

DOI: 10.7652/xjtuxb201712012

考虑变换域融合方法的刀具磨损区域三维重构

朱爱斌, 何仁杰, 吴玥璇, 王凯

(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, 710049, 西安)

摘要: 针对数控机床加工领域刀具磨损区域的三维重构精度提高的问题,提出了变换域融合方法。将非下采样轮廓波变换和小波变换相结合,对非下采样轮廓波变换得到的低频系数采用小波变换方法进行融合,对得到的高频系数构造区域方差进行融合,突出刀具磨损图像的整体灰度信息和边缘细节信息,从而获得更为清晰的二维刀具图像,以及更为准确的磨痕形貌及磨痕体积。对基于非下采样轮廓波变换、小波变换方法和变换域融合方法得到磨损区域三维形貌和磨损体积与显微镜的观察结果进行了对比分析,发现提出的方法得到的三维形貌与显微镜结果最接近,且计算出的磨损体积平均相对误差小于 10%。分析和实验数据表明,所提方法无论在图像的清晰度和磨损体积的准确性方面都有一定的优势,该方法对于刀具磨损区域三维重构精度较高,优于单独采用非下采样轮廓波变换和小波变换方法得到的结果。

关键词: 刀具磨损;变换域融合;三维重构

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0076-08

Three-Dimensional Reconstruction of Tool Wear Area Considering Transform-Domain Fusion

ZHU Aibin, HE Renjie, WU Yuexuan, WANG Kai

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

Abstract: To further improve 3D reconstruction accuracy of tool wear area, a transform-domain fusion method is proposed. Nonsubsampled contourlet transform (NSCT) and wavelet transform (WT) are combined in the transform domain. The low-frequency coefficients obtained by NSCT are fused with WT method, and the corresponding high-frequency coefficients are fused based on the regional variance criteria, so that the clearly-focused tool image is obtained to highlight the overall gray level information and edge detail information of tool wear image, so as to obtain clearer two-dimensional tool image and more accurate wear pattern. The 3D morphology and wear volume obtained by the three methods are compared with the results from microscope, it is found that this 3D morphology with the proposed method best coincides with the microscope result, and the average relative error of the wear volume is less than 10%. Compared with the traditional WT and NSCT methods, it is found that the proposed method has certain advantages in terms of the image clarity and accuracy of the wear volume and the reconstruction results are superior to ones obtained by using of non-subsampled contourlet transform or wavelet transform method alone for 3D reconstruction of the tool wear area.

Keywords: tool wear; transform-domain fusion; three-dimensional reconstruction

刀具磨损检测技术一直是数控机床加工领域非常重要的一个环节,而刀具磨损区域的三维重构对于研究刀具磨损状况及磨损机理具有重要的意义^[1-2]。目前,针对刀具磨损区域的三维重构,前人提出了各种方法。文献[3]采用一种结构光投影设备,将移相的条纹图案投射到前刀面上,利用不同条纹之间的相对位置关系,获得了磨损区域的三维轮廓图,但未获得磨损体积。文献[4]采用连续摄影方法,采集刀具的数百万个点,然后利用三角原理对点集进行处理,得到三维重构图,但是实际采集数据点的时候,需要从各个角度进行采集,以保证没有遗失,实际操作较为复杂。文献[5]采用一种激光扫描装置对刀具的磨损区域进行三维轮廓的重构。上述 3 种方法均对设备要求高,价格较为昂贵,虽然都获得了三维轮廓,但没有获得磨损体积。文献[6]采用了一种聚焦合成方法,采集多幅刀具图像并设定聚焦评价函数,以确定每幅图像中清晰的像素点,对这些像素点进行融合,得到了体现磨损区域各个点所在深度的三维重构图,但是该方法中深度值是离散的,因此与实际磨损区域存在一定误差。为了使深度值连续,得到较为精确的三维重构精度,可以采用明暗形状恢复方法,通过求解朗伯体表面方程提供连续深度值^[7-8]。为此,文献[9]将聚焦合成方法和明暗形状恢复方法相结合,采用改进拉普拉斯算子判断聚焦清晰的像素点,得到了比单独采用聚焦合成方法精度更高的三维重构效果,但该方法中由于拉普拉斯算子本身的局限性,并不能在多个方向、多个尺度上充分获取磨损区域信息,因此重构效果仍有提高的空间。

