

微铣刀同轴全息图像增强方法

程亚亚 于化东 于占江 许金凯 张向辉

Method of enhancing the quality of in-line holographic images for micro-milling tool

CHENG Ya-ya, YU Hua-dong, YU Zhan-jiang, XU Jin-kai, ZHANG Xiang-hui

引用本文:

程亚亚, 于化东, 于占江, 许金凯, 张向辉. 微铣刀同轴全息图像增强方法[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 705-712. doi: 10.37188/CO.2019-0217

CHENG Ya-ya, YU Hua-dong, YU Zhan-jiang, XU Jin-kai, ZHANG Xiang-hui. Method of enhancing the quality of in-line holographic images for micro-milling tool[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 705-712. doi: 10.37188/CO.2019-0217

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0217>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹数字全息术的研究进展

Recent advances in terahertz digital holography

中国光学. 2017, 10(1): 131 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0131>

图像增强算法综述

Review of image enhancement algorithms

中国光学. 2017, 10(4): 438 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0438>

偏光全息研究历程与展望

Review and prospect of polarization holography

中国光学. 2017, 10(5): 588 <https://doi.org/10.3788/CO.20171005.0588>

数字图像相关中的散斑区域自动提取研究

Automatic extraction of speckle area in digital image correlation

中国光学. 2019, 12(6): 1329 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1329>

高温下数字图像相关散斑最优成像探究

Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature

中国光学. 2018, 11(5): 728 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728>

多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法

A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window

中国光学. 2019, 12(6): 1311 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1311>

文章编号 2095-1531(2020)04-0705-08

微铣刀同轴全息图像增强方法

程亚亚, 于化东*, 于占江, 许金凯, 张向辉

(长春理工大学跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要:数字同轴全息对刀技术中,再现像中的零级项和离焦共轭像会形成一个强而复杂的背景噪声作用在实像上,严重降低了再现像的质量。针对全息应用中的干扰像问题,提出了一种基于改进自蛇模型滤波的全息图像增强方法,改进后的自蛇模型令每次扩散中只根据初始图像的梯度来选择扩散力度。实验结果表明,改进后的自蛇模型能够避免在扩散过程中由于受大梯度背景噪声影响而出现的“伪轮廓”和边缘锯齿化,弥补了自蛇模型在全息图像应用中的不足。此外,与相位恢复法和多重再现法去干扰像效果相比较,本文提出的改进自蛇模型滤波法不仅对干扰像有更好的抑制作用,还能够增强刀具边缘,有利于实现微铣刀的数字全息对刀。

关键词:数字全息;共轭像;自蛇模型;图像去噪

中图分类号:O438.1

文献标志码:A

doi: 10.37188/CO.2019-0217

Method of enhancing the quality of in-line holographic images for micro-milling tool

CHENG Ya-ya, YU Hua-dong*, YU Zhan-jiang, XU Jin-kai, ZHANG Xiang-hui

(Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: yuhudong@cust.edu.cn

Abstract: When tool setting with digital in-line holography, the zero-order image and defocused twin-image can form strong and complex background noise, which gets superimposed on the real image and seriously reduces the quality of the reconstructed image. To improve quality of interferential images in digital in-line holography, a holographic image enhancement method using an improved self-snake model is proposed. The improved self-snake model selects a diffusion intensity according to the gradient of the initial image. The experimental results show that the improved self-snake model can avoid the appearance of jagged edges and

收稿日期:2019-11-13; 修订日期:2019-12-09

基金项目:国家重点研发计划 (No.2018YFB1107403); 中国“111”计划 (No.D17017); 吉林省科技发展计划 (No.20190101005JH, No.20180201057GX)

(The National Key Research and Development Plan Project (No. 2018YFB1107403); The “111” Project of China (No. D17017); Jilin Province Scientific and Technological Development Program (No. 20190101005JH and No. 20180201057GX).)

“pseudo-contours” caused by large gradient background noise during the diffusion process. This improvement outweighs the shortcomings of the self-snake model in holographic imaging. In addition, compared with the phase retrieval and multi-plane reproduction approaches, the improved self-snake model filtering method proposed in this paper not only has better suppression for interferential images but also can enhance the edge of the tool, which is conducive to the actualization of tool-setting using on digital in-line holography.

