

分割太赫兹全息再现像的复合方法的比较

巩文盼*, 李琦, 董儒汲

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 为实现太赫兹同轴全息再现图像识别, 通常需要图像分割以提取图像特征。太赫兹同轴数字全息再现图像包含一定程度的噪声, 影响分割质量。本文针对太赫兹同轴全息再现像特点采用了基于裁剪、镜像扩展、滤波和直方图多项式拟合的复合分割方法, 用该方法分别对垫片和齿轮的 2.52 THz 同轴全息真实再现像进行了处理, 并分步与基本全局阈值法和刘津法进行了比较分析, 同时用马修斯相关系数进行了客观评价。实验结果表明, 该复合方法可以得到较好的分割结果。

关键词 太赫兹数字全息; 图像分割; 直方图多项式拟合

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090901

Comparison of Composite Image Segmentation Methods for Terahertz Holography Reconstruction Images

Gong Wenpan*, Li Qi, Dong Ruji

National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Image segmentation is usually needed to extract the features in order to recognize images of terahertz inline digital holography reconstruction. The images of terahertz inline digital holography reconstruction contain various degree of noise, which affects the quality of segmentation. In this paper, the composite segmentation method based on the clipping, mirror expansion, filtering and histogram polynomial fitting is adopted for the characteristics of terahertz holographic reconstructed image. By using this method, the 2.52 THz images of terahertz inline digital holography reconstruction of gasket and gear are processed and compared step by step with the basic global threshold method and the Otsu method, and objectively evaluated with Mathews correlation coefficient. Experimental results show that the composite method can get better segmentation results.

Key words terahertz digital holography; image segmentation; histogram polynomial fitting

OCIS codes 110.6795; 090.1995; 100.2960

1 引言

太赫兹数字全息成像正日益受到关注, 随之而来的图像处理技术也逐渐凸显其重要性^[1]。在实际应用中常常要求将目标与周围背景分开, 图像分割便可实现这一目的。图像分割是指将图像分成若干互不重叠的子区域, 使得同一子区域内的特征具有一定相似性、不同子区域间的特征呈现较为明显的差异^[2-4]。传统的图像分割方法主要包括阈值法、边缘检测法、区域法等, 其中阈值法的实质是利用图像

的灰度直方图信息确定阈值, 它用一个或几个阈值将图像的灰度级分为几个部分, 因其实现简单、计算量小、性能较稳定而成为图像分割中最基本和应用最广泛的分割技术。

全局阈值处理方法是最早的图像分割方法, 其中基本全局阈值法^[5]是一种比较简单的方法, 该方法由Rilder等^[6]提出, Magid等^[7]对其作了简化。对于直方图双峰明显, 谷底较深的图像, 基本全局阈值法可以有效地分割。此外, N. Otsu 提出的刘津法^[8] (最大类间方差法, Otsu) 以其计算简单、稳定有效一直广为使用,

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)

* E-mail: hitgongwenpan@163.com

例如,文献[9]将大津法应用于虚拟衍射平面框架的复杂全息图的自动分解中,文献[10]将大津法应用于光学扫描全息增强自动对焦中。该方法的原理是选取一个特定的阈值将像素分成两个类,使得两个类的类间方差达到最大。基本全局阈值法和大津法自动化程度高,但是文献[11]明确指出大津法适用于图像中的目标和背景所占面积接近的情况,当两者所占面积悬殊时将失效。

传统算法在许多场合仍有应用,但由于传统阈值分割法要求图像与背景的灰度值相差比较大,而部分图像不满足此条件,所以在研究阈值分割方法时,引入了多项式拟合。如王娜等^[12]在研究医学图像分割方法时,针对医学图像的特点,采用背景拟合设定阈值进行分割,有效地分割了医学图像背景;余成波等^[13]提出了一种基于双向多项式拟合的动态阈值分割算法,保留了因光照不均而容易丢失的特征形态细节。

图像分割算法的适用范围仍是一个尚未解决的问题。图像与图像间的巨大差异,使得目前仍然没有一种普遍适应各种图像的分割算法。当前的研究现状只能是针对一类具有共同光学特点的图像单独设计一种适合的图像处理算法^[14-15]。此外,由于图像往往带有一定程度的噪声,如何减弱其影响,也是图像分割关键的一步。

连续太赫兹同轴数字全息再现像是一种灰度图像,图像尺寸小、目标较小、背景大、信噪比较低。太赫兹同轴再现像分割具有重要的实用价值,由于背景噪声对基本全局阈值法和大津法有严重的影响,用这两种方法分割时无法得到理想的结果,因此本文针对金属目标太赫兹全息再现像的特点,研究了基于裁剪、镜像扩展、滤波和直方图多项式拟合的复合分割方法,以高质量地分割图像,并将该复合方法与基本全局阈值法和大津法这两种传统的阈值分割方法进行了比较分析。