在利用聚焦合成和明暗形状恢复的结合方法进行三维重构时,最为关键的就是对采集的多幅刀具图像序列进行融合,得到一幅较为清晰的磨损区域图像,从而进一步获得三维形貌和磨损体积。这种聚焦清晰图像要充分体现刀具磨损区域的各种信息,三维重构的精度才会更高,这些信息体现为边缘轮廓细节信息和灰度整体信息,即低频和低频信息。由于小波变换具有良好的多尺度、多分辨率特性,非下采样轮廓波变换具有良好的方向性,本文提出将两种变换方法结合,在变换域内融合边缘轮廓细节信息和灰度整体信息,进而获得精度较高的三维重构效果。该方法对原始图像进行融合得到聚焦清晰图像包含磨损区域的光照信息,通过求解朗伯体表面的辐照度方程,将光照信息反映为磨损区域的致密的深度信息,从而使得重构出的三维形貌更接近

实际情况。

1 磨损区域三维重构的原理

利用显微镜采集图像时,通过不断改变物距,就可以得到一系列聚焦清晰位置不一的刀具图像,如图 1 所示。

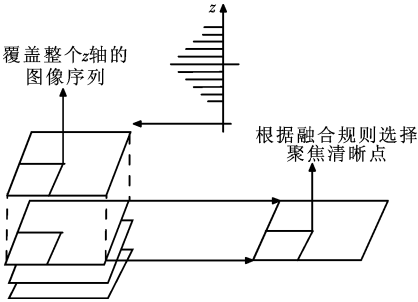


图 1 聚焦合成原理示意图^[8]

每一个物距都会对应一个点集,这个点集是由聚焦清晰的点组成的,这样磨损的深度值就和刀具图像上的点建立了对应关系。通过一定的融合规则,将图像中最清晰的像素点集对应的深度值作为最终的三维形貌中点的深度值,但是该深度值是离散的。

明暗形状恢复方法可以使得深度值连续化。朗伯体表面光照模型如图 2 所示,该模型可以用下式^[10]表示为

$$\cos i = \frac{1 + p p_0 + q q_0}{(1 + p^2 + q^2)^{1/2} (1 + q_0^2 + p_0^2)^{1/2}} \quad (1)$$

通过求解式(1),得到^[11]

$$z^n(x,y) = z^{n-1}(x,y) + [-f(z^{n-1}(x,y))] \cdot \left(\frac{d}{dz(x,y)} f(z^{n-1}(x,y)) \right)^{-1} \quad (2)$$

式中

$$\frac{df(z^{n-1}(x,y))}{dz(x,y)} = - \left(\frac{p_s + q_s}{(p^2 + q^2 + 1)^{1/2} (1 + q_s^2 + p_s^2)^{1/2}} - \right.$$

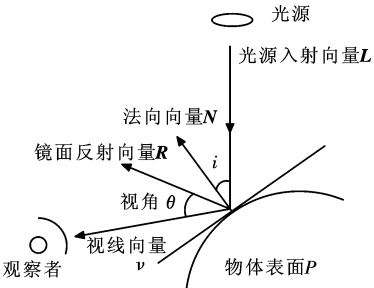


图 2 朗伯体表面光照模型

$$\frac{(p+q)(pp_s+qq_s+1)}{(p^2+q^2+1)^{3/2}(1+q_s^2+p_s^2)^{-1/2}} \quad (3)$$

本文初始迭代条件 $z^0(x,y)=0$, 初始光照方向 $p_s=0, q_s=0$ 对式进行迭代。

2 多聚焦刀具图像融合的传统方法

2.1 刀具图像的小波变换

对于 $M \times N$ 的图像 $f(x,y)$, 其离散小波变换^[12]为

$$w_\varphi(j_0, m, n) = \frac{1}{(MN)^{1/2}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \varphi_{j_0, m, n}(x,y) \quad (4)$$

$$w_\psi^i(j, m, n) = \frac{1}{(MN)^{1/2}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \psi_{j, m, n}^i(x,y) \quad (5)$$

离散小波反变换为

$$f(x,y) = \frac{1}{(MN)^{1/2}} \sum_m \sum_n w_\varphi(j_0, m, n) \phi_{j_0, m, n}(x,y) + \frac{1}{(MN)^{1/2}} \sum_{i=h,v,d} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_m \sum_n w_\psi^i(j, m, n) \psi_{j, m, n}^i(x,y) \quad (6)$$

二维小波变换的分解过程如图3所示。

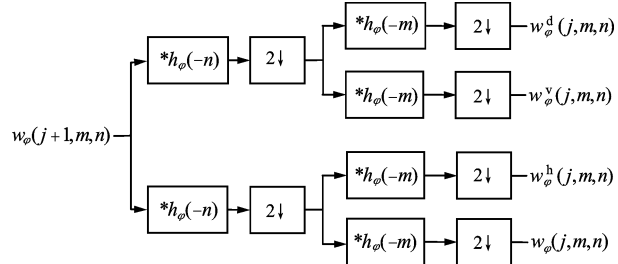


图3 小波分解过程示意图

图3中 $*$ 表示卷积,第1级的输入表示成矩阵的数字图像 $f(x,y)$,在第2级中以 $w_\varphi(j_0, m, n)$ 作为输入,第3级分解依次类推。类似的,重构过程的原理是上述过程的逆过程。

