

基于 Butterworth 滤波和 Haar 小波变换的 干涉图像齿面域分割^{*}

余子健¹ 杨鹏程¹ 连力平¹ 肖 渊¹ 朱新栋^{2,3}(1. 西安工程大学机电工程学院 西安 710048; 2. 西安交通大学物理学院物质非平衡合成与调控教育部
重点实验室 西安 710049; 3. 西安交通大学物理学院陕西省量子信息与光电量子器件重点实验室 西安 710049)

摘 要: 干涉图像中反映齿面形貌信息的齿面域被背景噪声包围,其分割精度对相位解包裹、图像配准等后续的处理步骤存在较大的影响,直接关系到最终测量结果的精度。针对齿面干涉图像边界存在杂散条纹的现象,通过分析齿面干涉条纹的分布规律,提出了一种结合 Butterworth 滤波和 Haar 小波的齿面域分割方法。最后,在本文实验条件下,通过与时域分割方法进行对比,该方法可以将齿面干涉图像的边界杂散条纹区域内解包裹相位值有错误的地方排除在有效测量区域外并且能够对其进行有效校正,证明了基于频域信息的分割方法能够有效地提高干涉图像齿面域分割的精度。

关键词: 杂散条纹;干涉图像;齿面域分割;Butterworth 滤波器;Haar 小波

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Tooth flank segmentation method of the interferogram based on Butterworth filter and Haar wavelet transform

Yu Zijian¹ Yang Pengcheng¹ Lian Liping¹ Xiao Yuan¹ Zhu Xindong^{2,3}(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;
2. Ministry of Education Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, School of Physics,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Shaanxi Province Key Laboratory of Quantum Information and Quantum
Optoelectronic Devices, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The tooth flank region that reflects the tooth flank shape information in the interferogram is surrounded by background noise, and its processing accuracy has a great impact on the subsequent processing steps such as phase unwrapping and the interferogram registration, which is directly related to the accuracy of the final measurement result. Aiming at the phenomenon that there are spurious fringes in the boundary of tooth flank interferogram, a tooth flank region segmentation method combining Butterworth filter and Haar wavelet is proposed by analyzing the distribution of tooth flank interferogram fringes. Finally, under the experimental conditions of this paper, it shows that the proposed method can exclude and correct the wrong phase values of the unwrapping in the boundary spurious fringe regions of the tooth flank interferogram from the valid measuring region by comparing with the time-domain segmentation method, which proves that the method based on the frequency domain can effectively improve the accuracy of the segmentation of the tooth flank region of the interferogram.

Keywords: spurious fringes; interferogram; tooth flank region segmentation; Butterworth filter; Haar wavelet

0 引 言

激光干涉测量法具有非接触、快速、高精度等优点,是齿轮表面形状误差精密测量的发展方向^[1]。测量中通过采

集并处理齿面干涉图像得到齿面形状误差,干涉图像的齿面域分割是图像处理的第一步,对后续的相位解包、相位差提取等图像处理步骤有着重要意义,若齿面域分割误差较大,会使解包路径穿过非齿面域,导致不正确的解包结果^[2]。

收稿日期:2022-06-25

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年项目(51905412)、陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划-面上项目(2022JM-219)资助

近年来,干涉图像处理研究领域提出了多种基于时域信息的干涉图像分割方法,能够有效地抑制背景噪声,从而提高了齿面区域的分割精度^[3]。

齿面的扭曲形状和干涉图像中光强不均等现象都会干扰齿面域的分割,无论是 Fang 提出的齿面物体像灰度法^[4]、还是 Wang 提出的基于非线性结构张量的齿面干涉图像分割方法^[5]等,这些方法都能够有效地分割出齿面区域,但是实验中由于齿轮的出射侧和入射侧距离主光轴的位置不同,使两侧难以同时处于聚焦区域,导致齿面一侧边界清晰平滑而出射侧边界模糊且呈锯齿状,这些锯齿状的边界形状在本研究中被成为“杂散条纹”,它与齿面域内的条纹都是激光干涉测量中物体光路和参考光路发生干涉产生的,显然它也会随着参考光路中移相步距的改变而变化,因此基于时域信息的齿面域分割方法难以识别这些杂散条纹区域,都会将其判定为干涉图像的齿面域,从而导致分割出的齿面域过大,降低分割精度^[6]。

目前,将图像从时域信息转化到频域信息进行处理的方法,在图像分割领域已经成为研究热门,但还未有研究者将频域分割方法引入到齿轮齿面干涉图像领域。为了验证频域分割能否被应用于处理齿面干涉图像,本文将通过对齿面干涉图像的频域信息进行特异性分析干涉图像的边缘部分是灰度突变部分,变化较快,反映在频域上是以高频分量为;干涉图像的齿面域灰度变化平缓则以低频分量为。因此,本文考虑引入干涉图像的频域信息,对其频谱进行特异性分析,提高干涉图像的分割精度。

1 基于频域信息的齿面域分割方法

本文所采用的激光干涉测量系统由参考光路和物体光路组成,两光路发生干涉后形成干涉条纹,干涉后的光束经成像透镜聚焦后在 CCD 相机内记录下干涉图像^[7],所拍摄的实测干涉图像如图 1 所示。

