

文章编号 1004-924X(2026)07-1057-11

## 大深径比微孔几何参数视觉检测

田安宇<sup>1</sup>, 刘 研<sup>1</sup>, 葛 洲<sup>1,2</sup>, 江宇辰<sup>1</sup>, 于瀛洁<sup>1</sup>, 夏新星<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444;  
2. 上海宝山区上大通用智能机器人研究院, 上海 200444)

**摘要:** 针对传统激光共聚焦显微镜成本较高, 传统机器视觉方法受限于孔底照明不均、成像模糊及特征提取困难等问题, 开发了一种基于同轴光源照明的机器视觉自动测量系统。该系统由工业相机、配备同轴光源的远心镜头及三轴精密位移台构成, 采用混合对焦与特征识别算法作为核心测量策略。实验结果表明, 系统运行稳定可靠, 性能优良, 对 7 种不同深径比(3.17~7.87)的样品进行测量, 孔径测量重复性为 0.56~4.58  $\mu\text{m}$ , 深度测量重复性最小可达 0.80  $\mu\text{m}$ , 变异系数最低仅为 0.09%, 测量均值与标称值的偏差普遍小于 1%。该系统实现了大深径比微孔几何参数的高效、高精度测量, 为精密制造中的微结构质量控制提供了一种低成本技术方案。

**关键词:** 微孔测量; 深径比; 自动对焦; Tenengrad 梯度函数; 天津法

**中图分类号:** TH741; TP391 **文献标识码:** A

**doi:** 10.37188/OPE.20263407.1057 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263407.1057

## Visual detection for geometric parameters of high aspect ratio micro-holes

TIAN Anyu<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>1</sup>, GE Zhou<sup>1,2</sup>, JIANG Yuchen<sup>1</sup>, YU Yingjie<sup>1</sup>, XIA Xinxing<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University,  
Shanghai 200444, China;

2. SHU General Intelligent Robotics Research Institute, Baoshan District, Shanghai 200444, China)

\* Corresponding author, E-mail: xiaxinxing@shu.edu.cn

**Abstract:** To address the high equipment cost of conventional laser confocal microscopy and the limitations of traditional machine vision methods caused by uneven well-bottom illumination, image blurring, and difficulty in feature extraction, an automated machine vision measurement system based on coaxial illumination is proposed. The system comprises an industrial camera, a telecentric lens integrated with a coaxial light source, and a three-axis precision displacement stage. A hybrid algorithm combining autofocus and feature recognition is employed as the core measurement strategy. Experimental results demonstrate stable and reliable system performance. For seven types of samples with aspect ratios ranging from 3.17 to 7.87, excellent measurement performance was achieved. The repeatability of aperture measurements

收稿日期: 2026-01-05; 修订日期: 2026-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 62575167); 教育部产学研合作协同育人项目(No. 241204575194133); 上海市“科技创新行动计划”专项项目(No. 24511106502); 上海大学联合大作业资助项目(No. LH2025013)

ranges from 0.56  $\mu\text{m}$  to 4.58  $\mu\text{m}$ , while the repeatability of depth measurements reaches as low as 0.80  $\mu\text{m}$ , with a minimum coefficient of variation of 0.09%. The deviation between the average measured values and nominal values is generally less than 1%. The proposed system enables efficient and high-precision measurement of geometric parameters of high-aspect-ratio micro-holes, providing a cost-effective solution for quality control in precision microstructure manufacturing.

**Key words:** micropore measurement; aspect ratio; autofocus; Tenengrad gradient function; OTSU

## 1 引言

在微电子、微纳光学、集成光学及微流控技术等前沿科技领域,常常需要在金属、半导体与玻璃等不同材料上加工具有大深径比的微孔。这些微孔结构是实现特定功能的关键,可作为喷墨打印头、航空发动机散热孔和生物芯片微通道等,且发挥着不可或缺的作用<sup>[1]</sup>。然而,微孔的加工过程复杂,易产生各种加工误差,例如孔的加工深度、直径、孔轴的垂直度、不同深度小孔直径的一致性、孔壁的表面光滑度以及孔的不圆度等<sup>[1]</sup>。因此,对这些微孔几何参数进行精确、高效的测量,是评估和改进加工工艺、确保器件性能与质量的重要前提。

传统的大深径比微孔测量方法主要分为接触式和非接触式两类。其中,接触式测量(如探针法)虽然精度较高,但存在速度慢、易损伤样品表面,且探针难以进入微米级小孔等局限性<sup>[2]</sup>。非接触式测量方法中,激光共聚焦显微镜等高端设备成本高昂,而传统的机器视觉方法在测量大深径比微孔时面临着巨大挑战<sup>[3]</sup>,其主要难点在于:当光学系统对准孔口上表面时,由于井壁的遮挡效应,光线难以有效照射到孔底,导致孔底成像亮度极低、对比度差。特别是对于激光加工的微孔,其孔底残留的环形加工纹理等特征信号微弱<sup>[1]</sup>,难以通过常规的图像处理算法有效识别和定位,从而无法精确测量深度。针对上述技术问题,本文提出了一种基于混合对焦策略与频域特征增强的自动测量系统,实现了大深径比微孔几何参数的高效、高精度测量,为精密制造中的微结构质量控制提供了一种低成本、非接触、自动化的技术方案。

## 2 测量原理

深径比 (Aspect Ratio, AR) 指的是微孔的两个独立参数深度和直径的比值,故深径比的测量独立成深度测量与孔径测量两部分。深径比,由已测得的深度  $H$  和有效孔径  $d$  计算得出:

$$R_A = \frac{H}{d}. \quad (1)$$

本系统测量微孔深径比的原理如图 1 所示,主要分为深度测量和孔径测量两部分。其深度测量的核心原理是通过光学系统沿光轴 ( $Z$  轴) 方向精确定位两个关键的特征物理平面——样品的上表面以及微孔的底部。微孔的绝对深度  $H$

