

基于机器学习的过焦扫描显微测量方法研究

李冠楠 石俊凯 陈晓梅 高超 姜行健 崔成君 朱强 霍树春 周维虎

Through-focus scanning optical microscopy measurement based on machine learning

LI Guan-nan, SHI Jun-kai, CHEN Xiao-mei, GAO Chao, JIANG Xing-jian, CUI Cheng-jun, ZHU Qiang, HUO Shu-chun, ZHOU Wei-hu

引用本文:

李冠楠, 石俊凯, 陈晓梅, 高超, 姜行健, 崔成君, 朱强, 霍树春, 周维虎. 基于机器学习的过焦扫描显微测量方法研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(4): 703–711. doi: 10.37188/CO.2022-0009

LI Guan-nan, SHI Jun-kai, CHEN Xiao-mei, GAO Chao, JIANG Xing-jian, CUI Cheng-jun, ZHU Qiang, HUO Shu-chun, ZHOU Wei-hu. Through-focus scanning optical microscopy measurement based on machine learning[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 703-711. doi: 10.37188/CO.2022-0009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于结构字典学习的图像复原方法](#)

Image restoration approach based on structure dictionary learning

中国光学. 2017, 10(2): 207 <https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0207>

[采用五棱镜扫描法检测大口径平面镜的面形](#)

Surface shape measurement of large flat mirrors using a scanning pentaprism method

中国光学. 2019, 12(4): 920 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0920>

[光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正](#)

Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system

中国光学. 2018, 11(1): 123 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0123>

[微分干涉差共焦显微膜层微结构缺陷探测系统](#)

Detection system of multilayer coating microstructure defects based on differential interference contrast confocal microscopy

中国光学. 2018, 11(2): 255 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0255>

[双色荧光辐射差分超分辨显微系统研究](#)

Dual-color fluorescence emission difference super-resolution microscopy

中国光学. 2018, 11(3): 329 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0329>

[激光扫描匹配方法研究综述](#)

A survey of laser scan matching methods

中国光学. 2018, 11(6): 914 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0914>

文章编号 2095-1531(2022)04-0703-09

基于机器学习的过焦扫描显微测量方法研究

李冠楠¹, 石俊凯^{1*}, 陈晓梅¹, 高超^{1,2}, 姜行健¹, 崔成君¹, 朱强^{1,2,3}, 霍树春¹, 周维虎^{1,2}

(1. 中国科学院微电子研究所, 光电技术研发中心, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中钞印刷技术研究院有限公司, 北京 100070)

摘要: 微电子机械系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 具有小型化、高集成度的特点, 随着 MEMS 结构深宽比的不断增大, 对 MEMS 结构尺寸的测量提出更高的要求。过焦扫描光学显微技术 (Through-focus Scanning Optical Microscopy, TSOM) 是一种高精度无损的光学测量方法, 通过采集一组离焦图并沿扫描方向截取 TSOM 图像, 利用库匹配的方法从中提取待测结构的尺寸信息。该方法对于纳米级结构测量有着极高的灵敏度, 然而对于微米级特征尺寸存在建库困难且易受环境干扰的问题。本文针对微米级 MEMS 沟槽结构, 在传统的光学显微镜基础上进行改造, 建立了 TSOM 光学系统采集离焦图像, 利用图像特征提取方法生成 TSOM 特征向量集, 结合机器学习的方法建立不同槽宽尺寸的回归预测模型, 对微米级 MEMS 槽宽尺寸实现纳米级测量精度, 单点重复性测量 2 μm 槽宽的相对标准差 (Relative Standard Deviation, RSD) 在 1% 左右, 10 μm 和 30 μm 槽宽 RSD 分别低于 0.2% 和 0.35%, 结果表明该方法对于微米级 MEMS 沟槽测量具有极高的应用前景。

关键词: MEMS; 机器学习; 过焦扫描光学显微法; 微纳测量

中图分类号: TP181; P207+.1; TH744

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0009

Through-focus scanning optical microscopy measurement based on machine learning

LI Guan-nan¹, SHI Jun-kai^{1*}, CHEN Xiao-mei¹, GAO Chao^{1,2}, JIANG Xing-jian¹, CUI Cheng-jun¹,

ZHU Qiang^{1,2,3}, HUO Shu-chun¹, ZHOU Wei-hu^{1,2}

(1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences,

Optoelectronic R & D Center, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. China Banknote Printing Technology Research Institute Co., LTD., Beijing 100070, China)

* Corresponding author, E-mail: shijunkai@ime.ac.cn

Abstract: Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) have the characteristics of miniaturization and high

