

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513675

基于视觉测量的微探针跨尺度沉积方法*

邢 强¹, 万晗驰¹, 杨宝权¹, 庄 健², 徐海黎¹

(1. 南通大学机械工程学院 南通 226019; 2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘 要:弯月形液滴限制电化学沉积技术以其低成本、高加工精度的优势在微纳尺度的结构制造中倍受青睐,但压电实验平台有限的位移行程限制了其在大尺度制造场景中的应用。据此,提出了一种基于视觉检测的跨尺度连续沉积法。该方法首先在现有 MCED 设备的基础上,集成了显微相机与三轴移动装置,搭建了基于显微视觉测量的探针粗调节与平台精调节相结合的跨尺度连续沉积平台;其次,以微纳平台的基底预设等间距位移为基准,利用图像灰度特征解算基底位移量对应的像素位移量,并在此基础上构建了基于 Adam 算法优化的梯度下降模型,建立“物-像”距离映射关系,实现了基于单相机图像的高精度沉积物与探针在线定位与测量;然后,利用视觉反馈控制,完成了探针位置与沉积位置间的高精度对准与沉积定位,实现了 MCED 平台的跨尺度连续沉积;最后,使用共聚焦显微镜测量分析了分段沉积物的长度及连接点的沉积质量。结果表明:基于视觉测量反馈的玻璃微探针跨尺度沉积方法,在保证沉积质量及线段端点沉积精度的基础上能够实现 80 μm 行程压电平台的毫米级尺度线段的沉积,且沉积长度误差 $<3\%$,此方法为大尺度精密制造提供了新方案。

关键词:弯月形液滴限制电化学沉积;微纳三维打印;视觉检测;反馈控制;跨尺度

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.2535

A cross-scale deposition method for micro-probe based on visual measurement

Xing Qiang¹, Wan Hanchi¹, Yang Baoquan¹, Zhuang Jian², Xu Haili¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Meniscus-confined electrodeposition (MCED) technology has gained considerable attention in micro/nano-scale structure fabrication due to its low cost and high precision. However, the limited displacement range of piezoelectric stages restricts its applicability in large-scale manufacturing scenarios. To overcome this limitation, a cross-scale continuous deposition method based on visual inspection is proposed. This approach integrates a microscope camera and a three-axis motion system into existing MCED equipment, creating a cross-scale continuous deposition platform that combines coarse probe adjustments with fine platform positioning, guided by microscopic vision measurements. Next, by using predefined equidistant displacements of the micro/nano platform as a reference, pixel shifts corresponding to these displacements are calculated through image grayscale analysis. This data is then used to develop an Adam-optimized gradient descent model, which establishes an “object-to-image” distance mapping relationship, enabling high-precision positioning and measurement of the deposited material and the probe from a single camera image. Visual feedback control is employed to achieve precise alignment and deposition positioning, facilitating cross-scale continuous deposition on the MCED platform. Finally, a confocal microscope is used to measure and analyze the length and junction quality of the deposits. The results demonstrate that this method enables the deposition of millimeter-scale line segments using an 80 μm -range piezoelectric stage, with deposition length errors below 3%, while maintaining high quality and precision at the segment endpoints. This approach offers a promising solution for large-scale precision manufacturing.

Keywords: meniscus confined electrodeposition; micro/nano 3D printing; visual inspection; feedback control; across scale

0 引言

增材制造技术可以在不受传统制造限制的条件下实现精确且高度定制的复杂结构制造^[1-2],在各个领域都有着广泛的应用。尽管宏观上的增材制造方法已经相对成熟,但是随着自然科学的发展以及航空航天、生物医学工程、电子、汽车和能源行业对设备小型化、微型化需求的持续增长^[3],面向微纳尺度的制造技术研究也日益受到关注^[4]。

弯月形液滴限制电化学沉积(meniscus confined electrodeposition, MCED)技术,凭借其微纳级加工精度、无需复杂的前后处理及对加工环境的低依赖性等优势,常被用于制造高精度的金属结构或微纳电子关键元器件^[5-8]。可用于集成电路、微纳机电系统领域的纳米级导线、互连线以及微纳尺度传感器等关键部件制造^[9],纳米光子学领域的光波导、纳米天线和等离子体结构等光学器件制备^[10-11],以及生物医学工程中高精度生物传感器和医疗器件等构建^[12]。诸如,2010年Hu等^[13]采用MCED技术(压电平台行程范围为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}\times 87.5\ \mu\text{m}$)实现了集成电路内部晶元之间节点直径约为 $2\ \mu\text{m}$ 、长度约为 $30\ \mu\text{m}$ 的Pt互连线的沉积制造;2018年Lei等^[14]利用MCED技术(压电陶瓷为Physik Instrumente公司生产的P-562.3CD,行程范围为 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$)沉积了一段长度约为 $40\ \mu\text{m}$ 、线宽约为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的Cu导线,实现了回路中LED灯电路的连通;2019年Zhang等^[15]利用MCED技术(压电陶瓷为Physik Instrumente公司生产的P-562.3CD,行程范围为 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$)堆叠沉积出线宽约为 $8\ \mu\text{m}$ 、最长长度约为 $100\ \mu\text{m}$ 的5层直写铜线结构以探索孪晶形成的临界条件;2022年李俊忠等^[16]利用MCED技术(压电陶瓷为纳动纳米公司生产的PS3L70-200U-S,行程范围 $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$)一次性在约为 $150\ \mu\text{m}\times 150\ \mu\text{m}$ 的范围内制备了直径 $5\ \mu\text{m}$ 、高度 $50\ \mu\text{m}$ 、阵列规模为 5×5 的仿生纤毛阵列,用以测量微流体流速;2022年Wang等^[17]使用体素化沉积法(压电平台行程为 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$)在约为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$ 的区域内沉积生长出直径约为 $2\ \mu\text{m}$ 、高度约为 $20\ \mu\text{m}$ 的三柱微结构并利用该结构进行后续的原位微尺度压缩试验。上述应用实现了在压电陶瓷有限行程范围内从数微米到几百微米不等的沉积,然而,当待沉积任务的尺度范围超过实验平台压电陶瓷的有限行程时,该技术在在大尺度图案化增材制造场景中的应用会受到显著制约,即有限行程的沉积范围无法满足跨尺度加工场景下的需求;且通过使用较大沉积范围的硬件来提高工作行程的方式存在成本增加及无法保证精准的分辨率等方面的局限性。

综上,即需要开发一种不受压电陶瓷行程限制,又能保证MCED沉积线段质量、有效扩大沉积范围的普适性沉积方法。针对这一问题,在研究了MCED平台的工作原理基础上,提出一种基于视觉反馈的跨尺度连续沉积方法。首先在基底上沉积一基准线段,并利用基底沉积反方向的等间距间歇运动与沉积物的显微成像建立“物-像”距离映射关系;其次,根据“物-像”距离映射关系获取探针投影点与沉积线段终点间的像素距离,进行基于探针位移粗调装置与压电陶瓷精调装置相结合的视觉测量反馈控制,实现相邻沉积单元间的平滑衔接;最后,重复上述方法,根据沉积尺度要求分段沉积,实现超压电平台行程的MCED跨尺度连续沉积。

