

文章编号 1004-924X(2013)01-0224-09

微小型结构件显微图像边缘的自动识别

姜 黎^{1*}, 吴伟仁^{1,2}, 张之敬¹, 金 鑫¹, 节德刚²

(1. 北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081;

2. 探月与航天工程中心, 北京 100037)

摘要: 由于作者在前一段工作中提出的基于工艺匹配的显微图像边缘提取算法(MPTM-MIED)无法适应微小构件的实时自动检测, 本文利用 BP 神经网络技术重新设计实现了 MPTM-MIED, 并提出了一种新的自动提取显微图像边缘的方法(AMIED)。为了验证该方法的有效性, 利用 AMIED 对 4 种工艺实现的微小型结构件显微图像的边缘进行了提取, 并对线切割工艺零件的尺寸进行了测量。边缘提取的分析结果表明: AMIED 提取出的显微图像边缘与 MPTM-MIED 提取出的基本一致; 与常用的边缘检测算法相比, AMIED 提取出的显微图像的边缘线形连接程度较好。测量尺寸的分析结果表明: MPTM-MIED 和 AMIED 测量的尺寸基本相同, 比 Canny 法测量得到的结果更接近万能工具显微镜测得的尺寸。由于在测量过程中不再需要手工选取边缘过渡区域, 提出的方法极大地提高了检测速度, 可用于实时自动测量微小型零件的尺寸。

关键词: 微小型结构件; 显微图像; 自动边缘识别; BP 神经网络

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132101.0224

Automatic detection of micro image edges for micro accessories

JIANG Li^{1*}, WU Wei-ren^{1,2}, ZHANG Zhi-jing¹, JIN Xin¹, JIE De-gang²

(1. School of Mechanical and Vehicular Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100037, China)

* Corresponding author, E-mail: jiangli.0929@gmail.com

Abstract: As Micro Processing Technology Matching based Micro Image Edge Detection method (MPTM-MIED) developed by previous research can not automatically detect the micro image edges of micro accessories in real time, this paper designs the MPTM-MIED based on BP neural network again. Then, it proposes a novel Automated Micro Image Edge Detection method (AMIED) to extract edges of micro images automatically. To verify the feasibility of the proposed method, the edges of micro images from micro accessories fabricated by four different methods are extracted by AMIED and the sizes of micro accessories by line cutting are measured. Obtained results show that the detected edges by AMIED and MPTM-MIED are almost the same, and the AMIED has better edge-connectivity as compared with some common detection algorithms. Furthermore, the analysis results indicate that

收稿日期: 2012-09-25; 修订日期: 2012-10-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51075035); 国防基础科研基金资助项目(No. A0920110000)

the measured sizes by AMIED are almost equal to those measured by MPTM-MIED and they are more close to those measured by the universal tool measuring microscope as compared with that of the Canny algorithm. Because the method has no more need of selecting edge transition region, it improves the detection speed and can measure the sizes of micro accessories in real time.

Key words: micro accessory; micro image; automatic edge detection; BP Neural Networks(BPNN)

1 引言

微小型结构件广泛应用于航空航天、微机电系统(MEMS)等各个领域,如微小型引信、微小型钟表、微小型机器人、微飞行器,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,几何特征尺寸为0.01~10 mm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,对微机械量和几何量的检测手段包括:扫描电子显微镜、扫描探针显微镜、干涉显微镜、高精度轮廓仪、光电坐标测量机等。在这些检测手段中,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、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的并且含有大量的伪边缘点,这将影响后续精密测量的结果。另外,微小型结构件图像边缘会呈现出显微图像所特有的特征:即具有明显统计特征的小型结构件本体边缘和不具统计特征的小型零件边缘毛刺、凸起等微

观随机边缘两部分。在进行微小型结构件边缘检测时,应根据检测需要将两部分数据加以融合,最终得到微小型结构件的真实边缘^[4]。

到目前为止,国内外学者针对显微图像的边缘识别提出了不少算法,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^[5-8]及数字形态法^[9-11]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,则边缘精确识别精度较低^[12]。另外,基于微小型零件加工工艺对显微图像边缘特征影响的特点,本文作者在前一阶段的研究中提出了一个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)^[13-14]。该算法针对不同的加工工艺,根据其加工出的微小零件的显微图像的边缘统计特征,识别手工选取的显微图像边缘过渡区域内的边缘。这种算法由于在提取边缘之前需要手工选取边缘过渡区域,极大地影响了检测速度,也由此无法应用于在实时自动检测中。