收稿日期: 2022-01-10; 修订日期: 2022-03-03

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2019YFB2005603); 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金 (No. TH20-01); 国家自然科学基金 (No. 51905528); 精密测试及仪器国家重点实验室开放基金 (No. pilab2102) Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2019YFB2005603); the National Key Laboratory of Precision Testing Techniques and Instrument (Tsinghua University) (No. TH20-01); the National Natural Science Foundation of China (No. 51905528); State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments (Tianjin University) (No. pilab2102)

integration. As the high aspect ratio of MEMS increases, the measurement of MEMS feature size faces greater challenges. Through-focus Scanning Optical Microscopy (TSOM) technology is a high-precision and nondestructive optical measurement method. TSOM images are captured along the scanning direction by collecting a set of defocused images and the size information of the structure is extracted from TSOM images by the library matching method. This method is highly sensitive and suitable for nano-scale structure measurements, but it is difficult to build a database for micron-scale features and is susceptible to environmental interference. In this paper, a TSOM optical system is established and traditional optical microscopy is used to collect a set of defocused images. The TSOM's feature vector set is obtained by the image feature extraction method and is combined with machine learning to establish MEMS groove regression prediction models with different feature sizes. The results show that the above method can achieve nano-scale high precision measurement of a MEMS groove width and the single point repeatability measurement has great performance. The Relative Standard Deviation (RSD) of 2 μm width is about 1%, and the RSD of 10 μm and 30 μm width are respectively lower than 0.2% and 0.35%. This method has very high application prospects for micron MEMS groove structure measurement.

Key words: MEMS; machine learning; TSOM; micro-nano measuring

1 引言

微电子机械系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS), 是指采用微机械加工技术, 由微传感器、执行器、微型机构以及信号处理和电路构成的微型系统, 具有小型化、智能化、多功能、高集成度等特点^[1]。MEMS 以微电子技术为基础, 涉及光学、化学、物理学、机械工程、材料工程等多学科交叉^[2-3], 其制造工艺中广泛采用高深宽比的沟槽结构。随着沟槽深度的增加和沟槽宽度的变窄, 对 MEMS 器件制造质量及良率提出了更加严峻的考验, 因此需要对 MEMS 沟槽的特征尺寸进行更高精度的测量与分析^[4]。目前 MEMS 沟槽特征尺寸测量主要采用原子力显微镜^[5]、表面形貌测量仪^[6]、扫描电子显微镜等方法^[7], 但几种方法存在样品制备复杂、测量耗时较长、成本高等缺点。其中电镜对测试样品的导电性、热稳定性等要求较高, 限制了其应用范围。

过焦扫描光学显微 (Through-focus Scanning Optical Microscopy, TSOM) 技术是 Ravi Attota 于 2008 年提出的一种非接触、快速、高精度的光学测量方法^[8]。该方法使用传统光学显微镜采集一组离焦图像并生成 TSOM 图用于提取三维几何信息。TSOM 方法对于微纳尺度的测量具有纳米

级分辨率, 可满足制造领域对高通量、低成本特征尺寸测量的要求, 具有良好的应用前景^[9-13]。TSOM 通常采用库匹配的方法, 将显微镜采集生成的 TSOM 图与光学仿真模拟建立的 TSOM 特征库进行匹配^[14-15], 从而得到对应结构的参数信息。由于库匹配法仿真条件过于理想化, 而在实际测量过程中, 实验环境易受到环境噪声及位移噪声的干扰, 因此仿真结果与实验结果匹配度较差, 此外, 对于微米级的 MEMS 结构, 仿真计算量大, 耗时长^[16-18], 因此, 鲜少有 TSOM 方法涉及微米级结构尺寸测量的研究。

为了拓宽 TSOM 方法的测量范围, 本文利用实验室现有的光学显微镜搭建了过焦扫描光学显微系统, 采用方向梯度直方图 (Histogram of Oriented Gradients, HOG) 特征提取^[19-21] 与支持向量回归 (Support Vector Regression, SVR)^[22-25] 组合的机器学习方法对采集的图像直接建立 TSOM 图像特征集, 并针对微米级 MEMS 沟槽结构建立回归模型进行训练, 省去了大量的仿真时间, 并实现了不同槽深的 MEMS 高精度槽宽尺寸预测。预测模型拟合效果与实测值相近 (2 μm 和 10 μm 的决定系数 R^2 值均大于 0.99, 30 μm 槽宽 R^2 值略低, 分别为 0.9344、0.9239), 模型具有较高的预测精度和较低的预测误差 (2 μm 和 10 μm 槽宽均方根误差值 (Root Mean Square Error, RMSE) 和平均绝对误差值 (Mean Absolute Error, MAE) 均小

于 $0.03\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ 槽宽 RMSE 值为 $0.084\ \mu\text{m}$ 、 $0.0966\ \mu\text{m}$, MAE 值为 $0.1839\ \mu\text{m}$ 、 $0.1614\ \mu\text{m}$, 单点重复性测量具有较高的精密度 ($2\ \mu\text{m}$ 槽宽 RSD 值分别 1.019% 、 1.539% , $10\ \mu\text{m}$ 槽宽 RSD 值分别为 0.144% 、 0.191% , $30\ \mu\text{m}$ 槽宽 RSD 值分别为 0.227% 、 0.351%), 结果表明机器学习结合 TSOM 技术可以较为准确地预测 MEMS 沟槽的槽宽尺寸。

