

DOI: 10.3901/JME.2021.10.001

基于光度立体视觉三维重构算法的微观磨损形貌 原位测量原理及方法*

朱可¹ 霍彦文¹ 武通海¹ 陈志雄²

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049;
2. 上海工程技术大学航空运输学院 上海 201620)

摘要: 基于图像的表面微观磨损形貌分析在磨损机理及状态分析中具有重要的地位, 三维显微成像技术的应用已经将二维磨损形貌图像分析拓展到更丰富的三维分析领域。然而, 从设备维护及故障监测的角度, 在机或原位测量显然比上述先进测量更具吸引力, 并且复杂、昂贵的先进表面测量技术至今无法打破其在机或原位测量的壁垒。针对现场检测与三维分析的需求, 将光度立体视觉原理引入至微观磨损形貌的原位测量, 借助便携式平面图像采集系统进行光学设计, 提出一种采用多阴影平面图像的三维表面重构方法。首先, 通过张正友标定法实现空间点由图像坐标系到相机坐标系的转换; 然后, 基于成像系统建立近场点光源模型, 并由光度立体视觉算法求解表面法向量; 最后, 基于 FC 算法计算表面深度与高度信息, 完成磨损表面微观形貌三维重构。基于上述方法, 研制便携式图像采集与三维重构系统, 分别对平面和曲面两类表面进行检测试验, 并与共聚焦显微镜测量结果进行对比。测量与对比结果表明, 截面曲线上特征点之间的高度误差小于 4.2%, 截面二维参数误差小于 10.9%, 三维表面参数误差小于 12.9%。上述工作表明, 所提出的方法为机械设备部件磨损表面原位测量与分析提供有效的技术手段。

关键词: 磨损表面形貌; 原位测量; 三维重构图像; 光度立体视觉; 微观形貌

中图分类号: TH117

Principle and Method for In-situ Measurement of Micro-scale Worn Surface Morphology Based on 3D Reconstruction with Photometric Stereo Vision Algorithm

ZHU Ke¹ HUO Yanwen¹ WU Tonghai¹ CHEN Zhixiong²

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: Image-based micro-wear morphology analysis plays important role in both wear mechanism and wear state analysis. This technique has been improved from 2D analysis to 3D analysis with the application of 3D microscopic imaging technology. However, for the maintenance and fault monitoring of equipment, the on-machine or in-situ measurement are more attractive than the advanced measurements described above. The reason lies in the fact that these expensive and advanced techniques still find their barriers in the application of in-machine or in-situ measurements. Aiming at this pain point, a new method based on the photometric stereo vision is introduced for the on-site and three-dimensional analysis of microscopic worn morphology. With a portable 2D image acquisition system, a 3D reconstruction method is constructed using multi-shadow 2D images. First, the calibration method is applied to perform the coordinate transform of the spatial points from the image coordinate to the camera coordinate. Second, the near-field point light source model is established and the surface 3D normal vector for each points is obtained using the photometric stereo vision algorithm. Finally, the surface depth and height for each points are calculated based on the FC algorithm, so far the 3D reconstruction of the wear surface micro-morphology is accomplished. Based on the above methods, a portable image acquisition system is developed to detect the plane and the curved surface respectively. Compared with the results of the laser scanning confocal microscopy, the current

* 国家重点研发计划(2018YFB1306100)和国家自然科学基金(51675403)资助项目。20200722 收到初稿, 20210128 收到修改稿

method shows acceptable precision with the height error of the feature points less than 4.2%, the cross-section curve error less than 10.9%, and the 3D surface error less than 12.9%. It can be generalized from above works that an effective technical means for in-situ and 3D analysis of worn surface of mechanical components.

Key words: worn surface morphology; in-situ measurement; 3D reconstruction image; photometric stereo vision; micro-scale morphology

0 前言

机械零件摩擦表面的磨损是机械失效的主要原因之一^[1-2], 微观磨损表面形貌是分析表面磨损状态及磨损机理最直接的判据^[3], 因而成为设备维护和故障诊断的重要依据。

传统的磨损表面形貌分析依赖于人眼对显微镜^[4]或现场工业内窥镜^[5]对磨损表面二维图像的经验判断。由于高度信息缺失, 检测者对表面材料损失和表面材料附着难以获得准确识别^[6], 误判率较高。

先进的三维成像显微系统直接获取三维表面形貌, 将传统二维图像分析延拓到数字化三维精准描述的领域。以激光共聚焦显微镜为代表的技术可以通过扫描获取磨损表面三维形貌, 并对表面进行数字化特征分析^[7]。但是, 这些技术要求对零件拆解或分割后置于实验室环境才可测量, 难以实现现场检测以及零部件级直接检测^[8]。拆解后检测结果可用于故障分析, 但无法反映故障发展的过程。因此, 无拆卸部件磨损表面微观三维形貌的原位测量是现有工程检测的技术瓶颈。

光度立体视觉(Photometric stereo, PS)是一种通过变换不同方向的光源, 采集不同光照情况下表面在同一视角位置的二维图像序列, 并由二维图像明暗信息计算表面法向量, 进而重建表面三维形貌的方法^[9]。与其他三维扫描方法比较, 光度立体视觉技术除了可以获取目标表面法向量, 还可以高精度恢复表面精细特征, 因而成为机器视觉领域研究热点^[10-12]。

随着视情维护需求的升级, 在机、原位、精确的零部件级磨损检测对重大装备运行维护的意义正在逐渐放大。装备零部件级的在机检测要求要求在原位观察到磨损表面三维形貌的同时能得到准确的表面高度与纹理数据以便能进行进一步的磨损故障分析、磨损机理识别以及视情维护。本文针对现场检测、三维分析的需求, 将光度立体视觉原理引入微观磨损形貌的原位测量, 借助便携式平面图像采集系统进行光学设计, 提出了一种采用多阴影二维图像的三维表面重构方法。