神经网络技术具有良好的容错性、自组织性和自适应性,并且能够表示任何非线性函数关系,因此在图像处理领域得到了广泛的应用^[15]。针对作者前一阶段提出的MPTM-MIED的不足,本文利用神经网络技术对其进行了重现设计和实现,提出了一种新的自动识别显微图像边缘的方法(Automated Micro Image Edge Detection Method, AMIED)。AMIED能够根据微小型结构件的加工工艺,自动从结构件显微图像中识别出图像的边缘。由于不再需要手工选取图像边缘过渡区域,AMIED能够在图像边缘实时自动检测中进行应用。

本文首先对MPTM-MIED进行简单介绍;在此基础上,利用BP神经网络模型对MPTM-

MIED 进行重新设计与实现,建立了自动识别显微图像边缘的方法,即 AMIED;并以对比分析的方式对 AMIED 的有效性进行了验证;最后,对本文的研究成果做了总结。

2 MPTM-MIED 的简单介绍

由于不同工艺加工出的微小结构件的显微图像边缘特征不同,为了准确识别图像边缘,边缘识别算法应该针对不同加工工艺建立不同的显微图像边缘识别模型。

由文献[12-13]可知,精密研磨和光刻、电铸和注塑(Lithographie、Galvanoformung、Abformung, LIGA)工艺的微型结构件边缘图像清晰,图像边缘特征区域较窄,边缘区域的灰度变化曲线与斜坡型边缘曲线重合度较好。线切割以及冲压工艺边缘图像模糊,边缘特征区域相对较大,边缘区域的灰度变化曲线与斜坡型边缘有较大差异。以上分析结果表明:使用同一检测系统采集显微图像,微型结构件的显微图像光学特征与被加工工艺存在映射关系。

如上所述,4 种不同工艺的微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建立了图像边缘过渡区域的数学模型。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \cdots + \beta_p x^p + \epsilon, \quad (1)$$

式中: ϵ 为随机误差,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。

针对每一种工艺,以 Person 相关系数 ρ 最大为原则确定回归模型的最佳阶数和过渡区宽度。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}') (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}')^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{L_{y'y}}{\sqrt{L_{y'y'} L_{yy}}} \quad (2)$$

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宽度和回归模型阶数
Tab. 1 Transition edge widths and regression model orders for four micro processing technologies

	过渡区宽度 (像素)	阶数 n	相关系数 ρ
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

实验标准件采用 0 级精度 1 mm 量块,检测误差为 $0.395 \mu\text{m}$, 满足微小结构件精密检测需要。

3 AMIED 的建立

上一节详细论述了 MPTM-MIED 算法模型的建立和参数的确定,但这种算法在提取边缘之前需要手动选取边缘过渡区域,不能应用在实时自动检测中。因此,本文提出了一种基于 BP 神经网络的自动识别显微图像边缘的方法。本节首先对 BP 神经网络模型及其学习算法进行介绍;在此基础上,对 MPTM-MIED 使用 BP 网络进行重新设计并实现,其中包括网络输入、输出及隐层的设计和神经网络的训练方法。

3.1 BP 神经网络模型及学习算法

3.1.1 网络模型

BP 网络是多层前馈式误差反向传播神经网络,是最具代表性和广泛应用的一种神经网络^[16]。图 1 所示为单隐层网络(三层前馈网络)的模型结构。

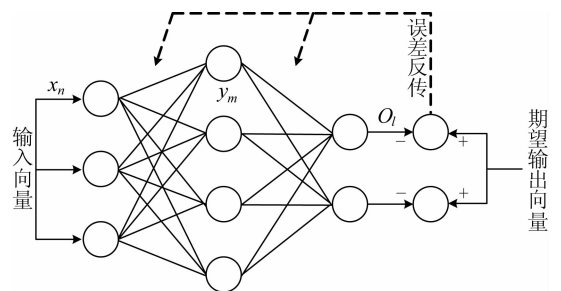


图 1 三层 BP 网络

Fig. 1 Three-layer BP neural network

变量说明:

输入向量: $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$;

隐层输出向量: $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)^T$;

输出层输出向量: $\mathbf{O} = (o_1, o_2, \dots, o_k, \dots, o_l)^T$;

期望输出向量: $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_l)^T$;

输入层到隐层之间的权值矩阵 \mathbf{V} :

$\mathbf{V} = (V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_m)$, 其中列向量 V_j

为与隐层第 j 个神经元对应的权向量;

隐层到输出层之间的权值矩阵 \mathbf{W} :

$\mathbf{W} = (W_1, W_2, \dots, W_k, \dots, W_l)$, 其中列向量

W_k 为与输出层第 k 个神经元对应的权向量。

对于输出层, 有

$$o_k = f(\text{net}_k) \quad k = 1, 2, \dots, l, \quad (3)$$

$$\text{net}_k = \sum_{j=0}^m w_{jk} y_j \quad k = 1, 2, \dots, l. \quad (4)$$

对于隐层, 有

$$y_j = f(\text{net}_j) \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$\text{net}_j = \sum_{i=0}^n v_{ij} x_i \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

BP 网络中的传输函数通常采用 S(Sigmoid) 型函数(双曲线正切函数):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (7)$$

式(3)~(7)共同构成了三层前馈网的数学模型。

3.1.2 学习算法

网络输出误差 E 定义如下:

$$E = \frac{1}{2}(\mathbf{d} - \mathbf{O})^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^l (d_k - o_k)^2. \quad (8)$$

通过调整权值, 可以使误差 E 不断减小。三层前馈网的学习算法的权值调整量计算公式为:

$$\begin{aligned} \Delta w_{jk} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} = \eta \delta_k^o y_j = \\ &\quad \eta (d_k - o_k) o_k (1 - o_k) y_j. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta v_{ij} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial v_{ij}} = \eta \delta_j^y x_i = \\ &\quad \eta \left(\sum_{k=1}^l \delta_k^o w_{jk} \right) y_j (1 - y_j) x_i. \end{aligned} \quad (10)$$

其中: 常数 $\eta \in (0, 1)$ 表示比例系数, 反映了训练速率, δ_k^o 和 δ_j^y 分别为输出层和隐层的误差信号:

$$\delta_k^o = (d_k - o_k)(1 - o_k) o_k, \quad (11)$$

$$\delta_j^y = \left(\sum_{k=1}^l \delta_k^o w_{jk} \right) (1 - y_j) y_j. \quad (12)$$

前面所推导出的算法是标准 BP 算法, 其计算流程如图 2 所示。

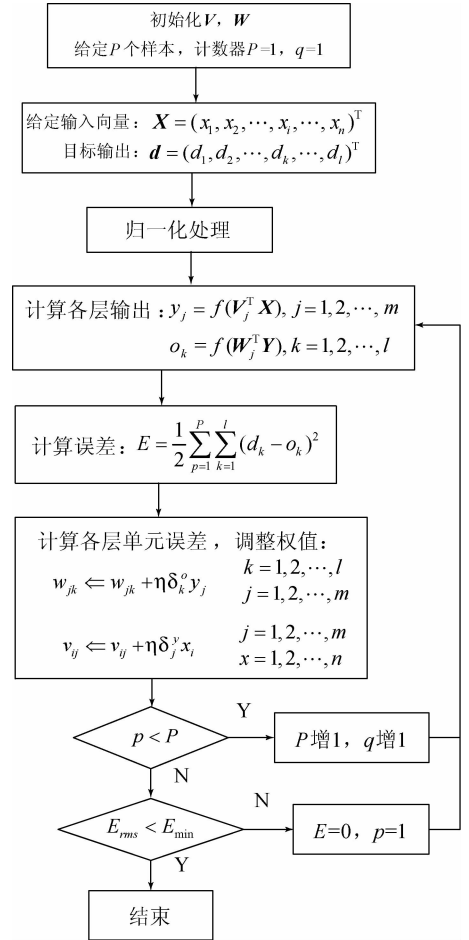


图 2 BP 算法流程

Fig. 2 Flowchart of BP algorithm

经过反复学习训练, 确定与最小误差相对应的网络参数(权值和阈值), 训练即告停止。此时经过训练的神经网络能对类似样本的输入信息自动处理并输出误差最小的经过非线性转换的信息。