2 算法原理

2.1 阈值分割和滤波原理

数字图像的直方图定义为^[8]

$$h(r_k) = n_k, \quad (1)$$

式中: r_k 表示第 k 级灰度, n_k 表示第 k 级灰度的像素数。还可以用归一化直方图表示数字图像中每一灰度级与该灰度级出现的概率间的统计关系。用横坐标表示灰度级,灰度级为归一化至 $[0, 1]$ 的连续量,纵坐标表示概率。定义为

$$P(r_k) = n_k / N, \quad (2)$$

式中: N 表示图像的总像素数, $P(r_k)$ 表示灰度级出现的概率。选取阈值 T 来分割图像,分割结果 $g(x, y)$ 被定义为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T \\ 0, & f(x, y) \leq T \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $f(x, y)$ 为输入图像的灰度, $g(x, y)$ 为输出图像的灰度。对于基本全局阈值法^[5],设图像最大灰度值为 T_{\max} ,最小灰度值为 T_{\min} ,设初始阈值:

$$T_0 = (T_{\max} + T_{\min}) / 2. \quad (4)$$

根据阈值 T_0 将图像分为前景和背景,求出各自平均灰度 T_A 和 T_B 。根据 T_A 和 T_B 求出新阈值:

$$T_{k+1} = (T_A + T_B) / 2. \quad (5)$$

重复计算 T_A 和 T_B 并更新阈值至满足迭代条件。

对于最大类间方差法,先设图像像素个数为 N ,有 L 个灰度级,灰度值为 i 的像素个数为 n_i , p_i 为概率密度。阈值 T 将图像分成目标 C_0 和背景 C_1 两个类, C_0 和 C_1 分别是灰度值为 $\{1, 2, \dots, T\}$ 和灰度值为 $\{T+1, T+2, \dots, L-1\}$ 的像素集合。设

$$\sigma_B^2(T) = \omega_0(T)\omega_1(T) [\mu_1(T) - \mu_0(T)]^2 \quad (6)$$

为类间方差。将全部灰度级代入,比较找出其中使 $\sigma_B^2(T)$ 取到最大值的 T ,即为所求阈值。(6)式中:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^T p_i, \quad \omega_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} p_i, \quad (7)$$

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^T i p_i / \omega_0, \quad \mu_1 = \sum_{i=T+1}^{L-1} i p_i / \omega_1. \quad (8)$$

本文中滤波算法为非局部均值(NLM)滤波^[16],其计算原理为

$$NL[g](i) = \sum_{j=I_s} \omega(i, j) g(j), \quad (9)$$

式中:待处理的图像为 g ,处理结果为 $NL[g](i)$, I_s 为以像素 i 为中心,大小为 $(2t+1) \times (2t+1)$ 的搜索窗口。 $\omega(i, j)$ 为权值,依赖于像素 i 与 j 之间的相似性。定义为

$$\omega(i, j) = \frac{1}{G(i)} \exp \left[\frac{\sum_{n_i \in N_i, n_j \in N_j, k_i \in k} k_i (n_i - n_j)^2}{h^2} \right], \quad (10)$$

式中: N_i 表示以像素 i 为中心的固定大小 $(2f+1) \times (2f+1)$ 的正方形邻域, N_j 表示以像素 j 为中心的固定大小 $(2f+1) \times (2f+1)$ 的正方形邻域, n_i, n_j 为 N_i, N_j 中处于相同位置的像素灰度值。参数 h 控制指数函数 t 的衰减速度,因而决定着滤波的平滑程度,可由图像的标准差 σ 估计。设参数 $h = c \times \sigma$, c 为控制系数。各邻域灰度值矩阵之间的相似性通过加权欧氏距离来衡量, k 表示相似性核,

由 $(2f+1) \times (2f+1)$ 个元素构成。其中的某一位置元素 k_l 可表示为

$$k_l = \frac{1}{f} \sum_{d=d_l}^f \frac{1}{(2d+1)^2}, \quad (11)$$

式中： d_l 表示元素距中心元素的欧氏距离的整数。

2.2 本文复合方法

本文要处理的第一幅图像为一个C形垫片的太赫兹同轴全息再现图像,124 pixel \times 124 pixel大小,原始图像如图1(a)所示,原始图像四周存在与目标灰度相似的部分,这是由于成像时激光器能量不够,同时该图像还存在很严重的背景噪声,目标的细节部分较少,因此分割该图像时重点要解决的是如何将四周背景去除。对其求灰度直方图,结果如图1(b)所示。该图像灰度直方图的灰度级为20和75左右的位置有两个极大值。

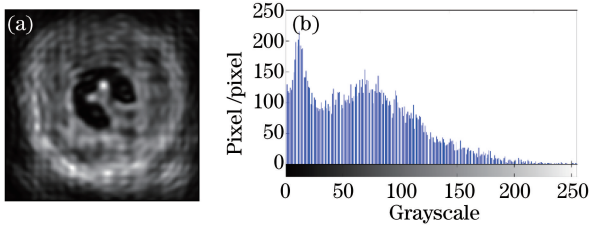


图1 原始图像1及其灰度直方图。

(a)原始图像1;(b)灰度直方图

Fig. 1 Original image 1 and its gradation histogram.

(a) Original image 1; (b) gradation histogram

第二幅图像为齿轮的太赫兹同轴全息再现像,124 pixel \times 124 pixel大小,原始图像如图2(a)所示。原始图像上存在较多噪声,在目标内部噪声比较严重,部分齿轮和噪声灰度级相似,目标细节较多,不利于分割,分割该图像要解决的问题是如何将目标细节保留。对其求灰度直方图,如图2(b)所示,由于图像中背景像素较多,导致255灰度级的像素数远远超过其余灰度级的像素数,在灰度级为100左右的位置有一个极小值。

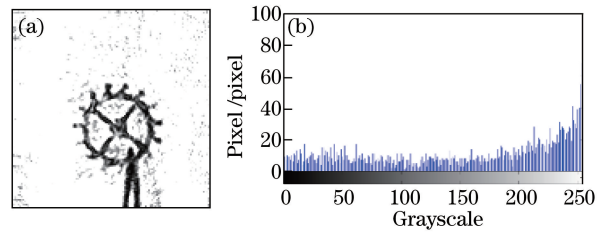


图2 原始图像2及其灰度直方图。

(a)原始图像2;(b)灰度直方图

Fig. 2 Original image 2 and its gradation histogram.