1 微观形貌图像三维重构方法

本文拟将光度立体视觉算法与显微成像技术融合, 开展磨损表面的二维测量及三维重构方法研究, 研究方案如图 1 所示。使用显微镜头分别拍摄八个光源单独照射下的磨损表面的二维图像序列, 通过光度立体视觉算法分析二维图像序列中的亮度与阴影信息, 得到表面法向量, 进而实现磨损表面三维形貌的重构。

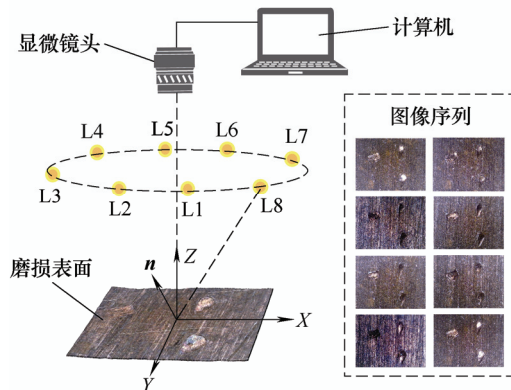


图 1 光度立体视觉显微成像技术原理图

基于上述原理, 磨损表面微观形貌三维重构方法的流程如图 2 所示。该方法主要包含三个部分: ① 构建成像坐标系; ② 研究显微成像条件下的光源模型, 经过光源标定矩阵求解磨损表面的法向量; ③ 基于表面法向量计算磨损表面的高度信息, 完成三维重构。

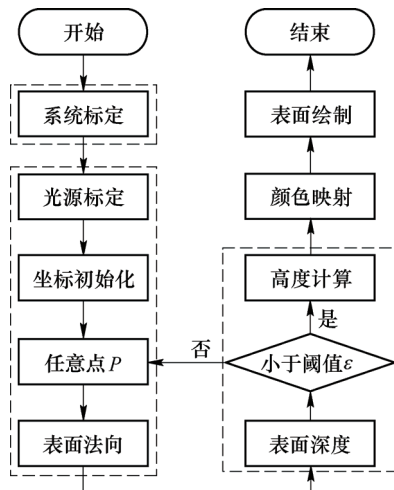


图 2 微观形貌图像三维重构方法流程图

1.1 成像系统坐标系环境构建

基于光度立体视觉算法计算表面法向量的本质是将二维的图像序列信息转换为法向量，故需要创建相应的二维图像坐标系和三维相机坐标系，并通过参数求解建立两坐标系之间的联系。

图 3 为成像系统环境中建立的三个坐标系，两个二维坐标系分别为图像像素坐标系 $u-v$ 与图像物理坐标系 $x-y$ ，以及三维相机坐标系为 $X_c-Y_c-Z_c$ 。

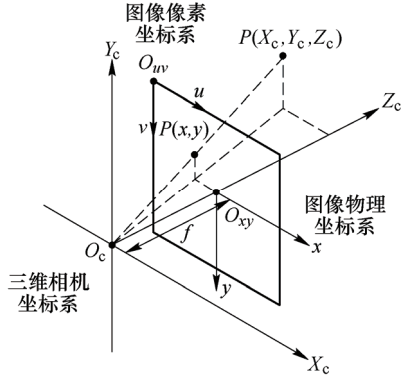


图 3 图 1 所示原理的成像系统坐标系

图像像素坐标系与相机坐标系之间的关系为

$$Z_c \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中， a_x 为 x 轴尺度因子； a_y 为 y 轴上的尺度因子； M 为相机内部参数矩阵。

使用张正友标定法^[13]对相机内部参数矩阵进行标定，完成上述两个坐标系变换。

1.2 基于近场点光源的表面法向求解

已有的光度立体视觉常用于宏观表面的重构。由于该模型假设光源距离待测表面足够远，入射光源可视作平行光且发光强度不随角度和距离的变化而衰减。

图 4 为平行光模型下金属盘平面的重构结果与共聚焦显微镜扫描的真实表面。在对磨损表面微观形貌进行显微成像时，由于光源与物体表面距离很近，若采用常规的平行光模型，会造成表面中心区域法向的错误估计，导致重构表面弯曲失真现象。

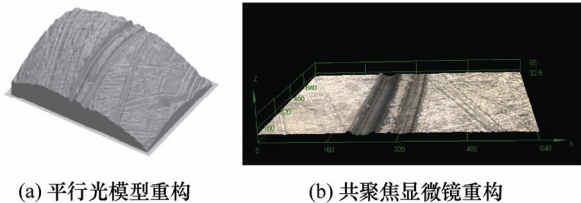


图 4 盘试样微观形貌重构效果对比

本文引入近场点光源模型^[14]，其原理如图 5 所示。图 5 中 l_p 为由光源照射至待测表面任意点 P 的一条光线，主光轴 l_0 为光源照射下最亮的光线，两者夹角为 θ 。区别于无衰减的平行光模型，近场点光源模型的衰减特性可表示为

$$E_p = \frac{E_0 \cos^g \theta}{d^2} \quad (2)$$

式中， E_p 为表面每一点 P 处的光强值， E_0 为光源在主光轴方向上的发光强度，即主光强； g 为点光源发光强度的角度衰减因子； d 为点 P 与光源的距离。

