

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.10.007

一种新的微小型结构件显微图像边缘检测方法

姜黎, 张之敬, 吴伟仁, 金鑫

(北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对目前大多显微图像边缘识别算法的边缘精确识别精度低等问题, 提出一种基于工艺匹配思想的微小型结构件边缘识别算法。对不同工艺微小型结构件显微图像进行分析, 通过提取不同加工工艺微小型结构件的边缘过渡区, 建立边缘过渡区的数学模型, 从数学模型中确定边缘点精确位置。建立基于显微视觉检测的边缘图像分形评价模型, 分析同类工艺方法边缘图像的相似程度, 并以实例进行实验验证。实验结果表明: 该方法具有普遍适用性, 且边缘检测精度高, 能进一步满足精密测量的需要。

关键词: 微小型结构件; 工艺匹配; 分形理论; 边缘识别

中图分类号: TP206⁺.1 **文献标志码:** A

A New Micro Image Edge Detection Method for Micro Accessories

Jiang Li, Zhang Zhijing, Wu Weiren, Jin Xin

(School of Mechanical & Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at the low recognition accuracy rate of micro image edge detection, a new edge detection method of micro image accessory based on processing matching was proposed. Analyze different micro images of micro accessories, picked up an edge transition zone, establish the math model for edge transition zone, confirm the edge point position based on math model. Establish the edge image fractal evaluation model based on microscope measurement, and analyze the similarity of same micro-machining model and test it by example. The test result shows that the new edge detection can reach the high precision, which can meet the precision measurement requirement.

Key words: micro accessory; process matching; fractal theory; edge detection

0 引言

微小型结构件广泛应用于航空航天、微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)等各个领域, 如微小型引信、微小型钟表、微小型机器人和微飞行器等产品。这些产品的广泛应用对微机械量和几何量的检测提出了越来越高的要求^[1]。因此, 几何特征尺寸在0.01~10 mm范围内的微小型结构件的精密检测技术成为了国内外研究的热点。目前, 显微视觉测量辅助以精密机械移动的方法可以覆盖亚微米到10 mm的区间(几乎覆盖了整个微(型)机械量几何量测量区间), 并且满足微小型结构件的检测需要^[2]。边缘提取是这一检测手段的关键技术, 其性能对测量结果的精确性有直接的影响。

在图像处理领域中, 边缘定义为图像中灰度发生急剧变化的区域边界。它是图像的基本特征, 包含着图像绝大多数的有用信息。传统的基于梯度的边缘提取方法是通过考查每个像素邻域内灰度的变化(即边缘邻近的一阶或二阶导数变化规律)来检测边缘的。这一类方法中经典的边缘提取算法有Canny算子、Sobel算子和Roberts算子等^[3]。这些

经典算法适用于噪声少并且物体与背景对比度强的图像边缘检测。然而, 由于显微图像具有边缘轮廓复杂、噪声多和边缘细节比较模糊的特点, 如果使用这些经典的方法, 提取出的图像边缘将是不连续并且含有大量的伪边缘点。这将极大影响后续精密测量的结果。

到目前为止, 针对显微图像的边缘识别, 国内外学者提出了不少算法, 例如, 在医学影像分析和微生物细胞领域内的小波变换算子^[4-6]及数字形态法^[7]等。然而, 这些算法大多适用于粗略的模式识别与分析, 如果用于显微视觉检测, 而边缘精确识别精度较低^[8]。笔者提出了一种基于工艺匹配的显微图像边缘提取算法(micro processing technology matching based micro image edge detection, MPTM-MIED), 针对不同的加工工艺, 根据其加工出微小零件的显微图像的边缘统计特征, 识别选取的显微图像边缘过渡区域内的边缘, 并建立基于分形理论的评价模型。

1 不同工艺微小型结构件的显微图像分析

对于理想图像, 边缘数学模型以阶跃边缘和线

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51075035)

