

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.09

叠焦三维显微视觉测量聚焦评价算法研究

吴昂^{1,2}, 卢荣胜^{1*}

(1.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2.河南农业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 为了精确、快速提取叠焦三维显微视觉测量的叠焦图像序列像素点聚焦位置, 提出了基于最大梯度的聚焦评价算法。设计了2个带通掩膜算子和4个高通掩膜算子, 在带通信号和高通信号中提取每个像素点对于相邻像素点强度变化的最大值来表示该点的聚焦程度, 以提高聚焦评价函数提取梯度信息的能力。采用自适应梯度阈值分割算法提高了聚焦评价的灵敏度, 降低了聚焦评价曲线的波动及次峰的影响。开展实验对算法的实际性能进行验证, 结果表明: 相较经典的空间域聚焦评价算法, 基于最大梯度的聚焦评价算法的鲁棒性、灵敏度、无偏性和单峰性均显著提高, 且具有很好的实用性, 能够有效满足复杂轮廓微纳级三维显微测量聚焦评价要求。

关键词: 叠焦; 显微成像; 聚焦评价; 最大梯度; 视觉测量

中图分类号: TB9; TP74

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0102-10

Research on focus measure algorithm of focus stacking 3D microscopic vision measurement

WU Ang^{1,2}, LU Rongsheng^{1*}

(1.School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to accurately and quickly extract the focus position of pixels in the image sequence of the focus stacking 3D microscopic vision measurement, a focus measure algorithm based on the maximum gradient is proposed. Two band-pass mask operators and four high-pass mask operators are designed, and the maximum value of the intensity change of each pixel with respect to adjacent pixels is extracted from the band-pass signal and the high-pass signal to indicate the degree of focus, so as to improve the ability of focus measure function to extract gradient information. The adaptive gradient threshold segmentation algorithm improves the sensitivity of focus measure and reduces the influence of large fluctuations and sub-peaks of the focus measure curve. The experimental results show that, compared with the classical spatial focus measure algorithm, the focusing measure algorithm based on maximum gradient has significantly improved its robustness, sensitivity, unbiasedness and unimodality, and has good practicability, which can effectively meet the requirements of focusing measure of micro-nanometer scale 3D microscopic measurement of complex contours.

Key words: focus stacking; microscopic imaging; focus measure; maximum gradient; vision measurement

收稿日期: 2022-11-26; 修回日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875164); 国家重点研发计划(2018YFB2003801)

引用格式: 吴昂, 卢荣胜. 叠焦三维显微视觉测量聚焦评价算法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 102-111.

Citation: WU A, LU R S. Research on focus measure algorithm of focus stacking 3D microscopic vision measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):102-111.



0 引言

随着科技的发展和生产效率的提高,精密制造、智能制造等产业领域对复杂微观物体精确、快速三维(3D)测量的需求越来越迫切,亟需开发合适的三维测量技术^[1-2]。近些年出现的基于超短焦深的叠焦显微三维测量技术^[3-6]在复杂轮廓三维测量方面表现出了突出的性能。叠焦显微测量技术采用聚焦堆叠的方法,由步进电机带动相机和显微镜头在垂直方向移动,利用垂直扫描方法以一定步长连续拍摄图像,分析图像序列每个像点聚焦信息与深度之间的对应关系,实现三维表面显微测量。叠焦显微三维测量系统的横向分辨力取决于相机像素大小与视场大小,深度分辨力能够达到微纳量级,具有非接触、效率高、灵活性高、成本低、无遮挡等优点,特别是对具有较大倾角的复杂微纳结构表面测量具有独特优势。

聚焦评价函数^[7-9]是叠焦显微三维测量的关键技术之一,用于计算叠焦图像序列中每个像素点的最大聚焦值对应的图像帧位置,决定了测量的精度和稳定性。一个有效的聚焦评价函数,应在鲁棒性、灵敏度、无偏性和单峰性等方面有较好的表现,以便快速、准确找到像素点的最佳焦点。聚焦评价函数一般分为空间域聚焦评价函数、频域聚焦评价函数和统计学评价函数三大类:空间域聚焦评价函数根据图像灰度值变化情况对聚焦程度进行评价^[8, 10],空间域清晰图像相较模糊图

像具有更锐利的边缘细节,也具有更大的梯度值,根据该原理,可以构建各种聚焦评价函数,如能量梯度函数、Brenner函数、Tenengrad函数、Prewitt函数、Laplacian函数和SML函数等,具有算法简单、计算效率高等优点,有着广泛的应用;频域聚焦评价函数通过计算图像的频域信息进行聚焦评价,主要包括离散傅里叶变换、离散余弦变换^[11]和离散小波变换^[12-13]等;统计学类聚焦评价函数根据灰度分布统计特征来表示图像的聚焦程度,主要包括GLV函数、Vollaths函数、Range函数等,容易受到环境影响,灵敏度较低,实际应用较少。

国内外学者提出了很多基于不同聚焦评价函数的算法,但是大多数算法仅针对一些特定的应用场合具有较好的评价效果。空间域聚焦评价算法直接对图像灰度进行处理来评价图像锐度,具有计算简单、速度快、应用范围广等特点,但是由于灰度差分对噪声敏感,空间域聚焦评价算法的稳定性容易受到影响;频域聚焦评价算法的灵敏度高、精度高,但计算量大,难以满足对实时性要求较高的应用需求;统计学类聚焦评价算法易受外界干扰,对测量环境的稳定性要求较高,易出现聚焦评价曲线不理想的问题,很多时候不能正确找到聚焦位置。

