

文章编号 1004-924X(2014)07-1820-08

双树复小波稳健滤波在工程表面粗糙度评定中的应用

任志英^{1,2}, 高诚辉^{1,2*}, 申 丁¹, 林建兴¹

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 福州大学 摩擦学研究所, 福建 福州 350116)

摘要: 讨论了现有工程表面粗糙度评定基准滤波方法的优缺点。提出双树复小波变换(DT-CWT)具有近似的平移不变性和改进方向选择性等优点适合用于三维表面基准滤波,但其滤波过于理想化易导致滤波基准在野点处畸变。为此,进一步提出将空域双边滤波思想引入 DT-CWT 来增强双树复小波变换在提取基准面野点处的稳健性。通过低频重构得到基准信号,并对每层重构系数进行双边滤波,最终增强 DT-CWT 滤波基准的稳健性。仿真结果显示:改进的 DT-CWT 能很好地抑制异常值干扰引起的滤波基准在野点处产生的畸变,其得到的基准面的精度误差为 0.1832×10^{-10} m,重构误差为 0.0161×10^{-10} m,低于传统方法所得。对实测数据进行处理结果表明,双树复小波稳健滤波能很好地克服边界效应并抑制工程表面上深沟对滤波结果的影响。提出的方法为工程表面粗糙度评定提供了一种新方法。

关键词: 表面粗糙度; 三维基准; 双树复小波; 双边滤波; 稳健滤波

中图分类号: TP391.4; TG84 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142207.1820

Application of DT-CWT robust filtering to evaluation of engineering surface roughness

REN Zhi-ying^{1,2}; GAO Cheng-hui^{1,2*}; SHEN Ding¹; LIN Jian-xing¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. The tribology Institute of Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

* Corresponding author, E-mail: gch@fzu.edu.cn

Abstract: The merits and demerits of existing reference filtering methods for evaluation of the three-dimensional engineering surface roughness were discussed. It points out that the Dual-tree Complex Wavelet Transform (DT-CWT) is suitable for the three-dimensional surface reference filter because of its advantages of approximate translation invariance and improved directional selectivity. However, its filtering is too idealistic, which will cause an opposition at the point of distortion of the filtered reference. Therefore, this paper brings the airspace bilateral filtering into the DT-CWT transform to enhance its robustness at the point of distortion of the filtered reference. The low-frequency reference signal was obtained through reconstruction and each reconstructed coefficient was bilaterally filtered, then, the robustness of reference filtering was enhanced by the DT-CWT filtering. The simulation data show that the robustness filtering under the conditions of abnormal interference is enhanced by

收稿日期: 2013-08-15; **修订日期:** 2013-10-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175085, 51375094); 福建省教育厅 A 类资金资助项目 (No. JA13059); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目 (No. SKLTKF13B02); 福州大学科技发展基金资助项目 (No. 600907)

the improved DT-CWT, the precision error is 0.1832×10^{-10} m and the reconstruction error is 0.0161×10^{-10} m, which is much lower than that of the traditional methods. The processing results for practical measurement data indicate that the improved method well overcomes the edge effects and suppresses the effects of deep valley in the surface on the filtering results. It provides a new way for evaluation of engineering surface roughness.

Key words: surfaces roughness; 3-D reference; dual-tree complex wavelet; bilateral filtering; robust filter

1 引言

目前,在三维表面粗糙度评定中用于提取表面基准的常用滤波方法主要分为两大类:一是以傅里叶变换为基础的高斯滤波和样条滤波等^[1-4];二是具有多尺度分析的小波滤波法^[5]。其中传统的傅里叶分析方法主要是将信号用一系列正弦波之和表示,这种方法仅能提供频率定位,不具有空间定位分辨率,从而导致傅里叶方法只能确定信号的频率成分,不能分辨各种成分在何处发生。而工程表面一般是由多种工艺加工形成,且每种加工工艺都有其独特的纹理频带(波长),在实际工作中,人们希望通过滤波方法在三维空间中提取不同的频带(波长)以便进行质量分析。此时,有限的多尺度分析能力和无空间定位分辨率使得高斯滤波不再适用。小波滤波可通过动态改变分析时频窗的大小,克服了正弦信号和脉冲函数作为基函数的缺点,提供了对信号同时进行空间和频率定位的能力,目前已在工程表面表征与参数评定中得到了广泛应用,但其平移变动性与方向性差等缺点,特别是最优小波基的选取和小波分解次数的确定一直是三维表面评定中的难点,给使用者带来选择的困扰^[6]。