作者简介: 姜黎(1983—), 女, 北京人, 博士生, 从事显微视觉检测研究。

条边缘为主，如图 1(a)和(b)所示。然而，由于图像传感器件特性等诸多因素的影响，理想图像的阶跃边缘和线条边缘分别变为斜坡型边缘和屋顶形边缘，如图 1(c)和(d)所示。

图 2 所示为不同工艺的微小型结构件显微镜成像后所得到图像及边缘过渡区域光学特征：精密研磨和 LIGA 工艺的图像清晰，图像边缘特征区域较小，边缘区域的灰度变化曲线重合度较好，边缘光学特征近似斜坡型边缘；线切割以及冲压工艺图像模糊，边缘特征区域相对增大，边缘区域的灰度变化曲线重合度较差，与斜坡型边缘有较大差异。从图 2 中可以看出，上述 4 种不同工艺图像边缘光学特征不同，与经典算法中的斜坡模型有较大差别，

显微图像光学特征随微小型结构件加工工艺的不同而发生改变。

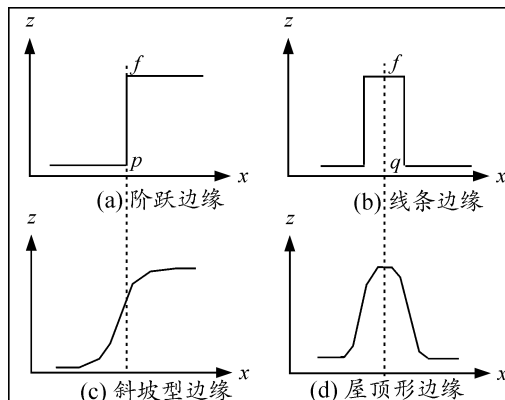
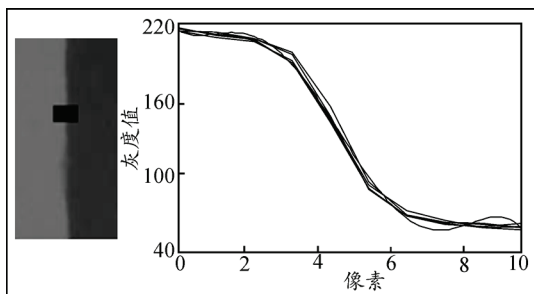
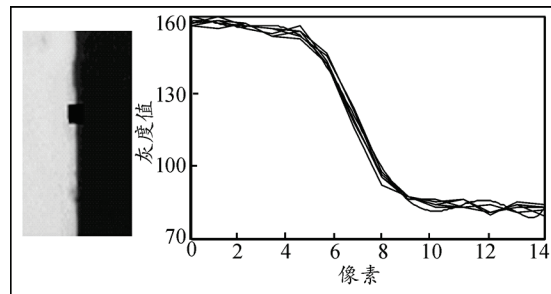