2 过焦扫描光学显微技术原理

在基于光学显微镜的传统计量方法中, 通常只保留焦平面图像, 焦平面以外的光强信息被作为无用信息剔除。通过焦平面图像提取微纳结构的特征尺寸, 测量精度会受到显微镜光学分辨率和焦深的限制。实际上焦平面以外的光强分布信息在一定程度上也能反映微纳结构的几何特征, 因此可以使用一组不同位置的离焦图像构成 TSOM 图来代替单一的焦平面图像, 能够有效提

高测量精度。

图 1(彩图见期刊电子版)为过焦扫描光学显微法生成 TSOM 图的流程图, 图 2(a)为以光学显微镜(上海光密仪器, GMM-370)为基础构建的 TSOM 实验装置。首先如图 1(a)所示, 将待测样品置于 Z 向高精度压电位移台上(芯明天, P11.Z300K), 沿 Z 向扫描并通过焦点, 在样品相对于焦点不同位置处使用高灵敏度相机(Thorlabs, DCU224M, 像素为 $1280\ \text{pixel}\times 1024\ \text{pixel}$, 像素尺寸为 $4.65\ \mu\text{m}\times 4.65\ \mu\text{m}$)获取一组样品图像(图 1(b)), 将每幅图像按扫描位置排列, 创建出如图 1(c)所示的包含光强信息的三维空间。对三维空间进行垂直剖面处理生成反映光强分布随样品位置变化趋势的 TSOM 图像。图 2(b)、2(c)、2(d)(彩图见期刊电子版)是槽宽分别为 $2\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 的沟槽样品生成的 TSOM 伪彩图, 可以看到不同宽度的沟槽样品生成的 TSOM 图存在明显差异。

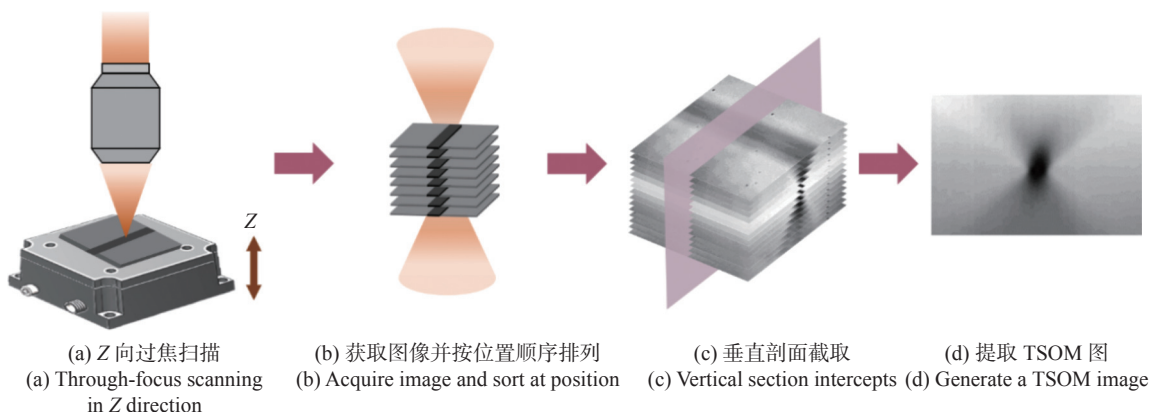


图 1 TSOM 流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the TSOM process

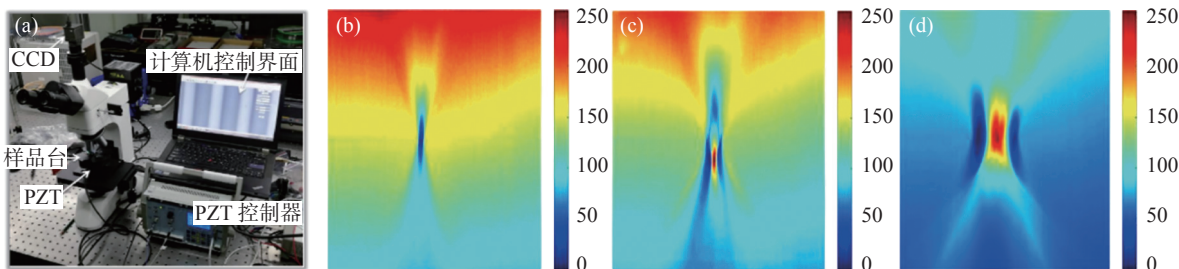


图 2 (a)TSOM 实验装置;(b)、(c)、(d)槽宽 $2\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ 的 TSOM 伪彩图, 其中横向对应像素点, 纵向对应离焦扫描位置

Fig. 2 (a) TSOM experimental setup; TSOM pseudo color images with widths of (b) $2\ \mu\text{m}$, (c) $10\ \mu\text{m}$, and (d) $30\ \mu\text{m}$. The lateral axis represents pixels and the vertical axis represents through-focus positions