Key words: digital holography; twin-image; self-snake model; image denoising

1 引言

在微细加工中,高精度对刀技术一直是精密/超精密加工领域的重要研究内容,高精度对刀能够避免刀具进刀过程中撞刀、刀具破损情况的发生^[1]。然而,对于直径在 0.5 mm 以下的微细铣刀,利用常用的对刀仪对刀法、激光直射/衍射法、图像法等对刀方法对刀时,对刀精度难以保证且容易损坏刀具^[2-6]。针对直径在 0.5 mm 以下微细铣刀的对刀,本课题组提出了一种基于同轴全息成像的微径铣刀对刀方法^[7],微细铣刀直径越小,衍射现象越明显,因此,其对刀精度可以不受微细铣刀直径的限制,可实现微细/超细刀具的高精度对刀检测。

全息再现像中刀具的实像与零级项、共轭像叠加在一起,降低了再现像的质量,导致后续微细铣刀的精确提取与分析存在困难。对于同轴全息的干扰像问题,相关研究者提出了相应的解决方法,主要有相位恢复法、多步相移法、高通滤波法、多重再现法等。其中相位恢复法效果较好^[8-13],但存在迭代次数多,运算时间较长,且不能普遍适应各类被测物体^[14];相移法虽能解决同轴全息的干扰像问题^[15-18],但对实验装置的精密性要求较高,不易应用于加工系统中^[13];高通滤波法、多重再现法等在一定程度上能够改善再现像质量^[19-23],但测试结果发现其无法满足微细铣刀精确提取的要求。

本文针对微细铣刀同轴全息成像中去干扰像问题,提出利用自蛇模型滤波法对其进行抑制。同时,为了弥补自蛇模型在全息图像应用中易受干扰像影响的缺陷,以及背景出现“伪轮廓”、边缘锯齿化的问题,提出了一种具有新的边缘停止

函数的改进自蛇模型,并通过实验验证了改进模型的效果。

2 数字同轴全息成像原理

数字同轴全息成像的记录过程如图 1 所示。

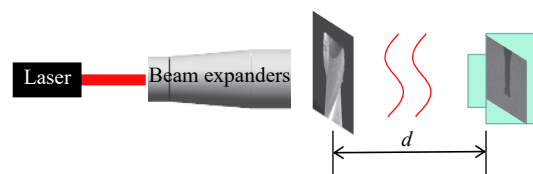


图 1 数字同轴全息记录过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the recording process of digital in-line holography

激光发出的平面波经扩束镜扩束准直后照射到物体表面,透过物体的光波由两部分组成:被物体调制的散射波 $O(x,y)$ 和未被物体调制的透射波 $R(x,y)$ 。透射波与散射波传播距离 d 后的强度分布 $I(x,y)$ 被 CMOS 光电传感器记录,形成物体的全息图。记录面 xoy 上的光强可表示为:

$$\begin{aligned} I(x,y) &= |O(x,y) + R(x,y)|^2 \\ &= |O(x,y)|^2 + |R(x,y)|^2 + O(x,y)R^*(x,y) \\ &\quad + O^*(x,y)R(x,y). \end{aligned} \quad (1)$$

数值再现即利用计算机模拟光学衍射过程,其用一束振幅为 A 的均匀平面波垂直照射全息图。在满足菲涅尔衍射近似条件的前提下,透射光波场传播距离 d 后在再现平面 $\xi\eta$ 的复振幅分布可表示为^[24]:

$$\begin{aligned} u(\xi,\eta) &= \frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} AI(x,y) \\ &\quad \exp\left\{\frac{jk}{2d}[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]\right\} dx dy \\ &= \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}\{AI(x,y)\}H(f_\xi, f_\eta)\}, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}\{\cdot\}$ 表示快速傅立叶变换, f_x, f_y 为频域坐标, 传递函数 $H(f_x, f_y) = \mathcal{F}\left\{\frac{\exp(jkd)}{j\lambda d} \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2)\right]\right\}$ 。

再现面的光强可以用复振幅与其共轭复数的积来表示:

$$U(\xi, \eta) = u(\xi, \eta) \cdot u^*(\xi, \eta) = |u(\xi, \eta)|^2. \quad (3)$$

