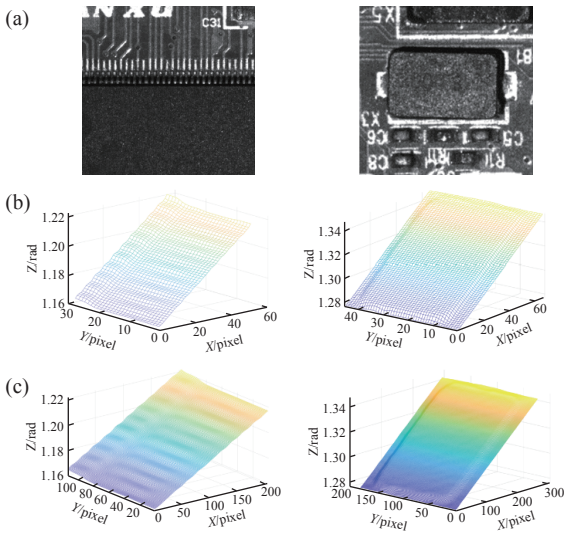
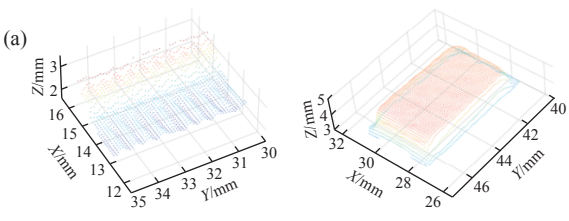


图 7 引脚区域与晶振封装区域的原始图像及相位结果对比。左列为高密度引脚区域，右列为晶振封装区域。(a)原始图像；(b)原始相位结果；(c)所提方法处理后的相位结果

Fig. 7 Comparison of original images and phase results in the pin region and crystal oscillator package region. The left column shows the high-density pin region, and the right column shows the crystal oscillator package region. (a) Original images; (b) original phase results; (c) phase results obtained by the proposed method



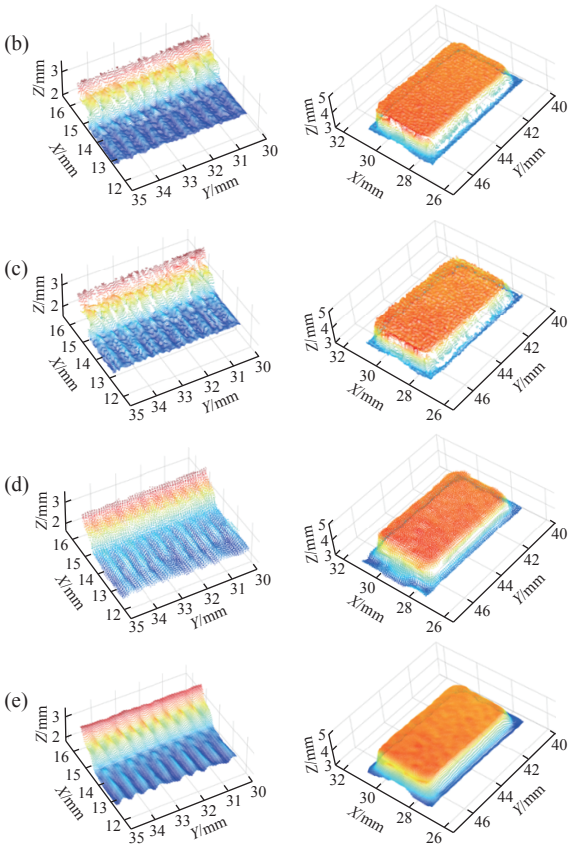


图 8　引脚区域与晶振封装区域的不同方法三维重建结果对比。左列为高密度引脚区域, 右列为晶振封装区域。(a)原始重建结果; (b)图像双三次插值结果; (c)基于深度学习的图像超分辨结果; (d)相位双三次插值结果; (e)所提方法的重建结果

Fig. 8　Comparison of 3D reconstruction results obtained by different methods in the pin region and crystal oscillator package region. The left column shows the high-density pin region, and the right column shows the crystal oscillator package region. (a) Original reconstruction; (b) image bicubic interpolation; (c) deep-learning-based image super-resolution; (d) phase bicubic interpolation; (e) proposed method