(a) Original image 2; (b) gradation histogram

素数远远超过其余灰度级的像素数,在灰度级为100左右的位置有一个极小值。

本文要处理的两幅图像均为太赫兹同轴全息再现像,信噪比低,透光的背景灰度级较高,不透光的背景灰度级较低。但两幅图像有一些不同的特点,所以分割时不仅应解决四周背景和噪声的问题,还要保留目标细节,因此要采用复合的方法求得最终将目标与背景分开的阈值。复合方法的思路为:要处理的太赫兹同轴全息再现像包括透光的背景和不透光的背景,因此默认灰度直方图上至少应存在目标和背景两个峰,则两个峰值之间的极小值即为所求阈值。又根据垫片图像的特点,首先应将四周背景去掉再进行滤波。背景灰度级较高,关心目标灰度所在部分,所以先进行灰度拉伸再通过多项式拟合求阈值。

复合的分割方法流程图如图3所示,具体步骤如下:

① 输入原始再现像。

② 裁剪和镜像扩展。构造一个左上对角线上有从大到小的元素的矩阵,用该矩阵元素与天津法的分割结果(该分割结果只用来大致找到背景的边界)中对应元素相乘,找到最大值对应的坐标,即为该方向上背景的边界所在的位置,将矩阵旋转90°,

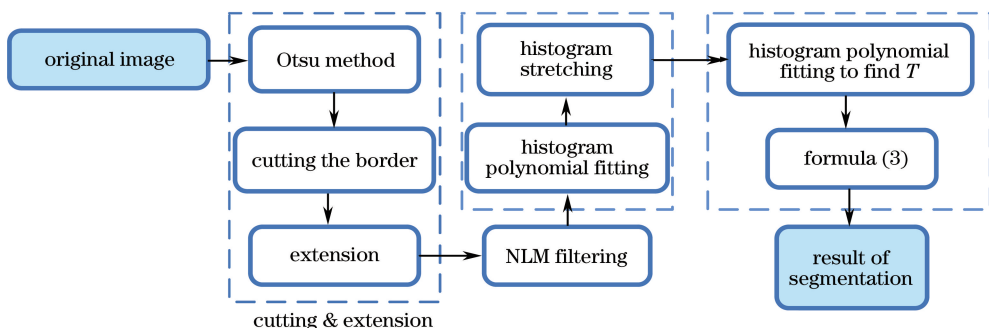


图3 复合方法流程图

Fig. 3 Flowchart of the composite method

再进行相同的处理,得到四组数据,找到其中的最大坐标,以它作为尺度将图像四角裁剪掉,然后镜像扩展其至原始大小。

③ 对图像进行 NLM 滤波。

④ 多项式拟合(5~7 阶)求极值,求极值时为避免影响拟合准确性,将 255 灰度级像素个数改变为与 254 灰度级相等,拟合时默认拟合出至少目标和背景两个峰,将拟合求得的最大的极大值点所在的峰视为背景所在的峰,以最大的极大值作为区间上界,零级灰度作为区间下界,拉伸至整个灰度区间;同阶多项式拟合求极值,以大于第一个极大值的每个极小值作为阈值进行分割,输出分割结果。

其中镜像扩展的原理如下:图像按照图像大小通过围绕边界进行镜像反射来扩展至指定大小。将一图像分为八个区域; $D_1 \sim D_8$ 。设图像左面区域为 D_1 ,上面区域为 D_3 。图像边界坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_2)$ 。

对于 D_1 区域,有:

$$g(x, y) = f(2x_1 - x, y)。 \quad (12)$$

对于 D_3 区域,有:

$$g(x, y) = f(x, 2y_2 - y)。 \quad (13)$$

同理,对剩余区域进行复制,即可得到扩展后的图像。

算法中用到的灰度拉伸计算式为

$$g(x, y) = \begin{cases} \frac{f(x, y)}{t_{\max}} \times 255, & 0 \leq f(x, y) \leq t_{\max} \\ 255, & f(x, y) > t_{\max} \end{cases}, \quad (14)$$

式中 t_{\max} 表示直方图拟合求得的第二个极大值。

本文采用马修斯相关系数(MCC)评价分割质量,定义为

$$M =$$

$$\frac{T_P \times T_N - F_P \times F_N}{\sqrt{(T_P + F_P)(T_P + F_N)(T_N + F_P)(T_N + F_N)}}, \quad (15)$$

式中:马修斯相关系数表示为 M , T_P 表示实际为阳性、预测为阳性的像素数; T_N 表示实际为阴性、预测为阴性的像素数; F_P 表示实际为阴性、预测为阳性的像素数; F_N 表示实际为阳性、预测为阴性的像素数。其中实际图像为标准图像,预测图像为分割结果。MCC 越大,表示分割结果同标准图像相关性越好。由于 MCC 的计算需要标准图像,因此为了客观评价各分割结果,对照图像手动地作出了垫片

和齿轮的标准图像,如图 4 所示,虽然不能保证与目标完全符合,但仍具有参考价值。

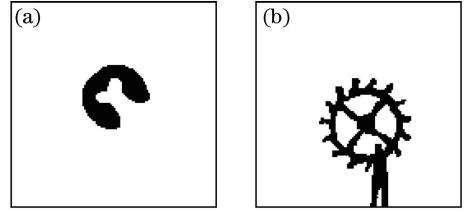


图 4 齿轮和垫片的标准图像。

(a) 垫片标准图像; (b) 齿轮标准图像

Fig. 4 Standard images of gasket and gear.