3.2 AMIED 的设计与实现

根据 3.1 节所述的神经网络理论, 本节介绍第 2 节涉及的 MPTM-MIED 的实现。在训练设计的网络过程中, 以每种加工工艺的零件的显微图像为输入, 以 MPTM-MIED 检测得到的边缘为输出, 每种工艺取 500 个样本。AMIED 的设计与实现过程如下:

3.2.1 输入和输出层的设计

对于图像来说, 像素的数目(模板的大小)决

定了输入节点的数目。这里选用的是 7×7 的邻域模板,有 49 个分量,即输入层节点的数目是 49。用于边缘检测的神经网络,其输出结果用于判断当前点是否为边缘点,因此输出节点数为 1。

3.2.2 隐含层数的选择

对于多层神经网络,首先要确定隐含层的数量。当各节点均采用 S 型函数时,2 个隐含层足以表示输入图形的任意输出函数^[16]。因此,AMIED 含有 2 个隐含层。

3.2.3 隐含层内节点数的确定

对于隐层(中间层)节点数,一般认为隐层节点数与求解问题的需要、输入输出单元数都有直接关系。隐层节点数过多会导致训练时间过长;节点数过少,容错性差。目前中间层单元的数目取值没有一定的规则,要根据具体的问题和训练情况来决定。根据专家和学者的经验得知,隐层单元的数目 $n = \sqrt{N+M} + \alpha$ (其中 M 为输出单元个数; N 为输入单元数, α 为 1 到 10 之间的常数)。对于实现 AMIED 的网络, $M=1$ 、 $N=49$ 、 $\alpha=3$,因此,隐层节点数为 $n=10$ 。

3.2.4 神经网络训练方法

(1)数据归一化处理:在学习训练过程中,不能使节点输入值和期望输出值太大,否则权值调节过小将使网络不能很好地学习训练。由于特征向量维数较大,且图像灰度值都大于 1,为了加快训练过程,采用线性函数转化方法(如式 11)对输入向量和期望输出向量进行归一化处理。

$$x'[i] = \frac{x[i] - Min}{Max - Min}, \quad (11)$$

其中: $x[i]$ 、 $x'[i]$ 分别为转换前后的值, Max 、 Min 分别为样本的最大值和最小值。

(2)学习函数采用学习率可变的 BP 算法

自适应的调整学习率梯度下降算法在训练过程中力图使算法稳定,同时又使学习的补偿尽量增大。学习率则是根据局部误差曲面做出相应的调整。当误差减小时,说明修正方向正确,可增加步长;当误差超过设定值时,减小步长,同时舍去使误差增加的前一步的修正过程,即

$$\alpha(k+1) = \begin{cases} k_{inc}\alpha(k) & E(k+1) < E(k) \\ k_{dec}\alpha(k) & E(k+1) > E(k) \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $\alpha(k)$ 为第 k 步时的学习率, $E(k)$ 为第 k 步时的学习误差, k_{inc} 为增量因子, k_{dec} 减量因子。

(3)网络误差确定

网络误差表示为样本误差 E_i ($1 \leq i \leq p$, 其中 p 表示训练样本的数量)的均方根,即 $E = (E_i^2 / p)^{1/2}$ 。在训练过程中,如果 $E < E_{min}$ (其中, $E_{min} = 0.001$),则训练结束。

(4)神经网络训练过程

将训练样本分为两部分——背景部分与边缘部分,两部分滚动训练,直到两部分的训练结果都满足要求,则学习结束。使用不同工艺样本训练的神经网络的权值和阈值不同,应分别保存。用神经网络进行边缘检测时,应根据所要检测的微小结构件的加工工艺选择相应的神经网络的各个权值和阈值。