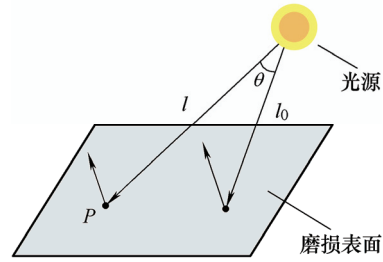


图 5 近场点光源模型示意图

从式(2)可以看出近场点光源模型具有角度衰减特性与距离衰减特性。为还原被测表面光照矢量，对式(2)中的光源信息进行标定，采用光线交叉法，测量并计算获得主光强与衰减因子，即可实现光源标定^[15-16]。

参照图 5 可知，被测表面 P 点处的法向量求解需先知道该点处的入射光方向 l_p ，而 l_p 又取决于光源位置及 P 点坐标，这是一个悖论。为此，本文首先假定具有一定初始深度的初始化表面，该表面为一个垂直于照相机光轴且与相机光心距离为 D 的平面。该表面上的任意点的坐标为 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ ，则

$$(X_c, Y_c, Z_c) = D \left(\frac{x}{f}, \frac{y}{f}, 1 \right) \quad (3)$$

式中， f 为显微镜镜头的焦距， x 、 y 分别为物理坐标系中的横纵坐标。本文假设 D 为相机光心到被测表面的距离，则可求得被测表面初始化点坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 。

由已求得的光源 i 的空间坐标 $L_i(X_{ci}, Y_{ci}, Z_{ci})$ 、主光轴 l_{0i} 和主光强 E_{0i} ，可求得该光源下物体表面 P 点的入射光矩阵 L_p^i ，具体计算流程如下所示。

被测表面点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 与光源的距离可表示为

$$d = \sqrt{(X_c - X_{c0i})^2 + (Y_c - Y_{c0i})^2 + (Z_c - Z_{c0i})^2} \quad (4)$$

被测点 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ 在该光源下的入射光方向为

$$LP = (X_c - X_{c0}, Y_c - Y_{c0}, Z_c - Z_{c0})^T \quad (5)$$

归一化后即光源方向矢量

$$I_p^i = \mathbf{LP} / |\mathbf{LP}| \quad (6)$$

该光源照射下 P 点的入射光照射度可表示为

$$E_p^i = E_0 \frac{(I_p^i \cdot I_0)^g}{d^2} \quad (7)$$

则该光源照射下 P 点的入射光矩阵可表示为

$$\mathbf{L}_p = E_p^i \cdot \mathbf{I}_p^i \quad (8)$$

当有 m 个光源时, 记 \mathbf{L}_p 、 \mathbf{I}_p^i 分别为第 i 个光源下表面任意点 P 处的入射光矢量、图像亮度值, 即: $\mathbf{L}_p = (\mathbf{L}_p^1, \dots, \mathbf{L}_p^i, \dots, \mathbf{L}_p^m)$ 、 $\mathbf{I}_p = (I_p^1, \dots, I_p^i, \dots, I_p^m)$, 则表面点 P 处的法向量 \mathbf{N}_p 满足

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{N}_p \cdot \mathbf{L}_p \quad (9)$$

由于法向量为三维单位矢量, 故理论上只需要 3 张图像即可求得点 P 法向量 \mathbf{N}_p 。在实际计算中, 使用更多的光源照射下的图像可采集更多的阴影信息, 进而得到更精确的结果。对应多个光源照射下的平面图像可以采用式(9)及最小二乘法求解图像上每一点处的法向量^[17], 进而通过扫描图像上的每个像素点, 获得整个被测表面的法向量矩阵。

图 6 给出了通过上述流程获取磨损表面图像的案例。图 6a 为磨损表面微观图像, 图 6b 为磨损表面法向分布图。对比法向量分布图对应原图特征磨损处可知, 粘着磨损特征处法向量较为密集, 表示该处高度与梯度均有较大的变化。

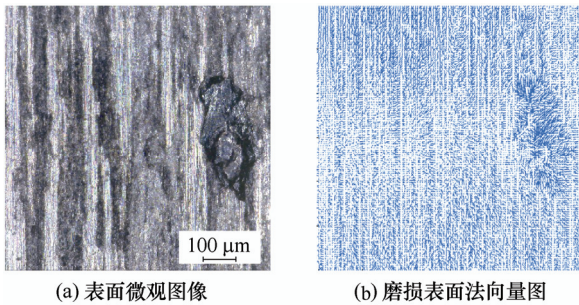


图 6 基于 PS 算法的磨损表面法向量计算结果

1.3 基于 Frankot-Chellappa 算法的深度恢复方法

记待测表面点 (X_c, Y_c) 深度为 $Z_c = Z(X_c, Y_c)$, $\{p(X_c, Y_c), q(X_c, Y_c)\}$ 为待测表面点 (X_c, Y_c) 的梯度域, 则该表面的法向量可表示为

$$\mathbf{N}(X_c, Y_c) = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_c}, \frac{\partial Z}{\partial Y_c}, -1 \right) = (p, q, -1) \quad (10)$$

由式(10), 将法向量 $\mathbf{N}(X_c, Y_c)$ 的 N_z 分量归一化后, 即可由式(11)求得相应的梯度域。

$$\left\{ p(X_c, Y_c) = \frac{N_x(X_c, Y_c)}{N_z(X_c, Y_c)}, q(X_c, Y_c) = \frac{N_y(X_c, Y_c)}{N_z(X_c, Y_c)} \right\} \quad (11)$$

根据 Frankot-Chellappa(FC)算法^[18], 由待测表面梯度域恢复表面深度 z , 计算公式为

$$z = F^{-1} \left\{ -\frac{j \frac{u}{N} F\{p\} + \frac{v}{M} F\{q\}}{2\pi \left(\left(\frac{u}{N} \right)^2 + \left(\frac{v}{M} \right)^2 \right)} \right\} \quad (12)$$

