

文章编号 1004-924X(2009)02-0356-06

微小尺寸零件复杂边缘识别算法

张之敬, 杜 芳, 金 鑫, 张 林

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要:提出了一种基于显微图像的微小尺寸零件复杂边缘识别算法。该算法通过对不同加工方法的边缘过渡区进行提取,建立边缘过渡区的多项式回归模型,然后从多项式模型中根据加工特性和零件的实际应用,利用求导的方法确定边缘点精确位置。实验结果表明:精研磨零级 1 mm 标准量块的测量误差为 $0.395 \mu\text{m}$ 。通过对精研磨、冲压、线切割 3 种常见微细加工方法建模分析得出:加工特性对微小型结构件边缘区域影响较大,边缘精确识别时应考虑加工特性的影响。该算法在思想上考虑了实际加工特性的影响,算法上加入了统计学方法,通过建立过渡区数学模型使边缘检测结果达到亚像素级;而且识别的单像素宽,其连续的边缘能进一步满足精密测量的需要。

关键词:微小尺寸零件;复杂边缘;边缘识别;边缘过渡区;多项式回归

中图分类号: TP394.1 **文献标识码:** A

Complex edge recognition algorithm of micro-accessory

ZHANG Zhi-jing, DU Fang, JIN Xin, ZHANG Lin

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to realize the edge recognition for micro-accessory, a new complex edge recognition algorithm for micro-accessory is proposed based on the process characteristics of micro-accessory. By extracting the edge transitional region of different micro-accessories, and the polynomial regression mathematical models of transitional region are established. Then, the accurate position is obtained by process characteristics from the mathematics model. The experimental results indicate that the measurement error of 1 mm standard gauge block is $0.395 \mu\text{m}$. After analysing the model for micro-fabrication, it comes to a conclusion that the process characteristics have greater influences on the edge of micro-accessory, so the edge recognition of micro-accessory should consider the influences of process characteristics. Proposed algorithm has considered the effects by processing characteristics and has induced a statistical scheme, so that the edge recognition result can reach to the sub-pixel level by establishing the mathematics model of transitional region. The algorithm also can offer a wide single-pixel and continuous edge, which can meet the precision measurement requirements.

Key words: micro-accessory; complex edge; edge recognition; edge transitional region; polynomial regression

收稿日期: 2008-03-03; 修订日期: 2008-03-03.

基金项目: 教育部高等学校博士学科点新教师专项科研基金资助项目 (No. 20070007044)

1 引言

随着微米和中间尺度零件加工技术的发展,微小尺寸零件的显微光学检测技术成为研究热点。但由于目前显微成像技术受到自身条件以及照明系统的限制,图像边缘大多不够清晰,边缘精确位置难以识别。目前显微图像复杂边缘还没有较好的识别方法,大多采用针对普通图像的数字图像处理技术,识别的显微图像边缘不连续且不单一,直接影响测量精度,因此,边缘精确识别技术一直是显微光学检测技术的研究重点^[1-3]。

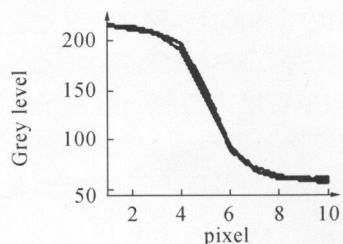
在零件的制造加工中,每一种加工方法因加工质量要求、材料特性等因素不同,会出现不同的加工特性,如激光打孔的孔周围会出现火山口现象;冲压的底面边缘会出现飞边现象。微小尺寸零件由于结构小,这种由加工造成的边缘特性就更为明显,现有技术很难较好地去除这些边缘现象。因此,在微小尺寸零件边缘显微视觉检测中应该考虑不同加工特性对边缘的影响。

基于上述考虑,本文采用放大倍率为 100 的工业显微镜和德国 Basler 公司的 A102k 型 CCD (分辨率 1 392 × 1 040) 分别对精研磨、冲压、线切割 3 种常用微细加工方法的零件进行显微图像采集和边缘分析,提出了一种针对微小尺寸零件复杂边缘的显微图像边缘精确识别算法。