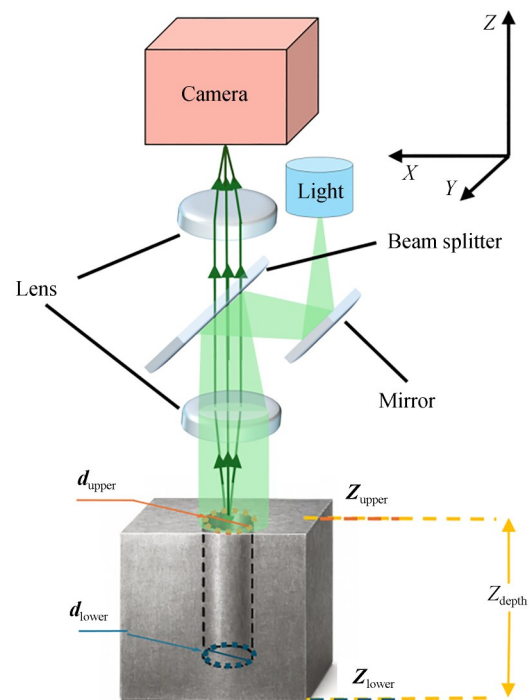


图 1 深径比测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aspect ratio measurement

即为这两个平面坐标的差值:

$$H = Z_{\text{depth}} = |Z_{\text{lower}} - Z_{\text{upper}}|, \quad (2)$$

其中: $Z_{\text{upper}}$ 和 $Z_{\text{lower}}$ 为样品上表面焦平面和孔底焦平面在测量坐标系 $Z$ 轴上的值。

在实际测量中,对这两个平面位置的确定存在不确定性。一个关键的物理限制来源于光学系统的景深(Depth of Field, DOF)。景深的存在意味着自动对焦算法所依赖的清晰度评价曲线峰值并非是一个理想的狄拉克 $\delta$ 函数,而是一个具有一定宽度的峰形。这种峰形的展宽引入了定位不确定性,是深度测量不确定度 $\sigma_H$ 的主要来源之一<sup>[4]</sup>。

在孔径测量方面,激光加工等工艺可能导致微孔并非理想的完美圆柱体,孔型的锥度调控一直不可避免,其孔径可能随深度变化而变化<sup>[5-6]</sup>。考虑到微孔加工存在一定锥度,本系统采取在孔的入口与孔底平面分别进行测量的方法。首先,在样品上表面处,测量得到上表面孔径 $d_{\text{upper}}$ ;随后,在孔底处,测量得到孔底孔径 $d_{\text{lower}}$ ,最终将用于计算深径比的有效孔径 $d$ 定义为这两个测量值的算术平均值,即:

$$d = \frac{d_{\text{upper}} + d_{\text{lower}}}{2}. \quad (3)$$

此方法有效地平滑了由于孔壁锥度或加工不规则性引起的局部直径变化,提供了对孔径更稳健的评估。

由于深径比是由深度 $H$ 与孔径 $d$ 的测量结果计算得到,因此其准确性不仅依赖于 $H$ 和 $d$ 的测量精度,还会受到两者误差传播的影响。为此,有必要对其灵敏度进行分析。

深度 $H$ 和孔径 $d$ 的测量是独立过程,其测量不确定度(标准差)分别为 $\delta H$ 和 $\delta d$ 。对 $R_A$ 分别求关于 $H$ 和 $d$ 的偏导数,可得其对各项测量绝对误差的灵敏度系数为:

$$S_d = \left| \frac{\partial R_A}{\partial d} \right| = \frac{H}{d^2} = \frac{H}{d} \left| \frac{\partial R_A}{\partial H} \right| = R_A \cdot S_H. \quad (4)$$

由式(4)可知,深径比对孔径测量误差的敏感度显著高于对深度测量的敏感度,其绝对误差灵敏度系数与深径比成正比。这意味着在实际测量中,孔径的不确定性会被放大并直接影响深径比的准确性。因此,相较于深度测量,提高孔径测量(包括 $d_{\text{upper}}$ 和 $d_{\text{lower}}$ )的精度是确保深径比可靠性的重要任务。

### 3 实现方法

研究设计并搭建了一套高精度硬件平台,开发了自动化软件 workflow 与多阶段混合算法于一体的综合测量系统。系统在硬件上集成了工业相机,配备同轴光源的远心镜头以及三轴精密位移台,搭建了一个稳定的光机电一体化平台。在核心算法方面,系统将 Tenengrad 梯度函数作为上表面的对焦评价函数,并开发了针对微孔孔底低照度条件下的特异性对焦评价函数,使用了大津法(OTSU)阈值分割和距离变换(Euclidean Distance Transform, EDT)进行上下表面孔径测量。

#### 3.1 硬件平台与自动化工作流程

本系统是一个高精密光机电一体化平台,如图2所示。其核心组件包括:一台 MV-CS060-10GC 高分辨率工业相机、一颗 Moritex SOD-10X 远心显微镜头、一台 KZ0830 型电动 $Z$ 轴位移台、一个 $XY$ 二维手动位移台以及一套亮度连续可调的同轴LED光源。其中,远心镜头的选用是保证测量准确性的物理前提,它通过消除透视误差确保了 $Z$ 轴扫描全程放大倍率的恒定,同轴LED光源以合适亮度照亮微孔表面与孔底,确保视觉测量程序的正常工作。 $XY$ 二维手动位移台用于微孔的初始定位,操作员依据工业相机提供的实时成像画面调整 $XY$ 二维手动位移台,将微孔粗略移至视场中央。高精度的电动 $Z$ 轴位移

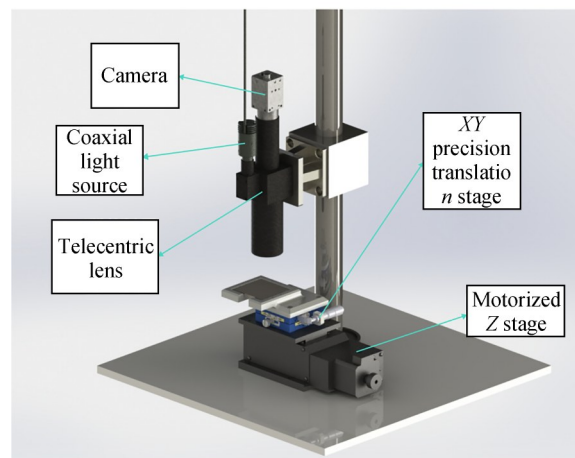


图2 自动化大深径比微孔测量系统

Fig. 2 Schematic diagram of automatic micro-holes with large depth-diameter ratio measurement system

