

复小波域影致留形及金属铣削表面质量评估

何昱超 孙维方 陈彬强 姚斌 曹新城
(厦门大学航空航天学院机电工程系 厦门 361005)

摘要:针对机械加工产品质量原位评估问题,提出一种数字图像为媒介的在线检测方法。通过数码相机对加工表面进行近场拍摄成像,获得影像在16位灰度空间上的映射。引入加工表面连续性约束构造辐照方程的正则化问题并求解,从灰度信息中恢复加工表面的三维模型。采用双数复小波变换对三维重构模型进行后处理降噪,计算加工表面的粗糙度评价指标。通过航空铝合金端面铣实验并应用提出方法进行分析,与离线接触式测量的结果进行对比,验证了该方法具有高精度重构效果,可有效的应用于在线金属铣削过程状态监测与加工质量评估。

关键词:质量评估;双数复小波;影致留形;金属铣削

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Complex-valued wavelet enhanced shape from shading and metal milling surface quality assessment

He Yuchao Sun Weifang Chen Binqiang Yao Bin Cao Xincheng
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to address the problems of online machining in-situ product quality evaluation, an online detecting method taking digital image as the monitoring vehicle is put forward. 16 bits image is acquired by photographing for the metal milling surface. The brightness equation regularization problem considering the continuous restriction of the machined surface is obtained to recover the three dimension surface. The dual tree complex wavelet transform is also applied to denoise the reconstruction surfaces. A face milling case of aerial aluminum alloy 7075 is investigated to verify the effectiveness of the proposed methodology. The result of the proposed method is compared with that of off-line roughness measuring instrument. It is demonstrated that the roughness indicators derived from the proposed method are consistent with those of the offline instrument. The comparison results indicates that the non-contact method is effective for the on-line metal milling condition monitoring and machining quality assessment.

Keywords: quality assessment; dual tree complex wavelet transform; shape from shading; metal milling

1 引言

承担金属切削任务的数控机床是典型的复杂机电装备,其状态监测与故障诊断问题是重要的研究热点。振动信号(包括位移、速度、加速度等不同类别)是最为广泛应用的故障诊断方法,与之相关的小波变换^[1-2]、稀疏展开表示^[3]等信号处理方法得到了长足发展。实际应用中传感器安装位置已经事先固定,并不能实时贴近实际加工位置,传递路径造成的影响不可忽略^[4]。近年来,学者们意识到材料加工表面的数字影像信息可以有效反应数控机床运行状态和健康程度。Son等人^[5]采用光学摄像头进行了圆筒结构的振动位移测量,并与间隙传感器获取位移

进行了对比,得到了较高的测量精度。Zi等人^[6]采用光学摄像头并基于散斑法对短轴功率进行了实时在线测量。

影致留形(shape from shading, SFS)是一种由物体表面在光源作用所产生的亮度信息恢复其三维空间位置的方法^[7]。在数学上,影致留形可以归纳为特定成像模型下偏微分方程(partial differential equation, PDE)的求解问题。目前关于影致留形研究的热点在于光源的选择和PDE的快速数值求解^[8-9]。双数复小波变换(dual tree complex wavelet transform, DTCWT)是近年来提出的新型小波变换,有利于提取数字信号中的平移不变量特征。Wang^[10]和Chen^[11]等研究了不同滤波器结构下的DTCWT紧框架构造和应用,证明了DTCWT对强噪声干扰下

收稿日期:2017-02

非平稳的时频域特征具有良好的辨识能力。

本文将影致留形方法和双树复小波变换应用于机械加工过程的状态监测与表面质量原位评估中,提出一种图像作为监测媒介的状态监测和故障诊断方法。采用常见的单镜头反光式取景照相机获取加工表面的灰度图像,通过引入加工表面连续性约束构造求解影致留形方法的正则化优化算子,获得加工表面的三维纹理图。在采用双数复小波变换对纹理界面的平面轮廓曲线进行降噪,获得形状较规则的粗糙度评价曲线,计算两种典型的粗糙度指标,通过与接触式粗糙度测量仪获得的结果相对比,验证所提出方法的有效性。

2 数字图片灰度映射

相对于其它机电设备状态监测与故障诊断方法,提出采用机械零件加工表面的质量作为监测对象,从二维数字图像中高质量的还原试件加工表面形貌。采用常见的民用单镜头反光式取景照相机(1 200 万像素级)获取金属铣削表面形貌。为提高表面的三维重构质量还原出失真度小的三维数字模型,提取 RAW(raw image format)图像文件 $N = 16$ Bit 色阶的灰度图(对应 $2^{16} = 65\ 536$ 个色阶层次)。