1 理论分析

1.1 MCED平台与基本原理

基于MCED的微纳增材制造实验平台原理图如图1所示。在一根灌注含有金属阳离子溶液(本研究采用 $0.1\ \text{mol/L}$ 的硫酸铜溶液)的玻璃探针中伸入与该金属阳离子同元素的金属电极(本研究采用铜)作为正极,同时以一块表面喷金的导电基底作为负极;探针内溶液受重力及表面张力的作用在探针尖端形成一个接近探针开口直径的弯月形微液滴。压电陶瓷带动导电基底向探针运动,当弯液面液滴与基底开始接触时便会形成一个导电回路;通电后,在作为负极的基底上会发生还原反应($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$)从而生成铜沉积物,溶液内正极电极发生氧化反应($\text{Cu} - 2\text{e}^- = \text{Cu}^{2+}$)生成铜离子向基底迁移以补充基底上还原反应所消耗的铜离子。

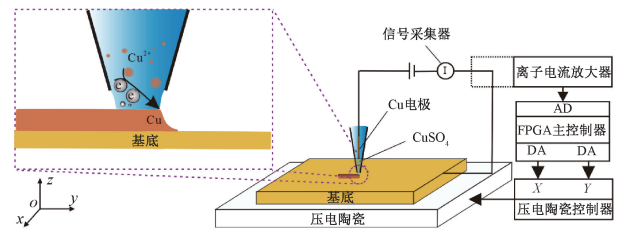


图1 MCED实验平台原理

Fig. 1 Schematic of the MCED experimental platform

该变化过程中的氧化还原电流被信号采集器捕获以后,传至离子电流放大器进行放大,之后进入可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)主控制器进行模数转换(analog-to-digital sampling, AD)采样,进而经由数模转换(analog-to-digital signal, DA)为模拟信号传输给压电陶瓷控制器;当电流变化值超过设定阈值时,压电陶瓷控制器控制基底停止运动,并做适当的微调以保证探针尖端弯液面与样本表面始终接

触,从而完成探针在基底平面内有限范围内的微纳增材制造^[18-20]。

1.2 基于视觉反馈的跨尺度沉积法

要进行 MCED 有限行程的跨尺度沉积实验,需采用拼接沉积的方式实现。但在沉积过程中,每段沉积物端点会因探针尖端磨损或弯液面液滴溢出发生不同程度的膨胀形变,导致每一沉积单元实际沉积长度与上位机控制行程间存在差异。当控制平台往复运动进行沉积时,极易产生两相邻沉积单元间的沉积断连、重叠干涉等问题,影响沉积质量。

为提高平台在水平面的跨尺度沉积能力,提出一种基于视觉反馈的跨尺度沉积工作方法。该方法的关键在于利用机器视觉观测沉积过程,利用长度模板进行沉积物在线自主测量,指导压电陶瓷进行反馈控制,实现 MCED 的跨尺度连续沉积;最后将多段独立的有限尺度内的沉积线段衔接成跨尺度沉积线段,具体过程如图 2 所示。

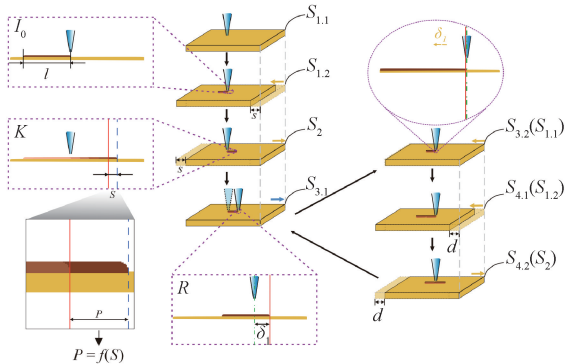


图2 基于视觉反馈的 MCED 跨尺度连续沉积方法流程
Fig.2 Flowchart of MCED cross-scale continuous deposition method based on visual feedback

在沉积开始前,将相机通过夹持装置固定于基底侧方,相机与水平面之间存在夹角,安装相机时应确保相机视野中的水平线与沉积线段平行;在沉积过程中,确保每段沉积线段在单次沉积完成后都位于相机拍摄的视野中央,最后通过相机获取沉积过程特征图像,具体步骤为:

1) 移动相机与显微镜镜头,使得 MCED 实验场景在视野范围内,沉积长度为 l 的第 1 段线段,然后基底下降与探针分离,利用相机拍摄基准图像 I_0 ;

2) 上位机发送指令控制,基底向复位方向间歇性移动 s (其中 $s=l/N$, N 为复位次数),并控制相机成像,直至重复 N 次操作后基底完全复位,获 I_1, I_2, \dots, I_N 共 N 张过程图像,并将每张过程图像依次与基准图像叠加得 N 张融合图像;在此过程中,以沉积线段右端点为基准点计算其与探针在沉积物上的投影点之间的水平像素距离 P ,利用上述数据建立实际距离 S 和像素距离 P 之间的函数

关系,即完成单相机视野范围内的测量标定。

3) 待基底复位后,使用探针位移调节装置移动探针位置至沉积物末端附近,相机拍摄此时的预沉积图像 R ,根据 $S-P$ 函数关系,测量计算获得探针投影点和基底沉积线段末端点的水平间距 δ_1 。并据此控制压电陶瓷微调以消除 δ_1 ,使得探针接近该段沉积线段末端点即连续衔接点,进行沉积。

4) 重复 1)~3) 直至沉积到预设长度,即可实现跨尺度的 MCED 沉积。

1.3 基于改进的梯度下降法的“物-像”方程拟合

由于透视投影的非线性效应在小范围内较弱,镜头畸变影响可忽略不计,且小范围内的水平方向上空间坐标与图像坐标的映射关系呈现出较高线性度^[21]。因此,在较小视场的 MCED 沉积场景中,沿着沉积线段方向的“物-像”距离映射关系可通过线性拟合方式求取。构造 $S-P$ 关系如式(1)所示。

$$\hat{P} = a \times S + b \quad (1)$$

其中, \hat{P} 是根据拟合结果求得的预测值, a 是斜率, S 是基底实际位移量, b 是截距。要使得拟合的 $S-P$ 对应关系模型的预测值与实际值间的差距最小,需要寻找 a 、 b 最优解。

尽管本实验数据集较小,但在图像特征提取的过程中可能会引入异常值和噪声,导致传统的线性解析方法(如最小二乘法)在求解最优解时处理受限,影响拟合精度^[22]。因此,采用具有较强的鲁棒性、可规避异常值对拟合结果影响的基于改进的梯度下降算法,避免在面对复杂或非均匀数据时陷入局部最优。

首先,构造均方差损失函数如式(2)所示。

$$L(a, b) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (\omega_i (a \times S_i + b - P_i)^2) \quad (2)$$

其中, $L(a, b)$ 是损失函数值, m 是样本数量, S_i 是第 i 个样本中输入的实际距离值, P_i 是第 i 个样本中 S 对应的像素距离 P 。 ω_i 为样本权重,其定义如式(3)所示。

$$\omega_i = \begin{cases} 1, & |r_i| \leq k \\ 1/|r_i|, & |r_i| > k \end{cases} \quad (3)$$

其中, $r_i = a \times S_i + b - P_i$, r_i 表示第 i 个样本的残差,即模型预测值与实际观测值间的差异, $k = 1.345\hat{\sigma}$, $\hat{\sigma}$ 是基于 MAD (median absolute deviation) 的鲁棒标准差估计,其定义如式(4)所示。

$$\hat{\sigma} = \frac{MAD}{0.6745} \quad (4)$$

MAD 是鲁棒的离散度量,其定义如式(5)所示。

$$MAD = \text{median}(|r_i - \text{median}(r_i)|) \quad (5)$$

式(5)表示残差 r_i 偏离其中位数的绝对距离的中位数。

其次,为了最小化损失函数,计算损失函数关于 a 、 b 的梯度,如式(6)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial L(a,b)}{\partial a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\omega_i(a \times S_i + b - P_i) \times S_i) \\ \frac{\partial L(a,b)}{\partial b} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\omega_i(a \times S_i + b - P_i)) \end{cases} \quad (6)$$