2.2 刀具图像的非下采样轮廓波变换

非下采样轮廓波变换(NSCT)是一种多尺度、多方向图像分析方法,其灵活的多方向滤波能力可以捕获到图像内在的几何结构。NSCT主要经过两个步骤完成:多尺度分解和多方向分解。前者在进行操作时采用的是非下采样的金字塔式滤波器组(NSPFB),对各尺度上的高频子带采用非下采样的方向滤波器组(NSDFB)进行方向滤波^[13]。图4为两级NSCT过程的分解示意图。

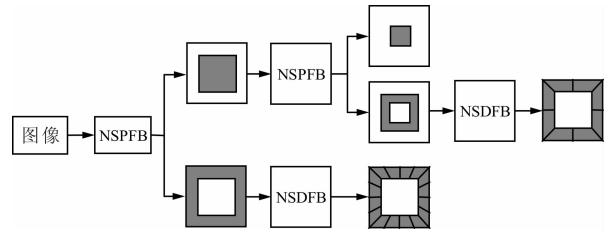


图4 两级NSCT分解过程示意图

3 多聚焦刀具图像融合的变换域方法

本文提出的考虑变换域融合方法刀具磨损区域三维重构的技术路线如图5所示。首先对每幅刀具图像进行NSCT操作,得到低通子带系数和带通方向子带系数,即低频部分和高频部分。将所有低频部分通过一定低频融合规则进行融合,形成新的低频系数,将所有高频部分通过一定高频融合规则进行融合,形成新的高频系数,最后通过逆变换得到融合后的聚焦清晰刀具图像。融合后的刀具磨损区域图像是一幅聚焦清晰的图像,清楚地反映了刀具磨损特征,然后根据前面的明暗形状恢复方法补充聚焦合成过程中缺失的深度值,实现对刀具磨损区域的三维重构。

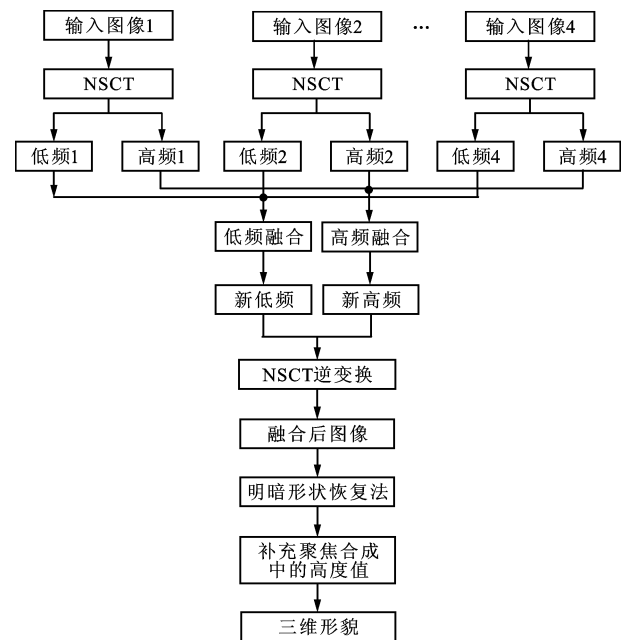


图5 刀具磨损区域三维重构的技术路线

低频融合规则如图6所示。具体来说,先将NSCT的低频系数进行小波变换,得到一系列的小波系数:一方面,对小波变换得到的低频系数采用取平均的融合方法,保留图像的光学信息;另一方面,小波变换后得到的高频系数是水平、垂直和对角方

向的系数,采用绝对值取大的融合方法。然后,将小波系数进行反变换,得到 NSCT 的新低频系数。

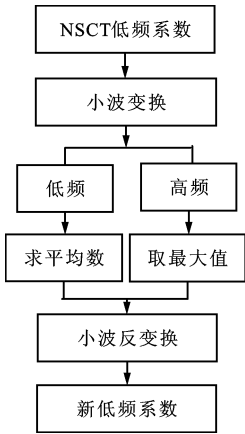


图 6 低频融合流程

小波变换后低频部分求平均数

$$C^F(x,y) = \sum_{k=1}^4 C^k(x,y)/4 \tag{7}$$

式中: $C^k(x,y)$ 为第 k 幅图像的 NSCT 低频系数小波变换后得到的低频部分。

小波变换后高频部分取最大值

$$H^F(x,y) = \max H^k(x,y) \tag{8}$$

式中: $H^k(x,y)$ 为第 k 幅图像的 NSCT 低频系数小波变换后得到的高频部分。

对于高频融合规则方面,本文构造了区域方差来进行融合。高频部分主要体现的是图像的边缘轮廓细节信息,这些信息需要保留,以增大融合后图像的清晰度。融合流程如图 7 所示。