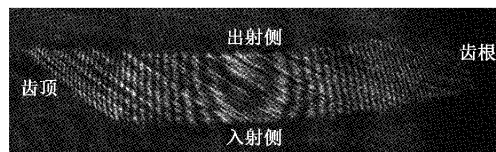


图1 实测干涉图像

首先,本文将通过二维离散傅里叶变换(two-dimensional discrete fourier transform, T-DFT)和小波变换分析干涉图像的频域信息,对干涉图像进行处理,包括干涉图像频域滤波和二值化处理等步骤;其次,利用小波变换分析的干涉图像的条纹噪声分布规律,去除干涉图像的部分噪声点;最后,对频域信息得到的齿面域边界与齿面物体像灰度法得到的齿面域边界进行分析对比,频域滤波处理的具体流程如图 2 所示。

1.1 干涉图像的 Butterworth 频域滤波

通过二维离散傅里叶变换(T-DFT)对干涉图像进行频

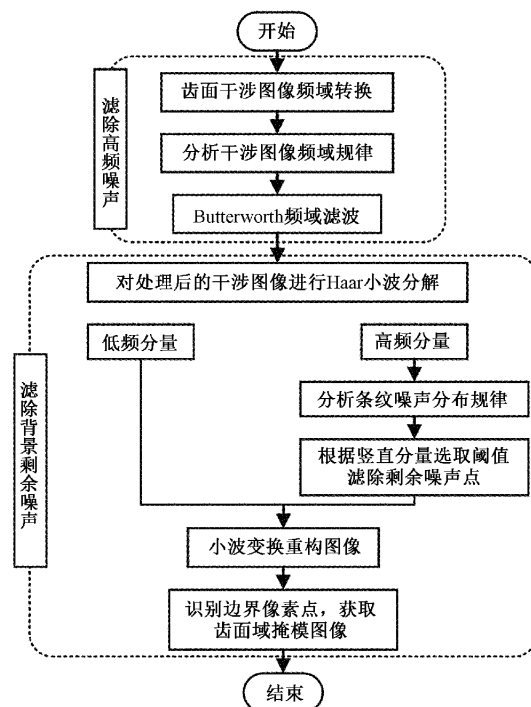


图2 频域滤波流程

域转换,得到干涉图像的低频分量和高频分量,其傅里叶变换结果如图 3 所示,经频谱中心化后,图中中心较亮的部分属于低频分量即干涉图像中齿面域部分,越往外频率越高,高频分量即干涉图像的背景噪声和边界部分(包含边界杂散条纹)。

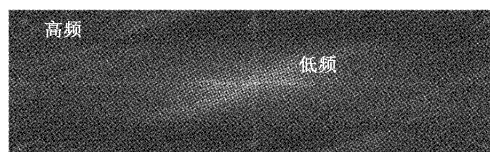


图3 干涉图像傅里叶变换

本文所采用的频域滤波方法基本流程为:将干涉图像转换到频域,经过频域滤波器滤波后产生新的频谱,再将其转换回时域,生成新的频域滤波后的干涉图像,如图 4 所示。

根据文献[8]可知,当切平面滚动而不滑过基圆柱时,母线的轨迹形成螺旋渐开线齿面(从齿面的入射侧到出射侧即为母线方向),可以发现渐开线斜齿轮的齿面是由无数条直线构成的,因此仿真齿面干涉图像的条纹基本呈竖直分布,其齿面形状呈螺旋曲面,当激光光线照射在齿面上各点时,各点由于法线不同,所以反射光线到达理论物平面后所经历的光程也不同,从而使测量光路和参考光路相减得到的光程差也不相同。

本文采用光线追迹算法计算物体光路和参考光路的光程差^[9],测量光路和参考光路的相对光程差如图 5 所示,两光路的光程差分布规律为:齿顶、齿根区域光程差较大、中

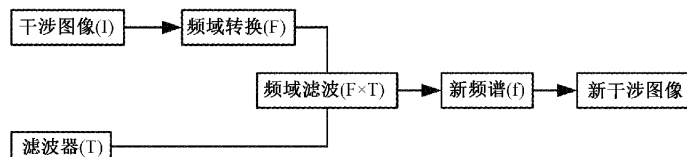


图 4 干涉图像的频域滤波流程

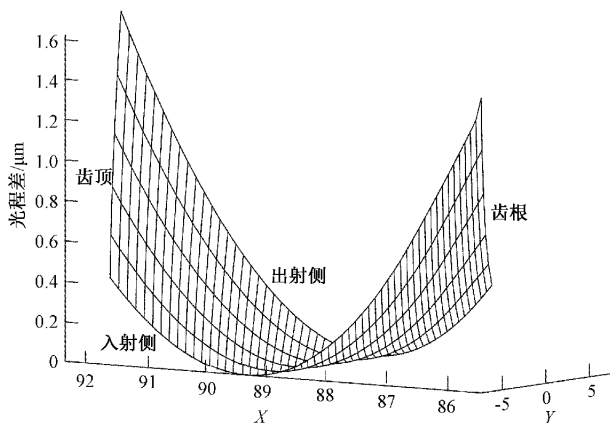


图 5 参考光路和测量光路的相对光程差

间区域(即主光轴和靠近主光轴的位置)较小,中间区域的条纹比较宽、稀疏,而齿顶和齿根区域的条纹比较窄、稠密,从中间位置向齿顶和齿根逐渐过渡,这与实测干涉条纹图像一致。

从频域角度上来说,齿面区域频域较低,齿面边界频域较高,齿面干涉图像背景区域的灰度值基本是不变的,因此背景区域也属于低频区域。可以得出,本研究中所获取到的齿面干涉图像频域特征是齿面区域呈低频、两边呈高频,对实测干涉图像经傅里叶变换后的频谱分布进行量化,其三维频谱分布如图 6 所示。因此干涉图像频域特征为中间部分呈高频、两边呈低频的分布规律,由于齿面域的边界在频谱中表现为高频信息,所以考虑使用高通滤波器。