对于晶振封装区域, 不同方法之间的差异主要体现在封装平面平整性和边缘过渡区域。图像双三次插值和深度学习方法在封装平面局部仍存在一定波纹或伪细节; 相位双三次插值能够减弱部分灰度域插值导致的相位扰动, 但在封装边缘和反射率突变区域仍容易产生过平滑现象。相比之下, 所提方法在晶振封装平面区域表现出更好的点云连续性, 同时在封装边缘和反射率突变区域也具有较稳定的几何过渡。该结果说明, 所提方法不仅适用于高密度引脚区域, 也能够在晶振封装这一非引脚类 PCB 局部结构中改善重建稳定性。

本文方法与 LSCM 参考测量对比结果如图 9(彩图见期刊电子版)所示, 可见二者具有较好的一致性, 重建轮廓波动较小, 绝对误差主要集中在零值附近。这种优势在图 10(彩图见期刊电子版)的绝对误差累积分布中得到了进一步体现。图 10 显示了不同方法在 PCB 局部 ROI 内绝对误差的累积分布。曲线越靠近左上方, 表示较小误差点所占比例越高。与图像双三次插值、深度学习超分辨和相位双三次插值相比, 本文方法的误差累积分布更集中于低误差区间, 说明其能够有效抑制局部异常误差并提高重建稳定性。

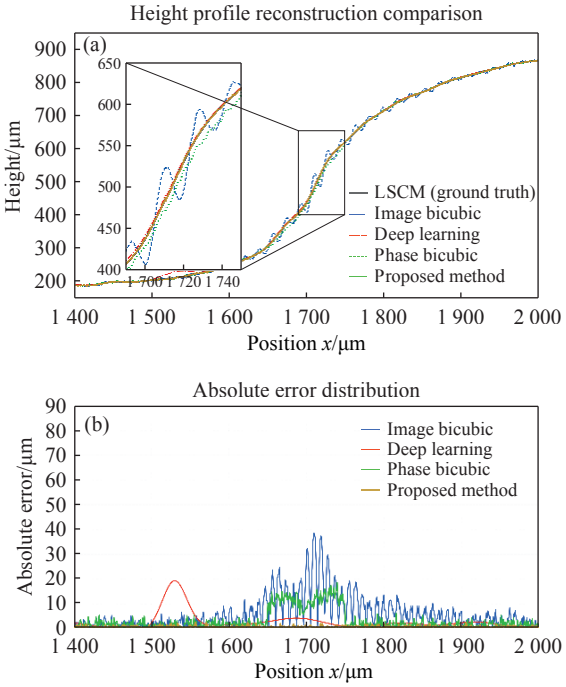


图 9　几种方法复杂 PCB 引脚表面的重建质量综合评估。(a)高度截图轮廓对比; (b)绝对重建误差分布

Fig. 9　Comprehensive evaluation of reconstruction quality on a complex PCB pin surface for different methods. (a) Height profile comparison; (b) absolute reconstruction error distribution

为定量评价不同方法在两类典型 PCB 局部结构中的重建性能, 本文在相同 ROI 和相同配准条件下统计 MAE、RMSE、STD、MaxAE 及平面度误差(见表 4)。MAE 和 RMSE 用于评价整体高度误差, STD 用于反映误差离散程度, MaxAE 用于表征局部极端误差, 平面度误差用于评价局部表面重建稳定性。

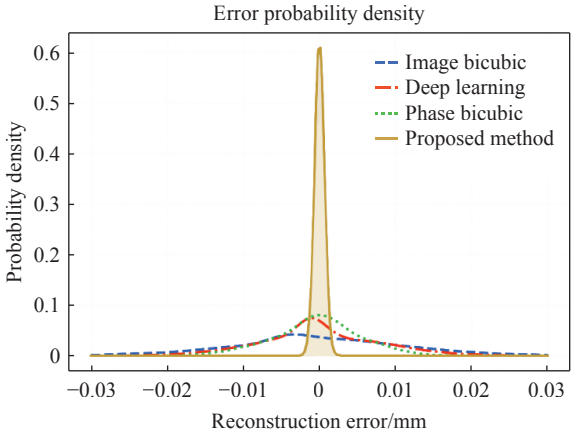


图 10 不同方法在 PCB 局部 ROI 内的绝对误差累积分布曲线

Fig. 10 Cumulative distribution curves of absolute errors for different methods within the PCB local ROI