针对叠焦三维显微测量实际应用场景,提出基于最大梯度的聚焦评价算法,并通过自行设计的叠焦三维显微视觉测量系统对该算法的性能进行验证。

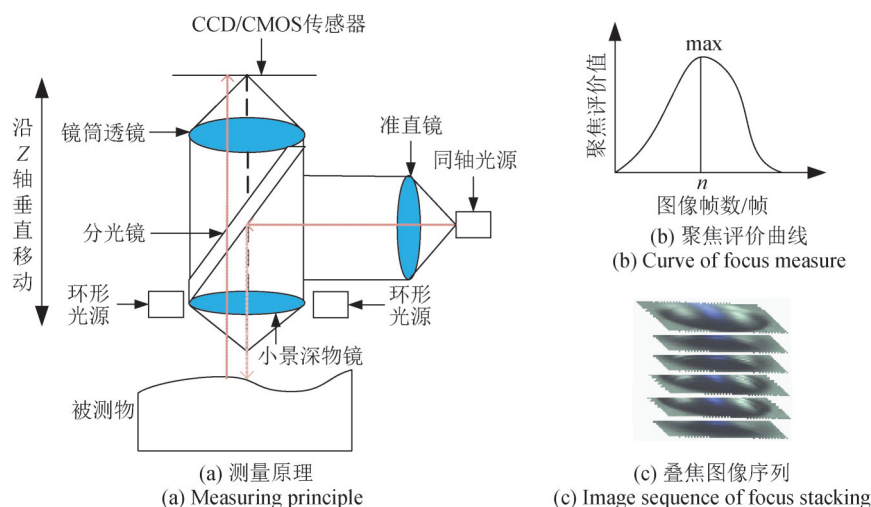


图1 叠焦三维显微测量原理

Fig.1 Principle of 3D micro measurement with focus stacking

1 叠焦三维显微视觉测量原理

叠焦三维显微视觉测量的原理：利用小景深物镜和垂直移动扫描技术，通过寻找被测表面各点的聚焦位置得到深度图，实现物体表面三维测量，如图1所示，光源（通常包括环形光源和准直光源）发出的光通过分光镜和物镜投射到被测物表面，由于物体表面形貌和反射率的变化，光线被反射到不同的方向，其中一部分反射光被物镜收集，然后通过分光镜和成像透镜投射到成像传感器。为了提高测量精度，使用小景深显微镜头进行拍摄，一次拍摄只对物体表面一小部分区域进行成像。在垂直方向改变测量头（本文将测量过程中在垂直方向移动的图像获取部件称为测量头）和被测物之间的距离，使被测表面的每个位置都经历“离焦-聚焦-离焦”的变化过程，在此过程中相机以一定步长等间隔采集图像，获取被测形貌叠焦图像序列。计算叠焦图像序列中每个像素点的聚焦评价价值，得到最大聚焦评价价值对应的垂直方向位置信息。根据像素点位置信息与高度信息之间的映射关系，建立高度信息矩阵，实现表面形貌的三维重建。

2 聚焦评价算法设计

2.1 带通掩模算子设计

Brenner 聚焦评价函数计算水平方向上相邻2个像素的灰度差的平方和，其定义式为

$$D_{\text{Brenner}}(f) = \sum_x \sum_y [f(x+2, y) - f(x, y)]^2 \quad (1)$$

式中： $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值。

Brenner 函数只采用一个水平方向的掩模模板 $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，理论上在像素的每个方向上都添加一个掩模模板会具有更好的滤波效果，但会提高计算的复杂度，降低计算效率。本文针对带通信号，只增加一个垂直方向的掩模模板 $\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$ 。带通掩模模板用 3×3 的矩阵表示为

$$\begin{aligned} T_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ T_2 &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

式中： T_1 为水平方向的掩模模板； T_2 为垂直方向的掩模模板。

2.2 高通掩模算子设计

高通滤波器的一种典型实现方法是对图像求二阶导数^[8]，高通拉普拉斯算子具有旋转不变性，其掩模模板为

$$T_{\text{Laplacian}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

拉普拉斯算子的缺点是差分项会相互抵消，容易造成算法不稳定，另外计算结果也可能为负值。本文将拉普拉斯掩模模板分解成4个掩模模板，相隔 90° 角的相邻2个元素分别进行差分，4个掩模模板分别为

$$\begin{aligned} T_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & T_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ T_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & T_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

该模板在一定程度上降低了聚焦评价曲线的波动，提高了稳定性。

2.3 最大梯度掩模算子

为了最大限度提取图像的梯度信息，带通和高通滤波过程共计算了6个梯度值，取梯度最大值作为当前像素的梯度，表达式为

$$G(x, y) = \max \{ |f_{3 \times 3} \otimes T_i| \} \quad (5)$$

式中： $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ； $\max \{ \cdot \}$ 为求最大值符号； $f_{3 \times 3}$ 为掩模模板对应的邻域像素矩阵； $\otimes$ 为卷积符号。

图2为原图像及其与各梯度算子卷积的结果，其中，图2(a)为 256×256 的灰度图像，图2(b)与图2(c)为带通掩模模板 T_1 和 T_2 的滤波结果，图2(d)~图2(g)为高通掩模模板 $T_3 \sim T_6$ 的滤波结果，图2(h)为利用式(5)计算得到的结果，可以看出：图2(b)~图2(c)中的中频段能量占比明显高于图2(d)~图2(g)中的高频段能量占比；本文提出的基于最大梯度的滤波算子对梯度信息的提取能力最强。