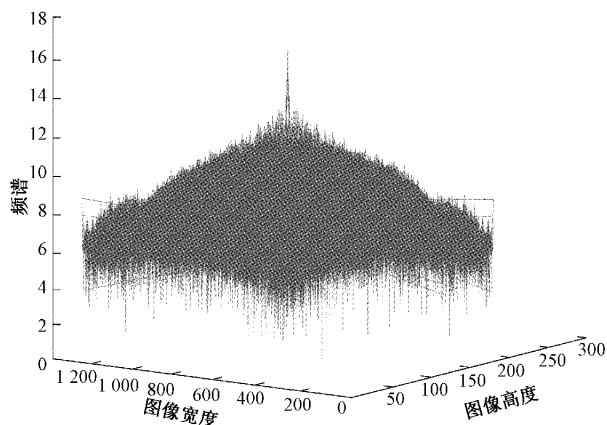


图 6 干涉图像的三维频谱

通过上述分析,齿面干涉条纹图像的频谱分布与

Butterworth 滤波器三维模型分布规律相似,都呈山丘状、具有明显地单峰性并且两边都为低频部分且逐渐下降趋近于 0。由上述分析的齿面干涉条纹分布规律可知获取到的齿面干涉图像都具有上述特性,所以本文选取 Butterworth 滤波器且其对本研究齿面干涉图像的适用性较强。

式(1)为 Butterworth 滤波器函数,其中 D_0 为截止频率, n 为滤波器阶数, $D(u, v)$ 为在频率域中的点距离中心点的距离,它的定义如式(2)所示,其中 M 、 N 为图像的高度和宽度, $(M/2, N/2)$ 为傅里叶变换后得到的图像的中心点。

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u, v)} \right]^{2n}} \quad (1)$$

$$D(u, v) = \left[\left(u - \frac{M}{2} \right)^2 + \left(v - \frac{N}{2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Butterworth 滤波器阶数为二阶时,干涉图像灰度级的负数几乎为零,振铃现象很微小;在选取截止频率时,考虑到由于在频域平面上能量集中于频率很小的圆域内,干涉图像的高频部分包含丰富的边界、细节信息,所以需要结合干涉图像的频域特性选取合适的截止频率。当 D_0 过大时,虽然能够去除干涉图像边界和背景区域的噪声,但会导致齿面有效测量区域的信息也被滤除掉,因此 D_0 不可过大;当截止频率 D_0 变小时,虽然能量损失不大,但干涉图像变模糊了并且去除噪声的效果也不理想,所以必须选取一个合适的截止频率。对干涉图像选取不同的截止频率进行 Butterworth 滤波的结果对比如图 7 所示,图 7(a)、(b)、(c)分别表示不同截止频率的齿面干涉图像滤波结果,可以看出,截止频率过高,频域滤波滤除背景噪声的效果越明显,但是干涉图像的边界信息以及齿面域内的信息随着截止频率的增加会变得越来越少;截止频率过低,干涉图像齿面信息虽然较为完整,但背景噪声较多,经采取多组实验分析,当 $D_0=30$ 时,能够保证齿面信息较为完整的情况下且背景区域的噪声也能较好的滤除。因此,根据上述分析,本文选取的最优滤波参数为:截止频率 $D_0=30$,阶数 $n=2$ 。

对干涉图像采用 Butterworth 滤波后,滤波图的齿面域像素灰度值较低且齿面域形状边界不明显,为了使齿面域形状清晰,统计 Butterworth 滤波结果的灰度分布需要对滤波结果再次二值化处理,其灰度分布如图 8 所示。