在图像领域提出的双树复小波变换(DT-CWT)^[7]因有近似的平移不变性和改进方向选择

性、有限的冗余度、可重构性和较高的计算效率等,使其具有解决以上不足的能力,在工程表面特征提取中得到了应用^[8]。但三维表面形貌残留下来的各种不同形状和尺寸的凸峰和凹谷等并非严格服从高斯分布,异常值的干扰会引起经双树复小波滤波得到的基准在野点处产生畸变,从而影响滤波精度。根据文献[9,10],目前在图像处理中,对斑点噪声和椒盐噪声都有良好滤除能力的滤波主要是双边滤波和中值滤波,属于空域、非线性滤波。但中值滤波不具有自适应性,在特征提取方面会导致基准面的过于平滑而失去某些重要特征;而双边滤波能将样本的幅度值作为判断滤波窗口中权值分配的依据,有助于基准面特征信号的保留;在三维表面方向形态特征的提取能力方面,双边滤波作为空域滤波明显弱于频域滤波。本文将双树复小波与空域双边滤波器相结合,同时发挥两者的优势,增强了双树复小波变换在提取基准面野点处的稳健性。

2 算法改进的理论基础

2.1 双树复小波变换

DT-CWT 采用了上下两棵树(即 A 树和 B 树),A 树和 B 树变换结果后构成 DT-CWT 的实部和虚部,可实现两棵树的互相补偿。图 1 所示为标准 DT-CWT 的分解和低频重构示意图。

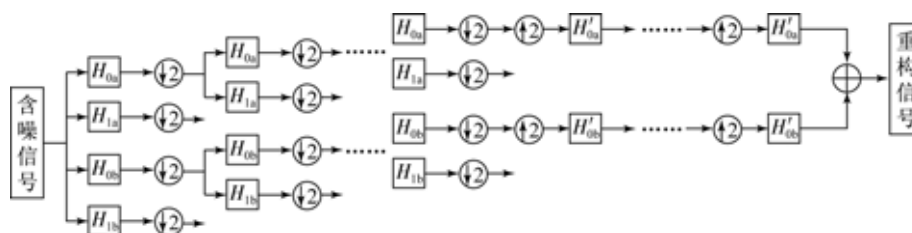


图 1 DT-CWT 的基本分解与低频重构示意图

Fig. 1 Frame of DT-CWT decomposition and reference reconstruction

DT-CWT 为克服 odd/even 滤波器的缺点, 采用 Q-shift 滤波器。该滤波器在两棵树的第二层及其以后的各层均为偶长度, 具有近似理想的平移不变性。为了保证偶树滤波器具有 1/4 延时, 并且满足传统的正交小波的完全重构的特点, 该滤波器满足^[11]:

$$\begin{cases} H_{L2}(z) = H_L(z^2) + z^{-1} H_L(z^{-2}), \\ H_L(z) H_L(z^{-1}) + H_L(-z) H_L(-z^{-1}) = 2, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $H_{L2}(z)$ 为具有 1/2 采样间距时延长度为 $4n$ 的线性滤波器, $H_L(z)$ 则是通过将 $H_{L2}(z)$ 进行二次采样得到。

对于二维信号 $f(s)$ 的复小波变换, 可将表示为二维尺度函数和 6 个高频方向小波函数的组合^[11]:

$$f(s) = \sum_{k \in Z^2} a_{j,L} \varphi_{j,L}(s) + \sum_{b \in B} \sum_{j \leq J} \sum_{l \in Z^2} d_{j,L}^b \psi_{j,L}^b(s), \quad (2)$$

式中: $s = (s_1, s_2)$, $B = \{\pm 15^\circ, \pm 45^\circ, \pm 75^\circ\}$ 。

对于 6 个不同高频子带的方向, 各个子带的函数可表示为:

$$\begin{cases} \psi^{\pm 15^\circ}(x, y) = \varphi^c(x) \psi^f(y) \\ \psi^{\pm 45^\circ}(x, y) = \psi^c(x) \varphi^f(y) \\ \psi^{\pm 75^\circ}(x, y) = \psi^c(x) \bar{\varphi}^f(y) \\ \psi^{\pm 15^\circ}(x, y) = \varphi^c(x) \bar{\psi}^f(y) \\ \psi^{\pm 45^\circ}(x, y) = \psi^c(x) \bar{\varphi}^f(y) \\ \psi^{\pm 75^\circ}(x, y) = \psi^c(x) \bar{\varphi}^f(y) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, DT-CWT 具有 6 个方向的选择性, 大大提高了对于表面形貌特征的检索性能。