在此,将参数 a 、 b 初始化为 0,通过梯度下降进行更新,如式(7)所示。

$$\begin{cases} a_t = a_{t-1} - \alpha \frac{\partial L(a,b)}{\partial a} \\ b_t = b_{t-1} - \alpha \frac{\partial L(a,b)}{\partial b} \end{cases} \quad (7)$$

其中 a_t 、 b_t 是根据上一次输入的 a 、 b 更新后输出的第 t 次迭代结果, α 是预先设定的学习率(初始化为 0.001)。

然后,在梯度下降法的基础上,为加快收敛与避免在接近最优解时振荡,采用 Adam 优化算法进行改进^[23],如式(8)、(9)所示。

$$\begin{cases} m_{a,t} = \beta_1 \times m_{a,t-1} + (1 - \beta_1) \frac{\partial L(a,b)}{\partial a} \\ m_{b,t} = \beta_1 \times m_{b,t-1} + (1 - \beta_1) \frac{\partial L(a,b)}{\partial b} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} v_{a,t} = \beta_2 \times v_{a,t-1} + (1 - \beta_2) \left(\frac{\partial L(a,b)}{\partial a} \right)^2 \\ v_{b,t} = \beta_2 \times v_{b,t-1} + (1 - \beta_2) \left(\frac{\partial L(a,b)}{\partial b} \right)^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $m_{a,t}$ 、 $m_{b,t}$ 、 $v_{a,t}$ 、 $v_{b,t}$ 分别为第 t 次迭代时参数 a 、 b 的一、二阶矩估计,初始化为 0。 β_1 、 β_2 是一、二阶矩估计的指数衰减率,此处分别取 0.9、0.999。

为了消除初始时刻一阶和二阶矩估计估计值的偏差,提升优化过程的效果,对矩估计进行校正,如式(10)所示。

$$\begin{cases} \hat{m}_{a,t} = \frac{m_{a,t}}{1 - \beta_1^t} \\ \hat{m}_{b,t} = \frac{m_{b,t}}{1 - \beta_1^t} \\ \hat{v}_{a,t} = \frac{v_{a,t}}{1 - \beta_2^t} \\ \hat{v}_{b,t} = \frac{v_{b,t}}{1 - \beta_2^t} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\hat{m}_{a,t}$ 、 $\hat{m}_{b,t}$ 、 $\hat{v}_{a,t}$ 、 $\hat{v}_{b,t}$ 为修正后的矩估计值,学习率动态自调节的参数更新公式如式(11)所示。

$$\begin{cases} a_t = a_{t-1} - \frac{\alpha}{\sqrt{v_{a,t} + \epsilon}} \hat{m}_{a,t} \\ b_t = b_{t-1} - \frac{\alpha}{\sqrt{v_{b,t} + \epsilon}} \hat{m}_{b,t} \end{cases} \quad (11)$$

其中,参数 ϵ 为参数 a 、 b 停止更新迭代的阈值。

最后,由此模型对参数进行寻优,使得损失函数达到最小值,得到最终拟合的“物-像”距离映射关系式为式(1)。

2 实验装置与方法

2.1 改进的实验平台

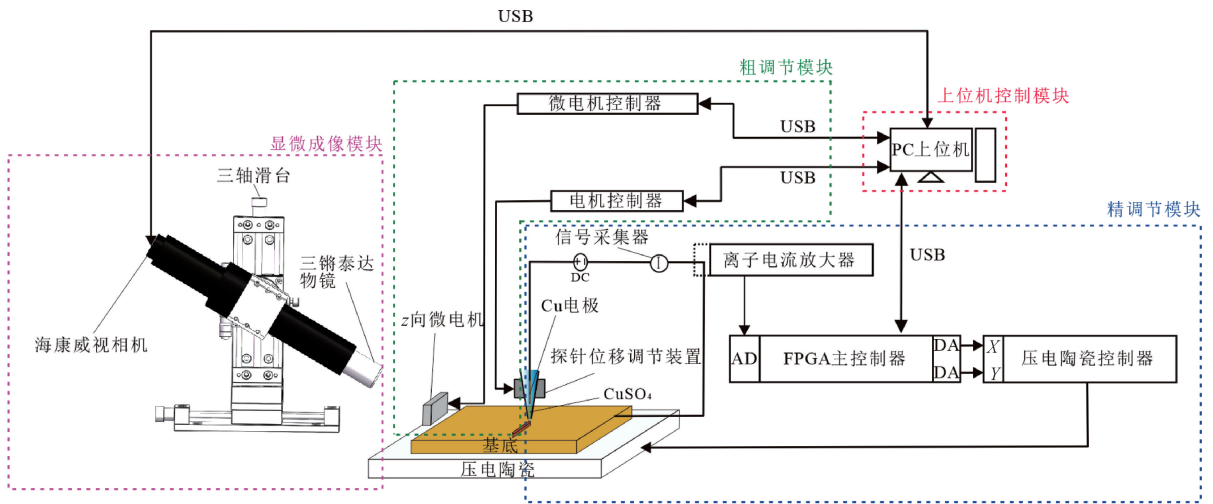
如图 3(a) 所示,改进的实验平台可分为 4 个模块,即粗调节模块、精调节模块、显微成像模块及上位机主控模块。

粗调节模块即探针-基底相对位置粗调节模块,该模块由集成在探针夹持装置上的探针位移调节装置和 Z 向微步进电机组成。其中,探针位移调节装置通过控制探针在 XOY 平面内的大范围运动实现探针与基底在水平方向上的相对位置粗调节; Z 向微步进电机(M111.1DG, 东方电机,日本)通过控制基底的升降实现探针与基底在垂直方向上的相对位置粗调节。

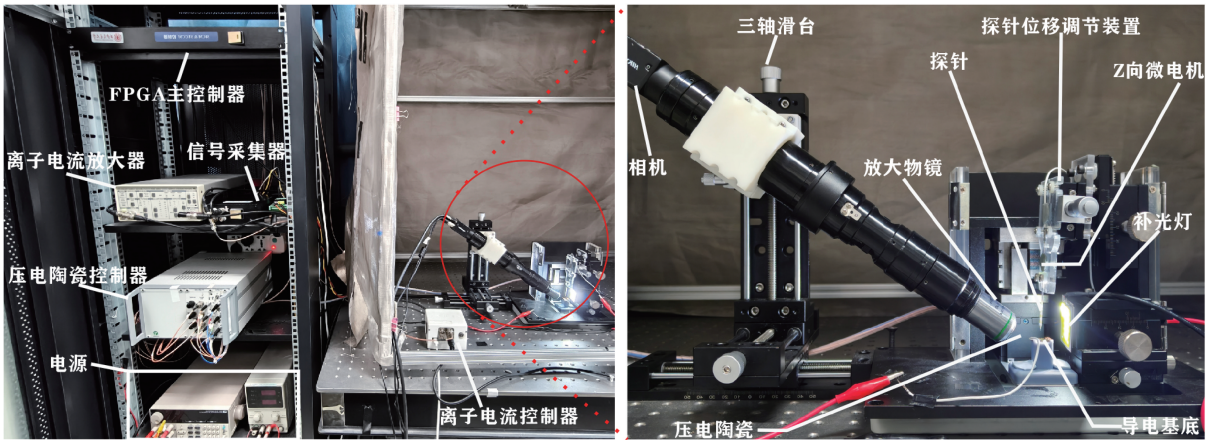
精调节模块即探针-基底相对位置精调节模块,该模块由信号采集系统和压电平台微动系统组成。其中信号采集系统通过采集离子电流信号并放大传输至 FPGA 主控制器,进而生成指令控制压电平台实现微纳移动,完成探针与基底间相对位置的精调节,使得探针的弯液面与基底接触并完成后续沉积作业;压电平台微动系统由压电陶瓷控制器(PCM721S, 纳米纳动,中国)和压电陶瓷(PS3L40-080U-S, 纳米纳动,中国)组成,其中压电陶瓷行程为 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,线性度为 0.05%,重复性定位精度为 0.05%,闭环分辨率为 3 nm。它通过控制基底的升降寻找工作区;在沉积过程中,探针保持静止,压电陶瓷通过接收控制器指令带动基底在 XOY 平面内完成精确移动实现沉积。