台则为自动对焦扫描提供了亚微米级的运动能力。

如图 3 所示,在此硬件平台上,系统通过一套自动化工作流程,高效精准地确定微孔上下表面,并获取用于计算深径比的上下微孔孔径及  $Z$  轴坐标,最后计算得出微孔深径比。具体而言,系统先经初始化后由操作员引导完成样品三轴粗定位,再令系统应用 Tenengrad 梯度函数辅助上表面精密对焦,以确定上表面精确位置  $Z_{\text{upper}}$ 。在使用 OTSU 确定微孔感兴趣区域 (ROI) 后,系统采用 EDT 模块进行上表面孔径测量获取参数  $d_{\text{upper}}$ ,接下来,针对 CLAHE 增强并环形滤波后的孔内图像执行孔底搜索,即使用霍夫圆变换作为孔底的特异性对焦评价函

数。当检测到的圆数量最多时,即确定孔底位置  $Z_{\text{lower}}$ ,在孔底处再次进行孔径测量得到参数  $d_{\text{lower}}$ ,最后,系统通过数据融合计算平均孔径、孔深以及深径比。

### 3.2 软件实现原理

#### 3.2.1 相机标定

在初始化阶段,系统会先导入先前几何标定的参数,以修正由物理镜头引入的系统性误差。本系统先前通过拍摄多姿态的棋盘格图像,精确求解出描述相机光学特性的内参矩阵和畸变系数。这些参数被固化于测量程序中,用于对采集的每一帧图进行实时几何校正,从而确保所有后续计算的度量准确性。

#### 3.2.2 上表面测量

上表面测量流程始于自动对焦。系统通过  $Z$  轴扫描,并对每一帧校正过的图像应用 Tenengrad 梯度函数作为清晰度评价指标<sup>[7-8]</sup>。在实际应用中,考虑到系统控制  $Z$  轴扫描时升降台运动产生的不可避免的轻微振动,每次控制升降台移动后会预留一定的稳定时间,在该时间段内,程序以最大帧率调用该函数计算实时清晰度,并取平均值作为该深度的清晰度评价指标,以减少振动带来的计算误差。Tenengrad 梯度函数通过计算图像梯度幅值的标准差来量化图像的锐利程度,其评价价值  $F_{\text{tenengrad}}$  定义为:

$$F_{\text{tenengrad}} = \text{std}(S(x, y)) = \text{std}(\sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2}), \quad (5)$$

其中:  $G_x$  和  $G_y$  为每一帧图像经 Sobel 算子卷积后的梯度分量。清晰度曲线的峰值点所对应的  $Z$  轴坐标即被确定为上表面焦平面  $Z_{\text{upper}}$ 。

在获得最清晰的上表面图像后,系统采用 OTSU 法进行孔洞分割<sup>[9-11]</sup>。该算法通过寻找能最大化前景(孔洞)与背景(样品表面)类间方差  $\sigma_B^2(k)$  的灰度阈值  $k^*$ , 实现自适应、可重复的分割。其优化目标为:

$$k^* = \arg \max_{0 \leq k < L} \sigma_B^2(k) = \arg \max_{0 \leq k < L} \left\{ \omega_0(k)(\mu_0(k) - \mu_T)^2 + \omega_1(k)(\mu_1(k) - \mu_T)^2 \right\}, \quad (6)$$

其中:  $k$  代表当前正在被评估的灰度阈值,其取值是从 0 到  $L-1$ ,  $L$  代表图像中所有可能的灰度级数;  $\omega_0(k)$  和  $\omega_1(k)$  分别是由阈值  $k$  分割出的背景和前景像素所占的比例,即图像中灰度值小于  $k$

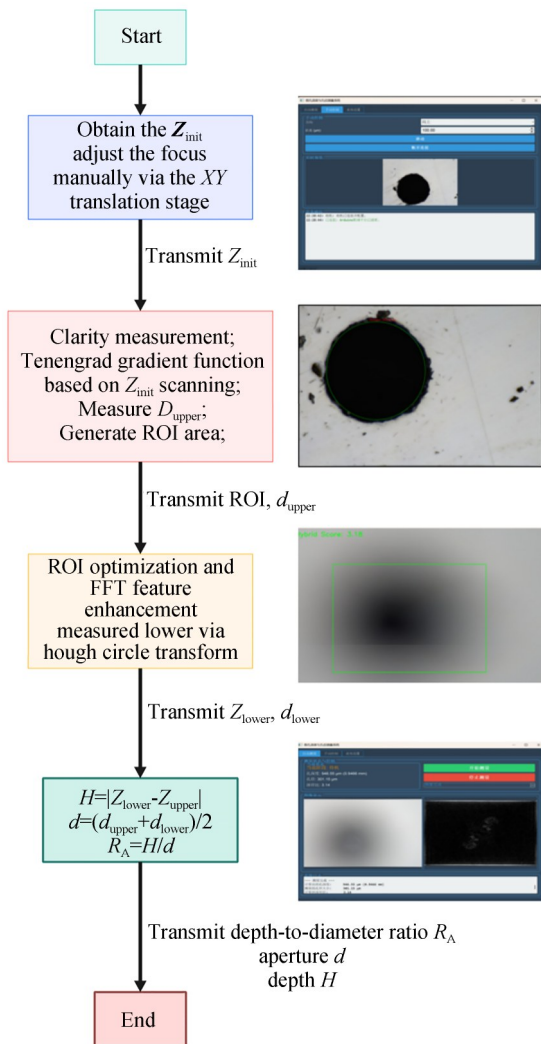


图 3 自动化测量流程

Fig. 3 Automated measurement process

或大于  $k$  的像素数量占总像素数量的比例;  $\mu_0(k)$ ,  $\mu_1(k)$  以及  $\mu_T$  分别是背景像素, 前景像素平均灰度值以及总平均灰度值。