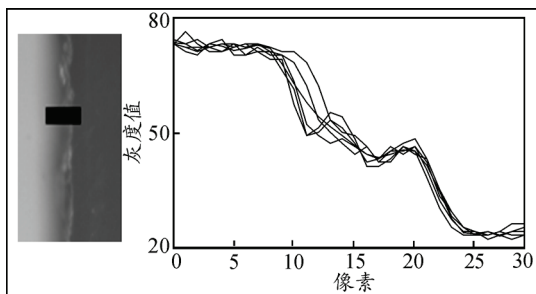
图 1 2 种常见边缘截面图



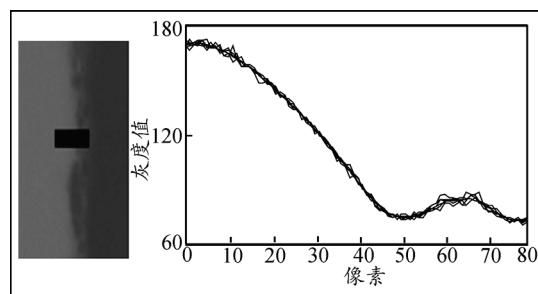
(a) 量块图像及其边缘灰度分布图



(b) LIGA 零件图像及其边缘灰度分布图



(c) 线切割零件图像及其边缘灰度分布图



(d) 冲压零件图像及其边缘灰度分布图

图 2 不同加工方法零件图像及边缘过渡区域光学特征

2 显微视觉检测的工艺匹配原则

上述分析说明：对同一检测系统，微小型结构件的图像光学特征与被加工工艺存在映射关系，而现有的边缘检测算法只针对图像进行边缘识别，没有考虑这种映射关系，若采用这种方法对微小型结构件进行检测，得到的图像边缘往往是伪边缘轮廓。

因此，微小型结构件视觉检测过程中零件边缘检测、边缘点准确提取、边缘毛刺以及微小型结构件的几何形状识别等问题，必须根据相关的工艺方法和所得到的边缘物理特征进行，不可能有不针对工艺方法的通用的标准和计算方法；边缘识别方法

应该在大量的同种工艺零件统计分析的基础上确定，即工艺匹配原则^[9]，基于这种原则的边缘检测算法即 MPTM-MIED。

3 基于工艺匹配原则的边缘检测算法

3.1 基于工艺匹配的边缘检测算法

如上所述，4 种不同工艺的微小型结构件的图像边缘过渡区域的宽度和形态各不相同。为了适应这种特点，采用参数个数可选择的多项式回归模型（其函数形式如式 (1) 所示）建立图像边缘过渡区域的数学模型。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \dots + \beta_p x^p + \varepsilon \quad (1)$$

其中: ε 是随机误差, 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$; 变量 x 为边缘过渡区域中像素点的 x 坐标值; y 为该点的灰度值。

笔者利用数理统计中的样本相关系数 r 作为拟合好坏的评价标准, 样本相关系数 r 具体描述如式 (2) 所示:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{L_{xy}}{\sqrt{L_{xx} L_{yy}}} \quad (2)$$

分别以精密研磨、LIGA、冲压和线切割 4 种加工方法加工出的微小型结构件为研究对象, 经过反复试验得出这 4 种工艺零件的最佳边缘过渡区宽度和阶数, 如表 1 所示。

表 1 4 种工艺零件的边缘过渡区域多项式拟合表

加工工艺	过渡区宽度/像素	阶数 n	相关系数 r
精密研磨工艺	10	5	0.997 5
LIGA 法工艺	14	7	0.997 8
冲压工艺	80	11	0.997 8
线切割工艺	30	19	0.997 4

边缘点定义为边缘拟合数学模型的灰度值变换最大点, 即对不同工艺的微小型结构件拟合的多项式分别求一阶导数, 取一阶导数绝对值最大的点作为边缘点的精确位置。

3.2 基于分形理论的评价准则

用分形理论进行图像分析的原理是利用图像的分形维数特征进行分析。对于灰度图像而言, 把二维图像视作一个三维空间中的一个表面 $(x, y, f(x, y))$, 其中 $f(x, y)$ 为图像 (x, y) 位置处的灰度值, 于是图像灰度的变化情况将反映在该表面的粗糙程度上, 使用不同尺度去度量该表面, 得到的维数就是图像的分形维数^[10]。目前已有许多估计其分形维数的方法, 例如频域方法、计盒维数法和基于数学形态学的方法等。其中, 计盒维数法应用最为广泛。

笔者采用差分盒计数法来计算微小型零件图像的分形维数, 其主要思想如下:

将 $M \times M$ 个像素图像分割成大小 $\delta \times \delta$ 的子块, xy 平面被分割为许多 $\delta \times \delta$ 的网格。在每个网格上是一列 $\delta \times \delta \times h$ 的长方体盒子, 设图像灰度在第 (i, j) 网格中的最大值和最小值分别落在从上往下数第 L 个和第 K 个盒子中, 则覆盖这一图像小区所