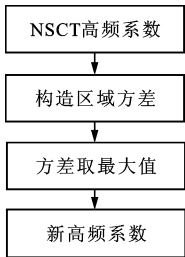


图 7 高频融合流程

刀具图像的子图像 l 层 d 方向以 (x,y) 为中心像素点的区域方差可表示为

$$V_{l,d}^k(x,y) = \frac{1}{ab} \sum_{x=i-a}^{i+a} \sum_{y=j-b}^{j+b} [f(x,y) - \bar{f}]^2 \tag{9}$$

式中: a 为模板的长; b 为模板的宽; $\bar{f}$ 为模板区域内像素点的均值。

将区域方差取得最大值的点作为融合后图像中聚焦清晰的部分,数学表达式如下

$$C_{l,d}^F(x,y) = C_{l,d}^k(x,y), \max V_{l,d}^k(x,y) \tag{10}$$

式中: $C_{l,d}^F(x,y)$ 为融合后图像在 (x,y) 处 l 层 d 方向上的带通子带系数。

4 实验结果与分析

实验所用图像采集装置具备自动白平衡调整能力,使得在不同的光照、白平衡条件下,采集的红、绿、蓝 3 色均可以保持合适的比例,转化为灰度图后,即可利用其光照信息。图 8 为实验采用的 YW2 型硬质合金焊接刀具,在不同物距下采集的 4 幅刀具图像如图 9 所示。

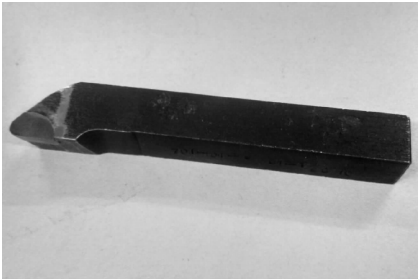


图 8 YW2 型硬质合金刀具

观察图 9 的 4 幅图发现,在第 1 幅中靠近刀面的区域是清晰的,靠近洼坑磨损底部的区域是模糊的。随着物距的改变,可以得到剩余 3 幅清晰区域不一样的刀具图像序列。

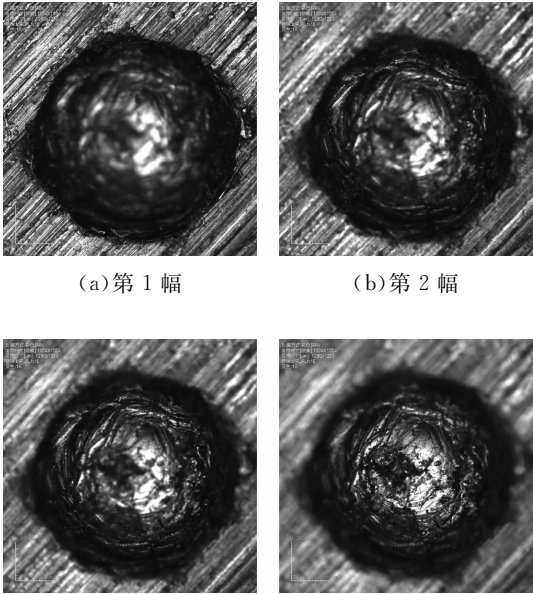


图 9 采集到的刀具图像序列

采用聚焦合成原理得到的深度值离散的刀具磨损区域三维重构图如图 10 所示,图中颜色较亮区域代表靠近刀具表面,颜色较深区域代表靠近洼坑底

部,可以发现其深度值是离散的,重构出的磨损区域三维形貌不是很完整。因此,需要再利用聚焦清晰图像中的光照信息来补充离散深度值,使得磨损区域的三维形貌完整化。

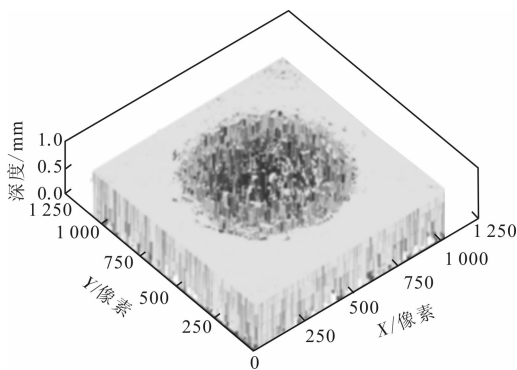


图10 深度值离散的刀具磨损区域三维重构图

采取明暗形状恢复方法来充分利用二维聚焦清晰图像中的光照信息,具体来说就是根据多幅聚焦模糊的刀具图像,获得1幅聚焦清晰的图像,然后对图像中的光照信息进行求解,获得图像连续深度值。