式中, (u, v) 为二维图像坐标, M 、 N 为图像的尺寸, $F\{\cdot\}$ 和 $F^{-1}\{\cdot\}$ 分别为二维离散傅里叶变换和二维离散傅里叶逆变换。

由式(12)可求解出每个像素点的深度值 z 。需要说明的是, 此时求解出的深度值 z 是基于图像坐标系扩展而成的三维坐标, 所生成的三维表面位于相机成像平面, 能反映待测表面的真实形状信息, 但不能反映物体的空间位置。故需要将深度值 z 转换至三维相机坐标系, 具体方法与流程如下所示。

令 $\Delta z = z - \bar{z}$, 其中 \bar{z} 表示式(12)恢复深度的均值, $\Delta Z_c = Z_c - \bar{Z}_c$, 其中 \bar{Z}_c 表示待测表面的平均平面, 即像素点对应的真实深度的均值。

令 $(x, y, \Delta z)$ 表示待测表面的形状信息, $(X_c, Y_c, \Delta Z_c)$ 表示待测表面的空间位置信息, 则二者间存在缩放关系^[19], 其关系可表示为

$$\frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} = \frac{\Delta z}{\Delta Z_c} \quad (13)$$

如图 3 所示的成像系统坐标系, 存在以下关系

$$\frac{x}{X_c} = \frac{y}{Y_c} = \frac{f}{Z_c} \quad (14)$$

则各像素点对应的坐标 Z_c 值可表示为

$$Z_c = \frac{f \cdot D'}{f - \Delta z} \quad (15)$$

式中, D' 为待测表面平均平面到相机光心的距离的估计值, 取 $D' = D - \bar{z}$ 。

利用式(14)计算出各像素点对应的 X_c 、 Y_c 坐标值, 完成表面形状到深度的映射。

将深度信息转换至三维相机坐标系后, 确定基准面, 即可求得深度点集相对于基准面的高度信息, 完成表面三维重构。

为了消除初始化误差, 将求得的深度值 Z_c 代替式(3)中的初值, 进行迭代运算, 直至 Z'_c 与上一次求解所得深度 Z_c 之间的差值小于设定阈值(本文设定阈值 $\varepsilon = 0.1 \mu\text{m}$), 所获得迭代结果即为相对于相机坐

标系每一点的深度值。

由深度值进行三维曲面构造生成基准面，从而获取磨损表面微观三维形貌高度信息。图像处理中的曲面拟合是构造相对于像素点拟合的曲面，主要基于多项式函数构造拟合曲面^[20]，其输入可以表示为

$$D = \{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)\} \quad (16)$$

目标输出是一个多项式函数，可表示为

$$\gamma = p_1x^1 + p_2y^1 + \dots + p_mx^m + p_ny^n + q \quad (17)$$

利用多项式函数逼近输入 x 、 y 和深度 z 的函数关系，以均方误差作为误差函数来衡量某个多项式函数的逼近程度，误差函数越小，模型越好。其中误差函数可表示为

$$E(w, b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z - f(x, y)]^2 \quad (18)$$

求得基准面后，相对基准面计算得到每个像素点处的高度值，将每个像素点的颜色值与高度值匹配进行纹理映射，完成微观磨损表面三维形貌重构。

2 试验与分析

基于本文提出的微观磨损形貌原位重构及测量方法，研制了便携式平面图像采集系统，并采用该系统对平面、曲面分别进行检测，并将测量结果与共聚焦显微镜扫描结果进行对比，以验证本文方法的准确性。

2.1 便携式图像采集系统

本文研制了微观三维形貌原位测量系统(In-suit micro-topography 3D measurement, IMTM)，该系统包括了 20 倍光学放大的笔式平面显微镜、八个环状均匀分布的 LED 光源及电路控制系统和固定支架组成，结构原理如图 7 所示。系统工作原理为：将笔式显微镜夹持在固定支架上，通过齿轮齿条滑台微调与被测表面进行对焦，通过切换 8 光源照明获得 8 幅单光源照明下的平面图像，采用本文提出的重构算法实现表面三维形貌获取。

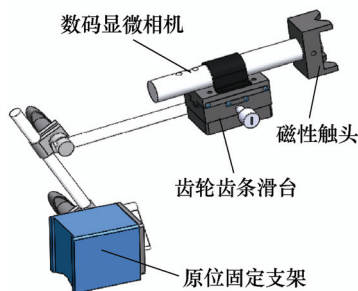


图 7 图像采集系统结构设计图

图 8 给出了无拆卸原位测量的应用场景，对轴承台架试验中轴承内圈磨损表面进行原位测量，在测量过程中需要保持待测磨损表面静止。



图 8 试验台架中轴承内圈表面原位测量场景图

2.2 验证试验的方案

以常见的磨损表面为试验对象，使用 IMTM 对其磨损部位进行三维形貌重构与特征提取，并对同一位置进行激光扫描共聚焦显微镜(Laser scanning confocal microscopy, LSCM)扫描，以验证重构方法的有效性。

本文对具有特征位置的磨损表面进行重构结果验证，以验证本重构方法对整个表面形貌以及特征细节的重构结果。特征位置指磨损表面上发生明显高度变化的位置，如内圈表面的粘着磨损部位、摩擦磨损试验机上盘摩擦试样表面的沟槽位置。本文的试验方案如表 1 所示，分别选取具有粘着磨损特征的轴承内圈以及具有划痕特征的盘摩擦试样进行测量比对。