从干涉图像 Butterworth 滤波结果的灰度分布图可以

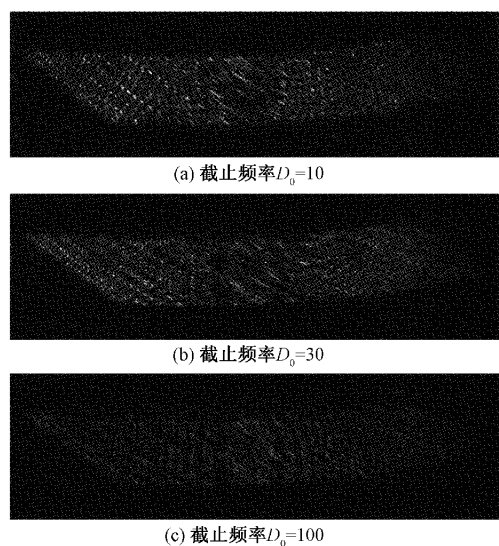


图7 不同截止频率的干涉图像 Butterworth 滤波

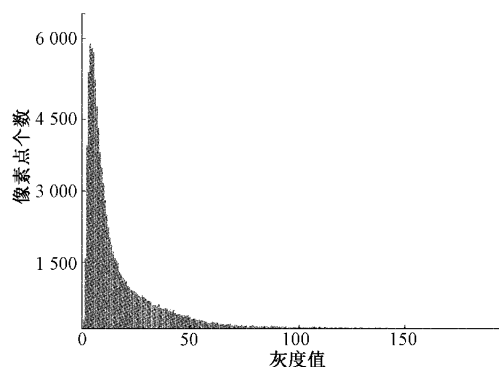


图8 Butterworth 滤波后干涉图像的灰度分布

看到,滤波结果图大部分像素为背景区域,但由于存在噪声干扰以及齿面域中内部条纹明暗相间分布,所以有部分像素处于中间灰度。为了精确分离出齿面域,需要选择合适的滤波阈值。根据阈值选取原则,灰度图的灰度分布既没有明显的峰值性,也没有波谷性,所以考虑根据灰度变化特性作为阈值选取原则。可以看到灰度值在 35~100 之间存在多次阶梯性变化,说明滤波图中,这些灰度值代表的像素变化较为剧烈,为齿面域的边缘区域和齿面域中内部的条纹间隔。所以统计阶梯性变化的灰度值,采用数学统计学统计其规律,然后根据齿面域在干涉图像内部所占面积比例为 40% 左右,选取阶梯性变 40% 处的灰度值作为分界阈值,来进行齿面域的划分,处理结果如图 9 所示,选择的二值化灰度阈值为 45。

1.2 干涉图像的 Haar 小波变换

虽然干涉图像在经过傅里叶变换及 Butterworth 滤波之后经过二值化处理后可以较好地显示干涉图像的齿面域形状信息,但是在背景区域及齿面域的边缘依然还有一些噪声点的存在,这些噪声点对于齿面域边界的识别与分割精度还会有一些影响。干涉图像经 Butterworth 滤波后

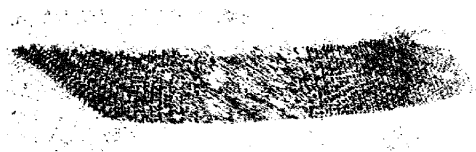


图9 干涉图像滤波二值化结果

转化为黑白二值图像,其结果如图 10 所示,观察 1、2、3 区域发现齿面域边界处及背景区域还存在一些噪声点,这会导致提取齿面域边界时存在较大的误差,因此需要对 Butterworth 滤波后的干涉图像再次进行滤波。

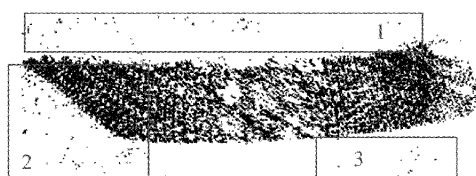


图10 干涉图像背景噪声区域

考虑到干涉图像的一部分背景噪声点位于齿面域边界附近,而本研究的主要目的在于精确识别并分割出拍摄干涉图像中的前景区域即齿面域部分,从而得到齿面域边界进行后续干涉图像处理。若使用一些形态学滤波,虽然能够较为明显地去除干涉图像背景噪声点,但会导致在去除噪声点的同时,使齿面域边界的一部分信息一起被去除,这会影响分割出的齿面域边界精度,给后续处理带来误差,所以本文考虑通过频域处理的方法来去除干涉图像边界及背景剩余部分的噪声点。干涉图像齿面域部分的频域较低,而背景噪声点的频域较高,由于小波变换具有多分辨率特性且其具有傅里叶变换所不具有的细节信息,它能够对干涉图像分解成不同分量,每一个分量都能够体现干涉图像的细节信息,因此利用小波变换对干涉图像进行去噪处理不仅能够有效去除噪声,又能很好地保留干涉图像的边界等重要的高频信息从而得到干涉图像更具体的细节信息,所以本文再次采用小波变换对 Butterworth 滤波后的干涉图像进行去噪处理。

对于同一个干涉图像,使用不同的小波基函数分解可能会得到不同的处理结果,因此小波分析应用到干涉图像处理中的一个难点就是最佳小波基函数的选取。例如 Daubuchies 小波基、Mexican Hat 小波基和 Morlet 小波基等容易引入光滑误差,且计算量大耗时长,由于干涉图像的齿面域提取需要良好的干涉条纹形状以显示齿面区域的轮廓形状且本文只需要通过小波变换去除干涉图像背景部分及齿面域边界的个别噪声点,而 Haar 小波具有操作简单、计算量小的特点同时可以在自身位置完成小波变换,满足本文对干涉图像处理的要求,所以本文采用 Haar 小波^[10]对干涉图像进行再处理,其基本原理为若存在一组一维数据 $a = [a_1, a_2, a_3, a_4]$,使用低通滤波矩阵 $[1, 1]$,高通滤波矩阵 $[-1, 1]$,则 Haar 小波变换如式(3)所示。

$$b = \left[\frac{a_1 + a_2}{2}, \frac{a_2 + a_3}{2}, \frac{a_1 - a_2}{2}, \frac{a_3 - a_4}{2} \right] \quad (3)$$

在进行频率为 2 的下采样时需要计算其均值,直接取 $[b1, b2]$,然后再次进行小波变换如式(4)所示:

$$c = \left[\frac{b_1 + b_2}{2}, \frac{b_1 - b_2}{2} \right] \quad (4)$$

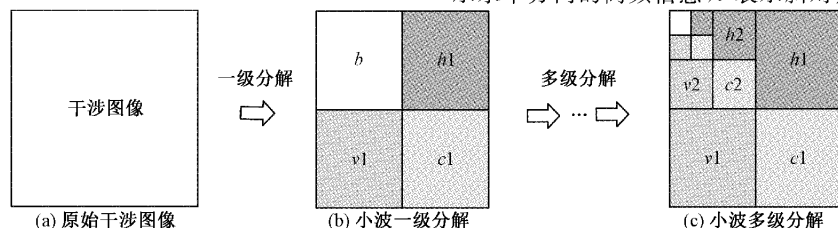
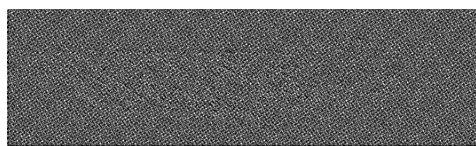