分割后的二值图像随后被送入距离变换 (Euclidean Distance Transform, EDT) 模块进行孔径计算<sup>[12]</sup>。EDT 将二值图像转换为距离图, 图中每个孔洞内部像素  $p(x, y)$  的 EDT 值为其到最近边界点  $(x_b, y_b)$  的欧几里得距离。

$$D = \text{EDT}(p) = \min_{(x_b, y_b) \in B} \sqrt{(x - x_b)^2 + (y - y_b)^2}. \quad (7)$$

对于近似圆形的孔洞, 距离图中的最大值  $D_{\max}$  即为最大内切圆的半径。因此, 上表面孔径  $d_{\text{upper}}$  可精确计算为:

$$d_{\text{upper}} = 2 \times D_{\max} \times F_s, \quad (8)$$

其中:  $F_s$  是由具体相机像元尺寸和镜头放大倍率的比值确定的像素-物理尺寸转换系数。

### 3.2.3 孔底测量

孔底的精确定位是深径比测量的最大难点。由于大深径比结构导致照明光路受限, 孔底图像往往存在低亮度、低对比度及高频噪声等典型退化特征。然而, 激光加工工艺会在孔底残留特有的周期性环形纹理<sup>[13]</sup>。针对这一特征, 本研究设计了“频域滤波-空域检测”的级联算法, 具体流程如图 4 所示。

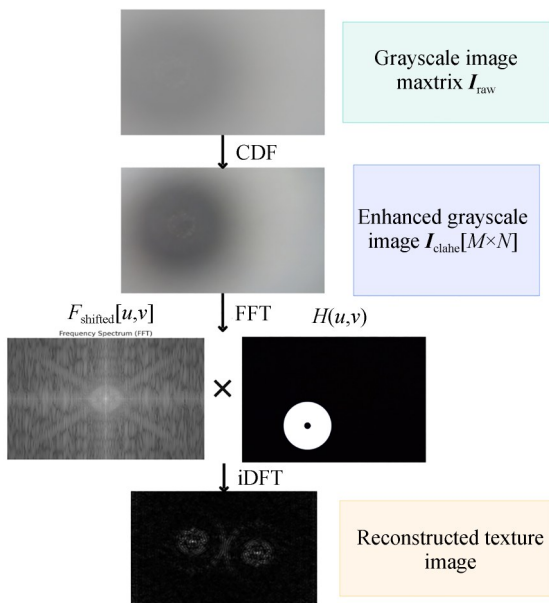


图 4 图像增强处理流程的可视化

Fig. 4 Visualization of image enhancing pipeline

首先, 程序应用限制对比度的自适应直方图均衡化 (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) 算法对获取的灰度图像矩阵  $I_{\text{raw}}$  进行增强, 生成一个分块大小设置为  $16 \times 16$  像素的增强对比度后的灰度图像  $I_{\text{clahe}}$ <sup>[14-15]</sup>。CLAHE 通过在图像局部上进行带裁剪阈值的直方图均衡, 并结合双线性插值平滑过渡, 能够在有效增强图像微弱孔底纹理的同时抑制噪声放大。

为了从增强后的图像中进一步提纯由激光加工产生的周期性环形纹理<sup>[13]</sup>, 系统采用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 带通滤波技术<sup>[16]</sup>。图像  $I_{\text{clahe}}$  被变换至频率域  $F_{\text{shifted}}(u, v)$ , 其中, 周期性结构表现为集中的能量分布。为了分离这一特征, 设计了一个与目标纹理频率近似的环形带通滤波器  $H(u, v)$ :

$$H(u, v) = \begin{cases} 1, & R_{\min} \leq D(u, v) \leq R_{\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (9)$$

其中:  $D(u, v)$  为频率域中点  $(u, v)$  到中心的距离,  $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  分别为低通截断半径和高通截断半径。  $R_{\min}$  主要用于抑制图像中的直流分量及由深径比引起的背景亮度不均, 例如滤除图 4 中  $I_{\text{clahe}}$  分图中非微孔部分的灰白色背景和低频噪声;  $R_{\max}$  主要用于滤除由工业相机感光元件产生的随机噪声及孔壁杂乱反射引起的高频干扰, 使重构后的纹理边缘更加平滑, 从而提升霍夫圆变换 (Hough Circle Transform) 的定位稳定性。  $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  的具体数值源于系统对部分非测试用样品孔底在实验之前的频谱能量的平均径向分布分析。通过这样的滤波器系统能精确分离出目标特征, 提取出反映位置特征的周期性纹理。最后, 系统通过逆傅里叶变换 (iDFT) 将滤波之后的保留特定空间频率的频谱图复原为一个仅含孔底类环形特征的重建图像。

在完成类环形特征图像的重建后, 系统引入霍夫圆变换构建面向孔底区域的特异性对焦评价函数<sup>[17]</sup>。该方法的理论依据在于: 当聚焦平面逼近孔底时, 环形结构的几何完整性显著提升, 表现为轮廓的圆度达到局部最优, 从而使得霍夫圆变换检测出的候选圆实例数量趋于最大。系统通过扫描不同  $Z$  轴层面上的图像响应, 将霍夫圆变换检测结果中圆形目标数量达到峰值所对应

的  $Z$  坐标,判定为孔底的精确焦平面位置,记为  $Z_{\text{lower}}$ 。考虑到在景深范围内可能存在检测到的圆数量相同的情况,系统在镜头景深较浅(仅  $17\ \mu\text{m}$ )的条件下,取几个焦平面的中间位置作为  $Z_{\text{lower}}$ 。在确定  $Z_{\text{lower}}$ 后,系统再次调用 Otsu 分割与 EDT 算法,计算出孔底孔径  $d_{\text{lower}}$ 。由  $Z_{\text{lower}}$ 和  $Z_{\text{upper}}$ 的差值绝对值确定孔深  $Z$ , $d_{\text{upper}}$ 和  $d_{\text{lower}}$ 的平均值确定孔径  $d$ ,由式(3)得出深径比的测量结果。