由于明暗形状恢复方法缺少明确有力的几何约束,目前通过该方法只能得到物体表面的大致轮廓,且在求解反射图的过程中一般将图像深度单位化,所以在对图像处理之前应该先对其深度图进行标定。

标定原理如下

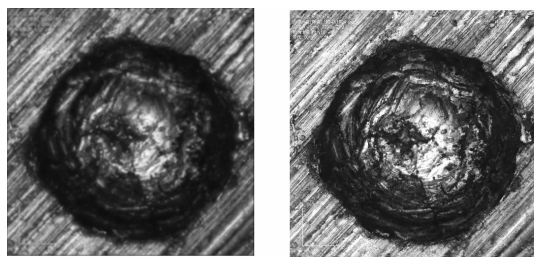
$$d_{\text{shading}}^1(x, y) = \frac{\max(d_{\text{focus}}(x_i, y_i))}{\max(d_{\text{shading}}^0(x_i, y_i))} d_{\text{shading}}^0(x, y) \quad (11)$$

式中: $d_{\text{shading}}^1(x, y)$ 代表标定过的明暗形状恢复方法中 (x, y) 处的像素深度值; $d_{\text{shading}}^0(x, y)$ 代表未标定的原有明暗形状恢复方法得到的 (x, y) 处像素深度值; $\max(d_{\text{focus}}(x_i, y_i))$ 和 $\max(d_{\text{shading}}^0(x_i, y_i))$ 分别代表聚焦合成方法和明暗形状恢复方法得到的最大深度值。

4.1 聚焦清晰的刀具图像

首先分别采用小波变换(WT)和 NSCT 方法融合上述刀具图像序列,以得到聚焦清晰的刀具图像,结果分别如图 11a 和 11b 所示。从图中可以发现,小波变换处理的刀具图像保留了较好的灰度整体信息,但是一些细节信息表达的并不是很好。NSCT 方法处理的刀具图像较好地展示了磨损区域的边缘轮廓信息,但是对于灰度整体信息的处理不是很好。

针对每一个物距,所采集的图像中模糊、清晰区域均不一样,通过不断改变物距得到一系列聚焦清晰不一的图像。根据设定的融合规则从图像序列中



(a) WT 方法

(b) NSCT 方法

图11 两种经典方法得到的聚焦清晰刀具图像

提取出相应位置处的清晰区域及对应的物距,并将该处的深度值作为融合后相应位置处的值,物距越大,图像中清晰区域所代表的实际磨损位置越靠近磨损洼坑的上部。因此清晰的磨损区域边界处于图 9a 中(对应的物距最大),在其他图像中均不存在清晰的磨损区域边界。计算磨损体积时以图 9a 的物距作为基准即可将磨损区域边界与实际主磨损区域区别开来。

采用本文方法得到的聚焦清晰刀具图像如图 12 所示。将本文方法和其他两种方法得到的图像进行对比发现,本文方法得到的刀具磨损区域图像在边缘轮廓细节信息、灰度整体信息方面得到了加强,因此本文方法得到的图像质量更高。

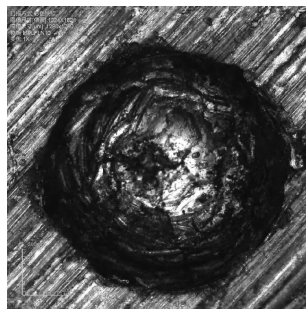


图12 本文方法得到的聚焦清晰刀具图像

为了使得这种区别变得更明显、直观,利用4种客观的图像质量评价指标,即平均梯度、边缘强度、信息熵和标准差,对采用变换域融合方法、NSCT方法和 WT 方法得到的10个刀具磨损样本的融合图像的质量进行量化评价,对比结果如图 13 所示。

根据图 13 可看出:在平均梯度方面,本文方法得到的图像相对其他两种方法具有明显较高的平均梯度值,只有样本4和样本10跟其他方法相差无几;在边缘强度方面,本文方法在每个样本上均比 NSCT 和 WT 方法好,展现出了满意的效果;在信息熵方面,本文方法除了样本2和样本5略高于 NSCT 方法外,其他样本的表现均明显高于 NSCT 和 WT 方法;在标准差方面,样本7的标准差和 WT