DT-CWT 在提高结果精度的同时其计算冗余度也增加了, 且其在一般情况下将噪声理想化为高斯噪声, 当基准滤波时, 常因某些点的异常分布或者测量中带来的不可避免的误差, 给滤波后的基准带来畸变, 制约了其在实际工程中的应用。

2.2 双边滤波

双边滤波作为一种空域、非迭代、非线性滤波, 在平缓部分可将其视为标准的低通滤波器, 而在变化剧烈部分, 又可保持边缘细节。其一维滤波形式为^[9]:

$$h(x) = k^{-1}(x) \int_{-\infty}^{\infty} f(\epsilon) c(\epsilon, x) s(\epsilon, x) d\epsilon, \quad (4)$$

$$k(x) = \int_{-\infty}^{\infty} c(\epsilon, x) s(\epsilon, x) d\epsilon, \quad (5)$$

式中: $k(x)$ 为归一化因子; $f(\epsilon)$ 为样本点; $h(x)$ 为双边滤波低频信号; $c(\epsilon, x)$ 为 X 点和附近 ϵ 点的几何接近权值, 其一维高斯移不变形式为^[9]:

$$c(\epsilon, x) = e^{-\frac{\| \epsilon - x \|^2}{2\delta_d^2}}, \quad (6)$$

其中: δ_d 为几何接近度权值; $s(f(\epsilon), f(x))$ 为 X 点和附近 ϵ 点的光度测定相似度函数, 其一维高斯移不变形式为^[9]:

$$s(f(\epsilon), f(x)) = e^{-\frac{\| f(\epsilon) - f(x) \|^2}{2\delta_r^2}}, \quad (7)$$

其中: δ_r 为相似度权值。

由上述公式得出, 双边滤波引入了光度测定相似度函数 $s(f(\epsilon), f(x))$, 借助此函数来调节几何接近权值 $c(\epsilon, x)$ 。

图 2 所示为一维情况下采用高斯移不变形式的双边滤波过程, 滤波权函数窗在原始轮廓上不断平移, 与传统一维的高斯滤波权函数窗有明显不同。在双边滤波的某些权函数窗会产生大小不一的缺口, 这是由于在该窗口内的“缺口”所对应的样本与窗口中心所对应的样本相似度(幅度)相差较大, 而此时函数 $s(f(\epsilon), f(x))$ 接近于 0, 借助这种消弱奇异点权值的方式来达到稳健滤波目的。

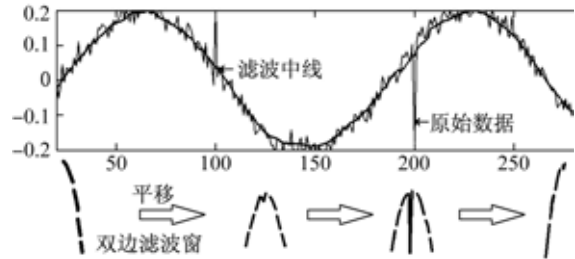


图 2 双边滤波过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bilateral filtering

对于三维情况, 假设在带有随机噪声的三维表面上有一异常点, 如图 3 所示。图 4 为图 3 中心点处大小为 15×15 的滤波窗口中的权值分布。二维信号中的样本在空间分布的顺序类似于函数的定义域, 各样本点的幅度类似于函数的值域。为了提高基准面的评定精度, 将光度测定相似度函数引入滤波的内核, 以此来分配滤波窗口中各点的权值。当样本点与滤波中心点的幅度相差较大时, 自适应的减少该样本点对应的权值, 从而避免在每个窗口中由于样本的异常而导致基准畸变。

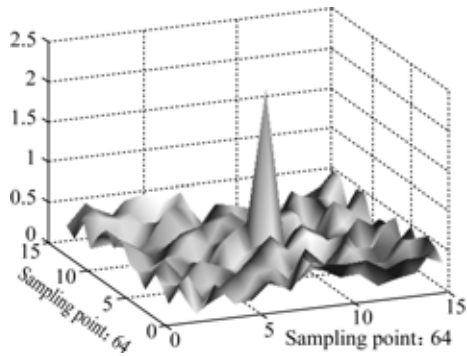


图 3 含奇异点的三维粗糙表面

Fig. 3 3-D rough surface containing abnormal point

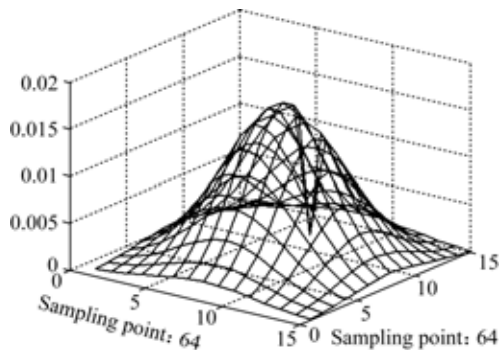


图 4 双边滤波器滤波原理图(归一化)