## 4 测量实验与结果分析

为全面、客观地验证本文所设计自动化微孔测量系统的可行性、准确性与稳定性,搭建了实体实验平台,并对一系列具有代表性的微孔样品进行了系统的测量实验。

### 4.1 实验平台与样品

如图 5 所示,实验平台严格依照 3.1 节所述硬件方案搭建。为最大程度减小环境振动对微米级测量的干扰,整套装置被固定于一个带有隔振功能的光学平台上。

在所有测量开始前,成像系统均按照 3.2 节所述的张正友标定法进行了精确标定,所得到的内参矩阵与畸变系数被应用于采集的每一帧图

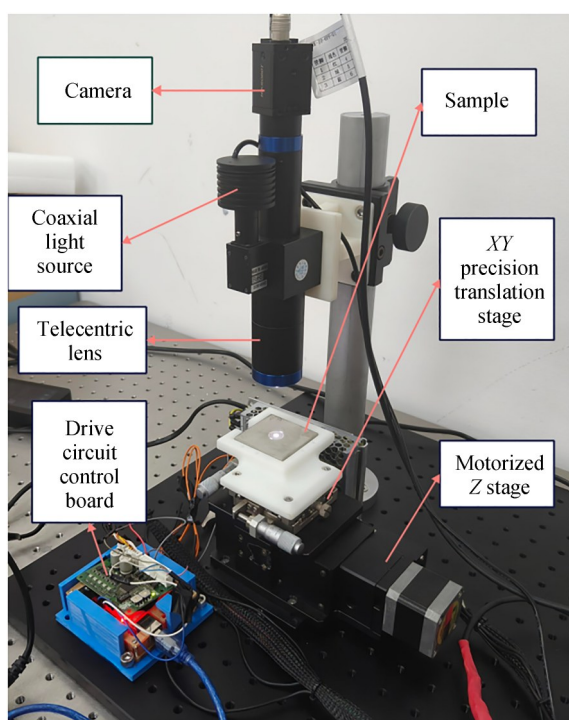


图 5 微孔样品测量系统

Fig. 5 Micro-hole sample measurement system

像,以确保后续所有计算的度量准确性。

实验样品为 7 块经由激光加工的 304 不锈钢板(尺寸为  $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ )。每块板中心上均布有一个特定规格的微孔,如图 6 所示。

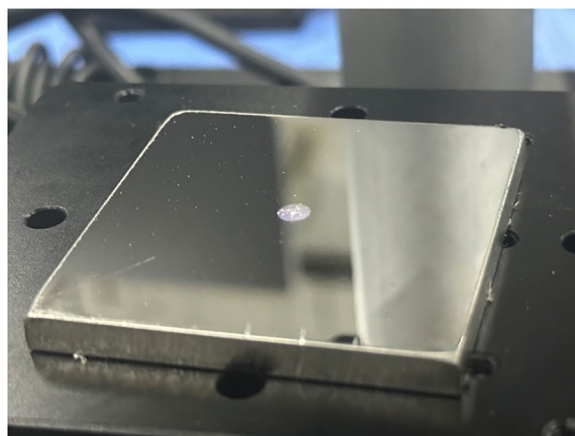


图 6 测量样品(#1)

Fig. 6 Measurement Sample(#1)

这些样品的规格旨在覆盖不同的孔径、深度及深径比范围,从而能够全面地检验本测量系统在不同工况下的性能与稳定性。激光加工工艺在微孔加工领域较为普遍,其特点是在孔底留下了微弱的环形纹理,这正是本系统所采用的基于 FFT 的深度测量算法所针对的关键特征。为了定量评估系统的测量准确性,样品的标称设计参数作为参考真值,具体规格如表 1 所示。

表 1 测量样品

Tab. 1 Measurement sample

样品编号	标称孔径/ $\mu\text{m}$	标称深度/ $\mu\text{m}$	标称深径比
#1	300.00	960	3.20
#2	258.05	850	3.29
#3	150.00	525	3.50
#4	280.00	1 064	3.80
#5	220.00	990	4.50
#6	250.00	1 500	6.00
#7	222.36	1 748	7.92

为验证系统的普适性,选取不同厂家的样品开展对比测试。其中,样品#2和#7来自与其余样品不同的生产厂家,其加工工艺同为激光加

工,但样品上/下表面加工状态与其他样品差异显著,其各项数据标称值经专业检测机构标定。其余测量样品虽来自同一生产厂家,不同深径比的微孔上下表面也出现了一定的形貌差异,其均为批量生产的产品,各项数据标称值由厂商测量标定。图 7 给出了各测量样品上表面与底面的实拍图。

在实验开始之前,为了客观确定孔底纹理特征在频域中的有效频带范围,避免主观选择带来的偏差,随机抽选了 6 个非本次测试所用的同批次样品,对其孔底图像进行了频谱能量的平均径向分布分析。具体步骤如下:首先,对每幅图像进行二维傅里叶变换并计算功率谱,再按频率半径(距频谱中心的距离)对功率谱进行径向平均,得到每幅图像的径向功率谱;然后,将 6 幅图像的

径向功率谱取平均,获得具有统计代表性的平均径向功率谱,如图 8 所示。由于自然图像的功率谱通常随频率增加呈  $1/f$  衰减趋势,为了突出与周期性纹理相关的局部能量波动,对平均径向功率谱取对数,并用三次多项式拟合去除背景趋势,得到表征纹理特征的能量残差信号。在该残差信号中,纹理特征表现为一个显著的峰值。通过峰值检测确定该峰值的位置(即中心频率),进而以峰值高度的一半为阈值,分别向低频侧和高频侧搜索,当残差信号首次低于该阈值时,对应的频率半径即被确定为频带的内半径  $R_{min}=31$  和外半径  $R_{max}=51$ 。这一方法基于半峰全宽的概念,能够自动、稳健地提取纹理能量集中的主要频带范围,所得结果将作为后续图像滤波及特征提取的关键参数依据。