图 11 干涉图像的 Haar 小波分解图

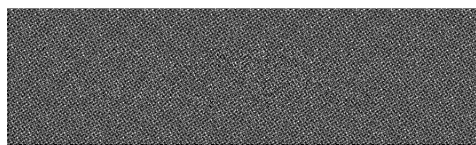
本文对干涉图像采用 Haar 小波变换后的结果如图 12 所示,对 Haar 小波变换后得到的结果进行分析,图 12(a)体现了干涉图像中齿面域的轮廓信息,图 12(b)体现了干涉图像中的干扰噪声信息,图 12(c)主要体现了干涉图像在竖直方向上的条纹信息以及部分噪声条纹信息,图 12(d)体现了干涉图像的斜对角方向的条纹信息。由于齿面域的条纹分布主要由竖直方向和对角线方向两个方向的条纹复合组成,而干扰噪声及噪声条纹分布方向不规律且角度位于二者之间。因此,将 Haar 滤波后的结果中的竖直高频信息图作为优选变换,以进行下一步处理。在对干涉图像进行 Haar 小波变换之后,每幅子图像大小变为原图像的 1/4,接下来对图 12(c)竖直高频子图像进行灰度统计,结果如图 13 所示。



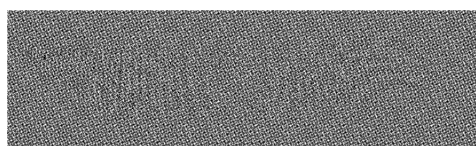
(a) 低频分量



(b) 水平高频分量



(c) 竖直高频分量



(d) 斜对角高频分量

图 12 干涉图像的 Haar 小波变换

对于二维图像 Haar 小波变换不再从一个方向进行滤波,而是从水平和竖直两个方向进行滤波,如图 11 所示。图 11(a)表示原始图像,图 11(b)表示经过一级小波变换的图像,图 11(c)表示在一级小波分解的基础上继续进行 Haar 小波变换。图中, v 表示竖直方向的高频信息, h 表示水平方向的高频信息, c 表示斜对角方向的高频信息。

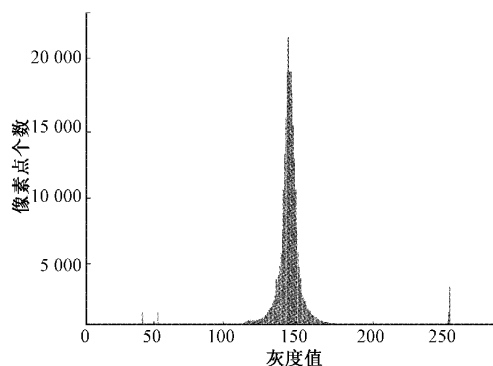


图 13 干涉图像竖直高频分量的灰度直方图

在统计完竖直高频子图像的灰度直方图后,由图 13 可以明显看到竖直高频分量的灰度值大多集中于 150 左右且具有明显地单峰性。因此选取极限峰值点附近的灰度值作为阈值对子图像进行二值化处理,结果如图 14 所示。由于干涉图像经过 Haar 小波变换之后,得到的子图像大小缩小为原图的 1/4,所以需要进行线性插值将子图像恢复成原始干涉图的 $1\ 315 \times 435$ 像素大小。



图 14 干涉图像的高频分量二值化后的子图像

2 实验结果与分析

2.1 基于 Haar 小波获取干涉图像齿面域边界信息

将 Butterworth 滤波后的二值图与小波变换后的二值图的齿面域结合起来,利用小波去除干涉图像的部分噪声点,如图 15(a)所示,与图 9 相比较,经过 Haar 小波去噪后的干涉图像背景部分及齿面域边界附近的噪声点明显被剔除,该处理过程为后续提高拟合边界精度提供保障,然后通过形态学腐蚀算法识别齿面域的边界像素点,如图 15(b)所示。

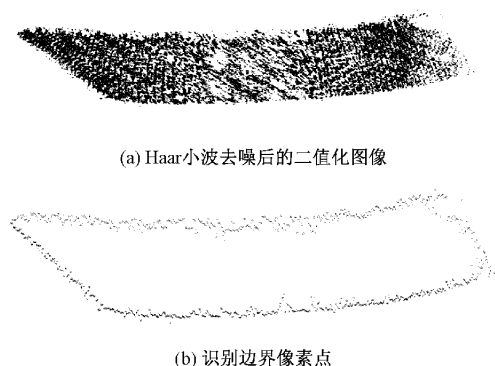


图 15 获取齿面域的边界

最后,将识别出的边界像素点通过最小二乘法拟合出齿面域的边界曲线,分割出干涉图像齿面域的掩模图像如图 16 所示。



图 16 齿面域的掩模图像

2.2 不同分割方法的配准结果对比

图 17(a)为齿面干涉图像的包裹相位图且显示了两种分割方法提取出的齿面域边界,绿色边界为本文所采用的频域分割方法,蓝色边界为时域分割方法。本文通过对比两种分割方法,可以发现,对于干涉图像中齿面域的入射侧和齿顶,基于齿面干涉图像时域信息的分割结果与频域信息的分割结果基本重合;而在齿面干涉图像中出射侧的边界处,两种分割方法之间存在差异。在图 17(a)中选取了出射侧 1 和 2 两个红色矩形区域,该区域的局部放大