上式计算结果包括3部分: 再现像中以背景噪声形式存在的零级项; 物体的真实再现像; 以及叠加在实像上的离焦共轭像。同轴全息再现的结果是直透项与离焦的共轭像形成有干扰的背景, 并作用在实像上, 严重影响了再现像的质量, 不利于刀具轮廓的提取, 故考虑通过自蛇扩散滤波来抑制干扰像的影响。

3 基于改进自蛇模型的干扰像抑制

自蛇模型^[25]是一种基于偏微分方程(Partial Differential Equation, PDE)的图像非线性滤波方法, 是图像自身的所有水平集按不含自由参数测地线活动轮廓(Geodesic Active Contour, GAC)模型运动的结果。省略复杂的推导过程, 基于自蛇模型的扩散方程可表示为^[26]:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = |\nabla I| \operatorname{div} \left[g(|\nabla I|) \frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right], \quad (4)$$

其中: $g(|\nabla I|)$ 为边缘停止函数, $g(|\nabla I|) = \frac{1}{1 + (|\nabla I|/K)^2}$,

I 表示图像, K 为常数。

光学图像经自蛇模型处理后, 不仅能很好地滤除噪声还能增强图像边缘, 但实验表明, 自蛇模型对全息再现像中边缘的保持性不够好。由于再现像中存在干扰像, 部分梯度较大的背景噪声会被当做“伪轮廓”, 随着扩散时间的增加, 扩散结果将产生明显的“伪轮廓”, 使边缘锯齿化。针对这一问题, 本文提出一种新的边缘停止函数, 令边缘停止函数中的图像梯度项只跟初始图像 I_0 有关, 即每次扩散中停止函数只根据初始图像的梯度来选择扩散力度。新的边缘停止函数为:

$$g_{\text{new}}(|\nabla I|) = \frac{1}{1 + (|\nabla I_0|/K)^2}. \quad (5)$$

根据散度算子的求解公式: $\operatorname{div}(\varphi F) = \nabla \varphi \cdot F + \varphi \cdot \operatorname{div}(F)$, 式(4)可展开为两项:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = g_{\text{new}}(|\nabla I|) |\nabla I| \operatorname{div} \left[\frac{\nabla I}{|\nabla I|} \right] + \nabla g_{\text{new}}(|\nabla I|) \cdot \nabla I. \quad (6)$$

式(6)由扩散项和冲击项组成。在扩散过程中, 前者实际是一个由边缘停止函数控制的方向扩散, 而后者的主要作用是增强边缘。

改进前后的自蛇模型处理结果如图2所示。实验中梯度阈值 K 取为12, 时间步长 Δt 为0.10, 待测图像为图2(a)所示的全息再现像。改进前的自蛇模型经2500次迭代后可得到图2(b)所示扩散结果及局部放大图。图2(c)为改进后的自蛇模型经同一迭代条件下得到的扩散结果及局部放大图。

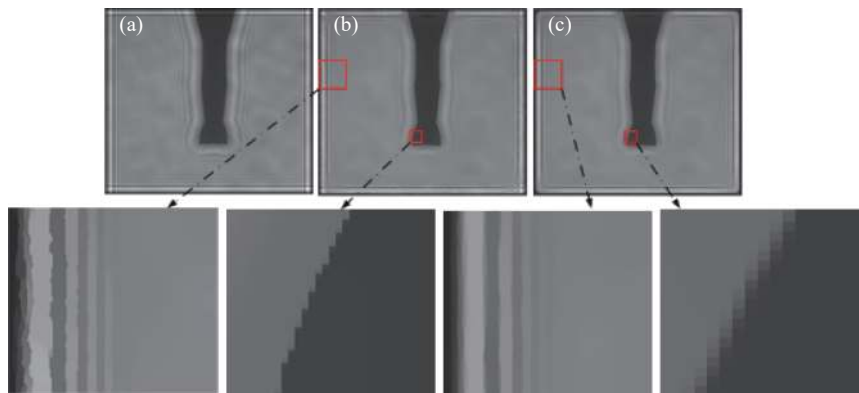


图2 改进前后的自蛇模型处理结果。(a)原图; (b)改进前的自蛇模型扩散结果及局部放大图; (c)改进后的自蛇模型扩散结果及局部放大图

Fig. 2 The diffusion results of self-snake model before and after improvement. (a) Original image; (b) diffusion result and local enlargement obtained by self-snake model; (c) diffusion result and local enlargement obtained by improved self-snake model