(a) Standard image of gasket; (b) standard image of gear

3 实验结果及分析

实验中 NLM 滤波参数为:搜索窗大小为 $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$,相似窗大小为 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$,平滑参数 h 为 σ' , σ' 为图像噪声标准差。

3.1 垫片图像

用本文复合方法处理垫片图像,即首先对原始图像 1 进行了裁剪和镜像扩展,用大津法分割原始图像,得到结果如图 5(a)所示,由于四角背景无法与目标分离开,大部分背景像素被处理为目标,而且有严重的噪声遗留,看不清具体目标,效果很差。

用图 5(a)结果找到背景边界的坐标,裁剪掉四周后,得到的结果如图 5(b)所示,成功地将四周背景裁剪掉了,裁剪后图像大小为 $86 \text{ pixel} \times 86 \text{ pixel}$ 。然后进行镜像扩展,得到结果如图 5(c)所示,四角有明显的对称。再进行 NLM 滤波去噪,结果如图 5(d)所示,得到的结果较平滑。对该结果求灰度直方图,结果如图 5(e)所示。

对该直方图进行多项式拟合求极值灰度拉伸,对拉伸结果再进行直方图多项式拟合求阈值分割。5 阶多项式拟合曲线如图 6(a)所示。求得的最大极大值为 0.9052,以该值为上界进行灰度拉伸的结果如图 6(b)所示,其灰度直方图的 5 阶多项式拟合曲线如图 6(c)所示,可以明显看出该拟合曲线不准确,曲线上存在两个极小值点,由于第一个极小值小于第一个极大值,所以判定该极小值点不在目标和背景之间,最终求得的一个极小值为 0.7623。以该极小值为阈值的分割结果如图 6(d)所示,由于求得的极小值也不在目标背景之间,所以得到的分割结果很差。

6 阶多项式拟合曲线如图 7(a)所示。求得的最大极大值为 0.7862,以该值为上界进行灰度拉伸的

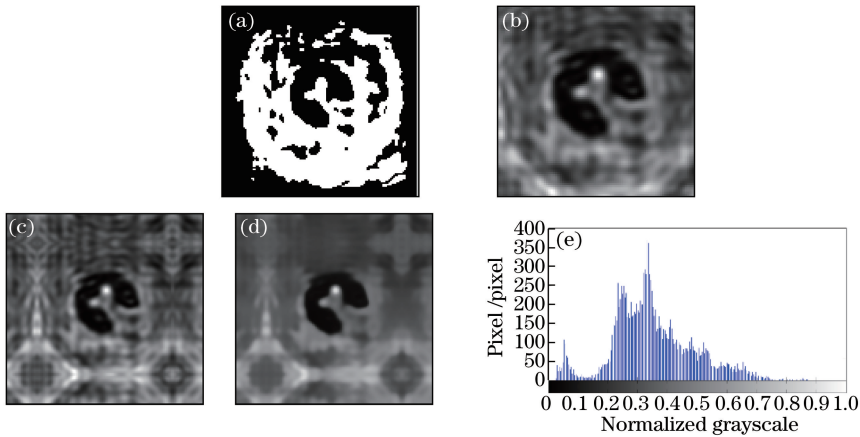


图 5 垫片的大津法结果、裁剪、镜像扩展、滤波结果及滤波后灰度直方图。(a)大津法结果;(b)裁剪结果;(c)扩展结果;(d) NLM 滤波结果;(e)(d)图的灰度直方图

Fig. 5 Results of Otsu, cutting, extension, NLM filter and gradation histogram of filtering result for gasket.

(a) Result of Otsu method; (b) cutting result; (c) extension result; (d) result of NLM filter; (e) gradation histogram of (d)

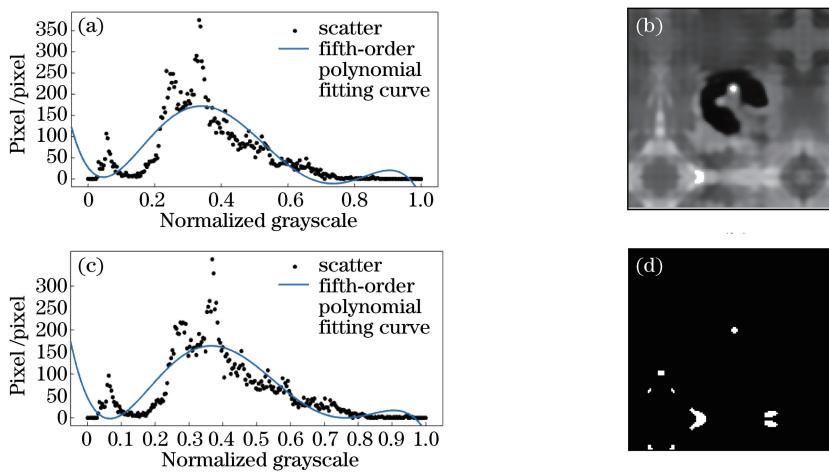


图 6 垫片直方图 5 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 5 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;(c)拉伸后的 5 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 1

Fig. 6 Histogram fifth-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gasket.