3 机器学习模型

本文采用方向梯度直方图配合支持向量回归 (HOG-SVR) 的机器学习模型进行 MEMS 槽宽尺寸预测, 具体流程如图 3 所示。设定压电位移台扫描参数后采集图像并提取 TSOM 图, 经过图像处理建立 TSOM 图像集。通过 HOG 分别对训练图集和测试图集进行特征提取, 形成训练特征数据集和测试特征数据集, 将训练集作为 SVR 的输入, 由此建立回归预测模型, 测试集用于评估模型性能。若模型评估结果较差, 则改变扫描参数或优化 SVR 参数重新进行训练以最终确定最优模型。

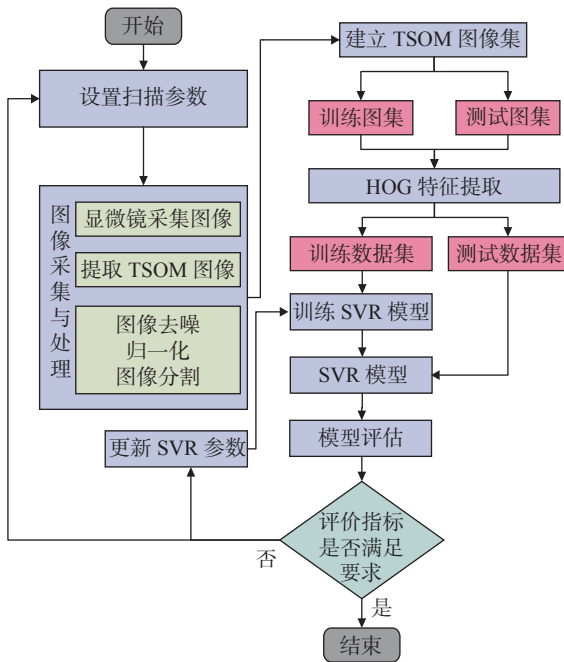


图 3 基于 HOG-SVR 的 MEMS 槽宽预测流程图

Fig. 3 MEMS widths prediction flowchart based on HOG-SVR

3.1 方向梯度直方图

HOG 作为一种常用的特征描述子, 通过计算和统计特定方向的图像局部的梯度直方图, 来提取目标的边缘信息^[19-21]。其基本原理如图 4 (彩图见期刊电子版) 所示, 图像分割为单元矩形区域, 计算每个矩形区域中每个像素点的梯度方向和梯度幅值并统计为直方图。若干个单元矩形区域整合成块, 进行块内归一化处理, 再以一定步长沿横向和纵向遍历图像矩阵, 组合成代表方向梯度的特征向量。

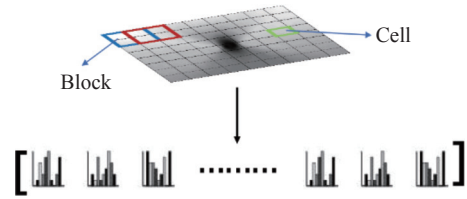


图 4 HOG 特征提取

Fig. 4 HOG feature extraction

HOG 特征提取首先在图像经过灰度处理与 Gamma 归一化后, 使用 $[-1, 0, -1]$ 和 $[-1, 0, 1]^T$ 算子分别计算水平方向和垂直方向的梯度值 G_x 、 G_y , 根据式 (1)、式 (2) 计算像素点 (x, y) 的梯度幅值 $G(x, y)$ 和边缘方向 θ 组成特征描述符。

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (1)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \quad (2)$$

3.2 支持向量回归

支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 是一种广泛应用于统计分类及回归分析的监督统计学习算法。SVR 是支持向量机的一个重要分支^[22-25]。如图 5 所示, 与一般的线性回归方法不同, SVR 引入了容忍偏差 ε , 在预测值与目标值 y_i 差距大于 ε 时计算损失, 通过最小化该损失来确定超平面权重 ω 及偏差 b 。

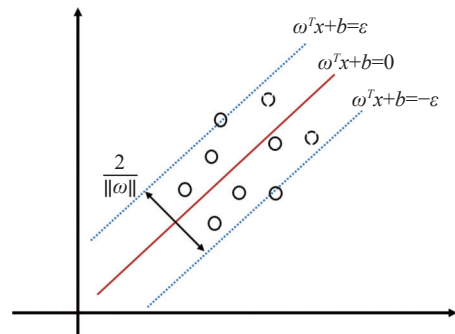


图 5 SVR 原理图

Fig. 5 Schematic diagram of SVR

引入松弛变量 ξ_i^+ 、 ξ_i^- 和惩罚系数 C , SVR 模型可视为解决以下问题:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b, \xi_i^+, \xi_i^-} & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i^+ + \xi_i^-) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} f(x) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^- \\ y_i - f(x) \leq \varepsilon + \xi_i^+ \\ \xi_i^+ \geq 0, \xi_i^- \geq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

求解约束二次规划的最优化问题可引入拉格朗日乘子 α_i^+ , α_i^- , 并选取合适的核函数 $K(x_p, x_j)$, 将样本映射到高维空间以解决非线性回归问题, 最终得到的回归表达式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (\alpha_i^+ - \alpha_i^-) K(x, x_i) + b \quad (4)$$