显微成像模块由三轴滑台、相机(MV-CA060-10GM, 海康威视,中国)、物镜镜头(三镨泰达,中国)组成。其中三轴滑台控制相机的拍摄角度与拍摄视野;相机分辨率为 $3\,072 \times 2\,048$;相机与放大倍数 90 倍的三镨泰达物镜配合用以观察并拍摄沉积过程,显微分辨率为 $0.8 \mu\text{m}$ 。相机拍摄所得图像利用 Matlab 软件进行处理。

上位机控制模块为计算机(personal computer, PC),通过通用串行总线(universal serial bus, USB)分别与粗调节模块、精调节模块、显微成像模块相连,主要功能在于:首先,通过显微成像检测模块指导粗调节模块垂直调节探针与基底的升降,以避免二者相撞;其次,当探针接近基底时,精调节模块中的压电平台控制基底在三维空间内的移动,即完成工作区的寻找和沉积;然后,当完成一段沉积任务后,利用显微成像模块成像并处理,确定衔接点与探针间的位置差;最后,采用探针位移调节装



(a) 改进的MCED系统组成结构
(a) Structure of the improved MCED system



(b) 改进的MCED系统实物
(b) Physical diagrams of the improved MCED system

图3 改进的实验平台

Fig. 3 Improved experimental platform

置粗调与压电陶瓷精调相结合的方式使探针到达衔接点所在位置,进行后续沉积任务。改进的实验平台实物图如图3(b)所示。

2.2 “物-像”距离映射关系的图像特征参数提取

为了建立基底位移在平台坐标系和图像坐标系中的映射关系,采集若干组对应的“物-像”位移量进行数据拟合;其中,基底在平台坐标系中的实际位移量由上位机预先设定、压电陶瓷移动实现;图像坐标系中的像素位移量由相机成像及数字图像处理方法获得。

具体过程如下:首先,沉积一段线段,基底下行并与探针分离,此时相机拍摄获得基准图像 I_0 ;其次,上位机发送指令控制基底朝着复位方向(即沉积方向的反方向)做等间距间歇性运动,在间歇期间相机拍摄对应位置图像,分别获取 I_1, I_2, \dots, I_N 共 N 张过程图像。

在该移动与成像过程中,因探针位置固定,沉积物相对偏移量有限且整段位移过程都在相机拍摄范围内,当相机位置固定时,所获得系列图像具有相同的成像区域。在该系列图像中,探针位置始终不变,沉积物随基底运动。因此,将相同过程中任意两张图像叠加时,探针位置完全重合,沉积物则呈现重叠与非重叠区域部分。通过数字图像识别并处理这些区域,便可求取基底位移量。如式(12)所示,将过程图像 I_i 与基准图像 I_0 叠加,可得融合图像 K_i 。

$$K_i(x, y) = (1 - a_i) \times I_0(x, y) + a_i \times I_i(x, y) + b \quad (12)$$

其中, $K_i(x, y)$ 是输出图像在位置 (x, y) 处的像素值, $I_i(x, y)$ 是第 i 个输入图像在 (x, y) 处的像素值, a_i 是第 i 个输入图像的加权系数(其中, $i = 1, 2, 3, \dots$,

N), b 是一个可选择的偏移量, 默认为 0。设定加权系数 a_i 为 0.5, 即可得到 N 张对应的融合图像 K_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$), 如图 4(a) 所示。

为计算融合图像 K_i 中沉积区内灰度值突变点间的像素距离, 首先需识别该区间内的灰度值突变点。通过将彩色图像转换为三态二值化图像, 根据灰度值的最小值和最大值确定整体灰度范围, 将灰度值划分为 3 个区间: 最暗部分(灰度值为 0)、中间灰度部分(灰度值为 0.5)和最亮部分(灰度值为 1), 如图 4(b) 中 S_1 所示。

为提高分析准确性, 对采集图像进行三态二值化处理, 并从图像底部向顶部逐行遍历, 确定感兴趣区域与端点测量位置。根据图像特征, 操作具体步骤为:

1) 遍历图像, 当某行中灰度值连续为 0 的像素点数超过设定阈值时, 将该行确定为探针、沉积物及干扰物区域的分界线, 保留感兴趣的探针、沉积物区域。如图 4(b) 中 S_2 所示。

2) 针对沉积物区域, 自上而下、从右向左逐像素遍历, 将首个灰度值由 1 突变为 0.5 的像素点确定为沉积物位移后的右端点, 将首个灰度值由 0.5 突变为 0 的像素点确定为沉积物位移前的右端点。并经由上述两点分别绘制竖直的虚线和实线, 如图 4(b) 中 S_3 所示。

3) 针对探针区域, 从三态二值化图像右上角开始, 自右向左逐像素遍历, 将首个灰度值由 1 突变为 0.5 的点确定为探针右边界轮廓点, 将首个灰度值由 0.5 突变为 1 的点确定为探针左边界轮廓点, 将两点中点作为探针中线拟合点; 同理, 进行后续行的像素遍历与轮廓点识别, 拟合得到探针中线, 并用竖直点画线进行标识, 如图 4(b) 中 S_4 所示。

利用数字图像处理方法测量实线与虚线间的像素间距可计算基底位移像素量; 测量实线与点画线间的像素间距可求取预沉积图像中探针对应位基底需调节的微动距离, 示意如图 4(c) 所示。

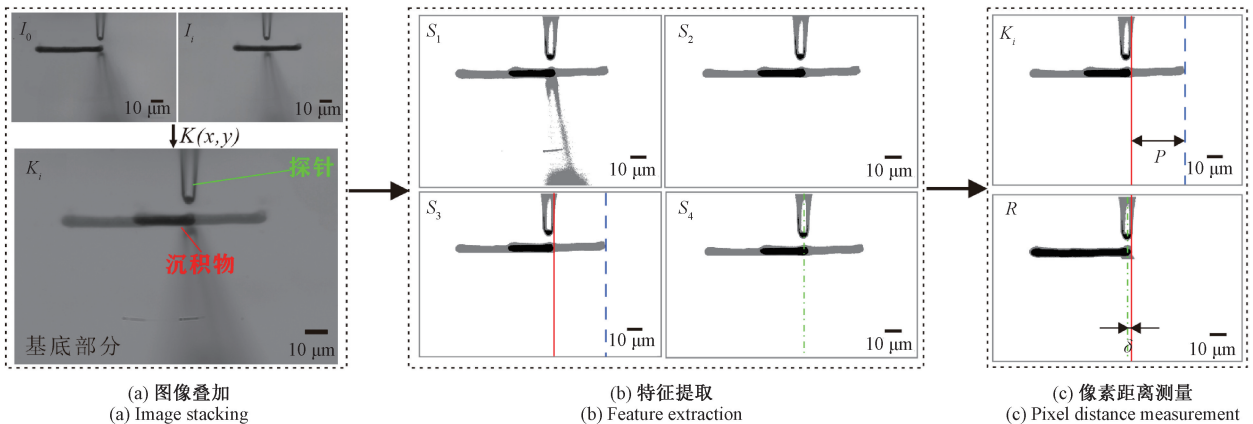


图4 基于图像处理的特征位置确定流程

Fig. 4 Flowchart of feature location determination based on image processing

3 实验结果与分析

3.1 基于基底位移的“物-像”距离映射关系标定结果

为建立平台坐标系与图像坐标系之间相应位移的对应关系, 需进行图像标定。针对微观倾斜视场内微细标定板制作工艺复杂、成本高昂, 常规标定方法精度有限、标定效果不稳定等问题, 提出图像自标定实验。