从以上实验结果可以发现,改进前的自蛇模型在扩散一定时间后,再现像中大梯度背景噪声产生的“伪轮廓”增强,且刀具边缘锯齿化,而改进后的模型随扩散时间增加,图像边缘依旧平滑,没有锯齿状。由此可知,改进后的自蛇模型能够很好地平滑背景噪声,对干扰像起到抑制作用,同时保证了刀具边缘的锐度,弥补了自蛇模型在全息图像中应用的不足。

4 实验结果和分析

4.1 模拟实验验证

计算机模拟实验采用同轴全息记录光路,待测物体如图 3(a) 所示,物面和记录面的大小均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 像元大小为 $10 \mu\text{m}$, 光波波长为 650 nm 。满足抽样定理的条件下,模拟实验中,物面与记录面之间的再现距离取为 25 mm 。图 3(b) 是上述记录条件下得到的数字全息图,菲涅尔再现像如图 3(c) 所示,图 3(d) 为再现像第 128 行的强度分布。

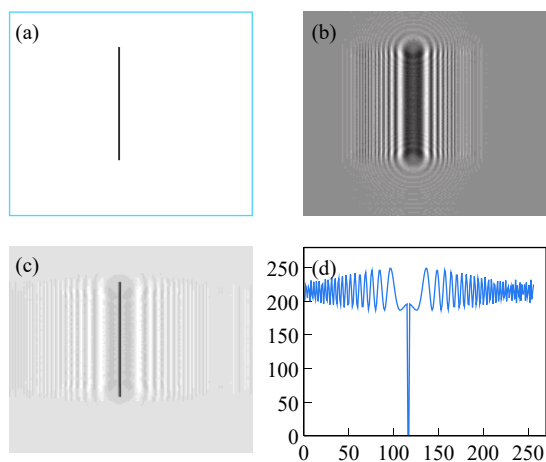


图 3 模拟实验结果。(a)待测物体;(b)全息图;(c)再现像;(d)再现像的纵截面强度分布

Fig. 3 Results of simulation experiments. (a) Tested object; (b) digital hologram; (c) reconstruction image; (d) intensity distribution of reconstruction image

首先,采用文献 [12] 所介绍的相位恢复算法来消除再现像中的干扰像。选择迭代初始值为归一化全息图的平方根乘以一个随机相位,记录面约束条件为归一化全息图的幅值,物面约束条件为幅值不超过单位幅值,收敛条件为记录面的平

方根误差小于 1×10^{-30} 。经过 50 次迭代后,实验结果如图 4(a) 所示。文献 [20] 介绍的多重再现法经过 12 次迭代后,实验结果如图 4(b) 所示。再用自蛇模型进行滤波,时间步长 Δt 为 0.12, 反差参数为 12, 经过 350 次迭代,得到图 4(c) 所示结果,同样条件下,用改进自蛇模型得到的结果如图 4(d) 所示。图 4 中右列图像为上述方法去干扰像后再现像第 128 行的强度分布。