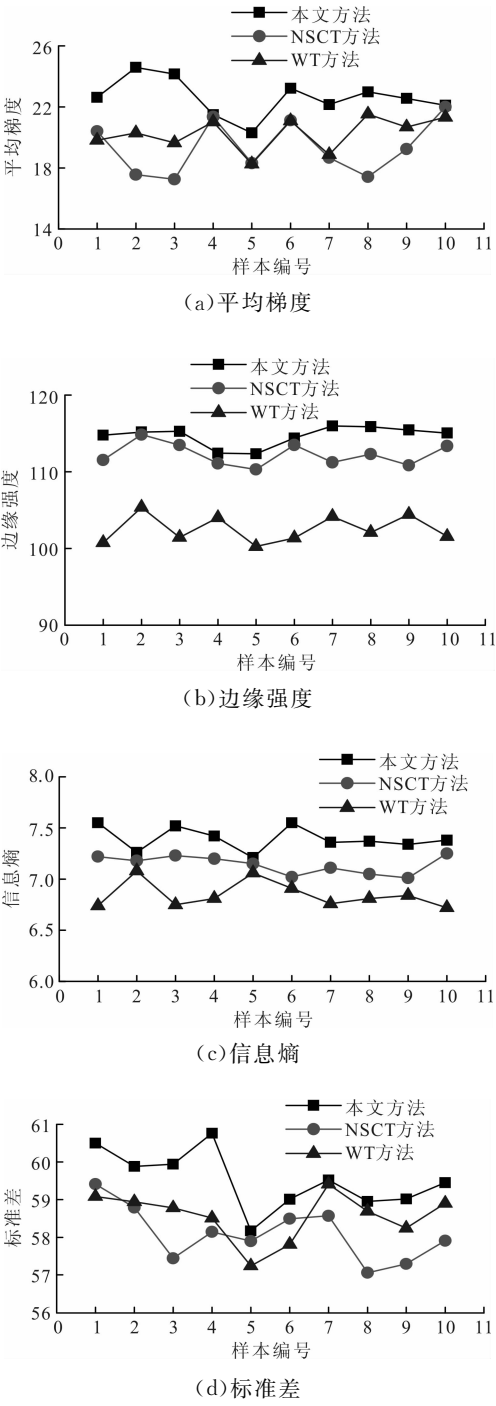


图 13 3 种方法融合效果的对比

方法相当,其他样本的表现均明显好于 NSCT 和 WT 方法。综合以上情况,可以说明本文的变换域融合方法得到的刀具图像质量总体来说比 NSCT 和 WT 方法要好,既保留了灰度整体信息,又保留了边缘轮廓等细节信息。

4.2 刀具磨损区域三维形貌与磨损体积分析

有了高质量的聚焦清晰的刀具图像,就可以补充聚焦合成过程中离散的深度值。如前所述,采取明暗形状恢复方法可充分利用二维聚焦清晰图像中

的光照信息来补充离散的深度值,从而获得高质量的刀具磨损区域三维形貌图。

WT 方法和 NSCT 方法得到的刀具磨损区域三维重构图如图 14 所示。将图 14 的结果与图 10 的结果进行对比发现,图 14 的三维形貌相对来说较为清晰、完整。另外,虽然 WT 方法与 NSCT 方法的结果比较好,但是其重构出的三维形貌在部分区域仍然没有很好地体现实际的刀具磨损区域,特别是在中间区域。

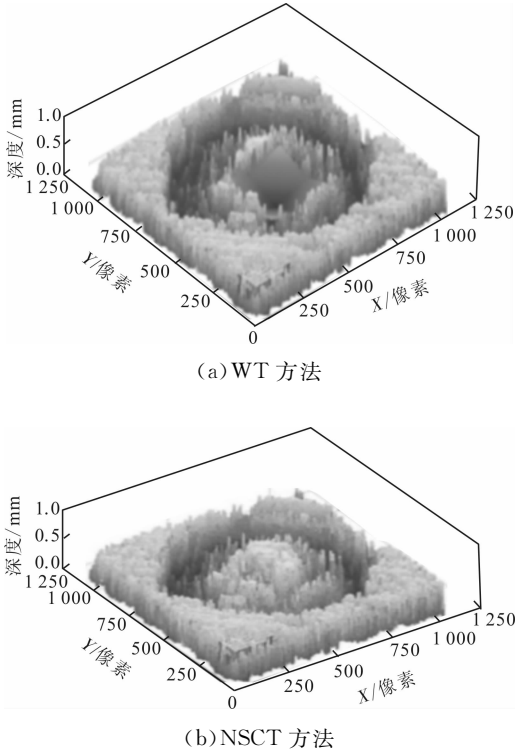


图 14 传统方法刀具磨损区域三维重构图

本文方法得到的刀具磨损区域的三维重构结果如图 15 所示,显微镜得到的磨损区域三维重构图如图 16 所示,可以发现,这两个图的中间都是凹下去的区域,形貌大体相似,说明本文方法基本能够较好地获得刀具磨损区域的三维形貌。