2.4 自适应梯度阈值处理

梯度计算对图像噪声比较敏感，为降低噪声对评价函数的影响，引入一个灰度梯度阈值对噪

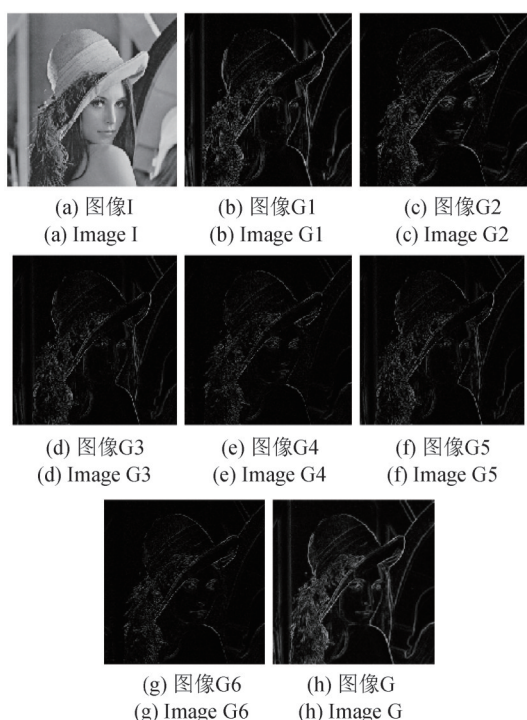


图2 原图像及其梯度图像

Fig.2 Original image and its gradient images

声进行抑制。当梯度值大于阈值时接收该梯度值，否则认为是背景点，舍弃该梯度值。常见的阈值选取方法有实验分析经验选取、图像标准差选取^[14]、迭代法选取^[15-17]等。

梯度图描述的是图像的边缘信息，较大的梯度值对应的是边缘（即对象点），较小的梯度值对应的是背景点，因此可以通过对梯度图像进行分割来实现梯度阈值的选取。图像分割有很多典型的方法，如固定阈值分割、直方图双峰分割、迭代阈值分割和自适应阈值分割等，考虑到叠焦显微检测的实时性，选用一种快速的自动估计阈值的迭代算法，具体步骤如下：

1) 令梯度阈值参数为 T ，求梯度图像的平均灰度值作为初始阈值 T_0 ；

2) 利用 T 将梯度图像 G 分割成对象 G_1 和背景 G_2 两类，即

$$G_1 = \{G(x,y) | G(x,y) \geq T\} \quad (6)$$

$$G_2 = \{G(x,y) | G(x,y) < T\} \quad (7)$$

3) 求 G_1 和 G_2 的平均值，分别用 m_1 和 m_2 表示；

4) 计算新阈值，即

$$T = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \quad (8)$$

5) 预定义参数 ΔT ，进行迭代。当连续2次迭代的阈值的差大于等于 ΔT 时(即 $|T_i - T_{i-1}| \geq \Delta T$)，重复步骤2)~步骤4)；当 $|T_i - T_{i-1}| < \Delta T$ 时，停止迭代。

新的灰度梯度图像 $G'(x, y)$ 的表达式为

$$G'(x,y) = \begin{cases} G(x,y) & G(x,y) > T \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

自适应梯度图像阈值迭代流程图如图3所示。

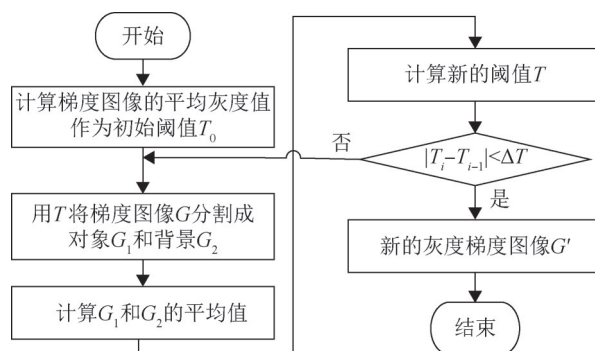


图3 自适应梯度图像阈值迭代流程图

Fig.3 Flow chart of adaptive threshold iteration of gradient image

对图2(h)进行自适应梯度阈值分割处理。图2(h)的梯度灰度均值为15.37，将其作为初始迭代阈值 T_0 ，预定义参数 $\Delta T = 0.1$ ，经过8次迭代，最终阈值 $T = 35.88$ ，迭代结束。经过阈值迭代生成的新的图像如图4所示，可以看出阈值处理保留了梯度图的边缘信息，同时降低了噪声的影响。