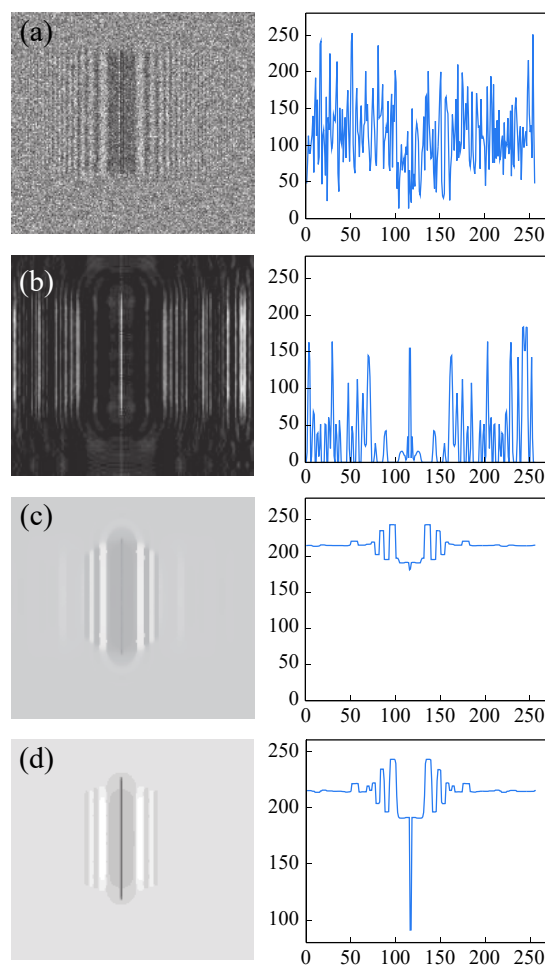


图 4 不同方法消除干扰像后的模拟物体再现像(左)及再现像第 128 行的强度分布(右)。(a)相位恢复法;(b)多重再现法;(c)自蛇模型滤波法;(d)改进自蛇模型滤波法

Fig. 4 The reconstructed images of simulation object (left) that interferential image were eliminated by different approaches and corresponding intensity distributions in 128th line (right). (a) Phase retrieval approach; (b) multi-plane reproduction approach; (c) self-snake filtering approach; (d) improved self-snake filtering approach

由图4可知,采用改进自蛇模型进行滤波后,再现像中大部分背景噪声得到了抑制,虽没有完全消除共轭像,但共轭像向外有一定扩散且分布更加均匀,不再聚积在实像周围。与改进前的自蛇模型相比,改进后的模型边缘有更好的保持性。

几种去除干扰像方法的信噪比和峰值信噪比如表1所示。通过比较可发现,改进自蛇模型滤波法具有最高的信噪比(SNR)和峰值信噪比(PSNR),自蛇模型次之,然后是相位恢复法,多重再现法最低。这一点也验证了之前的结论,本文提出的改进自蛇模型对再现像中的干扰像具有很好的抑制作用。

表1 各种去干扰像方法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of different interference removal methods

Method	SNR/dB	PSNR/dB
Phase retrieval	0.281	24.365
Multi-plane reproduction	0.019	24.103
Self-snake filtering	8.304	32.388
Improved self-snake filtering	8.433	32.517

4.2 光学实验

数字全息实验如图5所示。待测物体是直径为0.5 mm的微径铣刀,相干光源激光的波长为650 nm。记录介质CMOS的参数如下:像素数为 2448×2048 、像元大小为 $3.45 \mu\text{m}$ 。为减小计算量,截取像素数为 1024×1024 部分作为记录区域。实验中,待测物体距离记录平面20.8 mm,在满足采样条件的前提下,获得图6(a)所示干涉图样,再通过菲涅尔衍射再现算法得到图6(b)所示再现像。

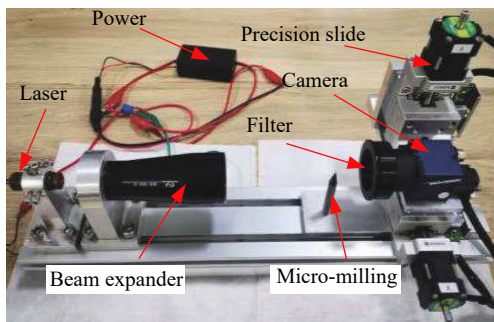


图5 数字全息实验装置

Fig. 5 Digital holographic experiment device

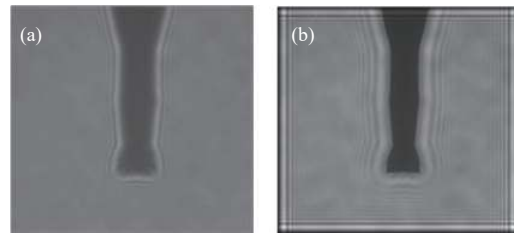


图6 刀具全息图(a)及再现像(b)