需的尺度为 r 的盒子数 $n_r(i, j)$ 为

$$n_r(i, j) = L - K + 1 \quad (3)$$

覆盖整个图像所需总的盒子数 N_r 为

$$N_r = \sum_{i,j} n_r(i, j) \quad (4)$$

图像的分形维数由式 (5) 给出

$$D = \frac{\ln(N_r)}{\ln(1/r)} \quad (5)$$

对于不同的尺度 r , 样本图像所包含的盒子数 N_r 是不同的, 用最小二乘法拟合出 D , 即为样本图像的盒维数。

从盒维数的数学公式上看, 数字图像分形维数描述了由离散像素点构成的数字图像中关心区域的分布特点, 它能够很好地把图像的空间信息和灰度信息有机结合起来。利用分形的这一特点建立模型, 通过对模型参数静研究, 可以了解图像的局部重要几何特征, 有效地分析和处理图像, 可得到图像灰度在空间上的变化和重复或图像中反复出现的局部模式和它们的排列规则。

笔者首先对 4 种不同加工工艺微小结构件图像进行分形维数分析, 如图 3, 统计出上述图像分形维数的分布规律和同一幅图像(不同区域)分形维数上的相互关系及相似性。选取微小型结构件的图像大小为 1392×1040 像素, 具体步骤为:

- 1) 提取边缘图像, 宽度范围为 64 像素(如图两白色边线范围);
- 2) 在这一范围内的不同区域获得 64×100 大小的 10 幅边缘图像;
- 3) 利用差分盒维数方法分别计算这 10 幅图像的分形维数, 图像块大小为 64×64 (即 $M \times M$ 的大小); 每幅边缘图像将获得 36 个分形维数值, 计算其均值和方差, 如表 2。

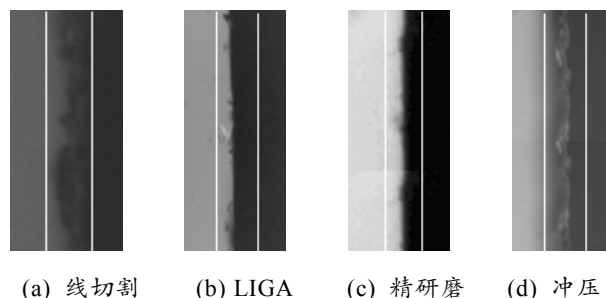


图 3 不同加工方法零件图像

表 2 零件图像分形维数计算

Image	FD(Variance)		Average
Wire-cutting	2.004 5(0.001 8)	2.002 9(0.001 8)	2.002 5
	2.002 7(0.001 8)	2.000 9(0.002 0)	
	2.001 3(0.001 7)	2.000 3(0.002 1)	
	2.001 6(0.001 8)	2.002 4(0.001 7)	
	2.004 1(0.002 1)	2.004 3(0.002 2)	
LIGA	2.019 5(0.003 3)	2.018 2(0.003 3)	2.020 3
	2.019 4(0.003 3)	2.018 1(0.003 4)	
	2.019 5(0.003 2)	2.019 5(0.003 4)	
	2.022 3(0.003 5)	2.021 9(0.003 1)	
	2.023 1(0.003 1)	2.021 8(0.003 0)	
Precision Grinding	2.039 2(0.005 0)	2.042 3(0.004 8)	2.039 8
	2.038 6(0.005 0)	2.042 2(0.004 8)	
	2.038 5(0.004 7)	2.042 3(0.004 8)	
	2.038 7(0.005 0)	2.038 7(0.004 9)	
	2.037 0(0.005 3)	2.040 9(0.005 3)	
Stamping	2.113 9(0.004 7)	2.116 4(0.004 4)	2.116 5
	2.116 3(0.004 5)	2.118 6(0.004 4)	
	2.117 9(0.004 4)	2.118 4(0.004 3)	
	2.116 7(0.004 4)	2.117 1(0.004 3)	
	2.114 6(0.004 5)	2.115 0(0.004 3)	