实验过程中, 为避免倾斜视角下可能出现的图像畸变及相机聚焦范围有限的问题, 需保证沉积线段所在直线与相机视野水平线平行; 在后续的跨尺度连续沉积实验中, 每段沉积任务开始前探针投影点与平滑衔接点之间都会存在偏差 δ , 该偏差需要通过基底运动的方式消除。由于现有的 MCED 实验平台中压电陶瓷在水平平面

内的位移范围是 $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$, 故将完成第一段沉积线段的基底位移方向设置为 Y 轴方向, 位移区间为 $[10 \mu\text{m}, 70 \mu\text{m}]$ 。沉积完成后, 基底向下运动与探针弯液面断触, 相机拍摄此时的沉积物图像。随后上位机发送指令控制基底间歇性复位, 每次复位 $5 \mu\text{m}$, 共运动 12 次, 每次运动完成后相机在对应位置成像。以初始位置时的图像为基准图像, 间歇性复位过程中拍摄的 12 张图像与基准图像依次叠加, 采用数字图像处理的方法确定相互间位置关系, 如图 5 所示。

提取每张融合图像中端点特征, 通过计算求取基底在图像坐标系中位移的像素距离 P 。如表 1 所示, 得到融合图像中基底在平台坐标系和图像坐标系中的位移量。同时采集了环境因素干扰引发的含异常值的图像自实验数据。

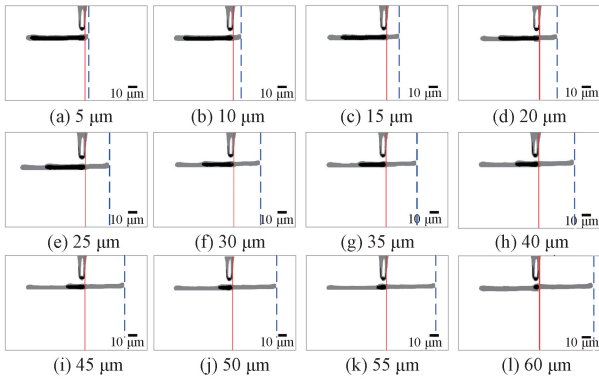


图5 不同复位情况下的融合图像与特征位置确定

Fig. 5 Fused images and feature position determination under different reset conditions

表1 图像自标定实验数据

Table 1 Image self-calibration experimental data

序号	基底位移量 S / μm	正常组像素 位移量 P/pixel	异常组像素 位移量 P/pixel
1	5	94	91
2	10	189	190
3	15	287	285
4	20	391	382
5	25	489	476
6	30	584	944
7	35	684	669
8	40	778	767
9	45	873	862
10	50	967	960
11	55	1 065	1 062
12	60	1 157	1 168

根据表1中正常组图像自标定实验数据计算

Pearson系数 $r(r = \sum (S_i - \bar{S})(P_i - \bar{P}) / \sqrt{\sum (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum (P_i - \bar{P})^2})$ 得出 $r = 0.9998$, 这组数据的Pearson系数极接近1, 表明 S 与 P 之间存在正线性关系。后续实验中每一次基底的总步进位移量为 $60 \mu\text{m}$; 因此, 本研究中的基底位移量均位于线性分布区间内。

如图6所示, 使用最小二乘法 (least squares method, LS)、标准梯度下降算法 (standard gradient descent algorithm, SGD)、Huber回归算法及Adam改进的梯度下降法对异常组数据进行拟合。由图6可得第6个数据点显著偏离线性回归轨迹, 而传统的线性拟合方法 (如LS、SGD等) 会使异常值在参数估计过程中被赋予过大的权

重, 导致回归曲线偏离真实数据分布, 影响全局的拟合效果。

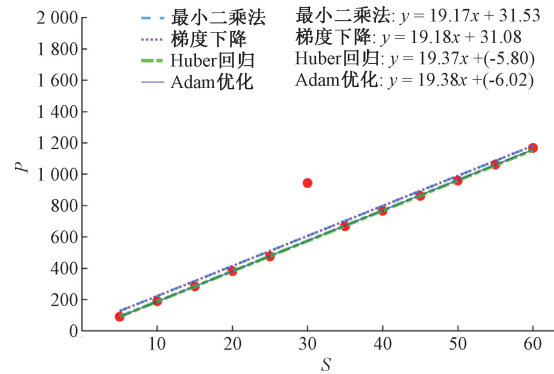


图6 含异常值数据拟合结果

Fig. 6 Fitting results for data with outliers

计算剔除异常点后LS及SGD的均方误差 ($MSE = (1/n) \sum_{i=1}^n (a \times S_i + b - P_i)^2$), 得出 $MSE_{LS} = 1034.57$, $MSE_{SGD} = 1034.15$, 表明这两种方法易受到异常值的影响。因此, 需要采用具有较强鲁棒性的线性拟合算法, 以抑制异常值对参数估计过程的干扰。Huber回归算法是一种鲁棒回归算法, 对异常组数据进行拟合, 剔除异常点后得 $MSE_{Huber} = 17.02$ 。Huber算法通过分段损失函数 (对正常值用平方损失, 异常值用线性损失) 来降低异常值的影响; 然而, 该算法需依赖人为设定阈值实现异常值识别与损失函数切换, 若阈值设置不当或遭遇极端异常值时, 该方法也会受到影响^[24], 因此需要采用一种具有更强鲁棒性的拟合方法。使用Adam算法与梯度下降法相结合的“物-像”方程拟合法对异常组数据进行拟合, 剔除异常点后得 $MSE_{Adam} = 16.45$ 。由此可见, 该方法及Huber算法的鲁棒性远超过最小二乘法和标准梯度下降算法。其中基于Adam算法改进的梯度下降算法得益于残差驱动的权重动态调节机制, 在无需人为设置阈值的条件下即可实现极端异常值抑制。可保证实验中因环境因素引入的偶然极端异常值数据不影响最终“物-像”距离映射关系式的拟合。

对正常组数据“物-像”距离映射关系进行拟合, 建立均方误差损失函数如式(2)所示。

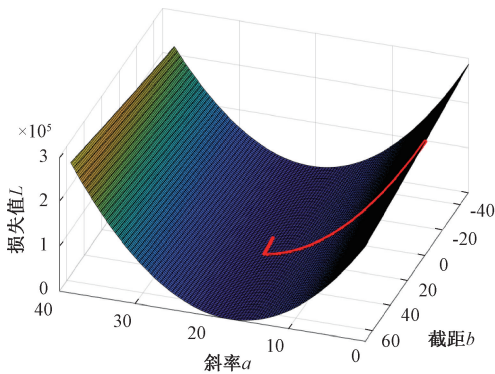
在三维坐标系中, 以 a 和 b 为平面坐标轴, 损失值 L 为竖轴, 绘制损失函数的曲面图。由于 $S-P$ 呈正相关关系, 故而斜率值 $a > 0$, 将参数 a, b 都初始化为0。为防止 a 和 b 进入无限制的迭代, 设置 a, b 的最大迭代次数为500 000次, 当连续两次迭代之间的均方误差损失函数变化小于设定阈值 $\epsilon = 10^{-8}$ 时, 认为模型收敛, 停止迭代。