(a) Fifth-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) fifth-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 1

结果如图 7(b)所示,其灰度直方图的 6 阶多项式拟合曲线如图 7(c)所示,求得两个极小值分别为 0.0849 和 0.7909。以该组极小值为阈值所得到的分割结果分别如图 7(d)、(e)所示,由于拟合的偏差,该组分割结果也不理想,其中较好的分割结果 2 与标准图像的 MCC 为 0.7594。

7 阶多项式拟合曲线如图 8(a)所示。求得的最大极大值为 0.7943,以该值为上界进行灰度拉伸得到的结果如图 8(b)所示,其灰度直方图的 7 阶多项式拟合曲线如图 8(c)所示,求得两个极小值分别为 0.1426 和 0.7016。以该组极小值为阈值的分割结果如图 8(d)、(e)所示,由于拟合的效果较好,将求得

的第一个极小值作为目标和背景间的阈值,所以效果很好,该结果与标准图像的 MCC 为 0.9192。可以看出,直方图多项式拟合曲线影响阈值的准确性,若曲线拟合得不合理,得到的阈值将会偏离合理的阈值,若拟合得合理,则能得到正确的阈值进行分割。

将基本全局阈值法和大津法也应用于此复合方法中进行了比较。首先,对图 5(c)滤波后的图像进行了分割,基本全局阈值法计算的阈值为 0.3937,大津法计算的阈值为 0.3922,得到了相同的分割结果,如图 9 所示。由于目标和背景所占的面积悬殊,基本全局阈值法和大津法均不适用于分割这样的图像。

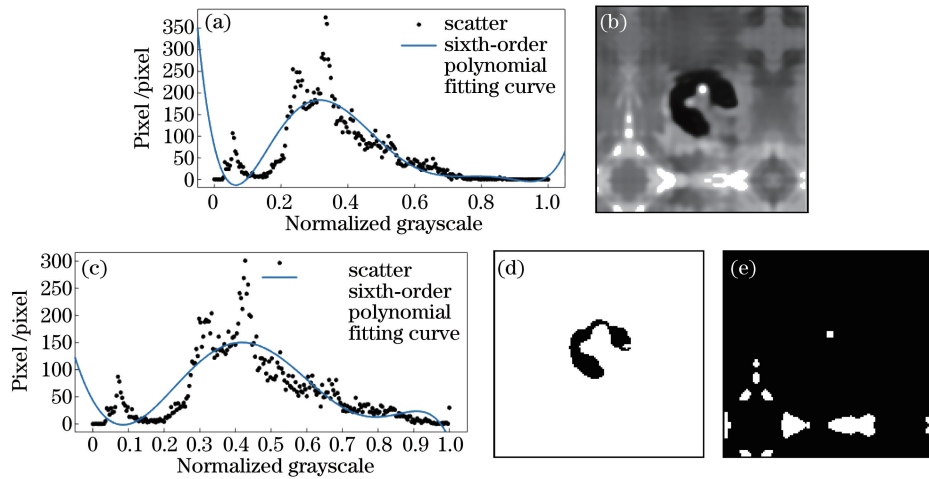


图 7 垫片直方图 6 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 6 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;
(c)伸后的 6 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 2;(e)分割结果 3

Fig. 7 Histogram sixth-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gasket.
(a) Sixth-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) sixth-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 2; (e) segmentation result 3

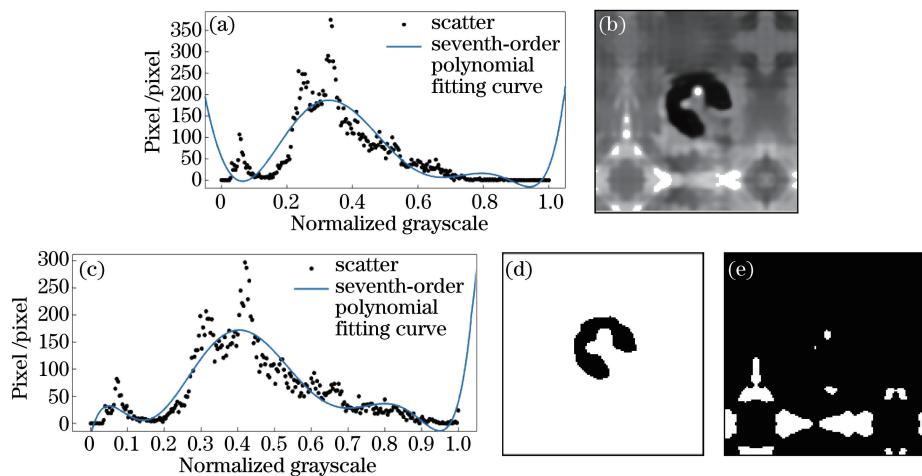


图 8 垫片直方图 7 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 7 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;
(c)伸后的 7 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 4;(e)分割结果 5

Fig. 8 Histogram seventh-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gasket.
(a) Seventh-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) seventh-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 4; (e) segmentation result 5



图 9 图 5(c)的基本全局阈值法和大津法分割结果
Fig. 9 Segmentation results of Fig. 5(c) using basic global threshold method and Otsu method

然后对图 8(b)7 阶多项式拟合求极值灰度拉伸后的图像进行分割,得到了相同的结果,如图 10 所



图 10 图 8(b)的基本全局阈值法和大津法分割结果
Fig. 10 Segmentation results of Fig. 8(b) using basic global threshold method and Otsu method
示。与上组结果类似,灰度拉伸后,可看出基本全局阈值法和大津法仍然不适合分割该图像。

比较复合方法、基本全局阈值法和大津法的分割结果,可以看出对于垫片图像的处理,复合方法中以7阶多项式拟合求得的第一个极小值为阈值分割可以得到更好的分割结果。该结果与标准图像的 MCC 最高为 0.9192,其余结果的 MCC 均较小,其中全局阈值法和大津法的分割结果的 MCC 约为 0.2。