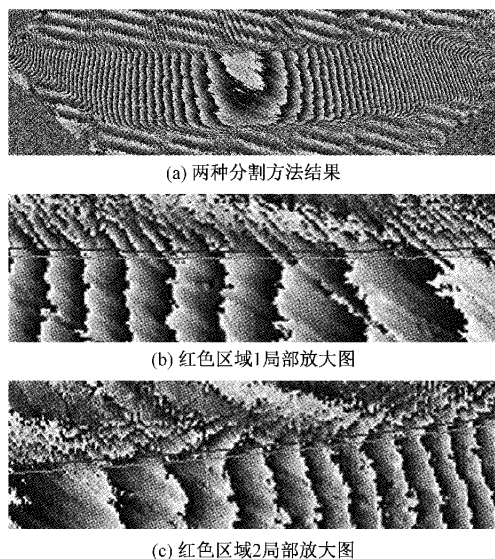


图 17 不同分割方法的比较

图如图 17(b)和(c)所示,可以发现本文所提的方法能够明显地将干涉图像出射侧的红色圆圈区域具有相位跳变的部分排除在外面,提高了相位解包的正确率并且能够得到更精确的齿面域边界。

通过对分割出的齿面域进行后续图像处理,最终得到的配准结果如图 18 所示,以下将通过对比频域分割方法和时域分割方法展开相位值的变化来具体说明两种方法之间的差异。

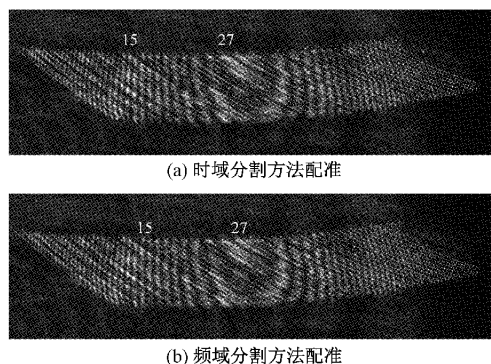


图 18 不同分割方法的配准结果

在图 18 中,比较了时域分割方法与频域分割方法的结果。图 18(a)和图 18(b)是通过这两种齿面域分割方法获得的边界的配准结果^[11]。其中,两个图中的着色点是被测齿面经过干涉条纹仿真方法仿真得到的模拟点。一般仿真得到的干涉图像与实际测量中得到的干涉图像相位值差距较大,因此受实验条件的限制,仿真相位值和实测相位值难以进行对比,通常只能将不同分割方法得到的实测相位值进行对比。以干涉条纹图中间最宽的条纹设置为相位展开的起点,比较用红色标记的两行中的展开相位值,如图 19 所示。由于所测齿轮齿面是连续且弯曲的,因此同一行中的展开相位值应该是连续的并且具有相同的变化趋势。通过采用频域分割方法分割的齿面域边界所拟合的边界曲线的数据更加符合这一条件,但通过时域分割方法拟合的边界曲线的数据则存在一定误差,这些误差会影响最终测量结果的准确性。例如,图 19(a)中的时域分割方法得到的展开相位值不规则地波动,部分蓝色点的展开相位值与图 19(a)中其他点的变化趋势不一致;图 19(b)中虽然两组相位值在中间都存在一定的波动,但红色相位保持着整体的变化趋势而波动,而蓝色相位值波动幅度大且不符合变化趋势,这种现象称为相位跳变即解包裹时相位值发生错误,并且本文统计了相邻仿真点间的展开相位差值,时域分割方法得到的展开相位值波动趋势较大,而频域分割方法得到的结果波动趋势较小,相对更平稳,如图 19(c)和(d)所示。为了更直观的对比两种分割方法之间的差异,本文计算了两种方法选取的展开行相位值的方差,如表 1 所示。从中可以看出,与时域分割方法得到的结果相比,频域分割方法得到的相位值方差较小,