3 铣削平面的影致留形优化算法

影致留形方法 SFS 是物体成像机理在数学上的反演^[12]。理想的 Lambert 表面漫反射模型如图 1 所示。

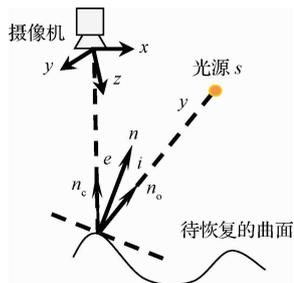


图 1 摄影测量表面反射原理

图 1 中,取待恢复曲面上的一个微元作为研究对象。在成像平面的一个右手标架($Oxyz$)上,微元到成像平面的距离 $z(x, y)$ 由 Taylor 级数可展开为:

$$\delta z = p(x, y)\delta x + q(x, y)\delta y + \varepsilon$$

式中: ε 为高阶无穷小量, $p(x, y)$ 、 $q(x, y)$ 为 $z(x, y)$ 的两个偏导数:

$$p(x, y) = \partial z / \partial x, q(x, y) = \partial z / \partial y$$

与之相关联的两个方向倒数为:

$$\mathbf{r}_x = [1 \ 0 \ p(x, y)]^T, \mathbf{r}_y = [0 \ 1 \ q(x, y)]^T$$

则曲面的单位法向量 $\hat{\mathbf{n}}$ 可由 \mathbf{r}_x 、 \mathbf{r}_y 的叉乘运算获得。

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_y}{\|\mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_y\|} = [-p \ -q \ 1]^T$$

图 1 中 θ_i 表示曲面法向量 $\hat{\mathbf{n}}$ 与点光源 s (辐射强度为

E)向量 $[-p_s \ -q_s \ 1]^T$ 的夹角,则微元在场景中的辐射强度 L 可以表示为:

$$L(x, y) = E \cdot \cos\theta_i = E \cdot \frac{\hat{\mathbf{n}}^T \mathbf{s}}{\|\hat{\mathbf{n}}\| \cdot \|\mathbf{s}\|} = E \cdot \frac{pp_s + qq_s + 1}{(p^2 + q^2 + 1)^{1/2} (p_s^2 + q_s^2 + 1)^{1/2}} \quad (1)$$

若按曲面上的最大辐射强度进行归一化处理,则式(1)的表达式成为待恢复曲面的 Lambert 反射图方程 $R_s(p, q)$ 。则图像的辐照方程可以表达为:

$$E(x, y) = R(p, q) \quad (2)$$

3.1 反射图模型的正则化求解

针对于辐照方程的求解,提出利用复分析中的球极坐标保角变换对式(2)进行求解,引入两个参数:

$$f = \frac{2p}{1 + (1 + p^2 + q^2)^{1/2}}$$

$$g = \frac{2q}{1 + (1 + p^2 + q^2)^{1/2}}$$

则辐照方程转变为:

$$e_s = \operatorname{argmin}_{f, g} \iint_I (E(x, y) - R_s(f, g))^2 dx dy$$

对需要解决的铣削加工表面质量评估问题,在高解析度的情况下,可知参量 f 和 g 的变化不会十分剧烈,因此可引入优化目标式(3)提高求解速度。

$$e_s = \operatorname{argmin}_{f, g} \iint_I ((f_x^2 + f_y^2) + (g_x^2 + g_y^2)) dx dy \quad (3)$$

式中: f_x, f_y, g_x, g_y 保角变换后的参数 f, g 的则影致留形的问题变为引入额 Lagrange 乘子。

$$\operatorname{argmin}_{f, g} e = \operatorname{argmin}_{f, g} (e_s + \lambda e_i) \quad (4)$$

相当于对

$$F = (f_x^2 + f_y^2) + (g_x^2 + g_y^2) + \lambda (E(x, y) - R_s(f, g))^2$$

进行优化,根据 Euler 方程为:

$$F_f - \frac{\partial}{\partial x} F_{f_x} - \frac{\partial}{\partial y} F_{f_y} = 0$$

$$F_g - \frac{\partial}{\partial x} F_{g_x} - \frac{\partial}{\partial y} F_{g_y} = 0$$

将 F 的最小化问题具体表示为:

$$\nabla^2 f = -\lambda (E(x, y) - R_s(f, g)) \frac{\partial R_s}{\partial f} \quad (5)$$

$$\nabla^2 g = -\lambda (E(x, y) - R_s(f, g)) \frac{\partial R_s}{\partial g} \quad (6)$$