Fig. 6 Hologram (a) and reconstruction image (b) of the milling tool

分别用上述相位恢复法、多重再现法、自蛇模型和改进自蛇模型来消除干扰像,结果如图7所示。

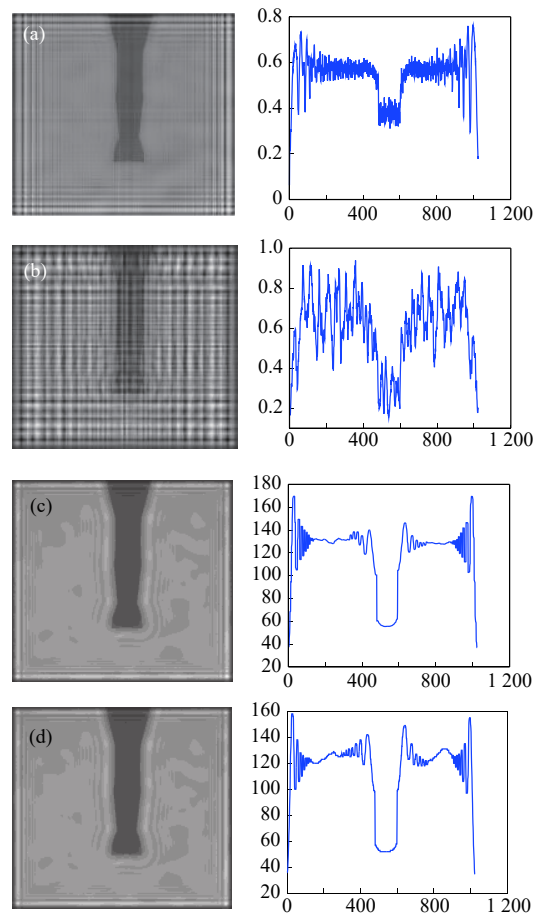


图7 不同方法消除干扰像后的微铣刀再现像(左)及对应截面的强度分布(右)。(a)相位恢复法;(b)多重再现法;(c)自蛇模型滤波法;(d)改进自蛇模型滤波法

Fig. 7 The reconstructed images of the micro-milling tool (left) that interferential image were eliminated by different approaches and their intensity distributions (right). (a) Phase retrieval approach; (b) multi-plane reproduction approach; (c) self-snake filtering approach; (d) improved self-snake filtering approach

对于迭代法,收敛条件为记录面的平方根误差小于 0.01,经过 7 次迭代后,得到图 7(a) 所示结果。然后,用多重再现法,经过 12 次迭代,得到如图 7(b) 所示实验结果。再用自蛇模型和本文所提出的改进自蛇模型进行滤波,时间步长 Δt 为 0.10,反差参数为 12,经过 350 次迭代,分别得到图 7(c) 和 7(d) 所示结果。图 7 中右列为上述方法去干扰像后再再现第 215 行的强度分布。

首先,利用 Sobel 算子对消除干扰像后的再现像进行边缘提取,再通过对刀具大致轮廓外的

灰度置零,可以去掉刀具轮廓周围的线条,提取到图 8(a)~8(d) 所示刀具轮廓图。由图 8 可知,利用相位恢复法去干扰像后会出现部分刀具轮廓丢失的情况,而且刀尖部分残留较多小线段;多重再现像法去干扰像后无法提取到较清晰的轮廓;利用改进之前的自蛇模型得到的刀具轮廓虽然具有比较清晰的边缘,但背景残留有小线段;利用改进后的自蛇模型滤波后得到的刀具轮廓最清晰,不仅背景干净而且边缘信息很全,这一点更有利于数字全息对刀工作。