3.2 齿轮图像

首先对原始图像 2 进行了裁剪和镜像扩展,用大津法分割原始图像,得到结果如图 11(a)所示,分

割结果不理想,保留的噪声像素较多。用该结果找背景边界的坐标,由于该原始图像背景最远的边界即图像的边界,因此裁剪不会裁剪掉目标,镜像扩展后的输出结果仍为原始图像 2。进行 NLM 滤波去噪,结果如图 11(b)所示,滤波后目标左下角有一个较细的齿消失了,这是由于滤波参数不合理,图像经过滤波之后得到的所有结果也都没有保留该部分,该结果的灰度直方图如图 11(c)所示。

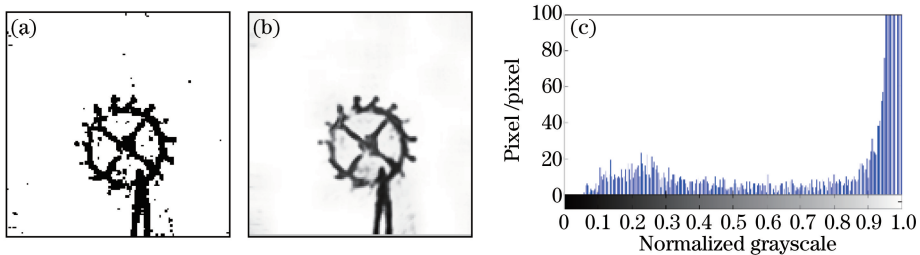


图 11 齿轮的大津法结果、滤波结果及其灰度直方图。(a)大津法结果;(b) NLM 滤波结果;(c)滤波结果的灰度直方图
Fig. 11 Results of Otsu, NLM filter and gradation histogram of filtering results of gear. (a) Result of Otsu method; (b) result of NLM filter; (c) gradation histogram of filtering result

对图 11(c)的直方图进行多项式拟合求极值灰度拉伸,对拉伸后结果再进行直方图多项式拟合求阈值分割。5 阶多项式拟合曲线如图 12(a)所示。求得的最大极大值为 0.5711,以该值为上界得到的灰度拉伸的结果如图 12(b)所示,其灰度直方图的 5 阶多项式拟合曲线如图 12(c)所示,求得的一个极小值为 0.7808。以该极小值作为阈值得到的分割结

果如图 12(d)所示。由于灰度拉伸的上界较小,拉伸后没有保留部分目标像素,如齿轮右上角和左上角,因此多项式拟合求阈值分割后得到结果中对应的位置也缺失了。该结果与标准图像的 MCC 为 0.7816。

6 阶多项式拟合曲线如图 13(a)所示。求得的最大极大值为 0.6705,以该值为上界进行灰度拉伸得到的结果如图 13(b)所示,其灰度直方图的 6 阶

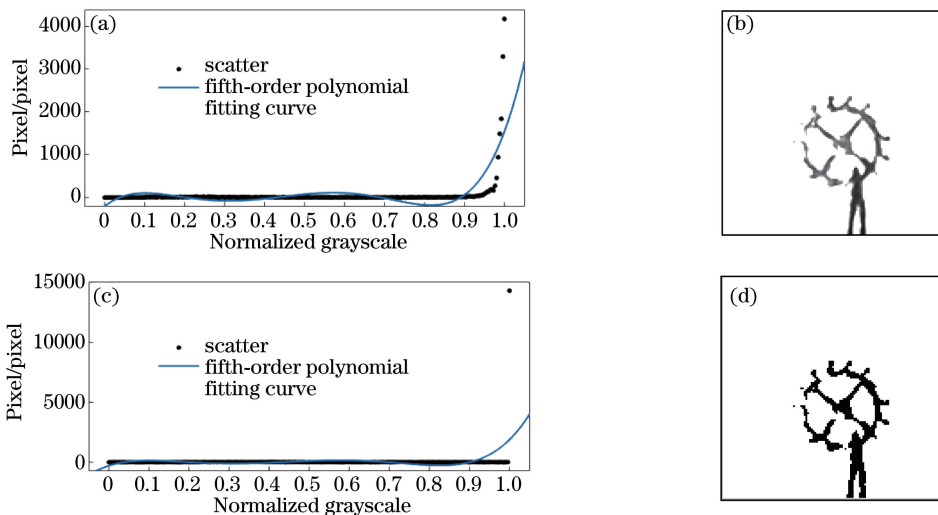


图 12 齿轮直方图 5 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 5 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;(c)拉伸后的 5 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 1

Fig. 12 Histogram fifth-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gear.

(a) Fifth-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) fifth-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 1

多项式拟合曲线如图 13(c)所示,求得一个极小值为 0.7158。以该极小值作为阈值的分割结果如图

13(d)所示,由于灰度拉伸的上界也较小,得到的结果类似图 12, MCC 为 0.8048。

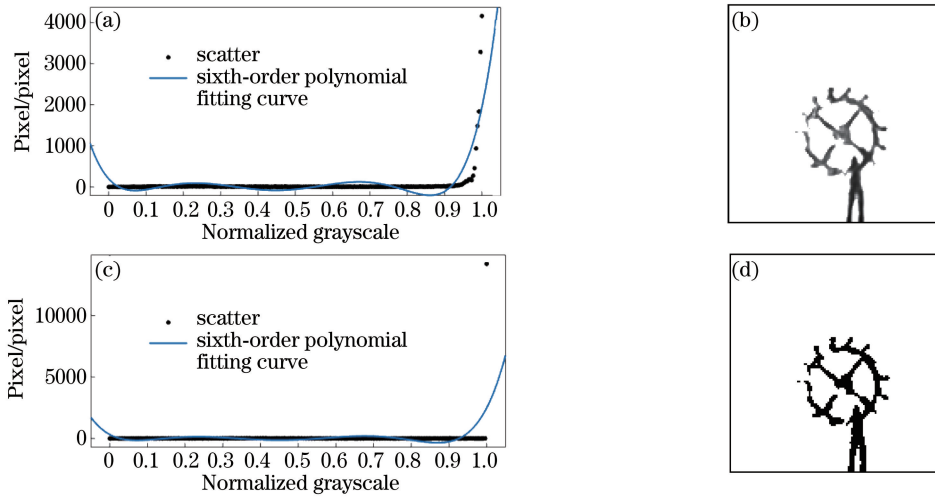


图 13 齿轮直方图 6 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 6 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;
(c)拉伸后的 6 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 2

Fig. 13 Histogram sixth-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gear.