表 1 验证试验的方案

待测表面	特征表达
轴承内圈表面位置 1	高度图； 特征位置截面图及二维参数
盘表面位置 2	截面图特征点高度差； 特征位置三维参数

为保证使用 IMTM 与 LSCM 分别测量的可比性，本试验采用标记法对试样进行标记。轴承内圈与盘摩擦试样实物图及测量位置如图 9 所示。图 9a 为轴承内圈及测量位置，表面为曲面，图 9b 为具有轻微磨损的盘摩擦试样，表面为平面。

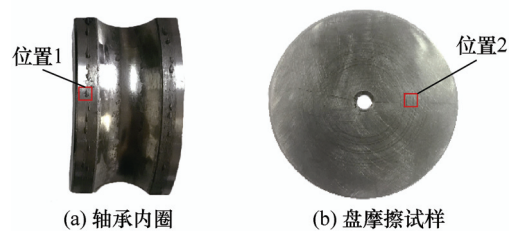


图 9 待测试样及测量位置

使用 IMTM 与 LSCM 分别获取三维结果后,分别进行采用高度图分布对比、特征位置截面图绘制对比、特征点高度差对比、二维参数对比以及特征位置三维参数对比,以验证重构系统对表面形貌细节还原的有效性与测量的准确性。

2.3 试验结果与分析

2.3.1 轴承内圈曲面测量

将轴承内圈分别置于普通环境的 IMTM 与实验室环境的 LSCM 下,获取了测量区域的二维图像如图 10 所示。

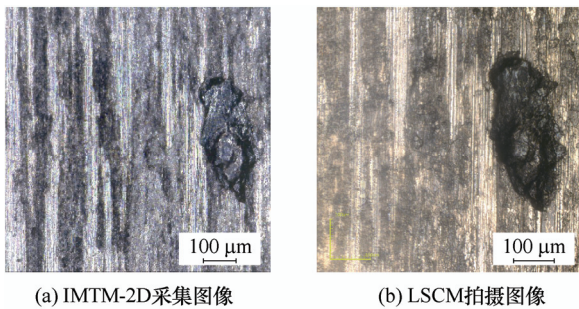


图 10 采用不同手段获取轴承内圈磨损表面二维微观图像

使用 IMTM 对二维图像序列进行三维重构,使用 LSCM 对拍摄区域进行激光扫描,获得磨损表面三维微观图像如图 11 所示。

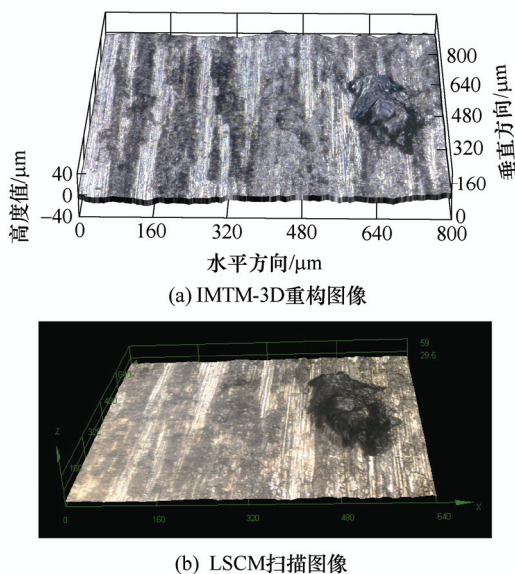


图 11 采用不同手段获取轴承内圈磨损表面三维微观图像

由表面三维图像可知, IMTM 重构结果与 LSCM 扫描结果均为近似平面,表面纹理基本一致,表面特征位置即右侧粘着磨损处还原程度较高。两种系统测量结果的高度图如图 12 所示。

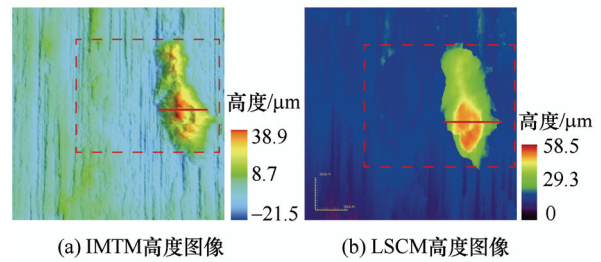


图 12 图 11 中磨损表面高度图像

由图 12 可知,两种三维重构模型的高度分布基本一致。进一步分别选取两幅高度图中特征区域与特征截线(图 12),并绘制轮廓曲线,如图 13 所示。

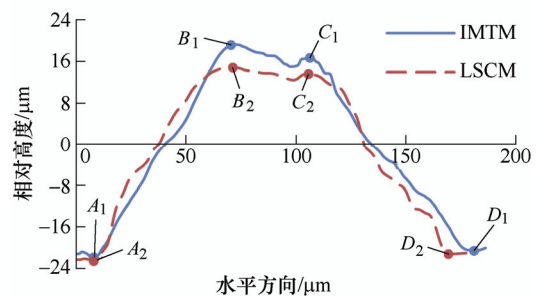


图 13 图 12 中 IMTM 截线与 LSCM 截线对比图

由特征位置截面图像定性对比可知, IMTM 与 LSCM 截面图像走势一致,峰谷完全对应;选择截面上左侧谷底、左侧峰顶、右侧峰顶、右侧谷底分别为特征点,采用两截面轮廓上特征点的高度差、宽度差及其绝对误差定量对比,结果如表 2 所示。