Fig. 4 Weight window of bilateral filter(normalized)

双边滤波的这种稳健作用和较少的计算量,为实际提取三维表面信号基准方面带来不可替代的优势。但在三维表面方向形态特征的提取能力方面,双边滤波作为空域滤波明显弱于频域滤波,而双树复小波作为频域滤波却一定程度上改善了这些不足。基于此将其引入双树复小波,既保证了在工程实际中得到详细的粗糙度又提高了其在提取基准面的精确程度。

2.3 本文算法的改进

本文算法主要用于三维表面基准评定,所以针对三维表面,先设理想基准面上加上随机白噪声,则含噪表面 $f(x, y)$ 为:

$$f(x, y) = s(x, y) + \epsilon(x, y), \quad (8)$$

其中: $s(x, y)$ 为理想基准面, $\epsilon(x, y)$ 为随机白噪声。本文目的是利用表面信号低频重构滤除含噪表面 $f(x, y)$ 中的噪声信号 $\epsilon(x, y)$, 从而尽可能恢复理想基准面 $s(x, y)$ 。图 5 所示为本文算法的示意图。其中 H_{0a}, H_{1a} 分别为树 A 分解的低通滤波器和高通滤波器; H_{0b}, H_{1b} 分别为树 B 分解的低通滤波器和高通滤波器; BF 为双边滤波; H'_{0a} 和 H'_{0b} 分别为树 A 的重构低通滤波器和树 B 的重构低通滤波器。

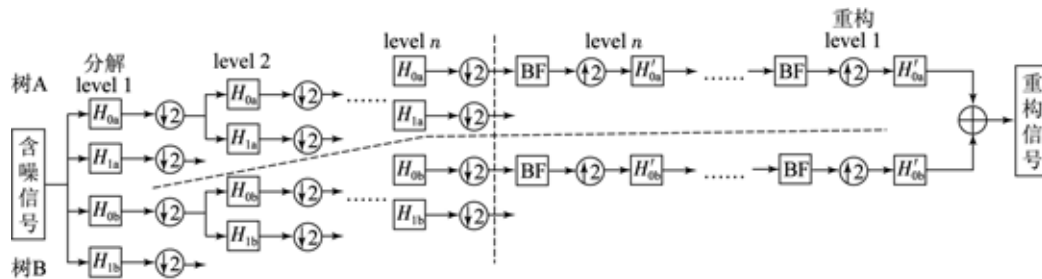


图 5 改进双树复小波滤波算法示意图

Fig. 5 Frame of improved double-tree complex wavelet filtering

从图 5 可知,根据双树复小波第一层 odd/even 滤波器,分别在 A 树和 B 树进行奇采样和偶采样,且各自获得的系数是对方不含的,再通过 Q-shift 滤波器进行分解。为了保证算法的截止波长与高斯滤波器相同,小波的分解层数必须满足^[8]:

$$\omega_c = \pi/2^n = 2\pi/\lambda_c, \quad (9)$$

式中: n 为小波分解层数, λ_c 为滤波器的截止波长。由此来判断合适的分解层数以保证信号因分解过多导致重构信号产生畸变,最后运用低频重

构,对每层重构系数进行双边滤波以得到基准信号。

对于三维表面,双边滤波改为:

$$h(x, y) = k^{-1}(x, y) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\zeta, \eta) c(x - \zeta, y - \eta) \cdot s(f(x, y), f(x - \zeta, y - \eta)) d\zeta d\eta, \quad (10)$$

$$k(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} c(x - \zeta, y - \eta) s(f(x, y), f(x - \zeta, y - \eta)) d\zeta d\eta. \quad (11)$$

在 Matlab 编程中,运用的是二维离散形式,具体形式为:

$$h(x, y) = k^{-1}(x, y) \sum_{\zeta=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=-\infty}^{\infty} f(x-\zeta, y-\eta) \cdot c(x-\zeta, y-\eta) s(f(x, y), f(x-\zeta, y-\eta)), \quad (12)$$

$$k(x, y) = \sum_{\zeta=-\infty}^{\infty} \sum_{\eta=-\infty}^{\infty} c(x-\zeta, y-\eta) \cdot s(f(x, y), f(x-\zeta, y-\eta)). \quad (13)$$