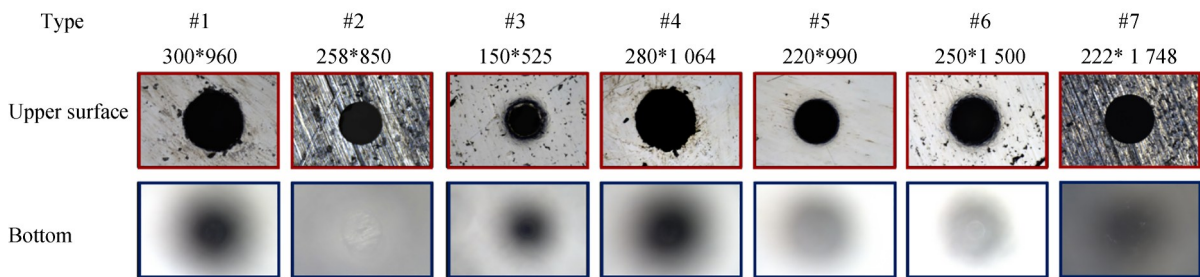


图 7 测量样品微孔上下表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of upper and lower sides of measured micro-hole samples

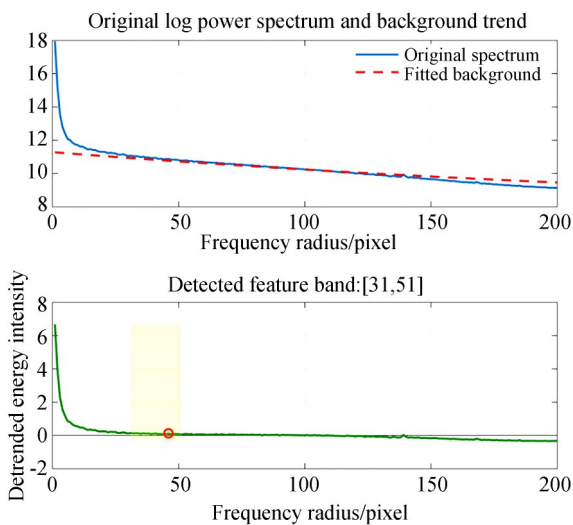


图 8 基于径向功率谱的孔底纹理频带选择结果

Fig. 8 Frequency band selection results for borehole texture based on radial power spectrum

#### 4.2 实验流程

针对每一样品微孔的单个完整测量,严格遵循 3.1 节所述的自动化流程,在控制在 25 °C 的实验室内进行,排除测量样品热胀冷缩产生形变的影响。流程始于操作者手动放置样品并进行粗略对准。启动自动测量程序后,系统接管并自动执行以下核心步骤:首先,系统利用 Tenengrad 梯度函数,通过 Z 轴扫描精确定位样品上表面焦点;接着,在清晰的上表面图像上,采用 OTSU 阈值分割和距离变换算法计算孔径,并自动生成后续处理所需的 ROI。随后,在 ROI 内,系统通过“粗-精”结合的扫描策略,利用自研图像增强算法并由 Hough 圆变换检测到的圆数量作为对焦评价指标;最终,精确定位孔底的 Z 轴坐标,完成深度测量。

为评估系统的综合性能,对 7 种型号的微孔

样品,每一种都重复执行完整测量流程5次,共计获得35组独立的孔径测量数据和35组深度测量数据。

### 4.3 测量结果与可靠性分析

在完成所有35次测量实验后,对采集到的数据进行了统计分析,旨在评估本测量系统的重复性、精度和稳定性。所有测量数据的统计分析结果汇总于表2与图9。

数据分析显示,本系统具备高水平的测量重复性与稳定性。首先,在重复性方面,系统的标准差是核心评价指标。对于孔径测量,所有7个型号样品的测量重复性稳定在 $0.56\ \mu\text{m}$ 到 $4.58\ \mu\text{m}$ 之间,证明了上表面对焦与边缘提取算法的高度一致性。在更具挑战性的深度测量上,系统同样表现出色,测量重复性范围为 $0.80\ \mu\text{m}$ 至 $5.44\ \mu\text{m}$ 。对于#3型号样品,系统获得了约 $2.01\ \mu\text{m}$ 的最优深度测量重复性,展示了其在较低深

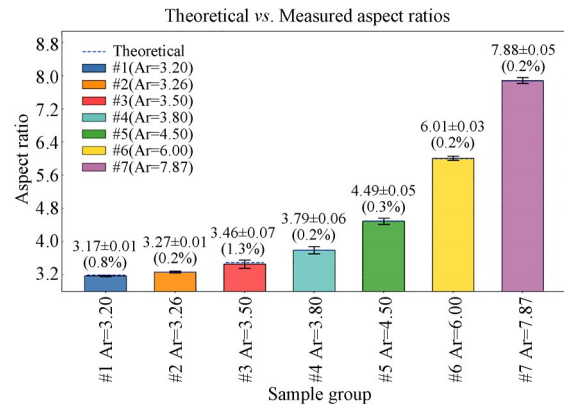


图9 测量样品误差分析

Fig. 9 Error analysis of measurement samples

度条件下的高精度潜力。数据也揭示了一个符合物理预期的趋势,即随着测量深度的增加(如#6和#7型号),测量重复性有轻微减弱的倾向,这主要是由于更长的光程和更微弱的孔底信号给对焦带来了更大挑战。

表2 测量数据分析结果

Tab. 2 Results of measurement data analysis

样品 编号	平均值/ $\mu\text{m}$			标准差/ $\mu\text{m}$			变异系数(%)			极差/ $\mu\text{m}$		
	孔径	深度	深径比	孔径	深度	深径比	孔径	深度	深径比	孔径	深度	深径比
#1	300.13	952.27	3.17	0.76	1.62	0.01	0.25	0.17	0.34	1.98	3.73	0.02
#2	258.32	842.79	3.27	0.56	0.80	0.01	0.21	0.09	0.26	1.31	1.45	0.01
#3	150.18	522.45	3.47	0.71	2.01	0.03	0.47	0.38	0.78	1.78	4.77	0.07
#4	281.84	1 068.69	3.79	4.58	2.19	0.06	1.62	0.21	1.56	11.20	4.71	0.06
#5	220.12	990.30	4.50	0.99	2.93	0.03	0.45	0.30	0.75	1.89	5.63	0.05
#6	250.09	1 503.69	6.01	1.02	2.11	0.03	0.41	0.14	0.55	2.35	4.58	0.03
#7	222.31	1 750.41	7.87	0.71	5.44	0.05	0.32	0.31	0.60	1.71	11.63	0.05