图4 阈值迭代后图像

Fig.4 Image after threshold iteration

2.5 聚焦评价函数

提出 Proposed1 和 Proposed2 两种聚焦评价函数。聚焦评价函数 Proposed1 着重提高梯度信息提取能力，其表达式为

$$D_{\text{Proposed1}}(f) = [G(x,y)]^2 \otimes T_b \quad (10)$$

式中： T_b 为 $N \times N$ 的平均滤波器掩膜模板。

聚焦评价函数 Proposed2 是在 Proposed1 的基础

上增加了自适应梯度阈值分割,以提高聚焦评价的灵敏度,降低聚焦评价曲线的波动及次峰的影响。聚焦评价函数Proposed2的表达式为

$$D_{\text{Proposed2}}(f) = [G'(x, y)]^2 \otimes T_D \quad (11)$$

3 实验结果与分析

3.1 叠焦三维显微测量系统搭建

叠焦三维显微测量系统主要由运动控制系统、显微成像系统、照明系统、图像采集系统及显微视觉测量软件等组成,搭建的实验系统如图5所示。

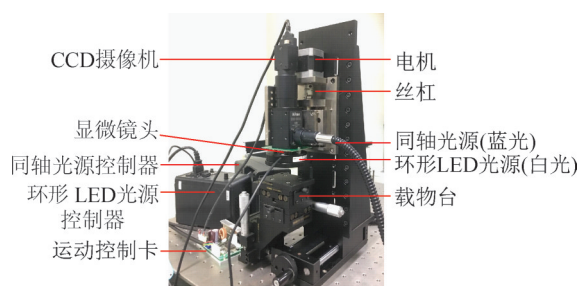


图5 叠焦三维显微测量系统

Fig.5 3D focus stacking microscopic measurement system

图像采集系统通过图像采集卡将CCD(北京微视科技有限公司研制,型号为MVC3000F)和显微镜头(型号为Nikon CF IC Epi Plan TI Interferometry Objective)采集的图像传送至工控机;照明系统由LED环形光源(奥普特公司LED环形光源OPT-RI7000)、准直光源(Moritex公司同轴光源MHAA-100W)和光源控制器组成;运动控制系统(日本东方电机有限公司精密步进电机PK545和驱动器DFC5107P以及深圳雷赛公司运动控制卡DMC2210组成)由纵向可调平台、螺杆、精密步进电机、驱动器和运动控制卡等组成,用于精确控制相机和物镜的匀速运动,实现不同焦距的分层扫描成像;显微视觉测量软件用于控制测量系统和处理数据。

3.2 叠焦显微图像序列数据集

选用直径为1010 μm 的金属螺纹孔和金属螺钉作为被测物,分层扫描获取内螺纹和外螺纹的叠焦显微图像序列。图像对应的实际尺寸为1310.72 $\mu\text{m} \times 983.04 \mu\text{m}$,叠焦图像序列信息如表1所示。

对叠焦图像序列聚焦评价前,采用 7×7 模板的Wiener滤波器对图像进行滤波,减小噪声对评

表1 叠焦图像序列信息

Tab.1 Information of focus stacking image sequence

叠焦图像	直径/ μm	图像帧数	图像位深	图像维度	帧间距/ μm
内螺纹	1010	106	8	768×1024	8
外螺纹	1010	127	8	768×1024	8

价函数的影响,采用文献[18]的配准算法对叠焦图像进行配准矫正。

理论上,叠焦图像序列的每个像素点都呈现了“完全离焦-部分聚焦-完全聚焦-完全离焦”的完整过程,但实际获取的叠焦图像由于受到各种干扰,某些像素点存在聚焦评价曲线较差或不聚焦现象。

为了在相同尺度下比较不同的聚焦评价函数,对聚焦评价结果进行归一化处理。对于像素点 (i, j) ,假设第 n 帧图像的聚焦评价值为 $D_n(i, j)$,聚焦评价最大值为 $\max(D(i, j))$,聚焦评价最小值为 $\min(D(i, j))$,则归一化的聚焦评价函数 $D_{\text{nor}(n)}(i, j)$ 可以表示为

$$D_{\text{nor}(n)}(i, j) = \frac{D_n(i, j) - \min(D(i, j))}{\max(D(i, j)) - \min(D(i, j))} \quad (12)$$

在内螺纹和外螺纹的叠焦图像序列中分别选取3个不同像素点,用于验证聚焦评价函数的性能,选取的像素点位置如表2所示。

表2 聚焦评价像素点选取及其峰值位置

Tab.2 Selection of focus measure pixels and their peak positions

像素点	叠焦图像	像素点位置	评价峰值位置/帧
Point1	内螺纹 106 帧	(356,230)	44
Point2	内螺纹 106 帧	(541,310)	24
Point3	内螺纹 106 帧	(499,491)	/
Point4	外螺纹 127 帧	(610,255)	50
Point5	外螺纹 127 帧	(496,229)	91
Point6	外螺纹 127 帧	(418,633)	86

图6为内螺纹叠焦图像序列的第25, 50, 75帧图像,图7为像素点(356, 230), (541, 310), (499, 491)的聚焦评价曲线,图8为外螺纹叠焦图像序列的第25, 55, 85帧图像,图9为像素点