如图 4 所示，统计不同加工工艺的微型结构件边缘图像分形维数的规律。实验结果证明：在相同的条件下(光照、图像分辨率及图像大小等)，同种加工工艺的零件边缘图像具有相同或相似的空间信息特征，从而表现出某种内在的相似性，即同类边缘图像像元的特征向量将集群在同一特征空间区域，而不同的边缘图空间信息特征将不同，它们将集群在不同的特征空间区域。

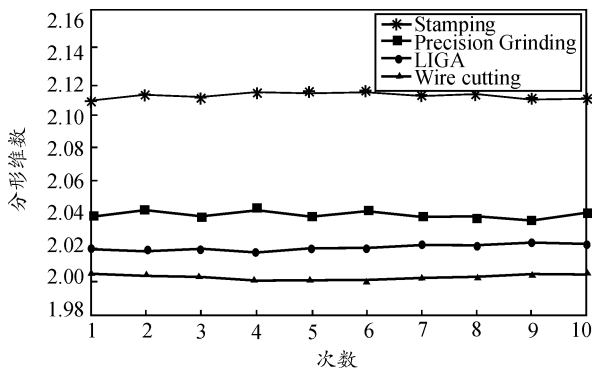
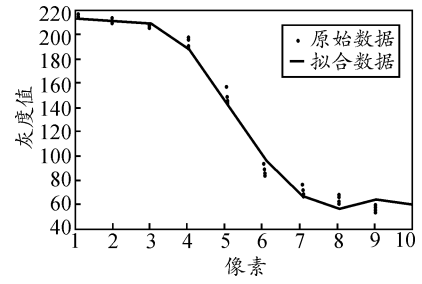


图 4 边缘图像分形维数值统计规律

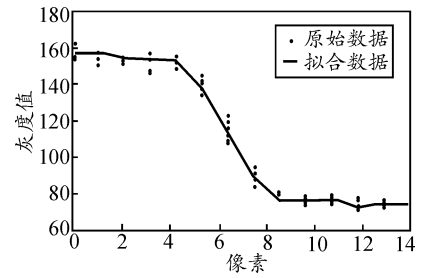
因此，笔者认为基于工艺匹配思想的微型结构件边缘识别算法是切实可行的，具有一定的理论价值和应用价值，并且对于同种加工工艺的零件边缘识别也是普遍适用的。

4 实验结果

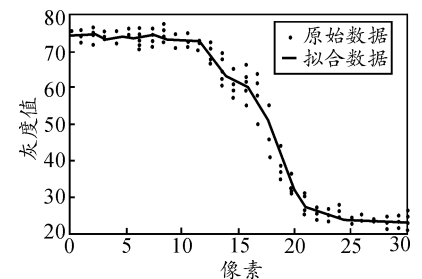
分别以精研磨、LIGA、冲压、线切割的微型零件加工工艺为研究对象，通过进行不同零件、不同光源强度以及不同部位的大量反复试验得出边缘的过渡区域模型，其边缘过渡区域多项式拟合结果如图 5 所示。



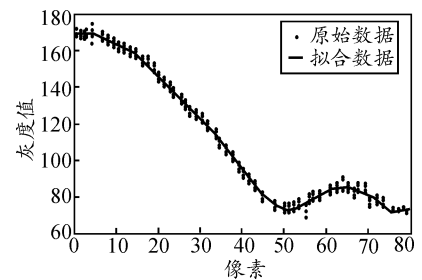
(a) 精研磨



(b) LIGA



(c) 冲压



(d) 线切割

图 5 多项式拟合曲线

对于精研工艺，通过文中方法得出的结果与标准量块量值比较，可验证文中边缘识别方法的正确性。实验采用零级精度 1 mm ($t_e = \pm 0.12 \mu\text{m}$) 量块，使用固定放大倍率的显微成像系统，经过校正 1 mm 对应 760 pix，即显微图像中量块理论宽度应为 760 pix。从图像中取一量块剖面，分别对左右边缘拟合求导确定边缘位置，得出该量块宽度为 1.000 395 mm (760.3 pix)，测量误差为 0.395 μm 。