在稳定性方面,通过变异系数(Coefficient of Variation, CV)可以评估测量的相对波动。所有测量参数的变异系数均处于极低的水平,特别是深度测量的CV值全部低于0.5%,最低仅为0.09%,这表明不同样品间测量数据的离散性极小,系统在多次重复测量中表现出高度稳定性。

在准确性方面,测量结果与样品的标称值进行了逐一对比,结果显示二者之间具有高度一致性。以样品#1(标称孔径为 $300\ \mu\text{m}$ ,深度为 $960\ \mu\text{m}$ )为例,系统测得的平均孔径 $d$ 为 $300.13\ \mu\text{m}$ ,平均深度 $H$ 为 $952.27\ \mu\text{m}$ ,相对误差分别控制在0.05%和0.8%以内。类似地,样品#3(标称孔

径 $150\ \mu\text{m}$ ,深度 $525\ \mu\text{m}$ )的实测值为 $150.18\ \mu\text{m}$ 与 $522.45\ \mu\text{m}$ ,其偏差均不超过0.5%。在最大深径比样品#7中,尽管孔深达到 $1\ 748\ \mu\text{m}$ ,系统在深度测量方面依旧获得了 $1\ 750.41\ \mu\text{m}$ 的平均测量值,与标称值高度吻合。整体来看,不同规格样品的各项参数实测平均值与标称值的偏差普遍保持在1%以内,且未出现系统性偏差或随深径比变化而显著加剧的误差累积现象。这表明所提出的测量系统在孔径与深度的双参数测量中均具备较高的准确度,能够在复杂工况下保证测量结果的可信性与可比性。

在深度测量不确定度方面,以深度测量标准

差最大的#7号测量样品为例,其5次重复测量标准差为 $5.44\ \mu\text{m}$ ,A类标准不确定度 $u_A=5.44/\sqrt{5}=2.43\ \mu\text{m}$ 。考虑Z轴位移台重复定位精度( $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ )引入的B类不确定度分量 $u_{B1}=0.5/\sqrt{3}=0.29\ \mu\text{m}$ ,以及镜头景深( $17\ \mu\text{m}$ )引入的B类不确定度分量 $u_{B2}=8.5/\sqrt{3}=4.91\ \mu\text{m}$ ,则深度测量合成标准不确定度为:

$$u_c(H)=\sqrt{u_A^2+u_{B1}^2+u_{B2}^2}. \quad (10)$$

可得深度测量合成标准不确定度 $u_c(H)=5.48\ \mu\text{m}$ 。由式(9)可知,深度测量标准差最大的测量样品,其深度测量合成标准不确定度的样品也最大,因此,系统的深度测量不确定度小于 $5.48\ \mu\text{m}$ ,表现出色。在孔径测量不确定度方面由于引入B类不确定度的镜头畸变仅为 $0.01\%$ ,故忽略不计,孔径测量不确定度 $u_c(d)$ 在本研究中可视等同于其A类不确定度分量 $u_A(d)$ ,#4样品的孔径测量不确定度最大,为 $2.05\ \mu\text{m}$ 。合成不确定度为:

$$u_c(R_A)=R_A\cdot\sqrt{\left(\frac{u_c(H)}{H}\right)^2+\left(\frac{u_c(d)}{d}\right)^2}. \quad (11)$$

由式(11)可知,系统的深径比不确定度最大不超过#3样品的 $0.037$ 。系统对不同深径比微孔几何参数的测量结果具有高可信度。

在样品选择中,#2与#7来自与其他样品不同的生产厂家,其上、下表面加工状态存在显著差异。然而,系统在这些样品上的孔径和深度测量仍保持低标准差和低变异系数,说明本系统能够适应不同工艺条件下的微孔检测需求。同时,即便测量样品来自同一生产厂家,各测量样品依旧存在一定的表面形貌差异,而系统始终保持稳定的测量性能。这充分证明了本研究提出的自动化视觉测量系统的广泛适用性与稳定性。从分析结果可以看出,该测量系统对不同加工状况的测量样本保有较高的测量精度以及高重复性,证明了本自动化测量系统应对不同加工状况的测量样品具有一定的适用性。

综上所述,统计分析有力地证明了本文所设计的测量系统不仅具备亚微米级的测量精度,且运行稳定、结果可靠、适用性广,是一种适用于精密制造领域质量控制的有效解决方案。

## 5 结 论

本文针对大深径比微孔光学测量中孔底成像困难、特征提取不稳定等技术瓶颈,提出并实现了一套基于机器视觉的自动化测量系统。该系统在硬件上引入了远心显微镜头与同轴光源照明,并结合高精度电动位移台构建了稳定的光机电一体化平台;在算法上融合了Tenengrad梯度对焦、OTSU阈值分割、距离变换孔径计算、FFT频域滤波与Hough圆变换等多阶段策略,实现了对上表面孔径与孔底特征的高效识别与精确定位。实验结果表明,该系统能在不同的大深径比测量样品上实现高精度测量,孔径测量的重复性维持在 $0.56$ 至 $4.58\ \mu\text{m}$ 之间,深度测量的标准差最低达 $0.80\ \mu\text{m}$ ,且所有深度测量的变异系数均低于 $0.5\%$ ,最低仅 $0.09\%$ ,充分验证了系统的高稳定性与低波动性。同时,测量均值与样品标称值之间的偏差普遍控制在 $1\%$ 以内,未出现系统性偏差,证明了系统具备较高的测量准确性,系统在各几何参数的测量不确定度与合成不确定度方面展现出优异水平,证明了系统测量结果的高可信度。针对不同厂家生产的样品,系统依旧保持了低标准差与低变异系数,体现出良好的普适性与稳定性。这说明本研究提出的方法不仅适用于统一条件下的重复测量,也能够推广至更多实践场景,满足实际制造环境中复杂工况下的检测需求。