其中几何接近权值 $c(x-\zeta, y-\eta)$ 和光度测定相似权值 $s(f(x, y), f(x-\zeta, y-\eta))$ 分别如下:

$$c(x-\zeta, y-\eta) = e^{-\frac{(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2}{2\sigma_c^2}}, \quad (14)$$

$$s(f(x, y), f(x-\zeta, y-\eta)) = e^{-\frac{(f(x, y) - f(x-\zeta, y-\eta))^2}{2\sigma_f^2}}. \quad (15)$$

3 仿真数据与实测数据比较分析

3.1 仿真数据分析

选用 64×64 大小的平稳随机三维表面(见图 6)进行仿真验证,加了随机白噪声后如图 7 所示。运用 DT-CWT 对随机表面进行三层下采样的分解。根据式(1),求解后发现当长度为 6 和 14 时,整个滤波器响应频率的能量最小,且奇树和偶树的滤波器满足反对称的特点,故 DT-CWT 采用奇偶滤波器为长度为 6 的正交滤波器和长度为 14 的 Q-shift 滤波器。再根据公式(9),其中双边滤波和高斯滤波的窗口大小都为 3×3 ,且高斯滤波截止波长 $\lambda_c = 20 \mu\text{m}$,双边滤波 $\alpha_i = 2, \sigma_r = 300$,故 DT-CWT 的分解次数 $n = 3.3219$,选取 $n = 3$ 。

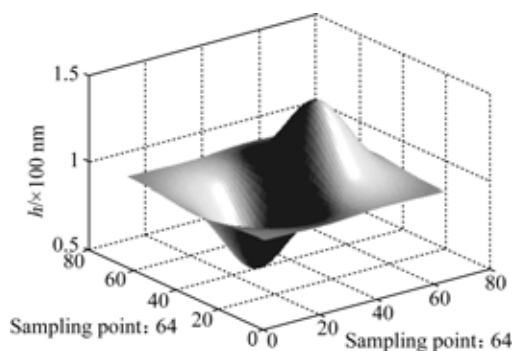


图 6 仿真基准面

Fig. 6 Simulated surface

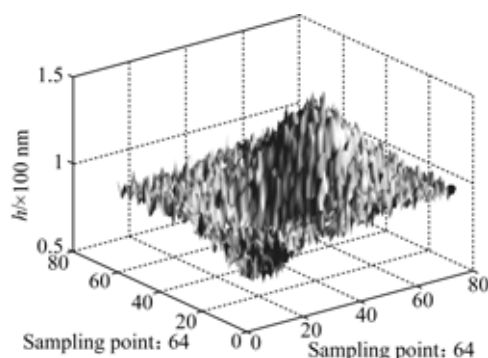
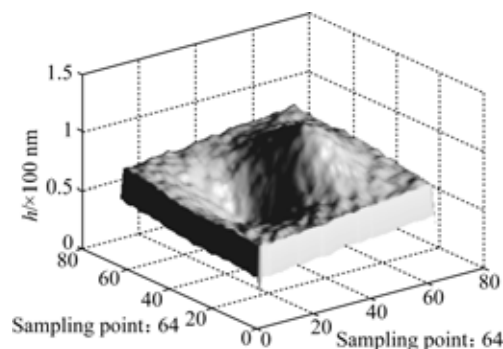


图 7 加噪表面

Fig. 7 Additive noise surface

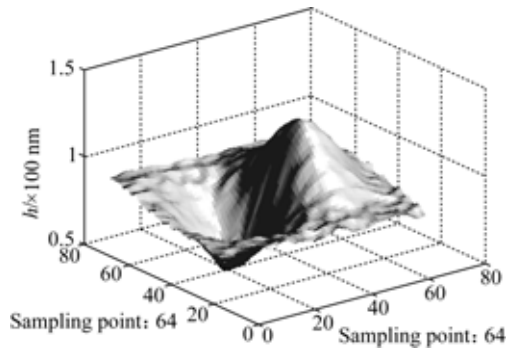
对仿真数据进行了对比发现:采用传统高斯滤波时,由于其存在严重的边界畸变,基准面不在同一表面的现象尤为严重,如图 8(a)所示。若采用文献[12]提出的高斯稳健滤波,虽然在边界处相对于传统高斯滤波变形较小,但在轮廓有较深谷的地方,该方法同高斯滤波一样,基准面会被拉下,产生变形,如图 8(b)所示。图 8(c)和图 8(d)分别为 DT-CWT 和改进 DT-CWT 的滤波结果比较。可以看出,当 DT-CWT 用于三维表面时,相比于传统高斯滤波及高斯稳健滤波,基准滤波效果要好得多,特别是边界畸变得到了较多改善,但对于存在的一些深谷地方同样产生较小的变形。而采用改进的 DT-CWT 不仅消除了边界效应,且在很大程度上抑制了野点处存在的异常值对基准滤波的影响,得到的基准面平坦且光滑,几乎接近于仿真的原始基准面。