表 2 两种重构图像轮廓的特征点差值表

特征点	IMTM 特征点差值		LSCM 特征点差值		绝对误差	
	高度差 /μm	宽度差 /μm	高度差 /μm	宽度差 /μm	高度 /μm	宽度 /μm
A、B	39.59	63.83	37.16	60.21	2.43	3.62
A、D	0.51	171.53	1.52	164.61	1.01	6.92
B、C	1.57	32.91	1.35	35.85	0.22	2.94
C、D	37.51	74.79	34.29	70.47	3.22	4.32

由表 2 可知,以 LSCM 为标准,宽度差误差最大值为 6.92 μm,其相对误差为 4.2%,其余高度误差与宽度误差值均小于 5 μm。使用两系统分别提取轮廓二维参数并进行对比,包括反映表面轮廓相对于基准线的算数平均偏差 R_a 、均方根偏差 R_q 、最大轮廓峰高 R_p 、最大轮廓谷深 R_v 、轮廓的最大高度 R_z ,反映轮廓线高度分布的偏斜度 R_{sk} 、陡峭度 R_{ku} ,结果如表 3 所示。

表 3 两种重构图像轮廓二维参数表

	平均偏差 $R_a/\mu\text{m}$	方均根 偏差 $R_q/\mu\text{m}$	最大轮 廓峰高 $R_p/\mu\text{m}$	最大轮 廓谷深 $R_v/\mu\text{m}$	最大 高度 $R_z/\mu\text{m}$	偏斜度 R_{sk}	陡峭度 R_{ku}
IMTM	6.518	9.503	23.967	14.113	38.080	1.534	3.945
LSCM	6.394	9.372	22.534	13.101	35.635	1.094	3.699
误差	0.124	0.131	1.433	1.012	2.455	一致	一致

由表 3 可知, 相对于 LSCM 图像, IMTM 二维幅度参数误差最大值为 $2.455\ \mu\text{m}$, 其相对误差为 6.9%。详细地, R_{sk} 均大于 0, 表明轮廓有大比例的凸台和尖峰; R_{ku} 均大于 3, 表明轮廓高度分布集中, 这些判断与直观观察相符。

使用两系统对图 12 特征位置处的三维参数进行提取与对比, 反映磨损表面相对于基准化平面的表面高度算数平均偏差 S_a 、均方根偏差 S_q 、最大峰高 S_p 、最大谷深 S_v 、最大高度 S_z 、反映表面高度分布的偏斜度 S_{sk} 、峭度 S_{ku} , 结果如表 4 所示。

表 4 两种重构图像轮廓三维参数提取表格

	平均偏 差 $S_a/\mu\text{m}$	方均根偏 差 $S_q/\mu\text{m}$	最大峰 高 $S_p/\mu\text{m}$	最大谷 深 $S_v/\mu\text{m}$	最大高 度 $S_z/\mu\text{m}$	偏斜度 S_{sk}	峭度 S_{ku}
IMTM	3.796	6.032	30.667	7.413	38.080	4.130	15.978
LSCM	3.097	5.732	32.653	9.028	41.681	2.944	13.272
误差	0.699	0.300	1.986	1.615	3.601	一致	一致

由表 4 可知, 以 LSCM 为标准, 三维幅度参数误差最大值为 $3.601\ \mu\text{m}$, 其相对误差为 8.6%。 S_{sk} 值均大于 0, 表示分布在高于基准面的一侧有较大的“尖峰”, 与特征区域三维形貌相符; S_{ku} 值均大于 3, 表示形貌高度分布集中在表面的中心, 与特征区域三维形貌相符。

综上所述, 对于轴承内圈表面(曲面)位置 1, 与 LSCM 相比, IMTM 三维模型直观形貌基本一致, 高度分布基本一致, 特征位置截线走势一致, 特征点间隔误差值最大为 $6.92\ \mu\text{m}$, 相对误差为 4.2%; 二维参数误差小于 $3\ \mu\text{m}$, 最大误差的相对误差为 6.9%, 判断截面走势的参数范围相同; 三维参数最大误差值为 $3.601\ \mu\text{m}$, 其相对误差为 8.6%, 判断高度分布的参数范围相同。

2.3.2 盘摩擦试样测量

分别采用 IMTM 与 LSCM 获取同一个盘摩擦试样的相同区域的二维图像如图 14 所示, 三维图像如图 15 所示。

考虑到盘试样表面磨痕特征比较单一, 为了直观比较, 分别在图 16 中两幅三维高度图像相似位置做截线进行磨痕轮廓对比, 结果如图 17 所示。

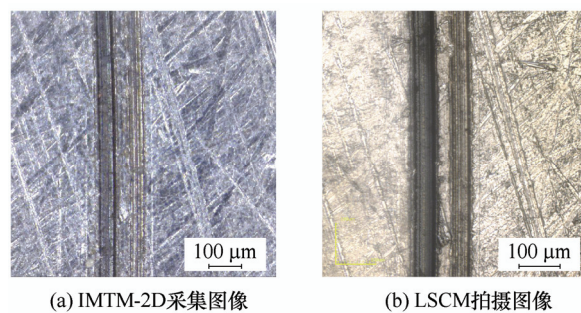


图 14 采用不同手段获取盘摩擦试样表面二维微观图像

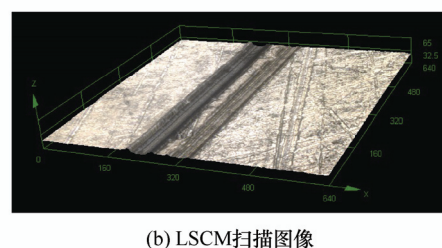
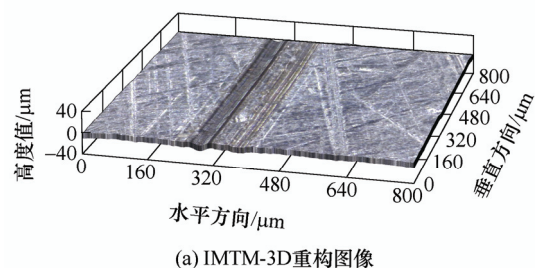