3.3 数据集建立

本文通过建立 MEMS 单体沟槽的 TSOM 图像数据集进行槽宽尺寸的回归预测。为验证 TSOM 方法预测 MEMS 槽宽的可行性, 本文涵盖 MEMS 沟槽不同深宽比的槽宽范围, 设计槽宽分别为 2 μm (1.6 μm 、1.8 μm 、2.0 μm 、2.2 μm 、2.4 μm) 范围, 10 μm (9.6 μm 、9.8 μm 、10.0 μm 、10.2 μm 、10.4 μm) 范围, 以及 30 μm (29.6 μm 、29.8 μm 、30.0 μm 、30.2 μm 、30.4 μm) 范围, 由于 Bosch 工艺存在制造误差, 电镜实际槽宽尺寸如表 1 所示, 其中 2、4、6 号样品分别剔除了一个槽宽值相同的沟槽。机器学习数据集标签根据电镜

表 1 样品参数

Tab. 1 Sample parameters

样品编号	设计槽宽/ μm	槽深/ μm	深宽比	电镜实测槽宽/ μm
1	2	24	12:1	2.21/2.52/2.61/2.86/3.06
2	2	200	100:1	1.79/1.98/2.19/2.58
3	10	34	3.4:1	10.5/10.7/10.8/11.1/11.3
4	10	106	10.6:1	10.8/11/11.3/11.7
5	30	38	1.3:1	30.6/30.9/31/31.2/31.5
6	30	236	7.9:1	31.4/31.8/32.1/33.1

实测值进行标定。

训练集采集流程如图 6 (彩图见期刊电子版) 所示, 每条单体沟槽在靠近沟槽中间位置选取多个区域 (蓝色方框) 范围, 随后在每个区域中提取不同截面 (红色虚线) 位置的强度值生成 TSOM 图像, 对应每一槽宽尺寸, 产生多幅 TSOM 图并利用 HOG 方法进行特征提取作为最终机器学习模型的数据集。

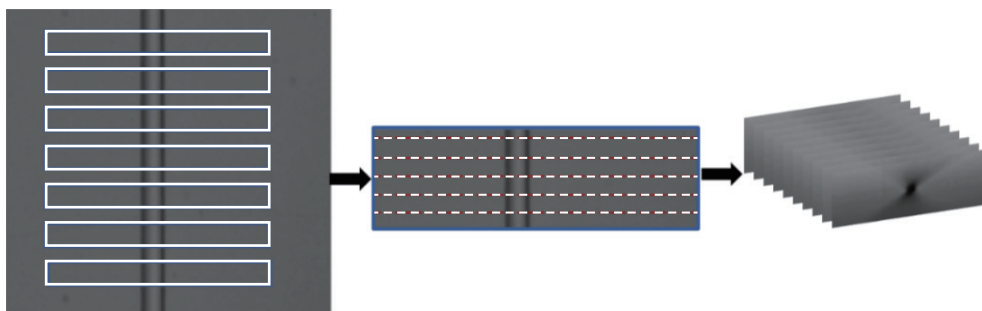


图 6 数据集获取流程

Fig. 6 Processes of dataset acquirement

如表 1 所示共有 6 组训练尺寸, 每组槽宽数据样本个数为 4200, 其中, 训练样本数量为 4000, 测试样本为 200, 用于评价模型的准确性。

4 实验结果与讨论

利用上述方法处理得到的训练集建立支持向量回归模型并进行训练, 测试集用于测试模型的性能, 建立表 1 所示的 6 组不同深宽比的槽宽预测模型, 预测结果如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。其中, 每组图的图左黑色实线代表实际测得的槽宽尺寸, 红色虚线代表模型预测的槽宽尺寸,

图右的黑色实线表示每个样本实际测量值与预测值的误差值。从 6 组结果可以看出, 对于不同槽宽、深宽比的沟槽结构, 电镜测量值曲线与预测值曲线接近重合, 各组预测结果的误差值相对槽宽值均保持在较低水平。以上结果表明该训练模型能够准确地预测槽宽尺寸。

为了准确评价各组模型的预测性能, 引入 RMSE、MAE、决定系数 R^2 作为评价模型预测能力的指标, 其计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - f(x_i))^2} \quad (5)$$