数据以 10 次独立重复采集结果的均值±标准差表示。MaxAE 表示有效 ROI 内绝对误差最大值。统计显著性针对 MAE、RMSE、STD 和 Planarity Error 进行比较，不包括 MaxAE 和平均耗时。统计分析采用重复测量单因素方差分析或 Friedman 检验，并进行 Holm 多重比较校正。*P < 0.05，**P < 0.01，与所提方法比较。由于 LSCM 测量为委托检测，表中误差未单独扣除 LSCM 参考测量不确定度和坐标对齐误差，应理解为包含参考测量误差、坐标变换误差、FPP 重建误差和重采样误差在内的综合误差。

由表 4 可知，在当前实验条件下，本文方法在 MAE、RMSE、STD 及平面度误差指标上均优于其余比较方法。从误差形成的物理机制角度分析：图像双三次插值的误差源于其对条纹正弦性的破坏。由于插值仅在光强域进行数学平滑，插值后的条纹灰度不再满足正弦分布，导致相位解调时产生与条纹频率相关的非线性误差。这种误差在边缘区域表现为模糊效应，在平坦区域则呈现周期性波纹。深度学习方法的误差源于其数据驱动的“幻觉”效应。深度神经网络在训练过程中学习的是低分辨到高分辨的统计映射，当输入图像中的局部模式与训练数据分布存在偏差时，模型倾向于“填补”出符合统计规律但不一定符合物理真实的高频信息，这在点云中表现为局部不均匀性和几何畸变。相位双三次插值的误差源于其各向同性插值核的局限性。该方法虽然避免了光强域的正弦破坏问题，但其插值核在相位变化剧烈的区域会产生过平滑效应，导致边缘区域的相位梯度偏低，即表现为表面高度差异显著区域的相位偏差。相比之下，本文方法通过显式的物理约束（脊线导向插值、几何校正）确保插值过程符合条纹的固有属性，同时通过区域自适应机制在不同纹理区域采用最优的插值策略。因此，在当前引脚区域和晶振封装区域中，所提方法能够在不同反射率和局部几何变化条件下保持较好的重建稳定性。上述结果说明，所提方法对复杂反光 PCB 局部结构具有一定适用性。除 MAE 和 RMSE 外，本文进一步报告 MaxAE 以评价局部极端误差。结果显示，所提方法不仅降低平均误差，而且减少了局部异常误差，说明其对高反光引脚边缘区域具有更稳定的重建表现。

表 4 采用不同方法时引脚区域与晶振封装区域的重建误差

Tab. 4 Reconstruction errors of different methods in the pin region and crystal oscillator package region

区域	方法	MAE/mm	RMSE/mm	STD/mm	MaxAE/mm	Planarity Error/mm	平均耗时/s
引脚	图像双三次	0.1753 ± 0.0120**	0.2057 ± 0.0160**	0.0951 ± 0.0085**	0.560 ± 0.060**	0.0201 ± 0.0020**	0.066 ± 0.005
	深度学习	0.1721 ± 0.0140**	0.2184 ± 0.0180**	0.0758 ± 0.0070**	0.590 ± 0.065**	0.0185 ± 0.0018**	3.126 ± 0.130
	相位双三次	0.0485 ± 0.0040**	0.0552 ± 0.0048**	0.0483 ± 0.0042**	0.150 ± 0.020**	0.0123 ± 0.0013**	0.074 ± 0.005
	本文方法	0.0254 ± 0.0021	0.0298 ± 0.0026	0.0126 ± 0.0014	0.082 ± 0.011	0.0081 ± 0.0008	0.349 ± 0.020
晶振	图像双三次	0.1626 ± 0.0105**	0.2416 ± 0.0170**	0.1180 ± 0.0100**	0.610 ± 0.070**	0.0220 ± 0.0020**	0.068 ± 0.005
	深度学习	0.1667 ± 0.0120**	0.2447 ± 0.0185**	0.1260 ± 0.0110**	0.630 ± 0.075**	0.0292 ± 0.0025**	3.184 ± 0.135
	相位双三次	0.0675 ± 0.0055**	0.1332 ± 0.0120**	0.0815 ± 0.0075**	0.310 ± 0.040**	0.0180 ± 0.0016	0.079 ± 0.006
	本文方法	0.0221 ± 0.0018	0.0347 ± 0.0030	0.0158 ± 0.0016	0.095 ± 0.012	0.0176 ± 0.0014	0.361 ± 0.022