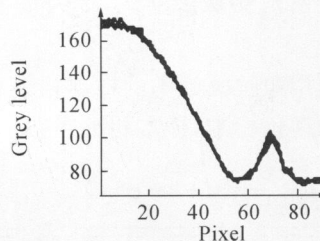
2 边缘过渡区域的提取和建模

2.1 边缘过渡区域提取

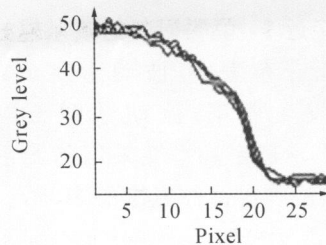
理论上,边缘(Edge)是指图像局部亮度变化最显著的部分^[4],只有在理想情况下才可把边缘看成是没有宽度的。而实际上,由于大多数传感元件具有低频特性,使得边缘部分的灰度变化不是瞬间的,而是跨越一定距离的^[5]。一般把这个特殊的区域称作过渡区,它是介于目标和背景之间的区域,既有边界的特点——把不同的区域分开,也有区域的特点——自身有宽度,面积不为零^[5]。过渡区在实际图像中可观察到,图像中各区域间的模糊处就属于过渡区,在显微图像中过渡区被放大,做出其剖面可明显看出边缘具有一定宽度,近似于斜坡型。本文主要对精研磨、冲压和线切割这 3 种方法进行了研究,其边缘过渡区



(a) 精研磨
(a) Lapping



(b) 冲压
(b) Stamping



(c) 线切割
(c) Wire-cutting

图 1 不同加工方法边缘过渡区的光学特征

Fig. 1 Optical characteristics of different process methods at edge transitional region

域的光学特征如图 1 所示:

从图 1 可以看出,不同加工方法的微小尺寸零件边缘形态有很大差异:精研磨加工的边缘过渡区宽度小、重合度好;冲压加工的边缘过渡区宽度大且有明显边缘特征;线切割加工的边缘重合度较差、拐点不明确。

目前常用的边缘过渡区提取算法主要有有效平均梯度法、高梯度像元法、基于度信息法和小波能量比参数法等。本文在对微小型结构件的显微图像边缘过渡区域提取时主要参照了有效平均梯度法^[5-6],即过渡区可借助图像有效平均梯度(EAG)的计算和对图像灰度的剪切操作来确定。

2.2 边缘过渡区域建模

由于图像噪声通常表现为孤立像素的离散性

变化,不具有空间相关性,建立边缘过渡区域回归模型之前可先进行相关性运算,去除部分随机噪声,再对去除随机噪声后的数据利用回归思想建立边缘过渡区回归模型。本文采用参数个数可选择、拟合效果较好的多项式回归模型,其函数形式为:

$$y = a_0 + a_1x + \dots + a_px^p + \epsilon, \quad (1)$$

其中 ϵ 是随机误差,服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$; 变量 y 与 x 的关系是 p 次多项式,称为 p 次多项式回归模型。

本文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 可表示为:

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

$|r|$ 越接近 1,说明回归的效果越好^[7]。统计学上的正态分布表明,波动达到 ± 2 ,涵盖了 95.44% 的发生概率;波动达到 ± 3 ,涵盖了 99.74% 的发生概率。本文采用相关系数 r 满足 3 准则的方法确定每种边缘的多项式拟合阶数,建立相应的数学模型。多项式拟合时可使用相关数学软件 (Origin 或 Matlab) 选择多项式拟合命令,直接输入拟合阶数即可得到拟合结果。值得注意的是,多项式拟合时参数个数 (多项式阶数) 可任意设置,但也不是参数越多拟合效果越好,参数越多所拟合的方程式振荡越大,反而可能会出现过拟现象。