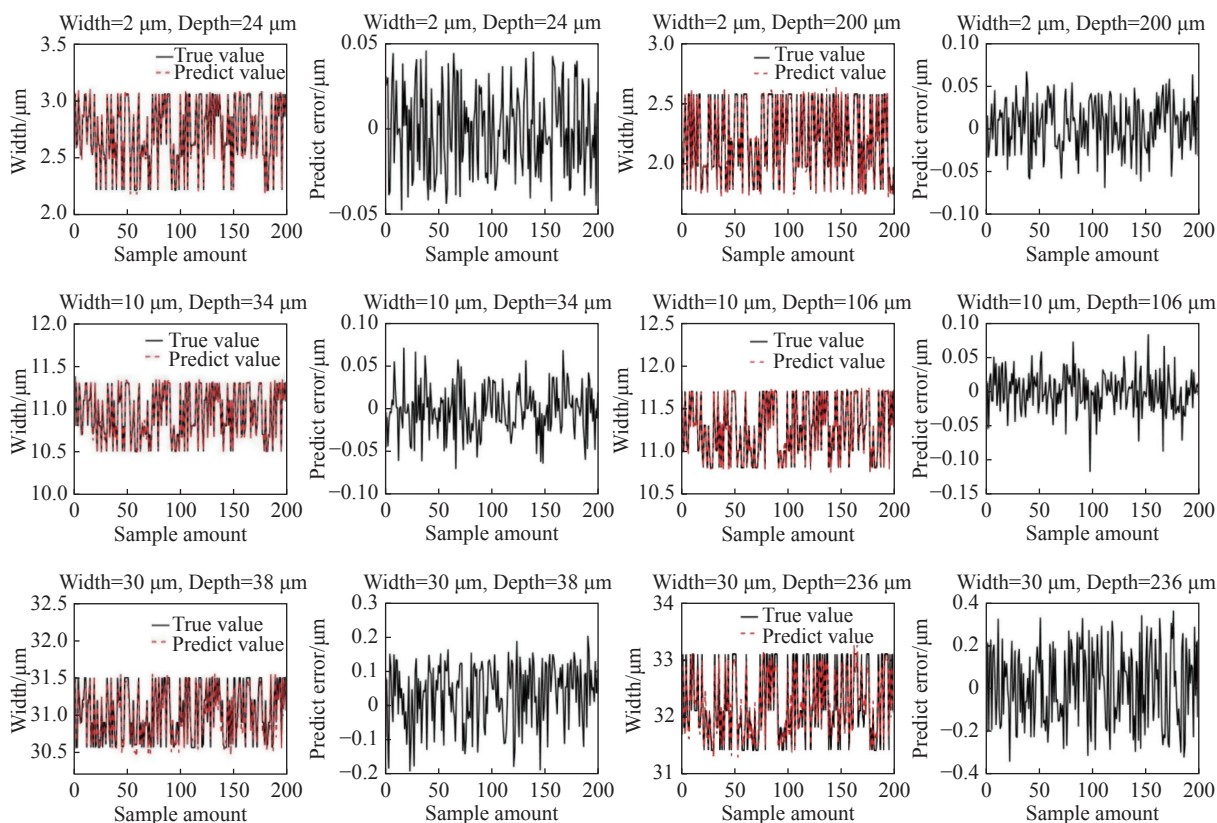


图 7 不同槽宽和槽深的 MEMS 沟槽基于 SVR 的预测结果

Fig. 7 Prediction results of MEMS groove with different widths and depths based on SVR

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y_i - f(x_i)|, \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - f(x_i))^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

其中, y_i 表示第 i 个样本的电镜测量值, $f(x_i)$ 表示第 i 个样本的模型预测值, \bar{y} 表示所有预测结果的平均值。RMSE 和 MAE 反映了实际槽宽值与预测槽宽值的偏差, 其数值越小, 说明模型预测精度越高, R^2 取值在 0 到 1 之间, 数值越接近 1 表明回归模型拟合效果越好。图 8 为 6 组样品的评价结果, 6 组数据中, 2 μm 沟槽(编号 1, 2)和 10 μm 沟槽(编号 3, 4)的 R^2 值均大于 0.99, 依次为 0.9932, 0.9912, 0.9908, 0.9929, 30 μm 沟槽(编号 5, 6) R^2 值也在 0.9 以上, 分别为 0.9344 和 0.9239, 说明模型具有极高的拟合精度。30 μm 沟槽 R^2 值略低, 这是由于大尺寸沟槽需要更大的纵向扫描范围才能获取完整的 TSOM 图, 目前本实验装置中的压电位移台扫描范围有限, 因此影响了 30 μm

沟槽的预测精度。2 μm 和 10 μm 沟槽的 RMSE 值和 MAE 值均在 0.03 μm 内, 同样受限于压电位移台的扫描范围, 30 μm 沟槽的 RMSE 值(0.0840 μm , 0.1839 μm)和 MAE 值(0.0966 μm , 0.1614 μm)略有增加。此外, 对于相同的槽宽, 随着槽深的增加, RMSE、MAE 增加而 R^2 值减小, 这是由于沟槽越深, 探测器越难以收集到沟槽底部反射光场的信息, 从而增大了模型的预测误差。

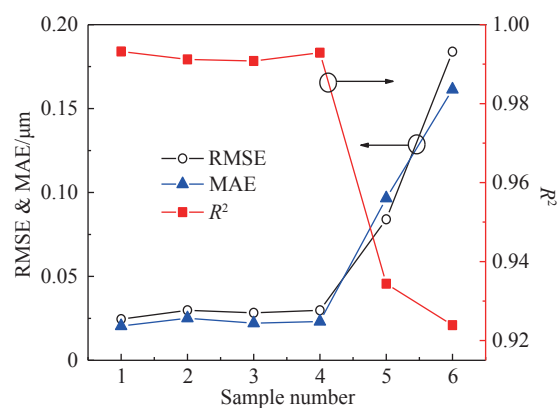


图 8 模型预测性能评价指标

Fig. 8 Evaluation indicators of prediction performance of the model

为了验证 TSOM 测量系统的重复性, 从表 1 每组样品中各选取一种尺寸的沟槽, 在靠近沟槽中间位置处选取一点重复测量 16 次, 并使用训练好的回归模型输出预测结果。使用 RSD 作为重复性测量精密程度的评价指标, RSD 值越小说明模型的测量重复性越好, 精密度越高, 其计算公式为:

$$RSD = \frac{S(x)}{\bar{x}} \times 100\% \quad (8)$$

$S(x)$ 为标准差 (Standard Deviation, STD), 其计算公式为:

$$STD = S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

其中, n 为重复测量次数, x_i 为模型第 i 次测量的预测结果, \bar{x} 为 n 次预测结果的平均值。

图 9 为 $n=16$ 次的单点重复性测量结果, 可以看出, 1 号至 5 号样品的测量误差均低于 100 nm, 6 号样品的误差略高, 约为 230 nm。2 μm 和 10 μm 沟槽的标准差均低于 30 nm, 随着沟槽宽度增加到 30 μm (5 号、6 号), 标准差也分别增加到 70 nm 和 114 nm。由于线宽较小, 2 μm 沟槽 (1 号、2 号) 的 RSD 分别为 1% 和 1.5%, 而 10 μm 和 30 μm 沟槽的 RSD 分别低于 0.2% 和 0.35%。以上结果说明该模型单点重复性预测表现良好, 具有较高的精密度。对于不同的槽宽值, 预测结果的标准差和相对标准差随着槽深的增加均有小幅度增加, 这说明沟槽深度会影响预测结果的重

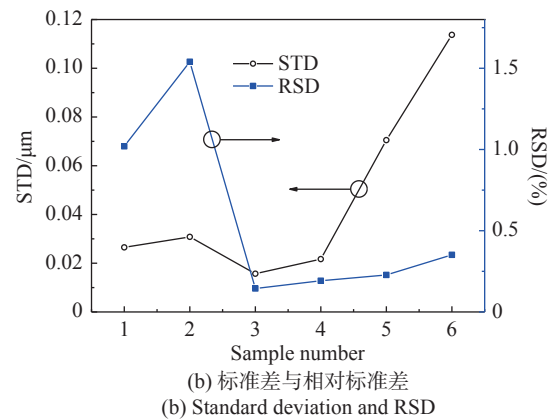
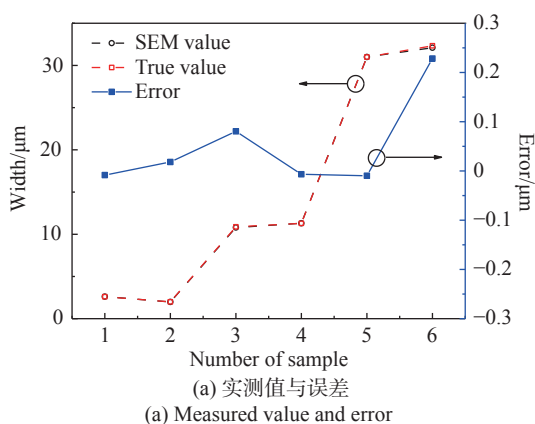


图 9 模型单点重复性预测结果

Fig. 9 Prediction results of single point repeatability of the mode

复性。综上, 该机器学习模型整体的预测性能较好, 模型对槽宽尺寸的预测准确性和有效性得到了验证。

5 结 论

不同于电子扫描显微镜等方法, 本文使用 TSOM 法实现了不同深宽比 MEMS 沟槽结构槽宽的测量。利用传统的光学显微镜采集一组离焦图像生成 TSOM 图, 结合机器学习回归模型预测 MEMS 沟槽槽宽, 验证槽宽尺寸为 2~30 μm , 深宽比为 1.3:1~100:1, 基本覆盖工艺线上微米级 MEMS 单体沟槽器件的结构尺寸。根据结果可知, 模型预测曲线与实际测量值拟合较好, 评价指标 RMSE 和 MAE 值极小, R^2 均在 0.9 以上, 单点重复性预测性能稳定, 有较高的精密度, 回归模型预测能力整体表现优秀。因此, 针对 MEMS 微米级沟槽结构, 本文提出的机器学习结合 TSOM 法能够对槽宽实现高精度的测量, 并且该方法对样品无损害, 测量时间短, 在 MEMS 计量领域具有广阔的应用前景。

致 谢

感谢中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室的资助。

参考文献:

[1] 秦雷, 谢晓瑛, 李君龙. MEMS 技术发展现状及未来发展趋势[J]. 现代防御技术, 2017, 45(4): 1-5, 23.