4 实验结果及分析

本节从两个方面对本文研究建立的 AMIED 的性能进行分析。第一、使用包括 Canny、Sobel、Roberts、MPTM-MIED 和 AMIED 在内的 5 种显微图像边缘识别方法对 4 种工艺加工出的微小结构件的显微图像边缘进行提取,在此基础上,进行对比分析。第二、使用包括万能工具显微镜、Canny、MPTM-MIED 和 AMIED 在内的 4 种方法对线切割零件图像进行测量,并对测量结果进行对比。

4.1 不同工艺微小结构件显微图像边缘提取

这 5 种方法分别提取的 4 种加工工艺零件边缘的结果如图 3~图 6 所示。在对比分析这些方法提取结果的时候,使用了边缘连接程度的定量分析方法。边缘连接程度使用基于连通成分的评价方法进行量化,即边缘连接程度用 8 连通成分数 C 与 4 连通成分数 B 的比值 C/B 表示^[17]。 C/B 的大小反映了边缘线形连接程度; C/B 值越小表示边缘线形连接度越好,边缘提取算法提取的边缘效果越好。图 3~图 6 中每一种边缘提取算法的 C/B 值见表 2 中所示。

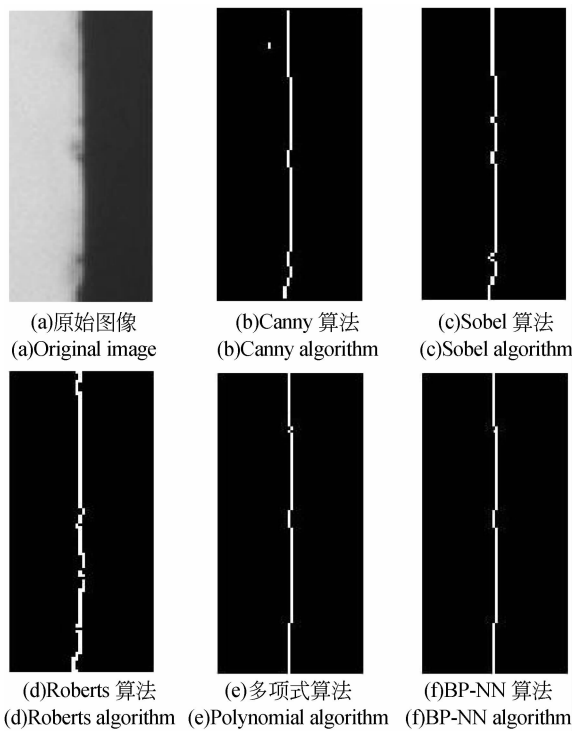


图 3 精研磨工艺零件边缘检测结果
Fig. 3 Edge measurements for a lapping microminiature