(610, 255), (496, 229), (418, 633) 的聚焦评价曲线。图 7 和图 9 中采用的聚焦评价函数为

Proposed1, 评价窗口为 13×13 。聚焦评价曲线横坐标为图像帧数, 纵坐标为归一化的聚焦评价价值。

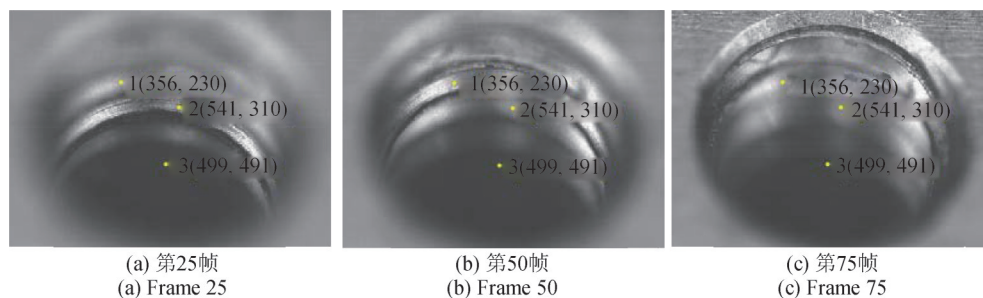


图 6 内螺纹图像序列

Fig.6 Internal thread image sequence

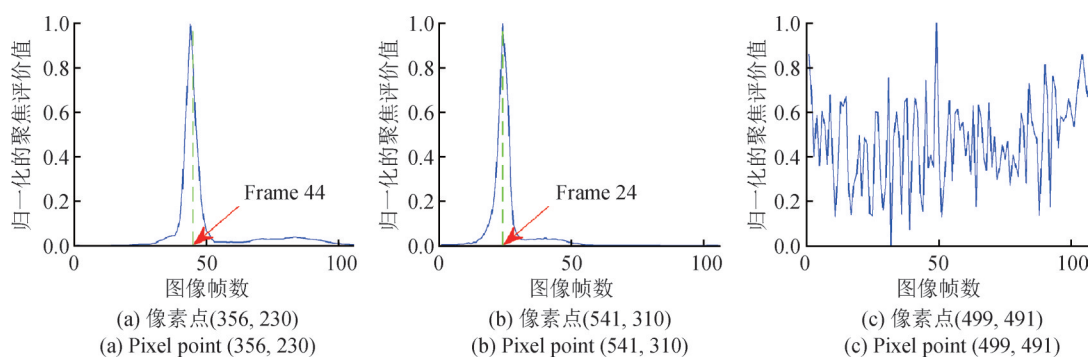


图 7 内螺纹部分像素点聚焦评价曲线

Fig.7 Focus measure curve of partial pixel points of internal thread

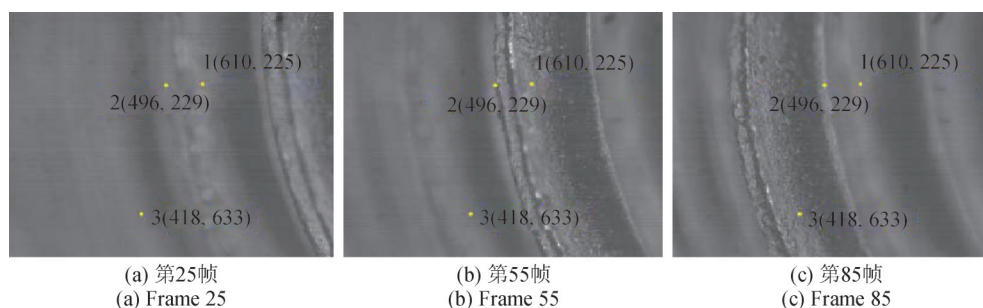


图 8 外螺纹图像序列

Fig.8 External thread image sequence

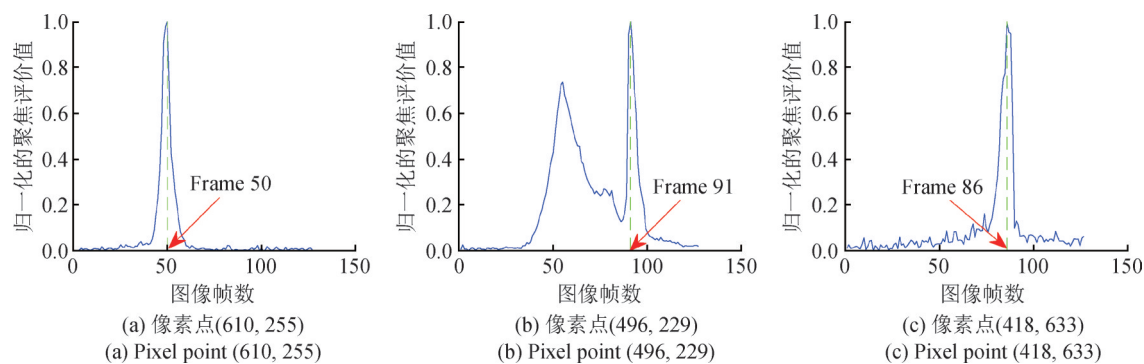


图 9 外螺纹部分像素点聚焦评价曲线

Fig.9 Focus measure curve of partial pixel points of external thread

聚焦评价价值越大,相应的图像帧区域越清晰,聚焦评价最大值对应聚焦的图像帧位置。

图6至图9中的2组叠焦图像序列及评价曲线反映了各像素点聚焦水平的变化趋势,这些像素点在不同帧图像上表现为不同的聚焦程度,对应不同的聚焦评价价值,评价曲线峰值表征了图像序列中该像素点的最佳聚焦位置。内螺纹像素点(356, 230)和(541, 310)的聚焦评价曲线峰值位置在叠焦图像序列的第44帧和24帧,在聚焦曲线峰值附近的图像帧像素点较清晰,锐度较大,如内螺纹第50帧图像像素点(356, 230)较清晰,第25帧图像像素点(541, 310)锐度接近峰值。内螺纹像素点(499, 491)位于孔洞区域,在整个测量过程中始终没有螺纹表面进入成像范围,无法产生聚焦,该点聚焦评价曲线呈现为没有规律的杂乱状态。外螺纹像素点(610, 255), (496, 229), (418, 633)的聚焦评价曲线峰值位置分别第50帧, 91帧, 86帧。