4.3.3　相位域保真性能评估

为了更直接验证本文方法对条纹相位结构的保持能力, 除三维重建误差外, 本文进一步在相位域对不同超分辨策略进行比较。具体地, 以同一结构光系统、同一相机-投影仪视角和同一投影相位配置下采集的高采样密度条纹图像解算得到的包裹相位作为相位域参考, 在同一引脚区域 ROI 内分别比较图像双三次插值、相位双三次插值和本文方法的包裹相位分布、绝对相位误差以及局部剖面一致性。需要说明的是, 高采样密度参考数据仅用于相位域评价, 不作为各方法的输入, 所有对比方法仍统一使用同一组低分辨率相移条纹作为输入。

低分辨率输入与高采样密度参考数据在样品和结构光系统固定条件下顺序采集。两类数据具有相同的投影相位序列和观测视角, 但采样网格不同。因此, 在相位误差计算前, 首先通过空间坐标配准和 ROI 重映射将两类包裹相位统一至相同图像坐标系, 并保证剖面线位置一致。由于采集过程中 PCB 样品未移动, 且投影相位配置保持一致, 并通过 ROI 重映射校正采样网格差异, 因此运动误差和投影相位配置差异对相位域比较的影响被尽量减小。该参考包裹相位仅用于评价不同重采样策略对局部相位结构的保持能力, 三维几何精度仍以 LSCM 参考测量结果为依据。

为避免包裹相位的 2π 周期性对误差统计造成影响, 本文将像素级相位误差定义为周期差值, 并在 ROI Ω 内分别统计相位域的 MAE、RMSE 和误差标准差 STD。上述指标比单纯的三维高度误差能更直接地反映插值过程是否破坏了条纹的局部相位连续性与边缘过渡特征。

$$e_\phi(x,y)=\mathrm{angle}\left(\exp\left(j\left(\phi(x,y)-\phi_{\mathrm{ref}}(x,y)\right)\right)\right), \tag{12}$$

$$\mathrm{phase\,MAE}=\frac{1}{N}\sum_{(x,y)\in\Omega}\left|e_\phi(x,y)\right|, \tag{13}$$

$$\mathrm{phase\,RMSE}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{(x,y)\in\Omega}e_\phi^2(x,y)}, \tag{14}$$

$$\mathrm{STD}=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{(x,y)\in\Omega}\left(e_\phi(x,y)-\bar{e}_\phi\right)^2}, \tag{15}$$

其中, $\phi(x,y)$ 表示待比较方法重建得到的包裹相位, $\phi_{\mathrm{ref}}(x,y)$ 表示参考包裹相位, angle()表示将相位差映射回区间 $(-\pi,\pi]$ 的周期算子, N为 ROI Ω 内的有效像素数, $\bar{e}_\phi$为像素级相位误差e_ϕ的均值。为保证比较公平, 所有待比较方法原始图像均由同一组低分辨率条纹图像重建得到, 并在完成空间配准后于相同 ROI 内统计上述相位误差指标。

相位域保真性能的局部对比结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。白色横线表示图 12(彩图见期刊电子版)所示剖面线位置。

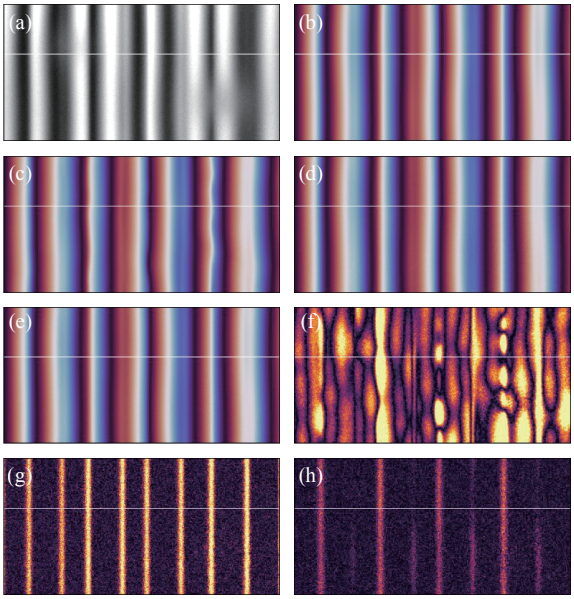


图 11　相位域保真性能的局部对比。(a)所选引脚区域的条纹 ROI; (b)参考包裹相位; (c)~(e)图像双三次插值、相位双三次插值与本文方法得到的包裹相位结果; (f)~(h)3 种方法相对参考结果的绝对相位误差分布