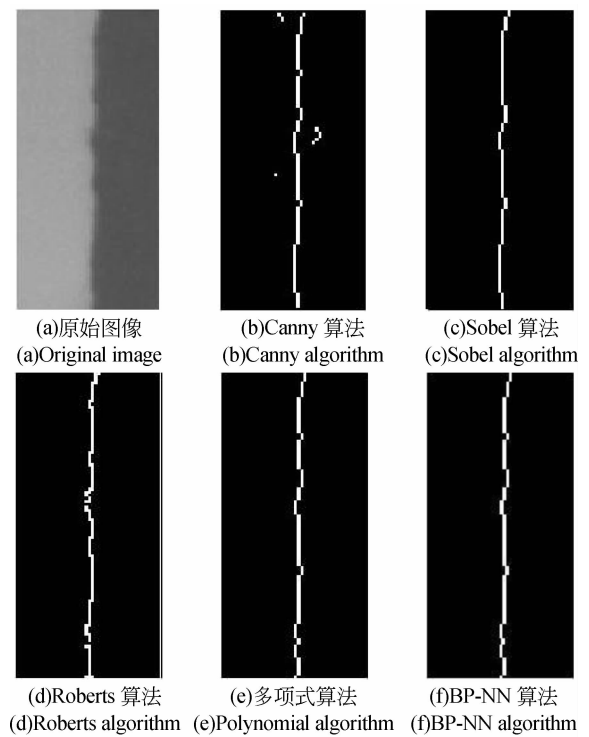


图 5 LIGA 工艺零件边缘检测结果
Fig. 5 Edge measurements for a LIGA microminiature

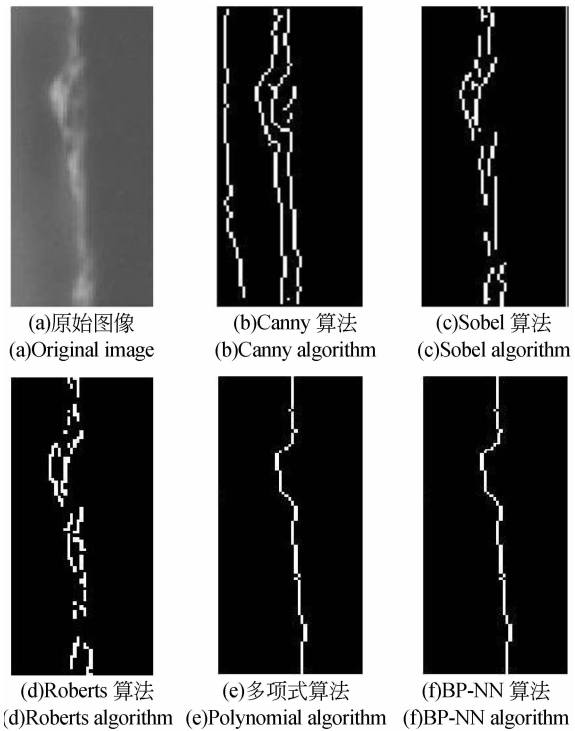


图 4 冲压工艺零件边缘检测结果
Fig. 4 Edge measurements for a stamping microminiature

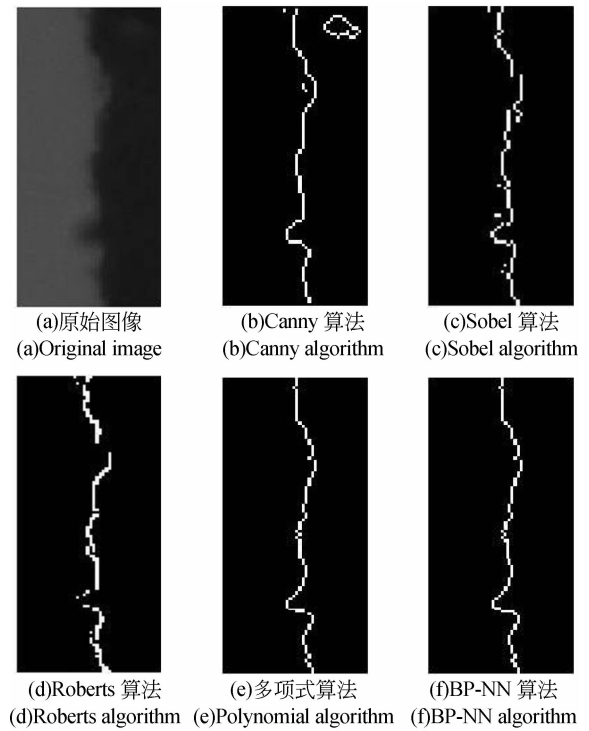


图 6 线切割工艺零件边缘检测结果
Fig. 6 Edge measurements for a wire-cutting microminiature

表 2 冲压工艺零件边缘图像 C/B 比值表

Tab. 2 C/B for a stamping microminiature

	Canny	Sobel	Roberts	MPTM-MIED	AMIED
精研磨	0.285 7	0.166 7	0.571 4	0.142 9	0.142 9
LIGA	0.200 0	0.090 9	0.750 0	0.062 5	0.062 5
冲压	0.225 4	0.279 1	0.750 0	0.125 0	0.173 9
线切割	0.100 0	0.200 0	0.705 9	0.085 1	0.088 9