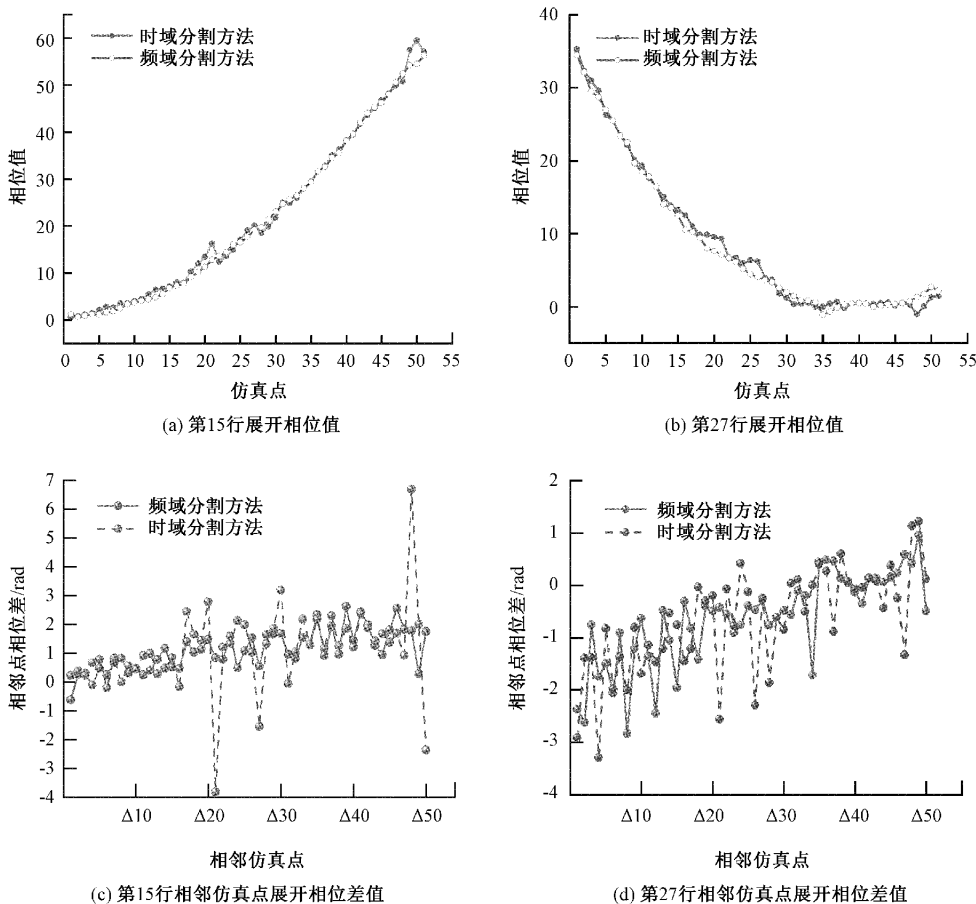


图 19 第 15 和 27 行的展开相位对比

表 1 展开行相位值的方差

分割方法	第 15 行展开 相位值方差	第 27 行展开 相位值方差
时域分割方法	0.059 7	0.102 1
频域分割方法	0.016 6	0.060 7

相位值变化更加连续。

为了进一步定量的对比上述两种分割方法,采用了图像处理领域常用的有监督评价算法:概率边缘指数(probabilistic rand index, PRI)^[12]、全局一致性误差(global consistency error, GCE)^[13]、信息变化指数(variation of information, VI)^[14],有监督评价算法是以人工参与的手动提取结果作为参考基准,将其与分割算法得到的结果进行比较。PRI 统计了待评价分割算法与参考结果之间具有一致性的像素对个数,数量越多代表带评价算法与参考结果越相似,即 PRI 值越大,代表齿面域分割结果越好;GCE 是以局部细分误差为基础,对待评价分割算法结果与参考结果重叠度的评价,GCE 越小代表齿面域分割结果越好;VI 从信息熵的角度评价待评价算法相对参考结果信息的变化情况,VI 值越小代表待评价分割算法与参考结果之间的信息变化越少,结果越好,本文两种分割方法的对比结果

如表 2 所示。可以看出,频域分割方法在 3 种评价指标上均要优于时域分割方法。

表 2 两种分割方法结果对比

分割方法	PRI	GCE	VI
时域方法	0.948 3	0.047 9	0.271 2
频域方法	0.954 6	0.042 7	0.253 3

为了更准确的验证频域分割方法对干涉图像的校正程度,根据本研究所采用的光线追迹法所计算的干涉仿真图像共有 51 行的原则^[15],统计了时域分割方法得到的干涉图像相位值发生错误的行数和频域分割方法的校正结果,结果如表 3 所示。

表 3 干涉图像相位值校正率统计

干涉图像 仿真行数	时域分割方法 相位错误的 行数	频域分割 方法校正 行数	校正率/ %
51	7	7	100

可以看出本文方法对展开相位值有错误的地方能够

有效地校正,对边界杂散条纹引起的分割精度误差有明显的改善。因此,结合图 17 可以看出,频域分割方法将齿面域出射侧处一些边缘倒角折射产生的杂散条纹与噪声排除在了边界外,而使用时域分割方法将它们识别为齿面域内部,这些杂散条纹并不是齿面域的正确反映,证明了基于频域信息的图像分割方法算法可以有效提高干涉图像齿面域的分割精度。

齿面干涉图像经过齿面域分割后,得到齿面域边界来对齿面干涉图像进行解包裹处理,本研究采用典型的解包裹算法枝切法^[16]对齿面干涉图像进行解包裹处理。若齿面域分割精度较低,则使边界处的杂散条纹被错误识别为齿面的有效测量区域,这会导致齿面域边界处的残差点数量增多。残差点是干涉相位图中使得相位展开结果与积分的路径相关的像素点,残差点可以分为正残差点和负残差点,若设置一条线将这些残差点相互连通,一旦相位展开时的路径穿过这条线,相位展开结果就会出现严重误差,相反相位展开时若能避开这些线,则能获得更准确的相位解包结果。因此当残差点比较密集时,枝切法会产生大量不合理枝切线,容易产生封闭的无法解包裹区域即‘孤岛区域’,造成解包裹结果出错,出现拉丝和斑块现象。为了进一步验证本文所提方法的有效性和正确性,本文将通过统计时域分割和频域分割得到的齿面干涉图像残差点数量来对本文所提方法进行验证。本研究在拍摄齿面干涉图像时,由于出射侧和入射侧不能同时聚焦,而出射侧距离主光轴较远,因此出射侧会产生散焦现象,本文通过统计齿面干涉图像的包裹图像出射侧的残差点来验证。图 20(a)和(b)分别为时域方法和频域方法所得到的包裹图像出射侧的残差点结果图,出射侧残差点的统计结果如表 4 所示。