Fig. 11　Local comparison of phase-domain fidelity performance. (a) Fringe ROI of the selected pin area; (b) reference wrapped phase; (c)−(e) wrapped phase obtained by image bicubic interpolation, phase bicubic interpolation and the proposed method, respectively; (f)−(h) absolute phase error distributions of the three methods relative to the reference result

图 11 显示: 图像双三次插值在引脚边缘附近更易出现局部相位拉伸与不规则起伏, 误差在边缘带和低调制度区域内更为明显; 相位双三次插值能够减弱光强域插值所引入的相位扰动, 但在相位跃迁较快的区域仍表现出一定程度的边缘钝

化；相比之下，本文方法在平坦区域与边缘过渡区域均与参考结果的一致性更高，其绝对相位误差主要集中在较窄范围内，表明二维位移场校正与结构感知融合有助于抑制弯曲条纹条件下的方向失配和相位畸变。

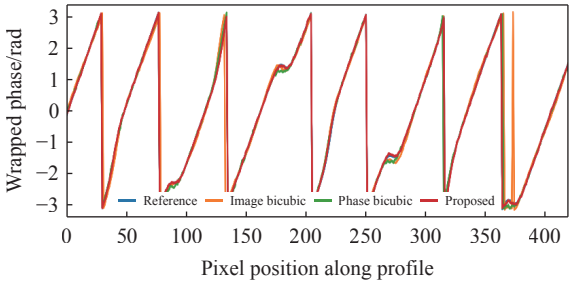


图 12 沿图 11 中标记剖面线提取的包裹相位曲线对比

Fig. 12 Comparison of wrapped-phase curves extracted along the marked profile line in Fig. 11

从图 12 可以看出：在相位跃迁较快的引脚边缘位置，图像双三次插值曲线更容易出现局部振荡和小幅偏移；相位双三次插值虽然整体较为平滑，但在若干跃迁位置仍存在边缘过渡变缓的现象；本文方法得到的相位剖面与参考曲线在峰谷位置、过渡陡度及局部连续性方面更为一致。该结果表明，本文方法在提高空间采样密度的同时，能够更好地保持条纹相位的局部几何结构。

表 5 给出了不同方法在相位域中的定量比较结果。由表 5 可见，不同超分辨方法在相位域中的误差水平存在明显差异。图像双三次插值的 phase MAE、phase RMSE 和相位误差标准差分别为 0.092 rad、0.124 rad 和 0.083 rad。这说明其在光强域直接进行二维平滑后，更容易破坏条纹原有的正弦结构，从而在相位重建过程中引入较明显的局部畸变。相位双三次插值将上述指标分别降低至 0.050 rad、0.074 rad 和 0.054 rad，表明相位域插值能够在一定程度上避免光强域插值直接破坏条纹相位关系，但由于其采用各向同性平滑核，在相位跃迁较快或边缘变化明显的区域仍会产生过平滑现象。相比之下，本文方法的 phase MAE、phase RMSE 和相位误差标准差进一步降低至 0.028 rad、0.037 rad 和 0.025 rad；相较于图像双三次插值，分别下降约 69.6%、70.2% 和 69.9%；相较于相位双三次插值，进一步下降约 44.0%、50.0% 和 53.7%。这表明本文方法在提升空间采样密度的同时，能够更有效地保持局部相位结构的一致性，并抑制边缘区域及低调制度区域的相位误差扩散，从而为后续三维重建精度提升提供更直接的相位域依据。

表 5 不同方法在相位域中的定量比较

Tab. 5 Quantitative comparison of different methods in the phase domain

方法	phase MAE / rad	phase RMSE / rad	相位误差 STD / rad	结果说明
图像双三次	0.092	0.124	0.083	边缘附近易出现局部振荡与周期性扰动
相位双三次	0.050	0.074	0.054	可减弱相位扰动，但边缘存在过平滑
本文方法	0.028	0.037	0.025	平坦区与边缘区均与参考结果保持较高一致性