图 15 采用不同手段获取的盘试样磨损表面三维图像

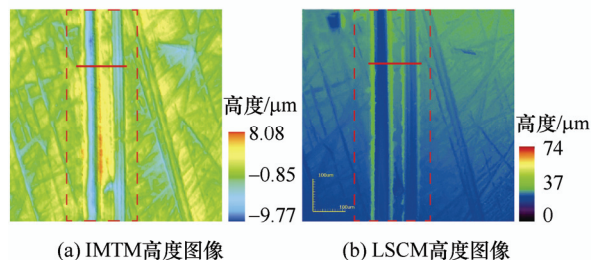


图 16 采用不同手段获取的盘试样磨损表面高度图像

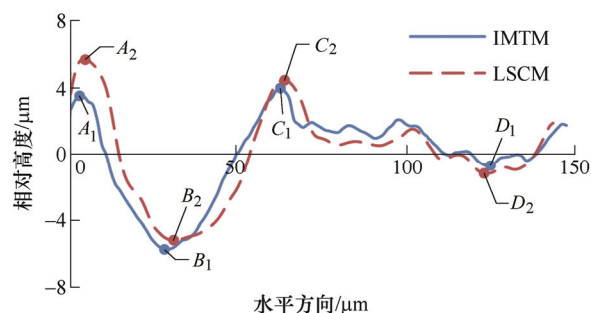


图 17 图 16 中 IMTM 截线与 LSCM 截线对比图

由图 17 可以看出, IMTM 与 LSCM 截面轮廓曲线符合度较高。进一步选择该曲线上的特征点,

包括：左侧峰顶点、左侧谷底点、右侧峰顶点、右侧谷底点，并采用上述特征点构造其高度差、宽度差及其绝对误差等相对量进行对比分析，结果如表 5 所示。结果表明，以 LSCM 为标准，宽度差误差最大值为 $3.77\ \mu\text{m}$ ，其相对误差为 4.1%，其余高度误差与宽度误差值均小于 $3\ \mu\text{m}$ 。

表 5 两种重构图像轮廓的特征点差值表

特征点	IMTM 特征点差值		LSCM 特征点差值		绝对误差	
	高度差 $/\mu\text{m}$	宽度差 $/\mu\text{m}$	高度差 $/\mu\text{m}$	宽度差 $/\mu\text{m}$	高度 $/\mu\text{m}$	宽度 $/\mu\text{m}$
A、B	8.85	25.7	10.91	26.97	2.06	1.27
A、D	5.12	95.53	4.14	91.77	0.98	3.77
B、C	9.72	34.32	9.78	32.40	0.06	1.92
C、D	4.60	61.21	4.14	59.37	0.46	1.84

提取截面轮廓曲线二维参数，包括反映表面轮廓相对于基准线的算数平均偏差 R_a 、均方根偏差 R_q 、最大轮廓峰高 R_p 、最大轮廓谷深 R_v 、轮廓的最大高度 R_z ，反映轮廓线高度分布的偏斜度 R_{sk} 、陡峭度 R_{ku} ，结果如表 6 所示。结果表明，以 LSCM 为标准，二维幅度参数误差最大值为 $1.19\ \mu\text{m}$ ，其相对误差为 10.9%。另外， R_{sk} 值均小于 0，表示此截面截面包含大比例的槽和谷，与截面图相符； R_{ku} 值均小于 3，表示本截面高度分布分散，这些判断与直观观察相符。

表 6 两种重构图像轮廓二维参数表

	平均偏差 $R_a/\mu\text{m}$	均方根偏差 $R_q/\mu\text{m}$	最大轮廓峰高 $R_p/\mu\text{m}$	最大轮廓谷深 $R_v/\mu\text{m}$	最大高度 $R_z/\mu\text{m}$	偏斜度 R_{sk}	陡峭度 R_{ku}
IMTM	1.961	2.523	4.524	5.196	9.72	-0.857	2.851
LSCM	2.165	2.801	5.179	5.731	10.91	-0.067	2.569
误差	0.204	0.278	0.655	0.535	1.19	一致	一致

为了进一步证明三维形貌的符合度，在图 16 的两副高度图中分别选择对应的特征区域进行评价。分别提取所选区域的三维参数，包括反映磨损表面相对于基准化平面的表面高度算数平均偏差 S_a 、均方根偏差 S_q 、最大峰高 S_p 、最大谷深 S_v 、最大高度 S_z 、反映表面高度分布的偏斜度 S_{sk} 、峭度 S_{ku} ，结果如表 7 所示。结果表明，以 LSCM 为标准，三维幅度参数误差最大值为 $0.793\ \mu\text{m}$ ，其相对误差为 12.9%。 S_{sk} 值均小于 0，表明表面分布在低于基准面的一侧有较大的“凹谷”，与特征区域三维形貌相符； S_{ku} 值均小于 3，表示形貌高度分布分散，与特征区域三维形貌相符。

表 7 两种重构图像轮廓三维参数提取表格

	平均偏差 $S_a/\mu\text{m}$	均方根偏差 $S_q/\mu\text{m}$	最大峰高 $S_p/\mu\text{m}$	最大谷深 $S_v/\mu\text{m}$	最大高度 $S_z/\mu\text{m}$	偏斜度 S_{sk}	峭度 S_{ku}
IMTM	5.796	7.032	25.473	16.74	42.231	2.840	5.758
LSCM	5.003	6.417	26.389	14.55	40.939	0.796	3.473
误差	0.793	0.615	0.916	2.19	1.292	一致	一致