从图 3~图 6 中可以看出,AMIED 检测的结果与 MPTM-MIED 的检测结果一致,边缘检测和定位准确。

从表 2 列出的 C/B 值可以看出:Robert 的 C/B 比值最大,表明其边缘连接程度较差,错检漏检情况较多;Sobel 和 Canny 的次之,针对加工精度较高的零件图像,边缘提取效果较好,但针对加工精度较低的零件图像,提取到的边缘连接程度较差,并含有大量伪边缘;MPTM-MIED 和 AMIED 的 C/B 基本一致且最小,表明它们的边缘线形连接程度最好,提取的显微图像边缘最佳。检测结果与图中边缘特性吻合,提取到的边缘单一且连续。

4.2 线切割工艺零件检测

使用万能工具显微镜、MPTM-MIED、AMIED 和 Canny 对图 7 所示的线切割零件进行测量,测量结果见表 3 所示。

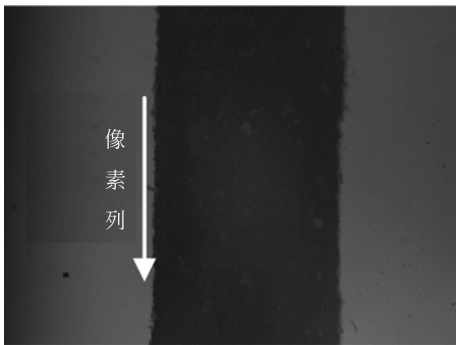


图 7 线切割零件图像

g. 7 Image of a wire-cutting microminiature

从表 3 可以看出:MPTM-MIED 和 AMIED 的测量结果基本相同,与 Canny 算子的相比,更接近万能工具显微镜测得的结果。

表 3 线切割零件测量结果

Tab. 3 Measurements for a wire-cutting microminiature

(mm)				
	万能工具 显微镜	MPTM-MIED	AMIED	Canny
1	0.738	0.738 7	0.738 2	0.739 4
2	0.736	0.736 1	0.736 8	0.736 8
3	0.739	0.738 2	0.738 2	0.742 1
4	0.736	0.736 8	0.736 8	0.734 2
5	0.737	0.737 1	0.736 8	0.735 5

5 结 论

在零件的制造加工中,每一种加工方法因加工质量要求、材料特性等因素不同,会出现不同的加工特性。本文针对作者在前一阶段的研究工作中对不同加工工艺得到的微小型结构件显微图像边缘提取提出的 MPTM-MIED 算法不能应用在实时自动检测中的问题,利用 BP 神经网络技术重新设计并实现了 MPTM-MIED,并提出了一种新的自动提取显微图像边缘的方法。针对不同工艺微小型结构件显微图像边缘提取的对比结果表明:AMIED 提取出的显微图像边缘与 MPTM-MIED 提取出的基本一致;与常用的边缘检测算法相比,AMIED 提取出的显微图像的边缘线形连接程度好。针对线切割工艺零件的测量结果表明:MPTM-MIED 和 AMIED 的测量结果基本相同,与 Canny 算子的相比,更接近万能工具显微镜测得的结果。在测量过程中,由于不再需要手工选取边缘过渡区域,AMIED 极大地提高了检测速度,并且可用于实时自动测量微小型零件的尺寸。

参考文献:

- [1] 张之敬,金鑫,周敏. 精密微小型制造理论、技术及其应用[J]. 机械工程学报,2007,43(1):49-61.
ZHANG Z J, JIN X, ZHOU M. Precise and micro-miniature manufacturing theory, technology and its appliance [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1):49-61. (in Chinese)
- [2] 王向军,王峰. 显微精密成像与微型机械尺寸检测技术[J]. 光学精密工程,2011,19(6):511-513.
WANG X J, WANG F. Study of micro mechanical size inspection technology by microscope precision digital image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):511-513. (in Chinese)
- [3] NIXON M S, AGUADO A S. *Feature Extraction and Image Processing* [M]. 2nd ed. United Kingdom: Academic Press, 2008.
- [4] 张之敬,程朋乐,金鑫,等. 具有统计特征的微小型零件边缘检测技术[J]. 北京理工大学学报,2007,27(3):231-234.
ZHANG Z J, CHENG P L, JIN X, et al.. Edge detection technique for micro accessory edges having statistical characters [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(3):231-234. (in Chinese)
- [5] XU G S. Approach of image edge detection based on wavelet scale multiplication [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 130-134:4282-4285.
- [6] 田永刚,董毅. 小波多尺度分割算法在细胞图像上的应用[J]. 计算机仿真,2011,28(11):255-301.
TIAN Y G, DONG Y. Application of image division algorithm based on wavelet transform in cellular image [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(11):255-301. (in Chinese)
- [7] 陈颖,蒋远大,孙志斌. 基于 Log-Gabor 滤波的小波显微图像融合[J]. 计算机工程与设计,2010,31(6):1316-1319.
CHEN Y, JIANG Y D, SUN Z B. Wavelet transform microscopy images fusion based on Log-Gabor filter [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(6):1316-1319. (in Chinese)
- [8] 陶雪容,孙兴波,汤秀华. 基于融合的显微图像 Gabor 边缘提取算法[J]. 计算机工程与设计,2010,31(4):798-804.
TAO X R, SUN X B, TANG X H. Gabor filtering algorithm for micrograph edge detection based on fusion method [J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(4):798-804. (in Chinese)
- [9] SU T C, YANG M D, WU T C. Morphological segmentation based on edge detection for sewer pipe defects on CCTV images [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10):13094-13114.
- [10] ZHANG X Q, YANG K, HAO B Q. Cell-edge detection method based on canny algorithm and mathematical morphology [C]. *The 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China: CISP*, 2010: 894-897.
- [11] ZHU S H. Edge detection based on mathematical morphology and image fusion [C]. *2011 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, Harbin, China: CSQRWC*, 2011: 1290-1293.
- [12] 杜芳. 基于显微视觉的小模数渐开线直齿轮检测方法研究[D]. 北京:北京理工大学,2009:37-38.
DU F. *Research on Detection Technology of Fine-pitch Involute Spur Gears Based on Micro-vision* [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009: 37-38. (in Chinese)
- [13] 张之敬,杜芳,金鑫,等. 微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J]. 光学精密工程,2009,17(2):355-361.
ZHANG Z J, DU F, JIN X, et al.. Complex edge recognition algorithm of micro-accessory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):355-361. (in Chinese)
- [14] 张林,张之敬,杜芳,等. 基于工艺匹配的微小型结构件边缘检测方法[J]. 北京理工大学学报,2009,29(12):1063-1066.
ZHANG L, ZHANG Z J, DU F, et al.. Processing matching principle for edge detection method of micro parts [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(12):1063-1066. (in Chinese)
- [15] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. *Image Processing, Analysis and Machine Vision* [M]. Toronto: Thomson Learning, 2008.
- [16] 胡伍生. 神经网络理论及其工程应用[M]. 北京:测绘出版社,2006.
HU W S. *The Theory of Neural Network and its Applications in Engineering* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006. (in Chinese)
- [17] KIRCHEN L, ROSENFELD A. Edge evaluation using local edge coherence [J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetics*, 1981, 11(9):597-605.

作者简介:



姜 黎(1983—),女,北京人,博士,2012年于北京理工大学获得博士学位,主要从事几何量测量,显微视觉检测等方面的研究。E-mail: jiangli.0929@gmail.com



金 鑫(1971—),女,黑龙江双城人,副教授,主要从事精密微小型制造和数字仿真方面的研究。E-mail: goldking@bit.edu.cn



吴伟仁(1953—),男,四川巴中人,2004年于华中科技大学获博士学位,主要从事航空宇航制造和航天测控技术方面的研究。E-mail: wuwr2002@vip.sina.com



节德刚(1978—),男,黑龙江人,工学博士,高级工程师,主要从事航天器总体/机械电子工程等方面研究。E-mail: joshjie@126.com



张之敬(1951—),男,陕西米脂人,1982年于北京理工大学获硕士学位,主要从事航空宇航制造和精密微小型制造方面的研究。E-mail: zhjz@bit.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)