(a) Sixth-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) sixth-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 2

7 阶多项式拟合曲线如图 14(a)所示。求得的最大极大值为 0.7385,以该值为上界灰度拉伸的结果如图 14(b)所示,其灰度直方图的 7 阶多项式拟合曲线如图 14(c)所示,求得两个极小值分别为 0.7071 和 0.9191。以该组极小值为阈值得到的分割结果如图

14(d)、(e)所示,由于灰度拉伸的上界比 5、6 阶的上界都稍大,因此拉伸结果保留了齿轮右上角的目标像素;由于第二个阈值比第一个阈值大一些,因此保留了更多的目标,效果也更好。这两个结果与标准图像的 MCC 分别为 0.8243 和 0.8899。

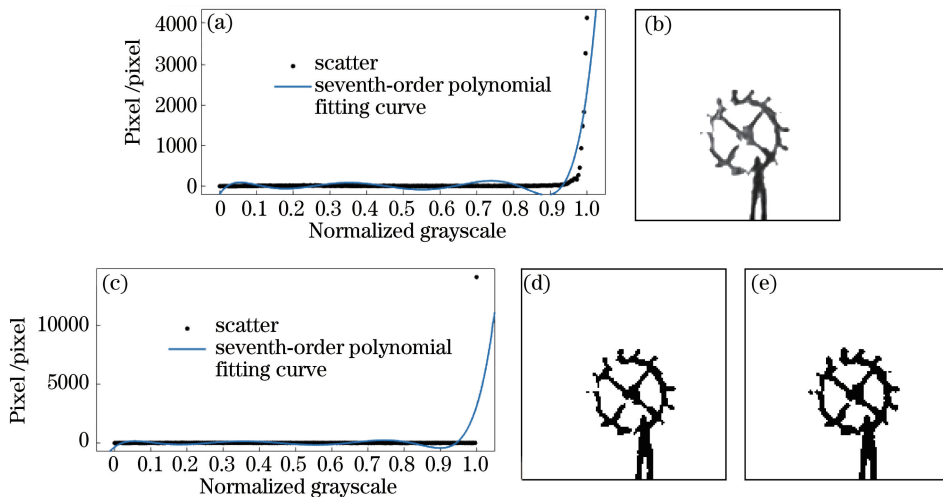


图 14 齿轮直方图 7 阶多项式拟合曲线及拉伸和分割结果。(a) 7 阶多项式拟合曲线;(b)灰度拉伸结果;
(c)拉伸后的 7 阶多项式拟合曲线;(d)分割结果 3;(e)分割结果 4

Fig. 14 Histogram seventh-order polynomial fitting curves and results of stretching and segmentation of gear.

(a) Seventh-order polynomial fitting curve; (b) result of histogram stretching; (c) seventh-order polynomial fitting curve after stretching; (d) segmentation result 3; (e) segmentation result 4

由于原始图像 2 上存在几个很细的齿(如目标的左下角和右上角),它们像素灰度级比其余的目标

像素灰度级高,滤波对它们有一定影响;若灰度拉伸的上界较小,则目标上较细的齿轮很容易在拉伸时

被去掉,再进行阈值分割时也无法保留这些目标。

与 3.1 节相同,对图 11(b)滤波后图像和图 14(b)7 阶多项式拟合求极值灰度拉伸结果,用基本全局阈值法和大津法进行了分割,其中基本全局阈值法计算的阈值为 0.6455,大津法计算的阈值为 0.6431,得到了相同的拉伸结果,如图 15 所示。效果较好,保留了目标右上角的齿轮,与标准图像的 MCC 为 0.8795。

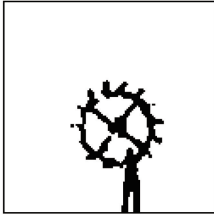


图 15 图 11(b)的基本全局阈值法和大津法分割结果
(分割结果 5)

Fig. 15 Segmentation results of Fig. 11(b) using basic global threshold method and Otsu method (segmentation 5)

对灰度拉伸后图像的处理结果分别如图 16 所示,结果相同,其中基本全局阈值法计算的阈值为 0.6753,大津法计算的阈值为 0.6745,它们比 7 阶多项式拟合求得的阈值 0.9191 小一些,目标右上角的齿轮被分割掉了,没有上组的分割结果理想,与标准图像的 MCC 为 0.8119。由于齿轮左上角目标上的噪声太严重,所有的分割结果齿轮左上角都出现了断裂。

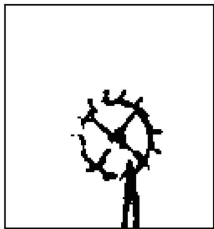


图 16 图 14(b)基本全局阈值法和大津法分割结果
(分割结果 6)

Fig. 16 Segmentation result of Fig. 14(b) using basic global threshold method and Otsu method (segmentation 6)