式中 Laplace 算子:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

3.2 数值松弛迭代算法

实际中无法获得式(5)和(6)所示的连续形式方程,对于机械零部件表面的近场高分辨率灰度图(每个栅格的位置用自然数 i, j 进行索引),可以等价对式(4)的全局误差。

$$e = \sum_i \sum_j (s_{i,j} + \lambda r_{i,j}) \quad (7)$$

进行优化。则函数的局部连续程度 $e_{i,j}$ 和辐照方程可

以表示为:

$$s_{i,j} = \frac{1}{4}((f_{i+1,j} - f_{i,j})^2 + (f_{i,j+1} - f_{i,j})^2 + (g_{i+1,j} - g_{i,j})^2 + (g_{i,j+1} - g_{i,j})^2)$$

$$r_{i,j} = (E_{i+1,j} - R_s(f_{i,j}, g_{i,j}))^2$$

全局误差 e 关于 $f_{k,l}$ 和 $g_{k,l}$ 的偏导数分别为:

$$\frac{\partial e}{\partial f_{k,l}} = 2(f_{k,l} - \bar{f}_{k,l}) - 2\lambda(E_{k,l} - R_s(f_{k,l}, g_{k,l})) \frac{\partial R_s}{\partial f}$$

$$\frac{\partial e}{\partial g_{k,l}} = 2(g_{k,l} - \bar{g}_{k,l}) - 2\lambda(E_{k,l} - R_s(f_{k,l}, g_{k,l})) \frac{\partial R_s}{\partial g}$$

其中索引 k, l 式为了避免与 i, j 发生混淆所引入。

$$\bar{f}_{i,j} = \frac{1}{4}(f_{i+1,j} + f_{i-1,j} + f_{i,j+1} + f_{i,j-1})$$

$$\bar{g}_{i,j} = \frac{1}{4}(g_{i+1,j} + g_{i-1,j} + g_{i,j+1} + g_{i,j-1})$$

在曲面的灰度图中,可用每个栅格点上的有限差分。

$$p(x,y) \approx p(i,j) = z_{i+1,j} - z_{i,j}$$

$$q(x,y) \approx q(i,j) = z_{i,j+1} - z_{i,j}$$

可以获得 $f_{k,l}$ 与 $g_{k,l}$ 的迭代初始值 $f_{k,l}^0$ 与 $g_{k,l}^0$ 。从而得到松弛化的迭代求解方法可以表示为:

$$f_{k,l}^{n+1} = \bar{f}_{k,l} + \lambda(E_{k,l} - R_s(f_{k,l}^n, g_{k,l}^n)) \frac{\partial R_s}{\partial f}$$

$$g_{k,l}^{n+1} = \bar{g}_{k,l} + \lambda(E_{k,l} - R_s(f_{k,l}^n, g_{k,l}^n)) \frac{\partial R_s}{\partial g}$$

3.3 双数复小波变换

双数复小波变换是近几年发展起来的一种具有诸多优良特性的新型小波变换方法^[13],对时空上的几何不变量具有平移不变性,其局部微观特征的刻画能力相对于传统离散小波变换显著增强^[14]。DTCWT 的小波基由两个尺度函数 $\{\varphi^{\text{Re}}(t), \varphi^{\text{Im}}(t)\}$ 和两个小波函数 $\{\psi^{\text{Re}}(t), \psi^{\text{Im}}(t)\}$ 构成。两个小波函数呈 Hilbert 变换对:

$$\psi^{\text{Re}}(t) \approx H\{\psi^{\text{Im}}(t)\}$$

式中: $H\{\cdot\}$ 代表 Hilbert 变换对,即采用一个近似解析的复小波函数和一个近似解析的复尺度函数^[15]:

$$\psi^{\text{C}}(t) = \psi^{\text{Re}}(t) + j \cdot \psi^{\text{Im}}(t)$$

$$\varphi^{\text{C}}(t) = \varphi^{\text{Re}}(t) + j \cdot \varphi^{\text{Im}}(t)$$

对信号进行分解和重构。对离散序列进行分析时, DTCWT 的实分支和虚部对信号进行独立的内积变换,两个分支之间没有数据流动。双数复小波变换各尺度上的时频信息由原始复尺度伸缩和平移而成,见下式:

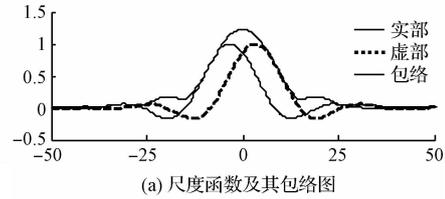
$$\Xi_{j,k}\{\psi\} = 2^{j/2} \psi(2^j \cdot t - k) = \psi_{j,k}$$

相应地,各细节信号序列可以通过内积变换获得

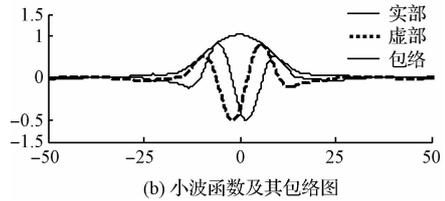
$$d_i^{\text{Re}}(k) = 2^{l/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^{\text{Re}}(2^l t - k) dt \quad (8)$$

$$d_i^{\text{Im}}(k) = 2^{l/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^{\text{Im}}(2^l t - k) dt \quad (9)$$

而逼近信号序列 $c_i^{\text{Re}}(k)$ 和 $c_i^{\text{Im}}(k)$ 是将式(8)和式(9)右式中 $\psi^{\text{Re}}(2^l t - k)$ 、和 $\psi^{\text{Im}}(2^l t - k)$ 替换为 $c^{\text{Re}}(2^l t - k)$ 、和 $c^{\text{Im}}(2^l t - k)$ 即可。本文采用文献[11]中构造的双树复小波基,它的时频分析原理如图 2 所示。



(a) 尺度函数及其包络图



(b) 小波函数及其包络图

图 2 双树复小波基的时频原理

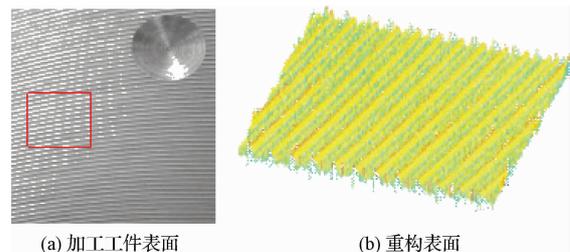
在本文中采用双树复小波变换对数字信号序列进行多尺度分析降噪,需要对逼近信号序列和细节信号序列进行重构,如下式:

$$d_i(k) = 2^{(l-1)/2} \left\{ \sum_m d_i^{\text{Re}}(k) \psi^{\text{Re}}(2^l t - m) + \sum_n d_i^{\text{Im}}(k) \psi^{\text{Im}}(2^l t - n) \right\} \quad (10)$$

$$c_i(k) = 2^{(l-1)/2} \left\{ \sum_m d_i^{\text{Re}}(k) \psi^{\text{Re}}(2^l t - m) + \sum_n d_i^{\text{Im}}(k) \psi^{\text{Im}}(2^l t - n) \right\} \quad (11)$$

4 航空铝合金铣削实验

为了对该方法进行有效性验证,进行金属平面铣削实验。本实验在 VMC650E/850E 加工中心上进行,试验采用硬质合金立铣刀对航空铝合金 7075 进行端铣加工。工件材料为航空铝合金 7075,铣削方式为顺铣,刀具为直径 60 mm 的可转位面铣刀。方料尺寸为 145 mm×92 mm×25 mm。铣削参数:主轴转速 1 200 r/min,进给速度 200 mm/min,沿着料长方向进行铣削加工。试验在 VMC650E/850E 加工中心上进行,其进给范围为 650 mm×400 mm×500 mm,轴向重复定位精度为±0.003 mm。



(a) 加工工件表面

(b) 重构表面

图 3 工件表面纹理

设计工装夹具将取景相机安装在数控机床的工作台上,对加工表面进行纹理摄影并对 CMOS 感光数据进行提取,并采用灰度映射将 RGB 三原色灰度信息插值到 $N=16$ bits 灰度空间上(65 536 个灰度级),最后生成所需要的数字图片(如图 3(a)所示)中方框部分为所需要进行

粗糙度评价的区域。基于第二部分的影致留形算法对航空铝合金毛坯的铣削表面纹理进行三维重构,其效果如图3(b)所示。由图可知其重构纹理周期性显著,较好的反映了工件的实际表面纹理。然而由于光源的不完美性和重构算法的迭代数值过程,其表面上出现大量的非光滑跳跃噪声,它们是实际加工表面纹理的干扰项。对图3(b)中的三维重构纹理取一个截面,基于第3部分双数复小波变换算法对获得的空间域的轮廓曲线进行滤波,结果如图4所示,其中可以发现若干周期内显著的波峰和波谷。