3.3 聚焦评价函数性能分析

开展对比实验,验证聚焦评价函数Proposed1和Proposed2的应用性能。选取Brenner, SMD, SML, Laplacian四种空间域函数以及频域函数

Wav^[12]进行对比。以表2中的6个像素点为评价对象,所有聚焦评价曲线均采用式(12)进行归一化处理。

实验中,所有聚焦评价函数掩膜模板大小均为 13×13 , Proposed2迭代预定义参数设定为0.5。聚焦评价结果如图10和图11所示,为便于观察不同聚焦评价函数的评价曲线的变化情况,将评价曲线峰值附近区域进行放大显示。

对实验结果进行分析:

1) 鲁棒性

SMD, SML, Laplace函数采用的都是高通掩膜算子,它们的共同特点是对噪声比较敏感,这些函数的评价曲线中的平坦区域有相对较大的波动。Brenner函数采用了带通掩膜算子,对噪声有较好的滤除作用,波动较小,评价曲线比较平滑。Proposed1函数通过提取带通和高通信号中的最大能量进行计算,其曲线平坦区域的平滑性介于上述采用带通算子的函数和采用高通算子的函数之间。Proposed2函数在Proposed1函数的基础上,增加了自适应梯度阈值处理,进一步削弱了噪声的影响,提高了抗干扰的能力,曲线平坦区域最平滑、鲁棒性最好。