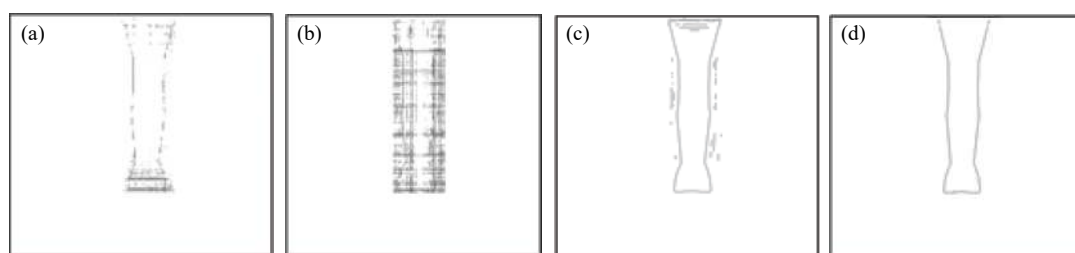


图 8 再现像轮廓提取结果。(a)相位恢复法;(b)多重再现法;(c)自蛇模型滤波法;(d)改进自蛇模型滤波法

Fig. 8 Results of contour extraction from reconstructed images. (a), (b), (c), (d) are reconstructed images obtained by phase retrieval approach, multi-plane reproduction approach, self-snake filtering approach and improved self-snake filtering approach, respectively

5 结 论

鉴于改进自蛇模型在平滑背景噪声的同时还能增强图像边缘这一优点,本文提出了一种基于 PDE 的同轴全息干扰像抑制方法。与相位恢复

算法、多重再现法的去干扰像效果做比较。结果显示:利用改进自蛇模型滤波法仅需单幅全息图就能很好地抑制再现像中的干扰像,而且还能得到清晰的刀具轮廓,更适合用于数字全息对刀技术中干扰像的抑制。

参考文献:

- [1] 于占江,王晶东,张留新,等. 微小车床对刀间隙检测技术[J]. *光电工程*, 2012, 39(10): 122-127.
YU ZH J, WANG J D, ZHANG L X, *et al.*. Detection method for tool setting gap of small lathe[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(10): 122-127. (in Chinese)
- [2] MATSUMURA T F D, SHINOZAKI S M. Method of trial cutting: EP, 0566750A1 [P]. 1994-02-16.
- [3] 陈明涛,李永强,黄京岳. 一种接触式Z轴对刀仪: 中国, 209062685U [P]. 2019-07-05.
CHEN M T, LI Y Q, HUANG J Y. A contact Z-axis tool-setting Instrument: CN, 209062685U [P]. 2019-07-05. (in Chinese)
- [4] SHI G F, ZHANG Y SH, ZHANG H, *et al.*. Analysis of the influence of installation tilt error on the tool setting accuracy by laser diffraction[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(12): 3012-3020.
- [5] 刘力双. 电子摄像式刀具预调测量仪的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006: 12-18.
LIU L SH. Research of tool presetting and measuring machine based on CCD imaging [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006: 12-18. (in Chinese)
- [6] BRAMLET C R. Tool presetting, shrinking and measuring-Zoller, booth 1551 [J]. *Modern Machine Shop*, 2005.