用原仿真基准面与重构后基准面每点坐标误差的二阶范数表征精度误差,用原仿真基准面与重构后基准面每点坐标误差绝对值的最大值表征最大重构误差。最后用精度误差和重构误差分别对不同滤波算法进行比较,结果如表 1 所示。



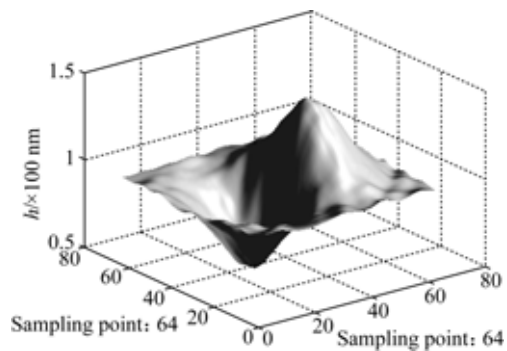
(a) 传统高斯滤波

(a) Conventional Gaussian filter



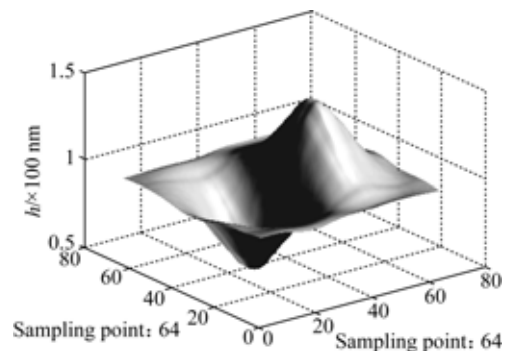
(b) 高斯稳健滤波

(b) Gaussian robust filter



(c) DT-CWT 滤波

(c) DT-CWT filter



(d) 改进的 DT-CWT 滤波

(d) Improved DT-CWT filter

图 8 不同算法所提取三维仿真表面的基准面

Fig. 8 Different algorithms for extracting the reference of 3-D simulated surface

从表 1 可以看出传统高斯滤波因发生了明显的边界畸变,其滤波结果的精度误差和重构误差远远大于后面的算法。而改进的 DT-CWT 滤波算法无论是从精度误差还是重构误差均最小,说

明了本文算法用于三维基准评定的优越性。

表 1 精度误差和重构误差比较

Tab. 1 Comparison of accuracy errors and reconstruction errors (10^{-10} m)

滤波算法	与原始形貌的精度误差	最大重构误差
高斯滤波	8.571 7	0.787 5
稳健高斯滤波	0.517 1	0.037 7
双树复小波	0.239 9	0.028 2
本文改进算法	0.183 2	0.016 1

3.2 实测数据分析

采用美国 KLA-Tencor 公司的 MicroXam-100 型光学轮廓仪进行数据分析,其最小采样间距为 $0.078 \mu\text{m}$,最大量程为 100 mm ,分辨率为 0.01 nm 。选用的截止波长 $\lambda_c=80 \mu\text{m}$,采样间距 $\Delta x=1 \mu\text{m}$,样本大小为 256×256 。根据式(9),求得 DT-CWT 的分解次数 $n=5.321 9$,选取 $n=5$ 。为了验证方法的可行性与正确性,采用 4 种不同的滤波方法对气缸内表面粗糙度进行分析,气缸内壁是一种最为典型的特殊功能表面,由于实际工程的要求在其表面存在不同形式的“深沟”,如图 9 所示。