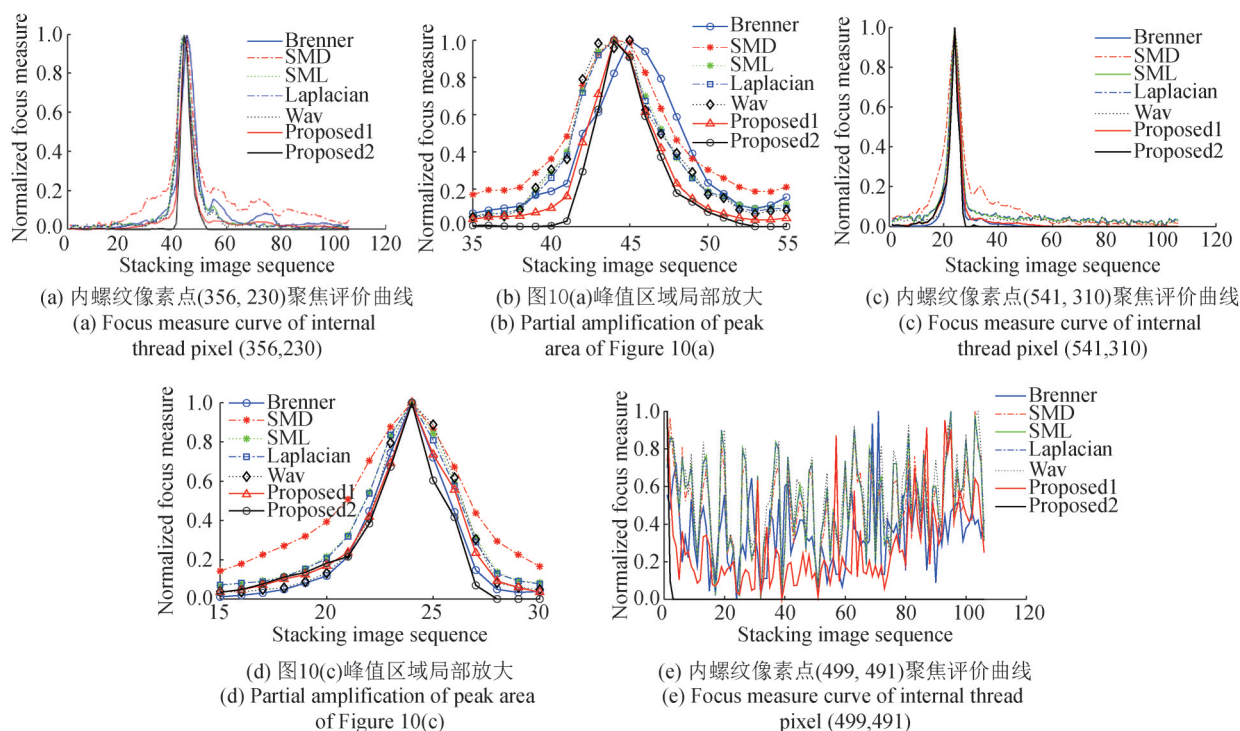


图10 内螺纹聚焦评价比较

Fig.10 Comparison of internal thread focus measure

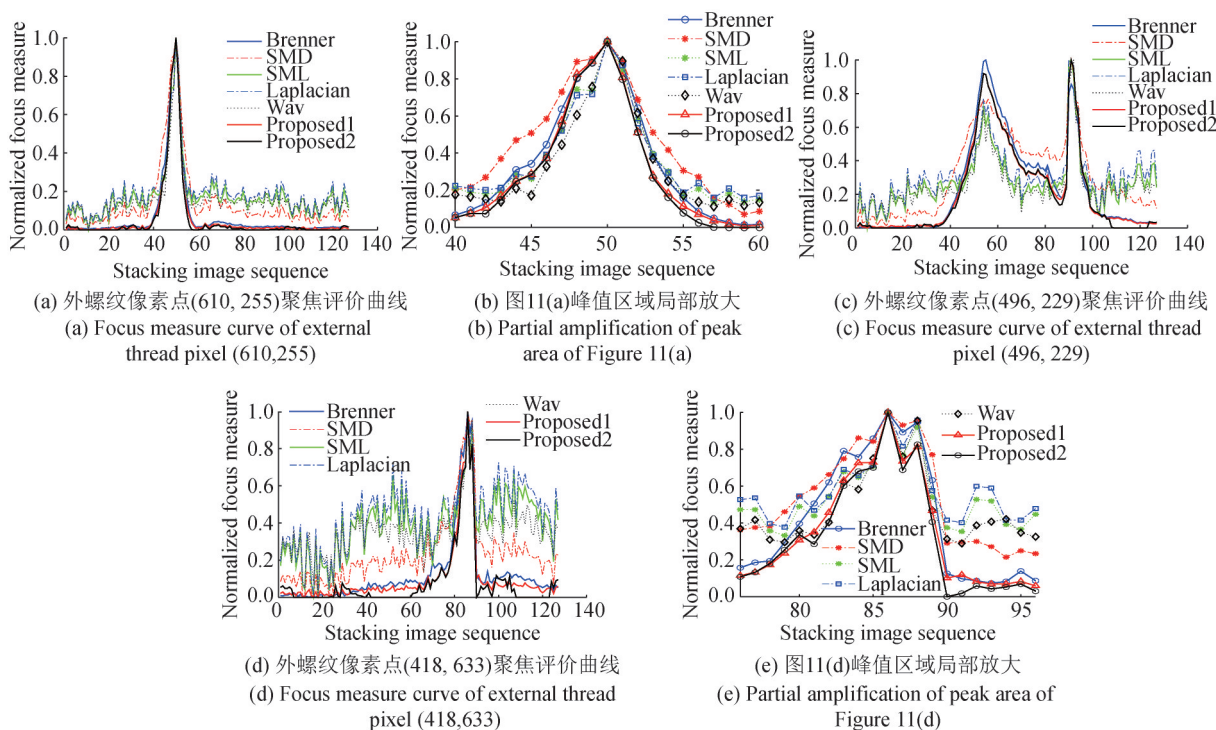


图11 外螺纹聚焦评价比较

Fig.11 Comparison of external thread focus measure

2) 灵敏度

在曲线峰值附近, 评价函数曲线斜率越大, 曲线越陡, 灵敏度越高。SMD 曲线陡峭区最宽, 灵敏度较差, Wav, Brenner, Proposed1, Proposed2 函数灵敏度较高, 其中 Proposed2 函数的灵敏度最高。

3) 无偏性

叠焦显微测量系统对测量的准确性要求较高, 需要准确找到聚焦位置。聚焦评价曲线峰值位置越接近真实焦点位置, 无偏性越好。图 10 (a) 中, Brenner 和 Wav 聚焦峰值位于第 45 帧, 其它函数聚焦峰值均位于第 44 帧, 峰值区域局部放大后如图 10 (b); 图 10 (c) 聚焦峰值均位于第 24 帧, 峰值区域局部放大后如图 10 (d); 图 11 (a) 聚焦峰值均位于第 50 帧, 峰值区域局部放大后如图 11 (b); 图 11 (e) 聚焦峰值均位于第 86 帧, 选用的评价函数均表现出良好的无偏性。

4) 单峰性

除了图 10 (e) 和图 11 (c), 聚焦评价函数曲线表现为只有一个主峰。

5) 无效聚焦评价数据

现场叠焦三维显微视觉测量数据非常复杂,

聚焦评价会产生一些无效的评价点, 在进行三维形貌重构时需要将这些异常的评价数据剔除或修复。图 10 (e) 所示的聚焦评价曲线是杂乱的, 没有形成聚焦峰值, 聚焦评价失败, 主要原因是内螺纹像素点 (499, 491) 位于螺纹孔孔洞内, 在叠焦图像成像全过程中, 该区域没有螺纹表面进入景深范围, 相机获取该点的光强实际是背景噪声, 因此评价曲线不会有峰值。图 11 (c) 出现双峰, 主要原因是该点评价窗口包含坡面区域和平面区域, 这两个区域分别产生了一个波峰。产生这些无效评价点与评价函数的性能无关。

综上所述, Proposed1 和 Proposed2 函数在鲁棒性、灵敏度、无偏性、单峰性等方面的性能均较为突出, 能够满足叠焦显微聚焦测量要求。

3.4 计算效率分析

实验中所有算法均用 MATLAB 实现, 硬件环境为 Intel(R)Core(TM)i5-4300M, 2.60 GHz, 12 GB 内存。计算机每次运行相同的程序时会存在时间差异, 为了提高时间统计的准确性, 分别运行 10 次求取平均运行时间。

表 3 为不同聚焦评价算法的平均运行时间。由表 3 可以看出空间域评价函数运算速度普遍较快,

表3 聚焦评价函数时间效率分析

Tab.3 Time efficiency analysis of focus measure

聚焦评价函数	内螺纹时间效率/s	外螺纹时间效率/s
Brenner	2.87	3.22
SMD	3.12	3.78
SML	3.58	3.95
Laplacian	2.62	3.03
Wav	16.9	18.78
Proposed1	5.35	7.89
Proposed2	12.34	11.19