上述分析表明，对于盘试样的平面磨损表面 IMTM 与 LSCM 具有相近的三维形貌获取能力，通过特征点、截面轮廓曲线以及三维形貌特征的量化比较可知，IMTM 能以较小的误差还原平面磨损表面的细节与形貌。

3 结论

针对机械设备零件磨损表面原位检测与三维分析的需求，本文将光度立体视觉原理引入至微磨损形貌的原位测量，提出了一种采用二维平面图像重构三维表面的方法。该方法从显微成像角度建立近场点光源模型，并针对不同光源照射下二维阴影图像序列采用光度立体视觉算法求解目标表面的法向量，进而基于 FC 算法获取表面深度与高度信息，最终实现表面微观形貌的三维重构。同时，基于该方法研制了原位显微磨损形貌的图像采集与三维重构系统，通过与激光共聚焦显微镜测量结果进行对比，分别对平面、曲面试样进行检测，结果表明本文的方法具有较高的重构精度。本文研制的原位测量系统进行一次测量试验大约需要耗时 90 s，略快于激光共聚焦显微镜的测量速度。

本文提出的方法能够实现机械零部件在无拆卸状态下进行磨损表面形貌的三维测量与分析，避免了现有的磨损表面形貌测量技术在测量与分析前需要对机器零部件进行拆卸甚至切割处理的问题，能够及时地根据磨损情况提供机械设备维护建议，不失为一种机械设备零部件磨损表面原位测量与分析的新技术。

参 考 文 献

- [1] 何正嘉, 曹宏瑞, 瞿艳阳, 等. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 171-186.
HE Zhengjia, CAO Hongrui, ZI Yanyang, et al. Developments and thoughts on operational reliability assessment of mechanical equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 171-186.
- [2] LIU Z, ZHANG L. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale

- wind turbine bearings[J]. *Measurement*, 2019, 149(1): 107-129.
- [3] 袁成清, 王志芳, 周志红, 等. 不同磨损形式下的滑动轴承磨损表面及其磨粒特征[J]. *润滑与密封*, 2008, 33(12): 21-24.
- YUAN Chengqing, WANG Zhifang, ZHOU Zhihong, et al. Characteristics of worn surfaces and wear debris in sliding bearings under different wear modes[J]. *Lubrication Engineering*, 2008, 33(12): 21-24.
- [4] SOLEIMANI S, SUKUMARAN J, KUMCU A, et al. Quantifying abrasion and micro-pits in polymer wear using image processing techniques[J]. *Wear*, 2014, 319(2): 123-137.
- [5] 胡静, 徐拓. 基于孔探技术的航空发动机常见损伤及案例分析[J]. *装备制造技术*, 2017(11): 183-185.
- HU Jing, XU Tuo. The common damage and case analysis of aero engine based on borescope technology[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2017(11): 183-185.
- [6] BEZAK T, KUSY M, ELIAS M, et al. Identification of surface topography scanned by laser scanning confocal microscope[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 693: 329-334.
- [7] KUMAR H, RAMKUMAR J, VENKATESH K S. Surface texture evaluation using 3D reconstruction from images by parametric anisotropic BRDF[J]. *Measurement*, 2018, 125: 612-633.
- [8] YUAN C Q, YAN X P, PENG Z. Prediction of surface features of wear components based on surface characteristics of wear debris[J]. *Wear*, 2007, 263(7): 1513-1517.
- [9] ACKERMANN J, GOESELE M. A survey of photometric stereo techniques[J]. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2015, 9(3): 149-254.
- [10] 徐科, 周鹏, 杨朝霖. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 25-29.
- XU Ke, ZHOU Peng, YANG Chaolin. On-line detection technique of tiny surface defects for metal plates and strips based on photometric stereo[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 25-29.
- [11] WANG Y, YANG Z, LIU Y, et al. The characterisation of three-dimensional texture morphology of pavement for describing pavement sliding resistance[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2019, 20(5): 1076-1095.
- [12] WANG S, WU T, YANG L, et al. Three-dimensional reconstruction of wear particle surface based on photometric stereo[J]. *Measurement*, 2019, 133: 350-360.
- [13] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 666-673.
- [14] XIE W, DAI C, WANG C C. Photometric stereo with near point lighting: A solution by mesh deformation[C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 4585-4593.
- [15] PARK J, SINHA S N, MATSUSHITA Y, et al. Calibrating a non-isotropic near point light source using a plane[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2014: 2267-2274.
- [16] SCHNIEDERS D, WONG K Y. Camera and light calibration from reflections on a sphere[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, 117(10): 1536-1547.
- [17] MACDONALD L, VERA M, HESS M. Three-dimensional reconstruction of Roman coins from photometric image sets[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2017, 26(1): 11-17.
- [18] FRANKOT R T, CHELLAPPA R. A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1988, 10(4): 439-451.
- [19] NIE Y, SONG Z. A novel photometric stereo method with nonisotropic point light sources[C]//IEEE International Conference on Pattern Recognition, 2016: 1737-1742.
- [20] 张帆. 图像处理中曲线曲面拟合问题研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- ZHANG Fan. Research on curve and surface fitting problems in image processing[D]. Jinan: Shandong University, 2015.

作者简介: 朱可, 男, 1996 年出生。主要研究方向为显微图像 3D 测量技术。

E-mail: zhukecn@163.com

武通海(通信作者), 男, 1976 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为监测大数据的人工智能、显微图像 3D 测量技术、嵌入式油液传感技术、装备 PHM 方法及应用。

E-mail: wt-h@163.com