本研究也存在一定的局限性,值得在未来工作中进一步探索与完善。首先,受限于硬件系统的成像视场与照明能力,当前实验装置仅适用于孔径小于 $415\ \mu\text{m}$ 、深度小于 $2\ 000\ \mu\text{m}$ 的微孔测量。对于孔径超出此范围的样品,微孔图像将超出相机视场,无法完整采集孔口轮廓;而对于深度超过 $2\ 000\ \mu\text{m}$ 的更深微孔,由于光路延长导致孔底照明急剧衰减,成像信噪比显著下降,在实际测试中现有算法难以实现对孔底特征的有效定位。其次,本文所提出的测量方法依赖于激光加工在孔底形成的周期性环形纹理作为对焦特征,因此,所有实验样品均为激光加工的金属微孔,尚未对孔底光滑或无显著纹理特征的微孔进行验证。对于此类孔底缺乏明显结构特征的样品,现有算法可能存在对焦失效或特征提取困难

的风险。此外,当前实验仅以不锈钢材料为研究对象,尚未涵盖微电子与光电封装领域中常见的透明材料(如玻璃、石英)或高反光材料(如硅片、金属薄膜)。这些材料在光学成像过程中可能引入透射、反射或干涉等复杂光学现象,对成像质量与测量稳定性构成新的挑战。针对上述局限,后续工作将从以下方向展开研究:在硬件层面,探索视场可调的光学系统与自适应照明方案,以拓展可测样品的尺寸范围;在算法层面,研究结合结构光投影、或深度学习特征提取等辅助手段,增强系统对多样化孔底形态与材料特性的适应能力,推动该技术在更广泛工业

场景中的应用落地。

#### 作者贡献声明:

田安宇:测量方法提出,实验设计,数据整理与分析,论文构思与撰写;

刘研:实验数据采集及整理与分析,可视化呈现;

葛洲:资源获取,论文审核,实验指导;

江宇辰:可视化呈现;

于瀛洁:资源获取,方法指导,项目管理;

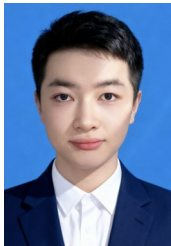
夏新星:测量方法提出,实验指导,项目管理,论文审核与修订。

#### 参考文献:

- [1] 武晓龙, 马玉平, 王海航, 等. 微孔超精密加工研究进展[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(12): 1913-1928.  
WU X L, MA Y P, WANG H H, *et al.* Progress in ultra-precision machining of micro hole[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2021, 40(12): 1913-1928. (in Chinese)
- [2] 简晓娇. 精密模具大深径比微孔尺寸测量方案设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.  
JIAN X J. *Design of Measuring Scheme of Micro-Hole With Large Depth-Diameter Ratio for Precision Mold*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [3] SONG L M, LI D P, QIN M C, *et al.* Research on high-precision hole measurement based on robot vision method[J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(5): 378-382.
- [4] DANZL R, HELMLI F, SCHERER S. Focus variation-a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology [J]. *Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 2011(3): 245-256.
- [5] 李斌, 耿梦琦, 王志军, 等. 航空复杂微孔道结构的磨粒流加工技术研究进展[J]. 材料导报, 2026, 40(1): 194-205.  
LI B, GENG M Q, WANG ZH J, *et al.* Research progress of abrasive flow machining in the processing of complex microporous structures materials for aeronautic applications [J]. *Materials Reports*, 2026, 40(1): 194-205. (in Chinese)
- [6] 张书愿, 周熙杰, 崔健磊, 等. 飞秒激光加工镍基合金无锥度微孔试验研究(封面文章·特邀)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(11): 10-19.  
ZHANG SH Y, ZHOU X J, CUI J L, *et al.* Experimental study on femtosecond laser processing non-taper microholes in nickel-based alloys(cover paper·invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(11): 10-19. (in Chinese)
- [7] PIAO W Y, HAN Y Q, HU L Y, *et al.* Quantitative evaluation of focus measure operators in optical microscopy[J]. *Sensors*, 2025, 25(10): 3144.
- [8] PECH-PACHECO J L, CRISTOBAL G, CHAMORRO-MARTINEZ J, *et al.* Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study[C]. *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000. September 3-7, 2000, Barcelona, Spain. IEEE*, 2002: 314-317.
- [9] 刘健庄, 乘文青. 灰度图象的二维Otsu自动阈值分割法[J]. 自动化学报, 1993(1): 101-105.  
LIU J ZH, LI W Q. The automatic thresholding of gray-level pictures via two-dimensional otsu method [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1993(1): 101-105. (in Chinese)
- [10] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [11] HERNANDEZ A, MAGHAMI A, KHOSH-DARREGI M. A machine vision framework for autonomous inspection of drilled holes in CFRP panels[C]. *2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). April 20-23, 2020. Singapore. IEEE*, 2020: 669-675.
- [12] SHIH F Y, WU Y T. The efficient algorithms for

- achieving Euclidean distance transformation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(8): 1078-1091.
- [13] LIU W, HU J, JIANG L, *et al.* Formation of laser-induced periodic surface nanometric concentric ring structures on silicon surfaces through single-spot irradiation with orthogonally polarized femtosecond laser double-pulse sequences[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(4): 1273-1283.
- [14] REZA A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1): 35-44.
- [15] MISHRA A. Contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) approach for enhancement of the microstructures of friction stir welded joints [EB/OL]. 2021: *arXiv*: 2109.00886. <https://arxiv.org/abs/2109.00886>.
- [16] XU P, YU Y, XIAO C J, *et al.* A real-time hole depth diagnostic based on coherent imaging with plasma amendment during femtosecond laser hole-drilling [EB/OL]. 2023: *arXiv*: 2309.06356. <https://arxiv.org/abs/2309.06356>.
- [17] CICCONE M, GEIGER D, WERMAN M. Complex-valued Hough transforms for circles[EB/OL]. 2015: *arXiv*: 1502.00558. <https://arxiv.org/abs/1502.00558>.

## 作者简介:



田安宇(2004—),男,上海人,主要从事机器视觉及精密测量仪器方面的研究。E-mail: tiananyu@shu.edu.cn

## 通讯作者:



夏新星(1986—),男,江苏连云港人,博士,副教授,2008年、2013年于浙江大学分别获得学士和博士学位,主要从事三维成像及显示、脑机交互方面的研究。E-mail: xiaxinxing@shu.edu.cn