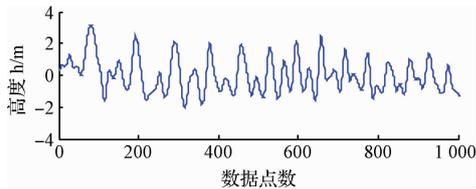


图4 表面粗糙度评定

根据轮廓算数平均偏差(R_a)对其进行表面粗糙度的评定,其 R_a 为 $1.2245\ \mu\text{m}$;根据微观不平度十点平均高度(R_z)对其进行表面轮廓峰高评定,其 $R_z=5.1144\ \mu\text{m}$ 。采用三丰SV 3100接触式测量仪对其进行粗糙度测量,其测量结果为, $R_a=12.387\ \mu\text{m}$, $R_z=4.7547\ \mu\text{m}$ 。提出的测量方法与接触式测量结果较为接近。由于摄影条件限制,不能对其进行较好的光线控制也是产生误差的一个重要原因。

5 结论

针对于金属铣削表面质量评估,提出采用图像作为工艺系统运行状态的监测媒介。以普通民用相机获取了加工表面的数字影像。通过加工表面连续性约束和Lambertian辐照方程逆向求解了实际三维表面。重构的表面很好地还原了原栅格图像中明暗相间的刀痕条纹。通过双数复小波变换对三维重构过程中的干扰成分进行了降噪,获得了反映真实微观不平度的轮廓评价曲线。计算了轮廓曲线的 R_a 和 R_z 值,并与传统的接触式测量仪进行了对比,结果表明二者在数值上十分接近。提出方法能有有效的评价金属表面的加工质量,可有效的应用于在线非接触式测量及金属铣削过程状态监测与加工质量评估。

参考文献

- [1] 孙萍萍. 基于小波包理论的激波信号去噪研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7):38-42.
- [2] 张芝旖, 姚恩涛, 石玉. 小波分析和MFCC融合的声音信号端点检测算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7):62-66.
- [3] XING H, LU C X, ZHANG Q. Frequency modulated weak signal detection based on stochastic resonance and genetic algorithm[J]. Instrumentation, 2016(1).

- [4] 杨双龙, 徐科军, 舒张平, 等. 应变式多维力传感器的故障诊断方法与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9):1361-1371.
- [5] SON K S, JEON H S, PARK J H, et al. Vibration displacement measurement technology for cylindrical structures using camera images[J]. Nuclear Engineering & Technology, 2015, 47(4):488-499.
- [6] ZI X, GENG S, ZHAO S, et al. Measurement of short shaft power based on a digital speckle correlation method[J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(4):45001-45008(8).
- [7] 王国琿, 宋玉贵. 一种非朗伯表面SFS的快速粘性解算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(7):1577-1583.
- [8] GUPTA G, KUMAR M. An iterative marching with correctness criterion algorithm for shape from shading under oblique light source[J]. Advances in Intelligent Systems & Computing, 2014, 236:535-546.
- [9] BREUB M, VOGEL O, WEICKERT J. Perspective shape from shading for phong-type non-lambertian surfaces[J]. Math Uni, 2008, 10(3):818-852.
- [10] WANG Y X, HE Zh J, ZI Y Y. Enhancement of signal denoising and multiple fault signatures detecting in rotating machinery using dual-tree complex wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 24(1):119-137.
- [11] 陈彬强, 张周锁, 郭婷. 双树复小波时频构造在齿轮系装配间隙检测的应用[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3):7-12.
- [12] TOZZA S, FALCONE M. Analysis and approximation of some shape-from-shading models for non-lambertian surfaces[J]. Journal of Mathematical Imaging & Vision, 2016, 55(2):153-178.
- [13] 白蕊, 杨万海, 张艳妮. 多光谱与高分辨率图像融合的新算法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2008, 35(4):696-702.
- [14] VEJDANNIK M, SADR A. Automatic microstructural characterization and classification using dual tree complex wavelet-based features and Bees Algorithm[J]. Neural Computing and Applications, 2016:1-13.
- [15] HU B, LI B. A new multiscale noise tuning stochastic resonance for enhanced fault diagnosis in wind turbine drivetrains[J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(2):025017.

作者简介

何昱超, 1993年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂曲面成型, 机械故障诊断。
E-mail: heyuchao1993@126.com