4.4 统计分析与鲁棒性评价

为进一步评价不同方法在重复采集条件下的稳定性，并避免仅依赖单一均值指标评价方法性能，本文对关键实验结果进行了统计稳定性分析。所有定量实验均独立重复采集 10 次，每次实验均重新投影并采集相移条纹图像，以反映采集、重建和误差评价流程的整体重复性。定量结果以均值±标准差表示。最大绝对误差（MaxAE）定义为有效 ROI 内所有点绝对误差的最大值，用于表征局部极端误差。对 PCB 引脚区域和晶振封装区域，统计分析均基于相同 LSCM 参考数据、相同 ROI 和相同误差计算流程完成，因此参考测量误差和坐标对齐误差对不同方法的影响一致。

95% 置信区间（confidence interval, CI）用于评价 10 次重复实验所得均值估计的不确定性。对于超分辨前后结果的比较，首先采用 Shapiro-Wilk 检验评估数据正态性，若满足正态性，则采用配对 t 检验，否则采用 Wilcoxon 符号秩检验。对于多方法比较，采用重复测量单因素方差进行分析；若数据不满足正态性，则采用 Friedman 检

验, 并采用 Holm 校正进行多重比较。显著性水平设为 P<0.05。考虑到本文重点是比较不同重采样策略在相同采集、标定和 ROI 条件下的相对误差变化, 统计检验结果与 MAE、RMSE、STD、MaxAE、平面度误差和误差分布图共同用于评价方法性能。

为进一步反映主要误差指标在重复采集条件下的估计稳定性, 本文计算了标准量块实验和 PCB 引脚区域以及晶振封装区域实验中关键指标的 95% 置信区间, 结果如表 6 所示。

表 6　主要误差指标的 95% 置信区间

Tab. 6　95% confidence intervals of the main error metrics

实验场景	方法	>指标	均值 ± SD/mm	95% CI/mm
标准量块	原始重建	MAE	0.0290 ± 0.0021	[0.0275, 0.0305]
	本文方法	MAE	0.0208 ± 0.0015	[0.0197, 0.0219]
	原始重建	RMSE	0.0428 ± 0.0037	[0.0402, 0.0454]
	本文方法	RMSE	0.0295 ± 0.0026	[0.0276, 0.0314]
引脚	图像双三次	MAE	0.1753 ± 0.0120	[0.1667, 0.1839]
	深度学习	MAE	0.1721 ± 0.0140	[0.1621, 0.1821]
	相位双三次	MAE	0.0485 ± 0.0040	[0.0456, 0.0514]
	本文方法	MAE	0.0254 ± 0.0021	[0.0239, 0.0269]
	本文方法	RMSE	0.0298 ± 0.0026	[0.0279, 0.0317]
	本文方法	MaxAE	0.0820 ± 0.0110	[0.0741, 0.0899]
晶振	图像双三次	MAE	0.1626 ± 0.0105	[0.1551, 0.1701]
	深度学习	MAE	0.1667 ± 0.0120	[0.1581, 0.1753]
	相位双三次	MAE	0.0675 ± 0.0055	[0.0636, 0.0714]
	本文方法	MAE	0.0221 ± 0.0018	[0.0208, 0.0234]
	本文方法	RMSE	0.0347 ± 0.0030	[0.0326, 0.0368]
	本文方法	MaxAE	0.0950 ± 0.0120	[0.0864,0.1036]

由表 6 可知, 所提方法在标准量块、PCB 引脚区域和晶振封装区域的主要误差指标均保持较窄的置信区间, 说明其在 10 次独立重复采集条件下具有较好的重复性和稳定性。相比图像双三次插值、深度学习基线和相位双三次插值, 所提方法在 PCB 引脚区域的 MAE、RMSE 和 MaxAE 均更低, 表明其不仅降低了平均误差, 也有助于抑制局部极端误差。

本文进一步以 PCB 引脚区域为代表, 在现有低分辨率相移条纹图像基础上进行了图像级扰动分析。噪声扰动通过向归一化条纹图像中加入不同标准差的高斯噪声实现, 曝光扰动通过对条纹灰度进行线性缩放并裁剪至有效灰度范围实现。所有方法均使用相同扰动后的低分辨率条纹作为输入, 并采用相同相位解算、坐标映射、ROI 选择和误差统计流程。结果如表 7 所示。随着噪声强度增加或曝光偏离正常范围, 各方法误差均有所增大, 但本文方法在多数扰动条件下仍保持较低的 MAE 和 RMSE, 说明调制度门控、二维位移场对齐和自适应融合有助于减弱噪声放大和曝光扰动引起的相位畸变。