完全满足叠焦显微测量速度要求；频域评价函数效率最低。Proposed1和Proposed2函数比经典的空间域评价函数效率低，但比频域评价函数效率高很多。Proposed1的效率是Proposed2效率的2倍，产生这种现象的原因是Proposed2函数中的迭代消耗了较多时间。

4 结论

提出了两种快速、准确的聚焦评价函数 Proposed1 和 Proposed2。Proposed1 函数利用 2 个带通掩膜算子和 4 个高通掩膜算子，在带通信号和高通信号中寻找每个像素点对于相邻像素强度变化的最大值来表示聚焦程度，以提高聚焦评价函数提取梯度信息的能力。Proposed2 函数在 Proposed1 函数的基础上增加了自适应迭代阈值分割以提高灵敏度。与经典的空间域聚焦评价函数相比，提出的两种函数在鲁棒性、灵敏度、无偏性和单峰性方面均具有较好的表现。与频域小波聚焦评价函数相比，Proposed1 函数的运算效率提高了 2~3 倍以上，聚焦评价效果达到甚至超过频域评价方法。Proposed2 算法降低了噪声对评价函数的影响，提高了聚焦评价的灵敏度，评价曲线波动平缓。设计的聚焦评价函数能够满足叠焦显微三维视觉测量要求，具有技术借鉴价值。

参考文献

- [1] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 91-96.
LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for the measurement of nano-scale topography[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(2): 91-96. (in Chinese)
- [2] 李杨, 张凯林, 石伟. 激光扫描共聚焦显微镜在微小硬度压痕测量中的应用研究[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 46-49.
LI Y, ZHANG K L, SHI W. Application of laser scanning confocal microscope in microvickers hardness indentation measurement[J]. Metrology and measurement technology, 2019, 39(6): 46-49. (in Chinese)
- [3] TROUVÉ-PELOUX P, CHAMPAGNAT F, LEBESNERAIS G, et al. Theoretical performance model for single image depth from defocus[J]. Journal of the optical society of America A, 2014, 31(12): 2650-2662.
- [4] HELMLI F, DANZL R, PRANTL M, et al. Ultra high speed 3D measurement with the focus variation method[C]. 2014: 617-622.
- [5] WLODEK J, GOFRON K J, CAI Y. Achieving 3D imaging through focus stacking[C]. Proceedings of the 13th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation - SRI2018, 2019: 50001-50007.
- [6] QIAN Q, GUNTURK B K. Extending depth of field and dynamic range from differently focused and exposed images[J]. Multidimensional systems and signal processing, 2016, 27(2): 493-509.
- [7] KWON O J, CHOI S, JANG D, et al. All-in-focus imaging using average filter-based relative focus measure[J]. Digital signal processing, 2017, 60: 200-210.
- [8] NAYAR S K, NAKAGAWA Y. Shape from focus[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1994, 16(8): 824-831.
- [9] XU Y, SUN B, YAN X, et al. Multi-focus image fusion using learning based matting with sum of the Gaussian-based modified Laplacian[J]. Digital signal processing, 2020, 106: 102821.
- [10] PERTUZ S, PUIG D, GARCIA M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus[J]. Pattern recognition, 2013, 46(5): 1415-1432.
- [11] ZHANG Z, LIU Y, XIONG Z, et al. Focus and blurriness measure using reorganized DCT coefficients for an autofocus application[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2018, 28(1): 15-30.
- [12] YANG G, NELSON B J. Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images[C]. Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003, 3: 2143-2148.

- [13] XIE H, RONG W, SUN L. Construction and evaluation of a wavelet-based focus measure for microscopy imaging [J]. Microscopy research and technique, 2007, 70(11): 987 – 995.
- [14] 邹昌帆, 刘秉琦, 黄富瑜, 等. 基于多向最大梯度阈值的自动调焦评价函数[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 115 – 118.
- ZOU C F, LIU B Q, HUANG F Y, et al. Automatic focusing evaluation function based on multi-directional maximal gradient threshold method [J]. Laser and infrared, 2016, 46(1): 115 – 118. (in Chinese)
- [15] GONZALEZ R, WOODS R. Digital image processing, global edition[M]. Pearson Education Limited, 2017.
- [16] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3401 – 3408.
- HONG Y Z, REN G Q, SUN J. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. Optics and precision engineering, 2014, 22(12): 3401 – 3408. (in Chinese)
- [17] 路朋罗. 基于图像处理技术的自动调焦方法研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- LU P L. Research on automatic focusing method based on image processing technology [D]. Changchun: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics), 2016. (in Chinese)
- [18] WU A, SHI Y Q, LU R S, et al. Sequence image registra-

tion for large depth of microscopic focus stacking [J]. IEEE access, 2020, 8: 6533 – 6542.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 吴昂 (1977—), 男, 副教授, 主要从事机器视觉与光学测量技术研究。



通讯作者: 卢荣胜 (1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为机器视觉与光学精密测量技术。1998年博士毕业于合肥工业大学精密仪器专业, 1998年至2000年在天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室作为博士后进行科学研究, 2001年至2006年在香港城市大学、英国 Imperial College London, University of Huddersfield 从事研究工作。现任合肥工业大学“斛兵学者”岗位教授, 无锡维度机器视觉产业技术研究院院长, 获国务院政府特殊津贴专家称号。主持国家级项目或课题10余项, 发表论文200余篇, 合作发表专著2本, 获发明专利20余项, 获省部级科技奖3项, 培养硕士和博士研究生120余人。