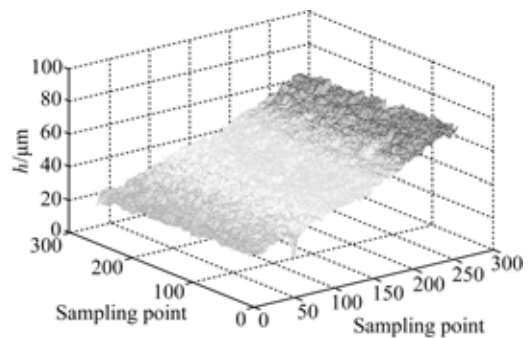
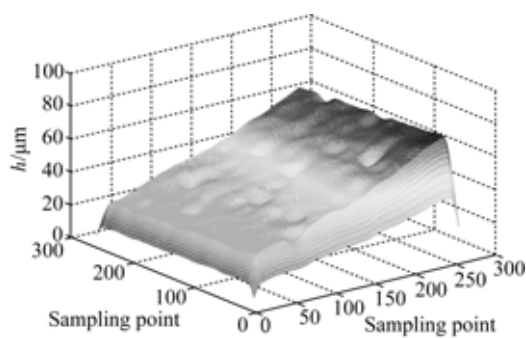


图 9 实测数据

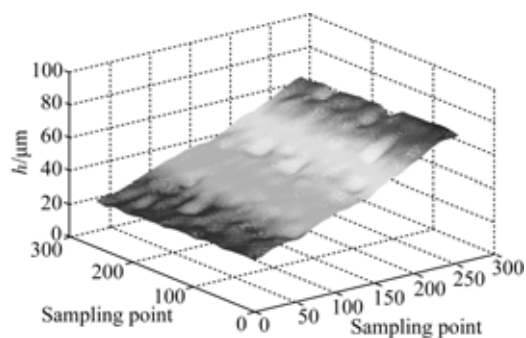
Fig. 9 Measured data

图 10 所示为不同算法所提取三维仿真表面的基准面。从图 10(a)可知,传统的高斯滤波在滤波后基准存在严重的边界畸变;而文献[12]的高斯稳健滤波算法能很好地抑制边界畸变,但和传统高斯滤波一样,滤波后得到的基准面存在不同形式的凹坑,如图 10(b);双树复小波虽然具有多方向性、近似的平移不变性和良好的重构等优点,但依然受到实测表面中存在的“凹坑”



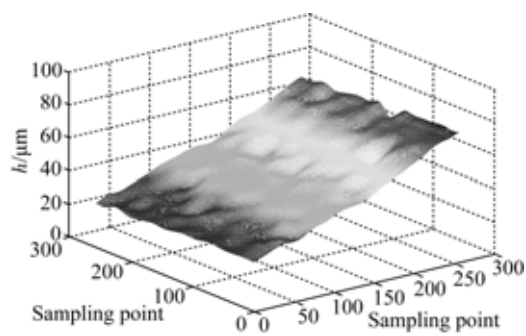
(a) 传统高斯滤波

(a) Conventional Gaussian filter



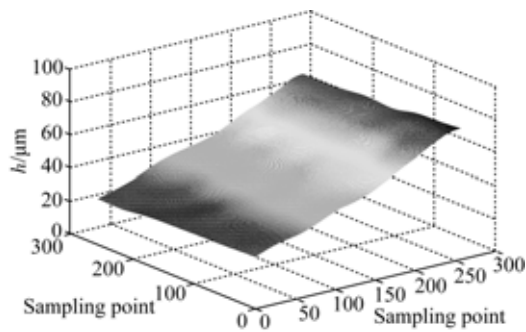
(b) 高斯稳健滤波

(b) Gaussian robust filter



(c) DT-CWT 滤波

(c) DT-CWT filter



(d) 改进的 DT-CWT 滤波

(d) Improved DT-CWT filter

图 10 不同算法所提取三维仿真表面的基准面

Fig. 10 Different algorithms for extracting references of 3-D measured surface

影响,如图 10(c);而从图 10(d)中可知,改进的双树复小波滤波算法成功地抑制了表面凹坑的影响,使整个滤波基准面保持相对光滑。

为了进一步说明几种算法的不同之处,将不同方法得到的基准面作 x 方向的侧面轮廓对比,如图 11 所示。从图中可以明显看出,由于实测数据“深沟”的影响,传统滤波算法和双树复小波所得基准面在凹坑处都被拉低,而加入双边滤波的双树复小波稳健算法却能很好地抑制这一现象。

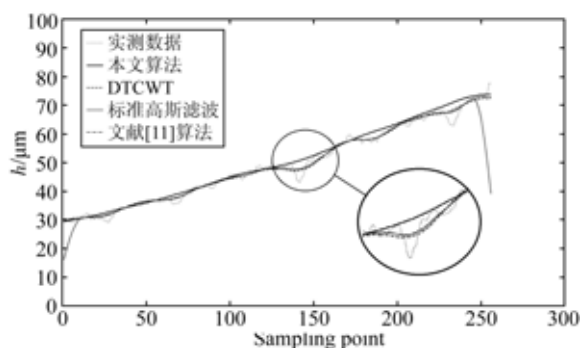


图 11 各滤波方法 X 方向表面轮廓对比图

Fig. 11 Comparison chart of X direction surface profiles by different filtering methods