- [7] 于化东,张向辉,于占江,等.一种微径铣刀高精度对刀装置及对刀方法:CN,105345595A[P].2016-02-24.
YU H D, ZHANG X H, YU ZH J, et al.. A high-precision tool-setting device and method for micro-milling tools: CN, 105345595A[P]. 2016-02-24. (in Chinese)
- [8] LIU G, SCOTT P D. Phase retrieval and twin-image elimination for in-line Fresnel holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(1): 159-165.
- [9] LIU G. Object reconstruction from noisy holograms: multiplicative noise model[J]. *Optics Communications*, 1990, 79(6): 402-406.
- [10] KOREN G, JOYEUX D, POLACK F. Twin-image elimination in in-line holography of finite-support complex objects[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(24): 1979-1981.
- [11] ZHANG Y, PEDRINI G, OSTEN W, et al.. Whole optical wave field reconstruction from double or multi in-line holograms by phase retrieval algorithm[J]. *Optics Express*, 2003, 11(24): 3234-3241.
- [12] LATYCHEVSKAIA T, FINK H W. Solution to the twin image problem in holography[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(23): 233901.
- [13] ZHAO J, WANG D Y, ZHANG F C, et al.. Hybrid phase retrieval approach for reconstruction of in-line digital holograms without twin image[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(9): 091310.
- [14] 戎路,王大勇,王云新,等.同轴数字全息中的相位恢复算法[J].*中国激光*,2014,41(2):0209006.
RONG L, WANG D Y, WANG Y X, et al.. Phase retrieval methods in in-line digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209006. (in Chinese)
- [15] WANG Y Z, ZHEN Y K, ZHANG H J, et al.. Study on digital holography with single phase-shifting operation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(3): 141-143.
- [16] LAI S C, KING B, NEIFELD M A. Wave front reconstruction by means of phase-shifting digital in-line holography[J]. *Optics Communications*, 2000, 173(1-6): 155-160.
- [17] GUO P Y, DEVANEY A J. Digital microscopy using phase-shifting digital holography with two reference waves[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(8): 857-859.
- [18] KAKUE T, TAHARA T, ITO K, et al.. Parallel phase-shifting color digital holography using two phase shifts[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H244-H250.
- [19] 杨绍光,谢行恕,赵永飞,等.高通滤波法数字重现同轴全息图[J].*强激光与粒子束*,1998,10(2):203-206.
YANG SH G, XIE X SH, ZHAO Y F, et al.. Digital reconstruction of in-line hologram with high-pass filter method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(2): 203-206. (in Chinese)
- [20] YANG SH G, XIE X SH, ZHAO Y F, et al.. Reconstruction of near-field in-line hologram[J]. *Optics Communications*, 1999, 159(1-3): 29-31.
- [21] 刘迪,王玉荣,孟祥锋,等.Gabor同轴数字全息的多重再现与自动聚焦[J].*中国激光*,2014,41(9):230-238.
LIU D, WANG Y R, MENG X F, et al.. Multi-plane reconstruction and auto-focus method of Gabor in-line digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 230-238. (in Chinese)
- [22] KREIS T M, JUEPTNER W P O. Suppression of the dc term in digital holography[J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(8): 2357-2360.
- [23] 国承山,王伟田,李健,等.全息图数字再现中零级衍射斑的消除[J].*光学学报*,1998,18(8):1073-1076.
GUO CH SH, WANG W T, LI J, et al.. Elimination of zero-order diffraction spot in digital reconstruction of hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8): 1073-1076. (in Chinese)
- [24] 李俊昌. 衍射计算及数字全息[M].北京:科学出版社,2014:81-84.
LI J CH. *Diffraction Calculation and Digital Holography*[M]. Beijing: Science Press, 2014: 81-84. (in Chinese)
- [25] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G. Geodesic active contours[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 22: 61-79.
- [26] 王大凯,侯榆青,彭进业.图像处理的偏微分方程方法[M].北京:科学出版社,2008:88-95.
WANG D K, HOU Y Q, PENG J Y. *Partial Differential Equation Method for Image Processing*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 88-95. (in Chinese)

作者简介:



程亚亚 (1995—), 女, 新疆石河子人, 硕士研究生, 2017 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事微纳技术方面的研究。E-mail: 15764341171@163.com



于化东 (1961—), 男, 吉林松原人, 博士, 教授, 博士生导师, 1983 年、1988 年于长春光学精密机械学院(现长春理工大学)分别获得学士、硕士学位, 1998 年于日本千叶大学获博士学位, 主要从事精密超精密加工技术、微纳制造与检测技术方面的研究。E-mail: yuhudong@cust.edu.cn

向您推荐《液晶与显示》期刊

- 中文核心期刊
- 中国液晶学科和显示技术领域的综合性专业学术期刊
- 中国物理学会液晶分会会刊、中国光学光电子行业协会液晶分会会刊
- 英国《科学文摘》(INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》以材料物理和化学、器件制备技术及器件物理、器件驱动与控制、成像技术与图像处理等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。其内容丰富,涵盖面广,信息量大,可读性强,是我国专业学术期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》征集有关液晶聚合物、胶体等软物质材料和各类显示材料及制备方法、液晶物理、液晶非线性光学、生物液晶;液晶显示、等离子体显示、发光二极管显示、电致发光显示、场发射显示、3D 显示、微显示、真空荧光显示、电致变色显示及其他新型显示等各类显示器件物理和制作技术;各类显示新型模式和驱动技术、显示技术应用;显示材料和器件的测试方法与技术;各类显示器件的应用;与显示相关的成像技术与图像处理等研究论文。

《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

地 址:长春市东南湖大路 3888 号

《液晶与显示》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)6176059

E-mail:yjyxs@126.com

国内统一刊号:CN 22-1259/04

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国内邮发代号:12-203

国内定价:50 元/期

网 址:www.yjyxs.com