比较复合方法和传统的阈值分割方法的分割结果,可以看出对于齿轮图像的处理,复合方法中以 7 阶多项式拟合求得的第二个极小值作为阈值进行分割可以得到很好的分割结果,MCC 为 0.8899;滤波后用基本全局阈值分割法和大津法也可以得到效果相当的分割结果,MCC 为 0.8795。通过对垫片和齿轮的分割可以看出,背景噪声严重影响了基本全局阈值分割法和大津法的分割结果。

对齿轮各分割结果的客观评价汇总表 1,序号 1~6 代表分别评价分割结果 1~6。综合以上分析和表中数据可知,各结果的客观评价符合主观评价,分割结果 4 的 MCC 最大,分割结果 5、6 的 MCC 其次。复合方法相比传统阈值分割方法提高了 0.0104,这种提升在图像上体现为复合方法得到的结果在目标轮廓位置多了 39 个目标像素。

表 1 齿轮各分割结果的客观评价参数

Table 1 Objective evaluation parameters of each segmentation result of gear

Result number	1	2	3	4	5	6
MCC	0.7816	0.8048	0.8243	0.8899	0.8795	0.8119

4 结 论

为克服金属小目标有背景干扰的问题,采用了基于裁剪、镜像扩展、滤波、直方图多项式拟合的复合分割算法,并分步与基本全局阈值法和大津法进行了主观比较分析和客观评价。实验结果表明,复合方法能得到更优秀的分割结果,解决了背景噪声严重影响分割结果的问题,且客观评价与主观分析符合。对于垫片图像的分割,复合方法相比传统阈值分割方法的分割结果 MCC 提高了 0.7 左右,对于齿轮图像的分割,复合方法相比传统阈值分割方法的分割结果 MCC 提高了 0.0104。但是该复合方法是针对太赫兹同轴全息再现像的特点提出的,目前仅适用于这种图像。

参 考 文 献

- [1] Wang Z W, Li Q, Yuan J. Image quality evaluation and analysis of zero-order diffraction elimination method in terahertz off-axis digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111102.
汪译文, 李琦, 袁静. 太赫兹离轴数字全息消零级方法的像质评价及其分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111102.
- [2] Zhao F Z, Liang H Y, Wu X L, *et al.* Active contour segmentation model based on local and global Gaussian fitting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051006.
赵方珍, 梁海英, 巫湘林, 等. 基于局部和全局高斯拟合的主动轮廓分割模型 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051006.
- [3] Zhu Z L, Wang J F. Image segmentation based on adaptive fuzzy C-means and post processing correction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55

- (1): 011004.
朱占龙, 王军芬. 基于自适应模糊 C 均值与后处理的图像分割算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011004.
- [4] Nie F Y, Li J Q, Zhang P F, *et al.* A threshold selection method for image segmentation based on Tsallis relative entropy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071002.
聂方彦, 李建奇, 张平凤, 等. 一种基于 Tsallis 相对熵的图像分割阈值选取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071002.
- [5] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. *Digital image processing using MATLAB*[M]. Ruan Q Q, Transl.. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 305-307.
拉斐尔·冈萨雷斯, 理查德·伍兹, 史蒂文·埃丁斯. 数字图像处理: MATLAB 版[M]. 阮秋琦, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2006: 305-307.
- [6] Ridler T W, Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1978, 8(8): 630-632.
- [7] Magid A, Rotman S R, Weiss A M. Comments on picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1990, 20(5): 1238-1239.
- [8] Otsu N. A thresholding selection method from gray-level histogram [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [9] Jiao A S M, Tsang P W M, Poon T C, *et al.* Automatic decomposition of a complex hologram based on the virtual diffraction plane framework[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(7): 075401.
- [10] Jiao S, Tsang P W M, Poon T C, *et al.* Enhanced autofocusing in optical scanning holography based on hologram decomposition [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(5): 2455-2463.
- [11] Zhou M. Low SNR infrared weak target image segmentation algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2004, 34(3): 225-228.
周铭. 低信噪比红外小目标图像的分割方法[J]. 激光与红外, 2004, 34(3): 225-228.
- [12] Wang N, Peng Q Y, Deng B Q. Background segmentation in medical image[J]. *Chinese Journal of Medical Imaging Technology*, 2010, 26(8): 1573-1575.
王娜, 彭青玉, 邓保青. 医学图像背景分割[J]. 中国医学影像技术, 2010, 26(8): 1573-1575.
- [13] Yu C B, Kong Q D, Qian Z W, *et al.* A dynamic threshold segmentation method based on bidirectional polynomial fitting [J]. *Application of Electronic Technique*, 2016, 42(3): 110-112, 119.
余成波, 孔庆达, 钱泽文, 等. 基于双向多项式拟合的动态阈值分割算法[J]. 电子技术应用, 2016, 42(3): 110-112, 119.
- [14] Zhang X, Zhao Y M, Zhang C L. Passive terahertz image segmentation algorithm[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6): 1597-1600.
张馨, 赵源萌, 张存林. 被动式太赫兹图像分割算法[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1597-1600.
- [15] Stephani H, Heise B, Katletz S, *et al.* A feature set for enhanced automatic segmentation of hyperspectral terahertz images[C]//2011 Irish Machine Vision and Image Processing Conference, September 7-9, 2011, Dublin, Ireland. New York: IEEE, 2011: 117-122.
- [16] Buades A, Coll B, Morel J M. A review of image denoising algorithms, with a new one[J]. *Multiscale Modeling & Simulation*, 2005, 4(2): 490-530.