- QIN L, XIE X Y, LI J L. Development status and future development trend of MEMS technology[J]. *Modern Defense Technology*, 2017, 45(4): 1-5,23. (in Chinese)
- [2] 穆继亮, 郭茂香, 刘冰, 等. 高深宽比硅基微纳结构制造方法及其应用[J]. *半导体技术*, 2013, 38(5): 321-327.
MU J L, GUO M X, LIU B, *et al.*. Fabrication methods and applications of silicon micro/nanometer structures with high aspect ratio[J]. *Semiconductor Technology*, 2013, 38(5): 321-327. (in Chinese)
- [3] 吴俊杰, 李源. 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2252-2259.
WU J J, LI Y. Three-dimensional coordinate measurement of microstructures based on Nano measuring machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2252-2259. (in Chinese)
- [4] 张冬至, 胡国清. 微机电系统关键技术及其研究进展[J]. *压电与声光*, 2010, 32(3): 513-520.
ZHANG D ZH, HU G Q. Key technologies of micro-electromechanical system and its recent progress[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(3): 513-520. (in Chinese)
- [5] OGURA T. A high contrast method of unstained biological samples under a thin carbon film by scanning electron microscopy[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2008, 377(1): 79-84.
- [6] 冯斌, 王建华. 表面形貌光学法测量技术[J]. *计量与测试技术*, 2005, 32(6): 4-6.
FENG B, WANG J H. The optical means used in measuring surface microtopography[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2005, 32(6): 4-6. (in Chinese)
- [7] SCHAPER A, RÖBLE M, FORMANEK H, *et al.*. Complementary visualization of mitotic barley chromatin by field-emission scanning electron microscopy and scanning force microscopy[J]. *Journal of Structural Biology*, 2000, 129(1): 17-29.
- [8] ATTOTA R, SILVER R, BARNES B M. Optical through-focus technique that differentiates small changes in line width, line height, and sidewall angle for CD, overlay, and defect metrology applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6922: 69220E.
- [9] ATTOTA R. TSOM method for nanoelectronics dimensional metrology[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2011, 1395(1): 57-63.
- [10] ATTOTA R, DIXSON R G, VLADÁR A E. Through-focus scanning optical microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8036: 803610.
- [11] VARTANIAN V, ATTOTA R, PARK H, *et al.*. TSV reveal height and dimension metrology by the TSOM method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8681: 86812F.
- [12] ATTOTA R. Noise analysis for through-focus scanning optical microscopy[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 745-748.
- [13] ATTOTA R K, KANG H, SCOTT K, *et al.*. Nondestructive shape process monitoring of three-dimensional, high-aspect-ratio targets using through-focus scanning optical microscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(12): 125007.
- [14] ATTOTA R. Through-focus or volumetric type of optical imaging methods: a review[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(7): 070901.
- [15] LEE J H, PARK J H, JEONG D, *et al.*. Tip/tilt-compensated through-focus scanning optical microscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10023: 100230P.
- [16] QU Y F, HAO J L, PENG R J. Machine-learning models for analyzing TSOM images of nanostructures[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33978-33998.
- [17] PENG R J, JIANG J, REN J J, *et al.*. Statistical character analysis for through-focus scanning optical microscopy in double floating variables measurement applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106560.
- [18] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
GE D B, YAN Y B. *Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. (in Chinese)
- [19] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]. *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2005: 886-893.
- [20] 张瑞琰, 姜秀杰, 安军社, 等. 面向光学遥感目标的全局上下文检测模型设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1302-1313.
ZHANG R Y, JIANG X J, AN J SH, *et al.*. Design of global-contextual detection model for optical remote sensing targets[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1302-1313. (in Chinese)
- [21] 耿庆田, 赵浩宇, 于繁华, 等. 基于改进HOG特征提取的车型识别算法[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 174-181.

- GENG Q T, ZHAO H Y, YU F H, *et al.*. Vehicle type recognition algorithm based on improved HOG feature[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 174-181. (in Chinese)
- [22] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.
- [23] 闫国华, 朱永生. 支持向量机回归的参数选择方法[J]. *计算机工程*, 2009, 35(14): 218-220.
YAN G H, ZHU Y SH. Parameters selection method for support vector machine regression[J]. *Computer Engineering*, 2009, 35(14): 218-220. (in Chinese)
- [24] 于连栋, 常雅琪, 赵会宁, 等. 基于支持向量回归机的机器人定位精度提高[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2646-2654.
YU L D, CHANG Y Q, ZHAO H N, *et al.*. Method for improving positioning accuracy of robot based on support vector regression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2646-2654. (in Chinese)
- [25] 邹永宁, 张智斌, 李琦, 等. 基于Hessian矩阵和支持向量机的CT图像裂纹分割[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(10): 2517-2527.
ZOU Y N, ZHANG ZH B, LI Q, *et al.*. Crack detection and segmentation in CT images using Hessian matrix and support vector machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(10): 2517-2527. (in Chinese)

作者简介:



李冠楠(1994—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士, 助理工程师, 2017年于哈尔滨工业大学获得光电信息科学与工程专业学士学位, 2020年于中国科学院大学获得光学工程硕士学位, 主要从事微纳测量和光学检测方面的研究。

E-mail: liguannan@ime.ac.cn



石俊凯(1986—), 男, 天津宁河人, 博士, 副研究员, 2015年于天津大学精仪学院获得博士学位, 主要从事光学精密测量、微纳检测及飞秒激光方面的研究。E-mail: shijunkai@ime.ac.cn