本文分别以精研磨、冲压、线切割 3 种常用微型零件加工方法为研究对象,通过进行不同零件、不同光强以及不同部位的大量反复试验得出这 3 种边缘的过渡区域模型,由表 1 所示数据可知:精研磨的边缘过渡区较窄,拟合阶数较低;冲压过渡区较宽;线切割拟合阶数最高。但过渡区宽度与镜头的对焦有关,所以要在相同镜头焦距条件下采集图像并完成建模。

表 1 3 种边缘过渡区的多项式拟合表

Tab. 1 Polynomial fitting of edge transitional region

	过渡区宽度 (pixels)	阶数	相关系数
精研磨	10	5	0.997 5
冲压	90	11	0.997 8
线切割	30	15	0.997 5

3 复杂边缘识别算法

下面分别对精研磨、冲压、线切割 3 种微型零件边缘进行识别。

3.1 精研磨边缘

本文对哈尔滨量具刃具集团有限责任公司生产的精研磨零级 1 mm 标准量块进行了边缘识别,其显微图像、多项式拟合模型 (图 2(a) 中灰色标注区域) 和一、二阶导数曲线如图 2(c) 所示:

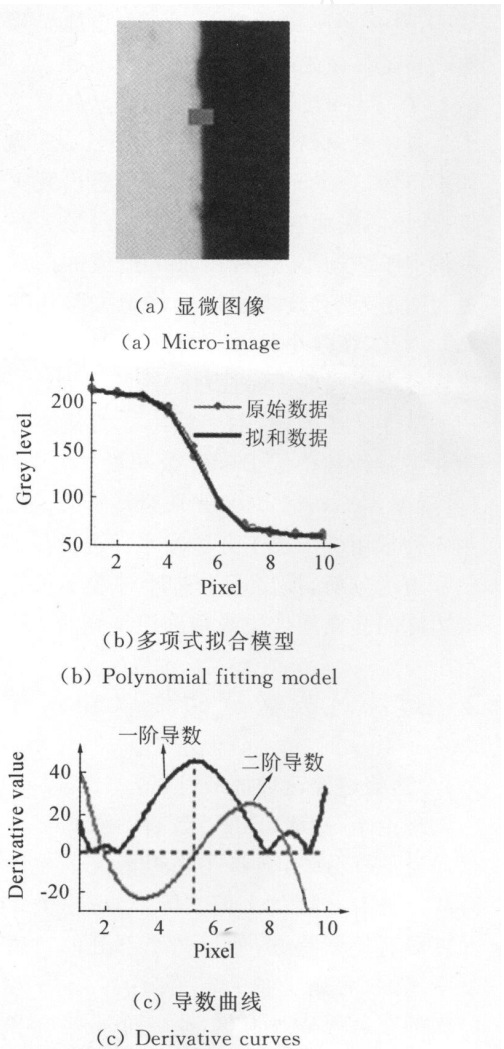
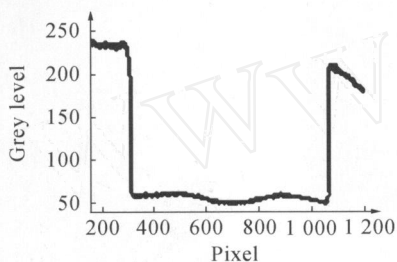


图 2 精研磨边缘特性

Fig. 2 Lapping edge characteristics

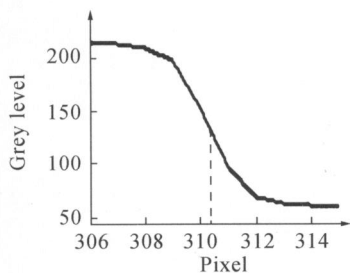
对图 2(b) 中拟合的多项式分别求一阶和二阶导数,一阶导数绝对值最大且二阶导数为零的点即为边缘精确位置,计算得出该边缘点位置为 5.2,如图 2(c) 所示。