数据以 10 次重复扰动实验的均值±标准差表示。Baseline 为未加入额外图像扰动的引脚区域结果。加粗值表示同一扰动条件下的最优结果。该表用于评价不同方法在图像级扰动下的鲁棒性, 未进行额外显著性标注。

表 7 PCB 引脚区域不同图像扰动条件下的鲁棒性分析

Tab. 7 Robustness analysis under different image perturbation conditions in the PCB pin region

扰动类型	条件	图像双三次 MAE/mm	相位双三次 MAE/mm	本文方法 MAE/mm	图像双三次 RMSE/mm	相位双三次 RMSE/mm	本文方法 RMSE/mm
无扰动	Baseline	0.1753 ± 0.0120	0.0485 ± 0.0040	0.0254 ± 0.0021	0.2057 ± 0.0160	0.0552 ± 0.0048	0.0298 ± 0.0026
高斯噪声	σ = 0.01	0.1846 ± 0.0134	0.0506 ± 0.0044	0.0262 ± 0.0024	0.2162 ± 0.0176	0.0574 ± 0.0052	0.0307 ± 0.0029
	σ = 0.02	0.1978 ± 0.0152	0.0539 ± 0.0049	0.0274 ± 0.0028	0.2315 ± 0.0195	0.0612 ± 0.0059	0.0321 ± 0.0032
	σ = 0.04	0.2265 ± 0.0196	0.0618 ± 0.0058	0.0301 ± 0.0034	0.2648 ± 0.0240	0.0699 ± 0.0068	0.0351 ± 0.0040
曝光扰动	α = 0.7	0.2072 ± 0.0165	0.0556 ± 0.0051	0.0279 ± 0.0029	0.2436 ± 0.0210	0.0637 ± 0.0060	0.0329 ± 0.0034
	α = 1.3	0.1991 ± 0.0158	0.0542 ± 0.0048	0.0275 ± 0.0028	0.2338 ± 0.0202	0.0621 ± 0.0058	0.0324 ± 0.0033
	α = 1.5	0.2348 ± 0.0215	0.0639 ± 0.0063	0.0309 ± 0.0036	0.2764 ± 0.0265	0.0728 ± 0.0075	0.0362 ± 0.0042

5 结 论

本文针对复杂 PCB 局部结构条纹测量中低分辨率采样易引入相位畸变、弯曲条纹条件下插值方向失配以及低调制度区域噪声放大等问题，提出了一种相位保真条纹超分辨三维测量方法。该方法通过脊谷联合权重、二维位移场对齐以及平坦区/陡变区自适应融合，实现了面向测量任务的超分辨重建。

量块实验以及 PCB 引脚区域和晶振封装区域实验表明，在本文设定的实验条件下，该方法在 MAE、RMSE、STD 及平面度误差等指标上均优于所比较方法，并在边缘和细节区域表现出更好的结构一致性。需要指出的是，本文所述超分辨主要体现为采样网格加密、点云密度提高和插值诱导相位误差降低，并不意味着突破光学系统真实横向分辨率的物理限制。本文验证仍限于当前 PCB 样本中的高密度引脚区域和晶振封装区域，尚未系统覆盖不同颜色阻焊层、丝印、通孔、焊点遮挡、严重饱和反光和低调制度区域。由于 LSCM 参考数据来自委托检测，本文也未对参考测量误差和配准误差进行单独传播分析。后续工作将结合分辨率板、微台阶样品、多块 PCB 样本和完整 LSCM 面点云，进一步评价真实可分辨结构尺寸、复杂场景泛化能力和配准误差传播。

参考文献：

[1] YU J B, ZHAO L X, WANG Y SH, *et al*.. Defect detection of printed circuit board based on adaptive key-points localization network[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 193: 110258.

[2] FUNG K C, XUE K W, LAI C M, *et al*.. Improving PCB defect detection using selective feature attention and pixel shuffle pyramid[J]. *Results in Engineering*, 2024, 21: 101992.

[3] ZHOU Y B, YUAN M H, ZHANG J, *et al*.. Review of vision-based defect detection research and its perspectives for printed circuit board[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 70: 557-578.