采用改进的梯度下降算法对参数 a, b 进行寻优, 寻优轨迹如图7(a)所示, 当参数更行迭代了48 743次后,

迭代停止, $a = 19.38$ 、 $b = 0.07$, 损失函数 $L(a, b)_{\min} = 7.26$; 此时, 得到最优参数拟合的 $S-P$ 曲线, 如图 7(b) 所示。由此得到“物-像”距离映射关系式, 如式 (13) 所示。

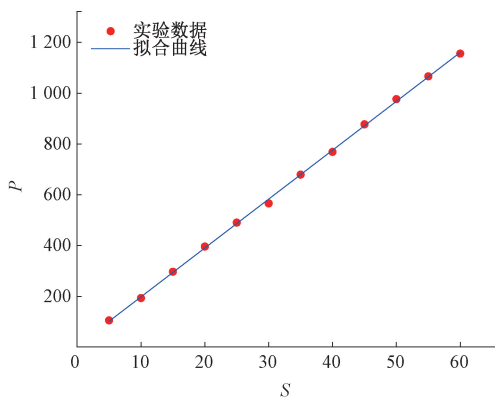
$$\hat{P} = 19.38 \times S + 0.07 \quad (13)$$

由于沉积时基底的移动与相机视野位置的调节变化, 需要对每次沉积复位后的探针及沉积终点的位置进行检测与定位。即在每次沉积前, 都根据前序线段间歇性复位获取的多组 $S-P$ 数据实时更新 $S-P$ 距离映射关系, 并据此计算探针每次沉积工作前基底需调节的微动距离, 避免了该线性模型因位移超限而失效。



(a) 均方误差损失函数及寻优轨迹

(a) Mean square error loss function and optimization trajectory



(b) 最优参数拟合的 $S-P$ 曲线

(b) $S-P$ curve for optimal parameter fitting

图 7 基于梯度下降法的“ $S-P$ ”曲线拟合

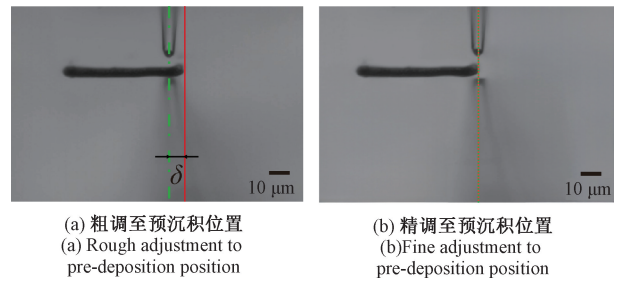
Fig. 7 $S-P$ curve fitting based on gradient descent algorithm

3.2 相邻线段衔接沉积实验与分析

1) 邻线段衔接对位精度控制

基于 MCED 技术的跨尺度连续沉积, 既要实现跨尺度范围的沉积, 还需确保沉积单元在衔接区域的沉积质量——即避免两沉积线段间出现断联或干涉等现象; 那么就需要保证相邻沉积线段间的对位精度。利用视觉测量技术进行反馈控制, 对位过程如图 8 所示。

首先, 利用相机显微拍摄沉积物与探针图像, 通过数



(a) 粗调至预沉积位置
(a) Rough adjustment to pre-deposition position
(b) 精调至预沉积位置
(b) Fine adjustment to pre-deposition position

图 8 探针-沉积物相对位置关系

Fig. 8 Diagram of the relative position between probe and deposit

字图像处理技术, 根据探针边缘轮廓识别拟合中线, 并测量探针中线与衔接点基准线的偏差像素距离 δ , 测得此时的 $\delta = 154$ pixels; 然后, 根据“物-像”距离映射关系式, 得到探针中线与沉积物终点的距离为 $7.94 \mu\text{m}$; 最后, 通过控制基底位移 $7.94 \mu\text{m}$, 使探针在基底上的正投影点与第 1 单元沉积线段终点重合, 从而定位到第 2 沉积线段起始沉积位置, 进行下一线段的沉积操作。通过上述方式, 实现对位精度的控制。

2) 衔接点的膨胀形变量分析

因沉积物的两端沉积点会因探针尖端磨损或弯液面液滴溢出而发生不同程度的膨胀形变, 导致每一沉积单元实际沉积线段的长度会在不同程度上大于理论长度, 因此; 以探针尖端管径作为衔接点的膨胀参照, 进行沉积长度误差分析, 从而实现在相邻两段沉积线段的衔接过程中探针对位的精确调节, 如图 9 所示。

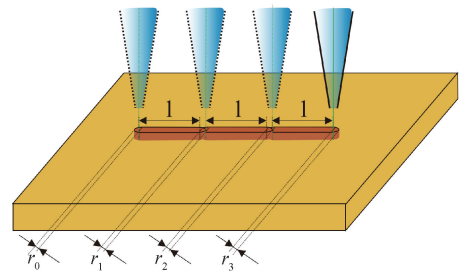


图 9 相邻沉积线段衔接点膨胀形变

Fig. 9 Schematic of the expansion deformation at the junction point of adjacent deposition line segments

在沉积过程中, 基于机器视觉测量反馈实现相邻线段衔接对位精度的控制。进行分段沉积实验, 且将沿着沉积方向的衔接点膨胀半径 (即探针尖端管半径) 分别记为 r_0, r_1, \dots, r_k (假设共沉积 k 段)。则理论沉积线段的长度与上位机输入的沉积长度之间的误差 e 如式 (14) 所示。

$$e = \sum_{i=0}^k r_k \quad (14)$$

鉴于探针尖端管径难以直接测量,且沉积过程中因磨损可能导致管径变化,实验采用沉积线段的线宽近似代替探针尖端管径,分析分段沉积过程中膨胀形变量。在实际沉积过程中,通过对每个衔接点位置的标记来确定衔接位置,获得相应的沉积线宽度。

3) 跨尺度的线段沉积实验与分析

相邻线段衔接沉积实验表明通过相邻沉积物首尾相接的方式可以扩大 MCED 技术的沉积范围,因此提出基于视觉测量的跨尺度连续沉积实验,实现在行程微米级别的

移动平台上打印毫米级规模的沉积物。具体步骤如下:首先,设置单元沉积长度为 $60\ \mu\text{m}$,沉积方向沿 Y 轴方向,位移区间为 $[10\ \mu\text{m}, 70\ \mu\text{m}]$ 。为实现跨尺度的要求,设置沉积单元数量为 11 段,则输入长度为 $660\ \mu\text{m}$;其中每段独立线段沉积之前,控制基底在沉积线段平面向法向方向偏移 $30\ \mu\text{m}$,随后基底上抬与探针接触并沉积一点作为衔接点标记位置。根据跨尺度沉积方法,对每次沉积完成后沉积场景进行自标定实验,获得的 11 个沉积实验中基底位移量 S 和图像像素位移量 P 的对应关系如表 2 所示。

表 2 适用于图像自标定的跨尺度视场内的 S/P 实验数据

Table 2 S/P experimental data in cross-scale field of view suitable for image self-calibration