本例使用了零级 1 mm 标准量块,将测量结果与量块标准值进行对比,可对本文的边缘识别方法进行验证。使用固定放大倍率的显微成像系统,经过校正 1 mm 对应 760 pixels,即显微图像中量块宽度为 760 pixels。从图像中取一量块剖面,其灰度值如图 3(a)所示,放大左右两侧边缘过渡区如图 3(b)(c)所示,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 760.3 pixels,即 1.000 395 mm,测量误差为 0.395 μm 。该实验表明,本文提出的通过对边缘过渡区拟合多项式模型及求导数确定精确边缘的边缘识别算法结果准确、精度高。



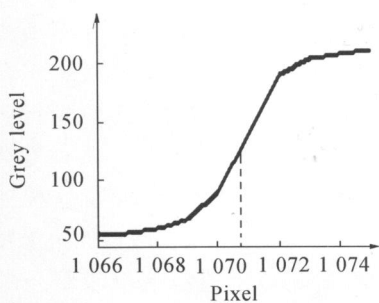
(a) 剖面灰度

(a) Grey level of section



(b) 左侧过渡区

(b) Left transitional region



(c) 右侧过渡区

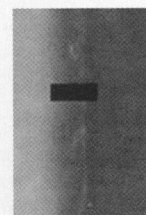
(c) Right transitional region

图 3 1 mm 量块

Fig. 3 1 mm gauge block

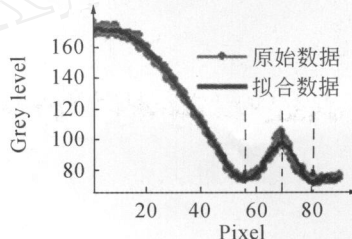
3.2 冲压边缘

冲压边缘由于加工特性的影响,在微小尺寸零件底面边缘处有明显飞边,其显微图像、多项式拟合模型(图 4(a)中黑色标注区域)和一、二阶导数曲线如图 4(c)所示:



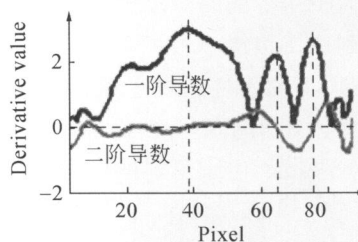
(a) 显微图像

(a) Micro-image



(b) 多项式拟合模型

(b) Polynomial fitting model



(c) 导数曲线

(c) Derivative curves

图 4 冲压边缘特性

Fig. 4 Stamping edge characteristics

冲压加工零件的底面边缘有一个压边,采用常用的边缘检测算子检测出的边缘不单一且不易识别,如图 5(a)、(b)所示。分析冲压边缘过渡区拟合的多项式(如图 4(b))可分为 3 段斜坡区域,使用本文边缘识别方法分别计算出 3 个边缘位置,分别记作内、中和外边缘,如图 5(c)、(d)、(e)所示,测量时可根据该工件的实际应用选择不同边缘。

从上述结果可看出,针对冲压这种有明显边缘加工特性的复杂边缘,本文的边缘识别方法比

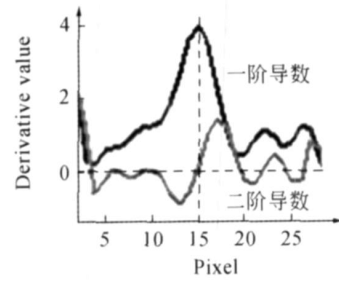
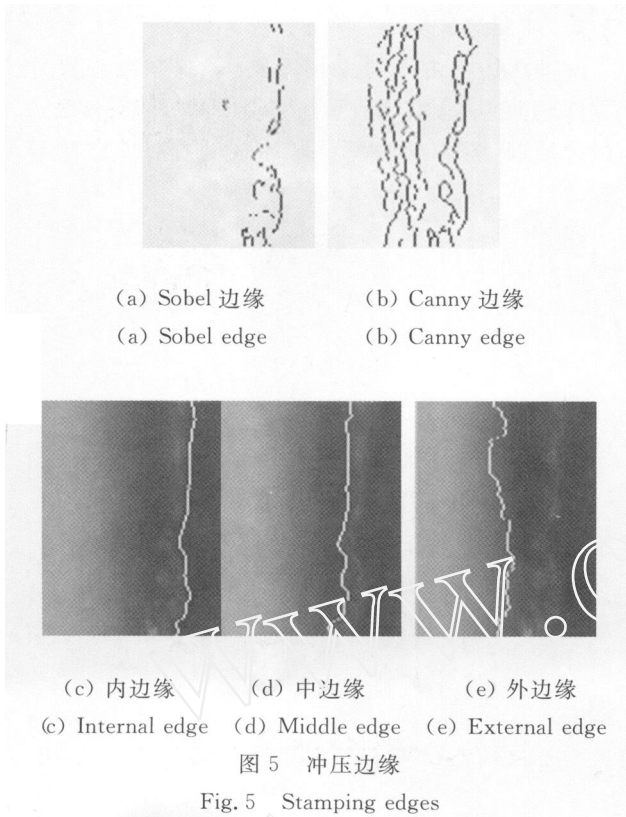