[4] 朱黎颖, 王森, 沈爱萍, 等. 复杂背景下的电路板表面焊接缺陷视觉检测[J]. 光学 精密工程, 2024, 32(14): 2256-2271.
ZHU L Y, WANG S, SHEN A P, *et al*.. Visual inspection of soldering defects on board surfaces against complex backgrounds[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(14): 2256-2271. (in Chinese).

[5] YANG J, LIU ZH X, DU W N, *et al*.. A PCB defect detector based on coordinate feature refinement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 5029410.

[6] GUO Y L, WANG H Y, HU Q Y, *et al*.. Deep learning for 3D point clouds: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, 43(12): 4338-4364.

[7] ZUO CH, QIAN J M, FENG SH J, *et al*. . Deep learning in optical metrology: a review[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 39.

[8] LAGA H, JOSPIN L V, BOUSSAID F, *et al*.. A survey on deep learning techniques for stereo-based depth estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(4): 1738-1764.

[9] WANG D, LIU ZH, SHAO SH W, *et al*. . Monocular depth estimation: a survey[C]. *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2023: 1-7.

[10] CHOI H, MAY N, PHOULADY A, *et al*.. Rapid three-dimensional reconstruction of printed circuit board using femtosecond laser delayering and digital microscopy[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 138: 114659.

[11] 刘飞, 罗惠方, 江翰立, 等. 改进的三频三步相移结构光三维重建方法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210179.
LIU F, LUO H F, JIANG H L, *et al*.. Modified three-dimensional reconstruction based on three-frequency three-step phase shifting algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(4): 20210179. (in Chinese).

[12] YANG D, QIAO D Y, XIA CH F, *et al*.. Adaptive horizontal scaling method for speckle-assisted fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2023, 31(1): 328-343.

[13] LYU C Y, LI P, WANG D CH, *et al*.. High-speed optical 3D measurement sensor for industrial application[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(10): 11253-11261.

[14] RANFTL R, BOCHKOVSKIY A, KOLTUN V. Vision transformers for dense prediction[C]. *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, IEEE, 2021: 12179-12188.

[15] CAO Y L, DING B J, HE Z W, *et al*.. Learning inter- and intraframe representations for non-Lambertian photometric stereo[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 150: 106838.

[16] 王腾, 杨树明, 李述胜, 等. 振镜激光扫描测量系统误差分析与补偿[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2315001.
WANG T, YANG SH M, LI SH SH, *et al*.. Error analysis and compensation of galvanometer laser scanning measurement system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(23): 2315001. (in Chinese).

[17] PARE A, ZHANG SH F, LEI ZH CH. Multipath interference suppression in time-of-flight sensors by exploiting the amplitude envelope of the transmission signal[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 167527-167536.

[18] HU Y, CHEN Q, FENG SH J, *et al*.. Microscopic fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106192.

[19] 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.
WU ZH J, ZHANG Q C. Recent progress on 3D shape and deformation measurement based on fringe projection[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(6): 730-747. (in Chinese).

[20] LY SH ZH, KEMAO Q. Modeling the measurement precision of fringe projection profilometry[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 257.

[21] ZUO CH, FENG SH J, HUANG L, *et al*.. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.

[22] FENG SH J, ZUO CH, ZHANG L, *et al*.. Calibration of fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 143: 106622.

[23] JUAREZ-SALAZAR R, RODRIGUEZ-REVELES G A, ESQUIVEL-HERNANDEZ S, *et al*.. Three-dimensional spatial point computation in fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 164: 107482.

[24] BOUKHTACHE S, BLAYSAT B, GRÉDIAC M, *et al*.. Alternatives to bicubic interpolation considering FPGA hardware resource consumption[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2021, 29(2): 247-258.

[25] LIANG J Y, CAO J ZH, SUN G L, *et al*. . SwinIR: image restoration using Swin transformer[C]. *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, IEEE, 2021: 1833-1844.

作者简介：



吴福培（1980—），男，广西玉林人，博士，教授，2009 年于华南理工大学机械工程专业获得博士学位，现就职于汕头大学机械工程系，主要研究方向为自动光学检测和 3D 测量。 E-mail: fpwu@stu.edu.cn



胡　聪（1997—），男，湖北荆州人，硕士，工程师，2026 年于汕头大学机械专业获得硕士学位，现就职于广东弘景光电科技股份有限公司，担任软件研发工程师。研究方向：结构光三维测量。E-mail: 1193809355@qq.com