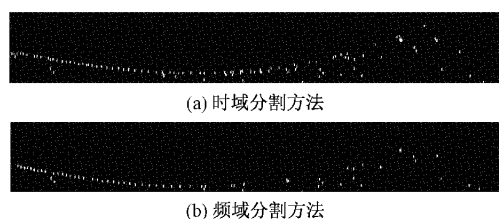


图 20 不同分割方法得到的包裹图像出射侧的残差点

表 4 包裹图像出射侧的残差点统计

齿面域分割方法	残差点个数	解包裹效率/s
时域方法	109	7
频域方法	65	5.7

通过上述分析可知,相比时域分割方法,频域分割方法得到的齿面域边界计算出的包裹相位图出射侧的残差点数量明显减少,解包裹的效率也明显提高。由于本研究需要用到解包裹计算出的数据来进行最后的齿面形状误差计算,频域分割方法不仅减少了解包裹错误的概率,而

且也减少了解包裹错误所带来的误差传递,提高了齿面形状误差测量的计算精度,更进一步验证了频域分割方法的可行性和有效性。但本文采用的频域分割方法尚有不足之处,随着后续研究的深入,将根据齿面干涉图像的频域特征设计相应的频域滤波器和更高阶的频域分割算法。

3 结 论

针对时域分割算法难以处理干涉图像齿面域边界杂散条纹的不足,通过分析齿面干涉条纹的分布规律和齿面干涉图像的频谱信息,提出了一种结合 Butterworth 滤波和 Haar 小波的齿面域分割方法,减小了边界杂散条纹对齿面域分割精度和后续处理精度的影响。首先,对干涉图像进行二维傅里叶变换得到干涉图像的频域信息;其次,对干涉图像进行 Butterworth 滤波,消除背景噪声对干涉图像分割精度的影响;然后,利用 Haar 小波剔除齿面域边界附近及背景区域剩余的噪声点,从而提高干涉图像有效测量区域提取的精度;通过与时域分割方法定性定量分析对比,实验结果表明频域方法可以将齿面干涉图像中展开相位值有错误的地方排除在有效测量区域外,验证了提出的基于频域的齿面干涉图像分割方法的可行性与正确性。

参考文献

- [1] HUNTLEY J M. Special issue on measurements of solid deformation by phase-shifting interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 24(5): 363-364.
- [2] FANG S P, WANG L J, YANG P C, et al. Object-image-based method to construct an unweighted quality map for phase extraction and phase unwrapping [J]. Applied Optics, 2011, 50(10):1482.
- [3] 戴雨志, 盛晓超, 杨鹏程, 等. 齿面形状误差测量中干涉图像有效测量区域分割方法的对比研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(5):6.
- [4] WANG L J, FANG S P, YANG P C, et al. Comparison of three methods for identifying fringe regions of interference fringe patterns in measuring gear tooth flanks by laser interferometry[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(24):5668-5671.
- [5] WANG X, FANG S P, ZHU X D, et al. Nonlinear diffusion and structure tensor based segmentation of valid measurement region from interference fringe patterns on gear systems [J]. Current Optics & Photonics, 2017, 1(6): 587-597.
- [6] YANG P C, FANG S P, WANG L J, et al. Correction method for segmenting valid measuring region of interference fringe patterns [J]. Optical Engineering, 2011, 50(9):62-65.

- [7] FANG S P, FUJIO H, KUBO A, et al. New optical system for reducing the interference fringe density in laser interferometric measurement of tooth flank form of a gear [J]. Jsme International Journal, 2008, 43(2):455-463.
- [8] FANG S P, WANG L, et al. Improvement of the oblique-incidence optical interferometric system to measure tooth flanks of involute helical gears [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2011.
- [9] 方素平, 小森雅晴, 久保爱三, 等. 适用于精密复杂零件表面形状的干涉测量光学系统的光线追迹方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2):170-177.
- [10] HAJJAJI M A, GAFSI M, BEN ABDELALI A, et al. FPGA Implementation of Digital Images Watermarking System Based on Discrete Haar Wavelet Transform [J]. Security and Communication Networks, 2019, 2019:1-17.
- [11] YANG P C, FANG S P, MENG L, et al. Shield Analysis and Non-rigid Match in Positioning the Actual Interferogram on the Tooth Flank based on Oblique Incidence Interferometry [J]. Optik, 2013, 124(20): 4307-4312.
- [12] PANTOFARU C, HEBERT M. A Comparison of Image Segmentation Algorithms[C]. 2005: 1-4.
- [13] Garcia-Lamont, Farid, Cervantes, et al. Segmentation of images by color features: A survey [J]. Neurocomputing, 2018.
- [14] DEY N, RAJINIKANTH V, ASHOUR A S, et al. social group optimization supported segmentation and evaluation of skin melanoma images 3[J]. 2019.
- [15] FANG S P, KOMORI M, KUBO A, et al. Ray Tracing Method for Optical System of Interferometry Measurement Used for Form Deviation of Precise Complex Surface of Machine Parts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2):170-177.
- [16] JIANG H, XU Y, ZHANG C, et al. An Algorithm Combining the Branch-Cut Method and Rhombus Phase Unwrapping Algorithm [J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1634:012068.

作者简介

余子健, 硕士研究生, 主要研究方向为激光干涉测量方法。

E-mail:cgwzsd@163.com

杨鹏程(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向精密干涉测量、光机电一体化技术等方面的研究工作。

E-mail:yangpengcheng@xpu.edu.cn