序号	基底位移量 $S/\mu\text{m}$	第 1 组像素位移量 P/pixel	第 2 组像素位移量 P/pixel	第 3 组像素位移量 P/pixel	第 4 组像素位移量 P/pixel	第 5 组像素位移量 P/pixel	第 6 组像素位移量 P/pixel	第 7 组像素位移量 P/pixel	第 8 组像素位移量 P/pixel	第 9 组像素位移量 P/pixel	第 10 组像素位移量 P/pixel	第 11 组像素位移量 P/pixel
1	5	94	104	104	118	66	104	113	99	61	90	113
2	10	189	198	198	198	170	212	212	203	170	193	184
3	15	287	288	321	297	260	297	311	297	264	311	288
4	20	391	392	401	411	368	387	406	396	354	382	387
5	25	489	481	505	486	458	491	495	505	453	495	505
6	30	584	571	595	595	562	590	609	595	557	585	600
7	35	684	675	713	680	661	680	684	675	618	680	689
8	40	778	783	816	774	750	764	783	793	722	783	774
9	45	873	887	911	863	868	864	892	878	821	878	878
10	50	967	972	996	958	958	982	982	977	934	963	967
11	55	1 065	1 057	1 085	1 062	1 052	1 052	1 076	1 066	1 024	1 071	1 071
12	60	1 157	1 161	1 175	1 170	1 151	1 170	1 161	1 165	1 145	1 180	1 161

利用金相显微镜对 11 段沉积线段按照首尾衔接的方式制造的沉积物拍摄图像并测长。该线段的输入长度为 $660\ \mu\text{m}$,考虑到膨胀形变:则该线段的理论长度为 $710.32\ \mu\text{m}$,由金相显微镜测得该线段长为 $695.94\ \mu\text{m}$,二者误差为 2.1%,具体如图 10 所示。利用高分辨率共聚焦显微镜(Oberhausen 公司,德国)对衔接处进行表面形貌测量,如图 11 所示。

对图 11 中的 4 个衔接处标记点(A、B、C、D)分别对应的沉积线段的投影点(a、b、c、d) $10\ \mu\text{m}$ 范围内沉积线段进行共聚焦显微成像,获取截面曲线及平均粗糙度,结果如图 12 所示。

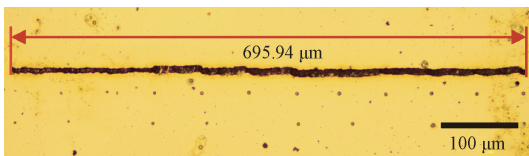
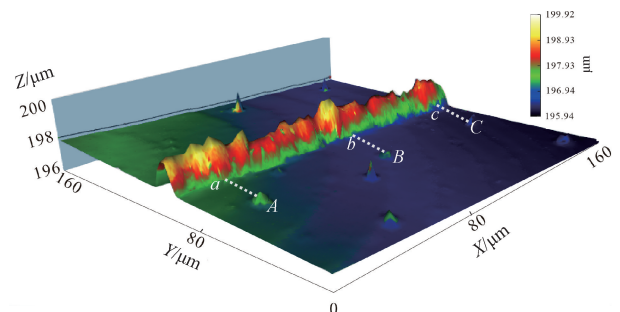


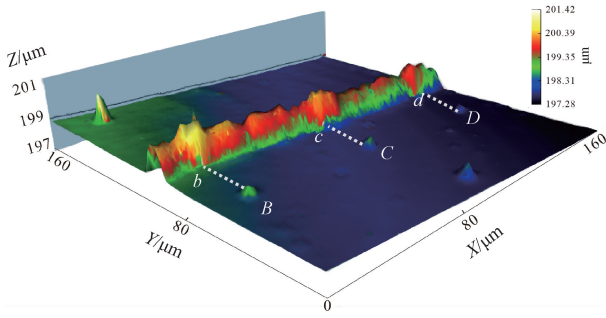
图 10 跨尺度连续沉积的跨尺度沉积线段

Fig. 10 Cross-scale deposition line segments in continuous deposition across scales



(a) a-c段沉积线段共聚焦显微镜图像

(a) Confocal microscopy image of deposition line segments a-c

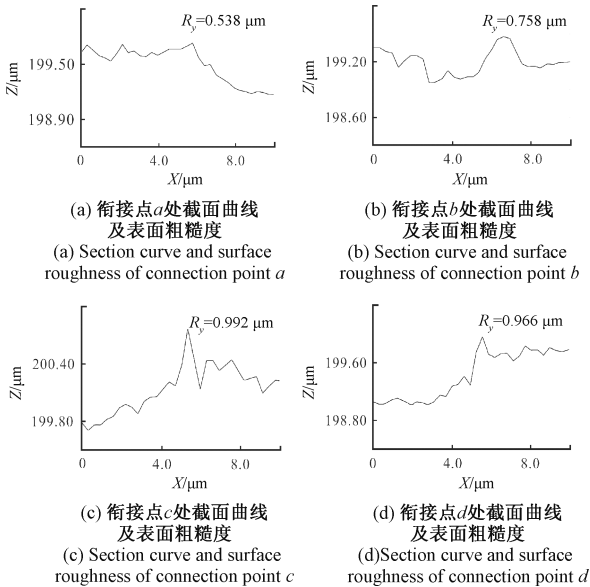


(b) b-d段沉积线段共聚焦显微镜图像

(b) Confocal microscopy image of deposition line segments b-d

图 11 跨尺度连续沉积线段的激光共聚焦显微镜图像

Fig. 11 Laser confocal microscopy images of continuously deposited line segments across scales



(a) 衔接点a处截面曲线及表面粗糙度

(a) Section curve and surface roughness of connection point a

(b) 衔接点b处截面曲线及表面粗糙度

(b) Section curve and surface roughness of connection point b

(c) 衔接点c处截面曲线及表面粗糙度

(c) Section curve and surface roughness of connection point c

(d) 衔接点d处截面曲线及表面粗糙度

(d) Section curve and surface roughness of connection point d

图 12 跨尺度连续沉积线段的衔接点截面曲线及表面粗糙度

Fig. 12 Section curves and surface roughness of connecting points of continuously deposited line segments across scales

根据共聚焦成像结果:跨尺度沉积线段整体表面轮廓最大高度为 $2.947\ \mu\text{m}$, 标准差为 $0.447\ \mu\text{m}$; 各个衔接点附近 $10\ \mu\text{m}$ 的区间内沉积线段平均表面轮廓最大高度为 $1.086\ \mu\text{m}$, 平均标准差为 $0.296\ \mu\text{m}$ 。

由此可见,衔接点附近的沉积线段有着良好的表面均匀性和沉积质量。采用的基于视觉反馈的 MCED 跨尺度连续沉积方法可为整体跨尺度线段的高质量加工提供方法和保障。

4 结 论

本研究提出了一种基于视觉检测的 MCED 跨尺度连续沉积方法。该方法在现有 MCED 设备的基础上搭建探针粗调节与平台细调节相结合的跨尺度连续沉积装置以扩大沉积范围;通过引入显微视觉检测与基于 Adam 算法改进的梯度下降算法建立起平台位移量和像素位移量的对应关系,指导平台控制探针的精确定位,确保相邻沉积线段间的平滑连续衔接。

实验结果表明:该方法通过有限尺度内的分段加工,沉积形成连续的跨尺度沉积线段,将行程为 $80\ \mu\text{m}$ 的 MCED 平台沉积加工范围从微米尺度扩大到毫米尺度,实现了 $0.695\ \text{mm}$ 的线段沉积(长度误差 $<3\%$),且保证了沉积质量,为拓宽 MCED 的加工范围提供了新的加工装置与方法。

需特别指出的是,MCED 微纳加工的视场范围及观察对象尺寸为微米级,其视觉检测易受振动、温度波动及光照不均匀等因素干扰。基于此,本研究已采用基于 Adam 算法优化的梯度下降法抑制异常值的干扰。进一步地,可采用气动隔振平台阻断环境振动传递,确保视觉反馈和沉积过程稳定;通过恒温箱维持沉积最优温度,并抑制因温度波动导致的 CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) 热形变及标定参数漂移,确保检测精度与沉积质量同步提升;选用稳定同轴光源提供均匀光照环境。

参考文献

[1] LEI Y, GAO F P, GUO J J, et al. Microfabrication of conductive copper patterns by meniscus-confined electrodeposition [J]. Integrated Ferroelectrics, 2018, 190(1): 164-172.