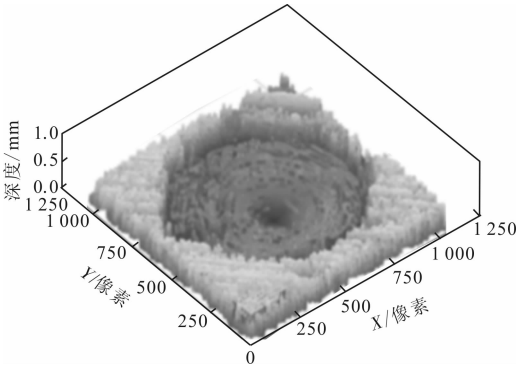


图 15 本文方法刀具磨损区域三维重构图

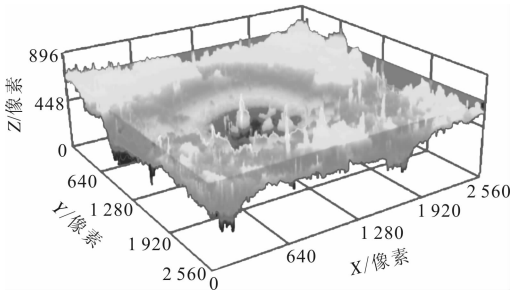


图 16 显微镜下刀具磨损区域三维重构图

在磨损体积的计算方面,将 WT 方法、NSCT 方法和本文方法得到的结果与显微镜的测量结果进行对比。为了确保显微镜结果可以作为参考值,本文采用了 OLS4000 和 DSX500 两种显微镜分别测量了 10 个样本的刀具磨损区域的磨损体积,从样本 1 到样本 10,磨损程度是逐渐增大的,从 1.730 mm³ 到 2.146 mm³,结果如图 17 所示。

从图 17 发现,不同显微镜测得同一样本的磨损体积基本相同,因此可将其均值作为磨损体积精度的参考值。表 1 列出了分别使用显微镜、本文方法、NSCT 方法和 WT 方法获得的刀具磨损体积。计算上述磨损体积的相对误差,结果如表 2 所示。

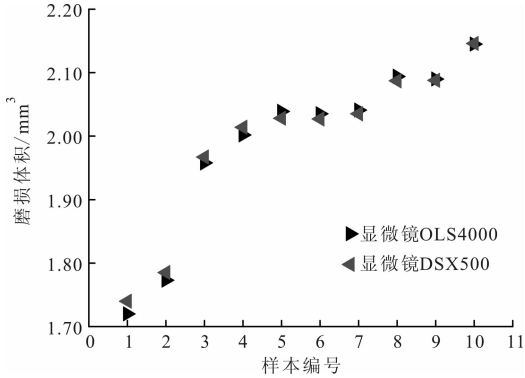


图 17 两种显微镜得到的 10 个样本的磨损体积

通过分析表 2 中的数据,可以发现本文方法在样本 5 和样本 10 上的精确度稍微优于其他两种方法,而在其余样本上均比其他两种方法取得了较为明显的优势。此外,通过观察全部样本来看,还可以发现本文方法得到的磨损体积与显微镜结果的相对误差均在 15% 以内,且平均相对误差为 9.04%,而 NSCT 方法的相对误差在 23% 以内,且平均相对误差为 14.55%,WT 方法的相对误差为 26% 以内,且平均相对误差为 15.70%。综上,本文方法得到的三维形貌和磨损体积比 NSCT 和 WT 方法的效果更好。

表 1 4 种方法得到的 10 个样本刀具磨损体积

方法	磨损体积/mm ³									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
显微镜	1.730	1.779	1.963	2.008	2.034	2.031	2.038	2.091	2.089	2.146
本文方法	1.982	1.984	2.154	2.178	1.821	2.134	2.198	1.914	1.968	1.964
NSCT	2.118	2.154	1.649	1.744	1.803	1.701	1.813	1.834	2.351	2.348
WT	2.173	2.145	1.706	1.715	1.689	1.762	1.850	1.808	1.788	2.486

表 2 不同方法得出的磨损体积相对误差

方法	相对误差/%										平均误差/%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
本文方法	14.57	11.52	9.73	8.47	10.45	5.07	7.85	8.44	5.79	8.46	9.04
NSCT	22.43	21.08	15.97	13.15	11.34	16.25	11.04	12.27	12.54	9.44	14.55
WT	25.61	20.57	13.07	14.59	16.94	13.24	9.22	13.51	14.41	15.87	15.70

5 结 论

本文提出的变换域融合方法,将非下采样轮廓波变换和小波变换相结合,来融合刀具磨损图像的整体灰度信息和边缘细节信息,以获取聚焦清晰的二维刀具图像,从而重构出较为精确完好的磨损区域三维形貌,并计算出磨损体积。具体来说,针对非

下采样轮廓波变换和小波变换的各自特点和优势,设定融合规则采用小波变换方法对非下采样轮廓波变换得到的低频系数进行融合,对得到的高频系数构造区域的方差进行融合。对本文方法和传统方法得到的图像进行主观分析,并根据客观的图像质量评价指标进行量化评价与比较。对 3 种方法得到磨损区域三维形貌和磨损体积与显微镜的结果进行了