4 结 论

本文将双边滤波和双树复小波变换相结合,使用双树复小波变换对三维工程表面进行多尺度和多方向的分解,在低频重构过程中,对每一个尺度上重构得到的低频信号使用空域的双边滤波算法来增强双树复小波变换在提取基准面野点处的稳健性。结果表明,其精度误差和重构误差分别为 0.1832×10^{-10} m 和 0.0162×10^{-10} m。对滤波后基准面和原始形貌进行比较显示,该算法对三维基准滤波精确程度具有最优性。最后,对一个工程表面上具有典型深沟的气缸套内表面滤波,结果表明改进后的双树复小波变换对于表面存在的较大深沟具有较好地抑制能力,且不存在边界畸变,为工程表面粗糙度评定提供一种新方法。

参考文献:

- [1] 陈辉,胡元中,王慧,等.粗糙表面分形特征的模拟及其表征[J].机械工程学报,2006,42,9:219-223.
CHEN H, HU Y ZH, WANG H, *et al.*. Rough surface fractal characteristics Simulation and Characterization [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(9): 219-223. (in Chinese)
- [2] ISO16610-21, Geometrical Product Specification (GPS)-Filtration [S]. *Linear Profile Filters; Gaussian Filters*, 2011.
- [3] FISHER J, DOWSON D, HAMDZAH H, *et al.*. The effect of sliding velocity on the friction and wear of UHMWPE for use in total artificial joints [J]. *Wear*, 1994, 175: 219-225.
- [4] ZHANG H, YUAN Y B, PIAO W Y. The spline filter: A regularization approach for the Gaussian filter [J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 586-592.
- [5] 张浩,袁怡宝,张峰. 巴特沃思小波在表面形貌信号分离中得应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1661-1667.
ZHANG H, YUAN Y B, ZHANG F. Application of Butterworth wavelet in surface signal separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7): 1661-1667.
- [6] 李惠芬,蒋向前,李柱. 三维表面功能评定技术发展综述[J]. 工具技术, 2002, 17(4): 8-11.
LI H F, JIANG X Q, LI ZH. Three-dimensional surface functional evaluation technology and development [J]. *Tool Technology*, 2002, 17(4): 8-11.
- [7] SELESNICK I W. Hilbert transform pairs of wavelets bases [J]. *IEEE Signal Process. Lett.*, 2001, 8(6): 170-173.
- [8] 曾文涵. 双树复小波表面分析模型及加工过程形貌辨识方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
ZENG W H. *Tree complex wavelet surface analysis model and the process morphology identification method research* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [9] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. *Proceeding of International Conference on Computer Vision*, 1998: 839-846.
- [10] ZHANG M, GUNTURKB K. Multi-resolution bilateral filtering for image denoising [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2008, 17(12): 2324-233.
- [11] JIANG X Q, BLUNT L. Third generation wavelet for the extraction of morphological features from micro and nano scalar surfaces [J]. *Epsrc gr/s* 13316/01, 2003.
- [12] 曾文涵, 谢铁邦, 蒋向前, 等. 表面粗糙度的稳健提取方法研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(2): 127-130.
ZENG W H, XIE T B, JIANG X Q, *et al.*. Research on robust extraction of surface roughness method [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2004, 15(2): 127-130.
- [13] 罗钧, 王强, 付丽. 改进蜂群算法在平面度误差评定中的应用 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 422-430.
LUO J, WANG Q, FU L. Application of modified artificial colony algorithm to flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2). (in Chinese)
- [14] 雷贤卿, 李飞, 涂鲜萍, 等. 评定平面度误差的几何搜索逼近算法 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1312-1317.
LEI X Q, LI F, TU X P, *et al.*. Geometry searching approximation for flatness error evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5). (in Chinese)

作者简介:



任志英(1980—),女,浙江嵊州人,博士研究生,讲师,主要从事摩擦学中表面表征方法研究。E-mail: renzyrose@126.com

通讯作者:



高诚辉(1953—),男,福建福清人,博士,教授,博士生导师,1990年于机械部机械科学研究院获得博士学位,主要从事摩擦学研究,数字化设计等。E-mail: gch@fzu.edu.cn