[2] WANG X, XU J K, REN W F. Application of optimization algorithm in meniscus-constrained electrodeposition of three-dimensional metal microstructure [J]. Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), 2023: 380-384.

[3] HOSSAIN M I, ZAHID M S, CHOWDHURY M A, et al. Smart Bandage: A device for wound monitoring and targeted treatment [J]. Results in Chemistry, 2024, 7: 101292.

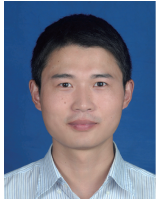
[4] GEORGES A, GWENN V, CLEVY C D J, et al. 3D printed vision-based micro-force sensors for microrobotic applications [J]. Micro-Bio Robot, 2022, 18(1/2): 15-24.

[5] GU W D, JIANG Y J. Electrochemical additive manufacturing of micro/nano functional metals [J]. Materials Today Sustainability, 2024(27): 100793.

- [6] XU J K, REN W F, LIAN ZH X, et al. A review: Development of the maskless localized electrochemical deposition technology [J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2020,110(7/8): 1731-1757.
- [7] MENG X H, WU X M, SHEN X J, et al. Self-adjusting voxelated electrochemical three-dimensional printing of metallic microstructures [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2025,7(1): 015102.
- [8] LEI Y, ZHANG X Y, CHAI X R, et al. Fabrication of shape-controlled copper line arrays by meniscus-confined 3D microprinting on insulating substrates[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2024, 26(20): 2400725.
- [9] SIDDIQUI H, SINGH N, NAIDU P, et al. Emerging electrochemical additive manufacturing technology for advanced materials: Structures and applications [J]. *Materials Today*, 2023,70: 161-192.
- [10] CHEN Y L, WANG Y T, WANG Y Y, et al. Meniscus-confined electrodeposition of metallic microstructures with in-process monitoring of surface qualities[J]. *Precision Engineering*, 2021,70: 34-43.
- [11] YAN D F, WANG Y H, LIU J Y, et al. Electrochemical 3D printing of superhydrophobic pillars with conical, cylindrical, and inverted conical shapes [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021,625: 126869.
- [12] KRIEG M, FLÄSCHNER G, ALSTEENS D, et al. Atomic force microscopy-based mechanobiology [J]. *Nature Reviews Physics*, 2019,1(1): 41-57.
- [13] HU J, YU M F. Meniscus-confined three-dimensional electrodeposition for direct writing of wire bonds [J]. *Science*, 2010,329: 313-316.
- [14] LEI Y, ZHANG X Y, XU D D, et al. Dynamic “scanning-mode” meniscus confined electrodepositing and micropatterning of individually addressable ultraconductive copper line arrays [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2018, 9(9): 2380-2387.
- [15] ZHANG X Y, ZHANG Y F, LI Y Y, et al. Bipolar electrochemistry regulation for dynamic meniscus confined electrodeposition of copper micro-structures by a double-anode system [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019,166(13): 676-682.
- [16] 李俊忠, 廖晓波, 许世林, 等. 仿生纤毛微流量传感器及其制备方法[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(16): 1968-1977.
- LI J ZH, LIAO X B, XU SH L, et al. Bionic cilium microflow sensor and preparation method thereof [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(16): 1968-1977.
- [17] WANG Y T, XIONG X, JU B F, et al. Voxelated meniscus-confined electrodeposition of 3D metallic microstructures [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022,174: 103850.
- [18] 廖晓波, 庄健, 邓亚楼, 等. 一种基于扫描探针的微纳结构原位在线读写方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(5): 148-156.
- LIAO X B, ZHUANG J, DENG Y L, et al. An in-situ online reading and writing method for micro-nano structures based on scanning probes[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(5): 148-156.
- [19] LIAO X B, ZHUANG J, DENG Y L, et al. A closed-loop constant deposition current control method based on MCED circuit model[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045118.
- [20] HU G C, BI J L, LI W, et al. Micro-nano scaled copper nanowire: Deposited with meniscus-confined electrodeposition[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2025,189: 109272.
- [21] 陈晓辉, 张智豪, 杨鑫, 等. 基于线结构光单平面标定的3D成像方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 179-187.
- CHEN X H, ZHANG ZH H, YANG X, et al. Research on 3D imaging method based on single plane calibration of line structured light[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 179-187.
- [22] 郝旭娥, 沈大伟, 张艳兵. 膛压测试仪模拟环境因子校准的数据拟合方法研究[J]. *电子测量技术*, 2023, 46(2): 87-92.
- HAO X E, SHEN D W, ZHANG Y B. Study on data fitting method of simulation environment factor calibration for chamber pressure tester[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2023, 46(2): 87-92.
- [23] 蔡玉芳, 王涵, 李琦, 等. 联合自然梯度和 AdamW 算法的 RSF 图像分割模型[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(3): 261-270.
- CAI Y F, WANG H, LI Q, et al. RSF image segmentation model based on natural gradient and AdamW algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(3): 261-270.
- [24] 郭庆瑞, 章政, 黄卫华, 等. 基于 Huber 鲁棒估计的改进互补滤波姿态解算算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(3): 157-165.
- GUO Q R, ZHANG ZH, HUANG W H, et al. Improved

complementary filtering attitude resolution algorithm based on Huber robust estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 157-165.

作者简介



邢强, 2007年于南京航空航天大学获得学士学位, 2010年于南京航空航天大学获得硕士学位, 2014年于南京航空航天大学获得博士学位。现为南通大学机械工程学院副教授。主要研究方向为仿生视觉感知与智能系统研究。

E-mail: meexq@ntu.edu.cn

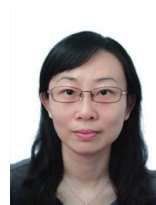
Xing Qiang received his B.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2007, received his M.Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010, and received his Ph.D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. Now he is an associate professor at the School of Mechanical Engineering, Nantong University. His main research interests include bionic visual perception and intelligent system research.



庄健, 1996年于西安交通大学获得学士学位, 1999年于西安交通大学获得硕士学位, 2002年于西安交通大学获得博士学位。现为西安交通大学机械工程学院教授。主要研究方向为基于离子电导微纳成像原理与应用、复杂机电系统监测与控制技术应用与研究、ECMO等急救设备制造与控制技术应用与研究。

E-mail: zhuangjian@mail.xjtu.edu.cn

Zhuang Jian received his B.Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1996, received his M.Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1999, and received his Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2002. Now he is a professor at the School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University. His research interests include the principle and application of micro-nano imaging based on ion conductance, application and research of complex electromechanical system monitoring and control technology, ECMO and other emergency equipment manufacturing and control technology application and research.



徐海黎 (通信作者), 1995年于南京理工大学获得学士学位, 2002年南京理工大学获得学士学位, 2010年于西安交通大学获得博士学位, 现为南通大学机械工程学院教授。主要研究方向为嵌入式系统开发、人工智能算法、机电系统的智能控制与信息处理。

处理。

E-mail: xu.hl@ntu.edu.cn

Xu Haili (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 1995, received her M.Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2002, and received her Ph.D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2010. Now she is a professor at the School of Mechanical Engineering, Nantong University. Her research interests include the development of embedded systems, artificial intelligence algorithm, intelligent control and information processing of electromechanical systems.