对比分析发现,本文方法得到的三维形貌与显微镜观察结果最接近,且计算出的磨损体积也最接近显微镜的测量结果,平均相对误差小于 10%,优于单独采用非下采样轮廓波变换和小波变换方法得到的结果。

参考文献:

- [1] ZHU Aibin, HE Dayong, ZHAO Jianwei, et al. 3D wear area reconstruction of grinding wheel by frequency-domain fusion [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1): 1111-1117.
- [2] 童展,何宁,李亮,等. 刀具磨损三维形貌的测量及评价方法 [J]. 机械制造与自动化, 2008, 37(5): 57-60.
TONG Zhan, HE Ning, LI Liang, et al. Methods to measure and evaluate 3D topography of tool wear [J]. Mechanical Manufacturing and Automation, 2008, 37(5): 57-60.
- [3] WANG W H, WONG Y S, HONG G S. 3D measurement of crater wear by phase shifting method [J]. Wear, 2006, 261(2): 164-171.
- [4] VUĠINA D R, BAJIĠ D, JOZIĠ S, et al. Evaluation of 3D tool wear in machining by successive stereo-photogrammetry and point cloud processing [J]. Tehniċki Vjesnik, 2013, 20(3): 449-458.
- [5] ĠERĠE L, PUŠAVEC F, KOPAĠ J. 3D cutting tool-wear monitoring in the process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(9): 3885-3895.
- [6] 李丽宏. 基于显微视觉的刀具磨损状态监测技术研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2013: 15-31.
- [7] BARRON J T, MALIK J. Shape, illumination, and reflectance from shading [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(8): 1670-1687.
- [8] PICCININI F, TESEI A, ZOLI W, et al. Extended depth of focus in optical microscopy: assessment of existing methods and a new proposal [J]. Microscopy Research & Technique, 2012, 75(11): 1582-1592.
- [9] 朱爱斌,胡浩强,何大勇,等. 采用频域融合方法的砂轮刀具磨损三维重构技术 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 82-86.
ZHU Aibin, HU Haoqiang, HE Dayong, et al. Three-dimensional reconstruction of tool wear area for grinding wheel using frequency-domain fusion method

- [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 82-86.
- [10] HU Jianfang, ZHENG Weishi, XIE Xiaohua, et al. Sparse transfer for facial shape-from-shading [J]. Pattern Recognition, 2017, 68: 272-285.
- [11] CIACCIO E J, TENNYSON C A, BHAGAT G, et al. Use of shape-from-shading to estimate three-dimensional architecture in the small intestinal lumen of celiac and control patients [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2013, 111(3): 676-684.
- [12] MAK BOL N M, KHOO B E. A new robust and secure digital image watermarking scheme based on the integer wavelet transform and singular value decomposition [J]. Digital Signal Processing, 2014, 33: 134-147.
- [13] LI Huafeng, CHAI Yi, LI Zhaofei. Multi-focus image fusion based on nonsubsampling contourlet transform and focused regions detection [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(1): 40-51.

[本刊相关文献链接]

- 张鹏鹏,赵伟刚,董光能. 铜基石墨密封材料的摩擦磨损性能研究. 2017, 51(9): 92-97. [doi:10.7652/xjtuxb201709013]
- 温淑花,张学良,陈永会,等. 结合面切向接触等效黏性阻尼分形模型. 2017, 51(1): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201701001]
- 邱恒斌,徐自力,刘雅琳,等. 一种求解含围带阻尼成圈叶片振动响应的高效方法. 2016, 50(11): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201611001]
- 夏凯,孙岩桦,洪德江,等. 轴向拉紧的圆弧端齿轴段扭转特性研究. 西安交通大学学报, 2016, 50(5): 51-56. [doi:10.7652/xjtuxb201605008]
- 雷默涵,姜歌东,梅雪松,等. 高速球轴承微接触弹流摩擦及生热分析. 2016, 50(4): 81-88. [doi:10.7652/xjtuxb201604013]
- 朱爱斌,何大勇,邹超,等. 刀具磨损图像视差图的非标定方法. 2016, 50(3): 8-15. [doi:10.7652/xjtuxb201603002]
- 刘雅琳,上官博,徐自力. 干摩擦阻尼对失谐叶盘系统受迫振动的影响. 2016, 50(2): 111-117. [doi:10.7652/xjtuxb201602019]
- 朱爱斌,胡浩强,何大勇,等. 采用频域融合方法的砂轮刀具磨损三维重构技术. 2015, 49(5): 82-86. [doi:10.7652/xjtuxb201505013]

(编辑 杜秀杰)