图 6 线切割边缘特性

Fig. 6 Wire-cutting edge characteristics

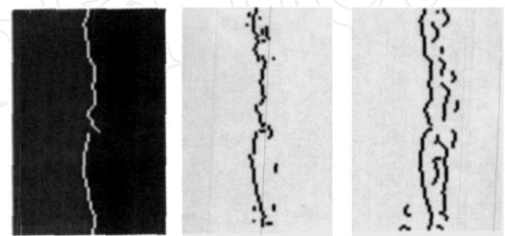


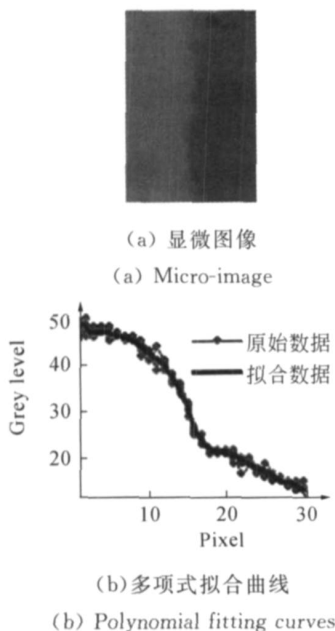
图 7 线切割边缘

Fig. 7 Wire-cutting edges

传统梯度算子好很多,而且识别出的边缘具有加工特性,可为下一步的测量提供准确信息。

3.3 线切割加工边缘

线切割加工的零件边缘过渡区重合性差、规律性少,但总体还属于单一的斜坡型边缘。其边缘特性如图 6 所示,边缘识别结果如图 7 所示。



4 结 论

本文将边缘过渡区域概念和数理统计方法引入微小尺寸零件精密测量中,解决了显微图像复杂边缘的识别困难。该算法思想上考虑了加工特性对微小尺寸零件边缘的影响,使识别的边缘位置更接近实际微小型零件真实边缘;算法上加入统计学方法,通过对过渡区建立多项式回归模型,使边缘检测结果达到亚像素级。实验结果表明:对精研磨零级 1 mm 标准量块进行测量,测量误差为 0.395 μm,满足微小尺寸零件复杂边缘识别和检测要求。通过实例,说明了这种针对加工特性的边缘识别算法在微小型零件边缘精确识别中的重要性,尤其对于边缘区域较复杂的微细加工方法,该算法识别单像素、连续的边缘比传统算法更精确。

本文提出的微小型零件复杂边缘识别算法还处于研究和试验阶段,其中所有数据均在大量反复试验中得出。通过进一步研究获得更为完整的试验数据,建立一套较完整的基于加工特性的微

小尺寸零件边缘识别算法并应用于微小尺寸零件

检测是今后的工作重点。

参考文献:

- [1] 伍济钢,宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1):124-130.
WU J G, BIN H Z. Dimensional inspecting system of thin sheet parts based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1):124-130. (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, 2001, 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.*, 2001, 19(6):511-513. (in Chinese)
- [3] 贺秋伟,王龙山,刘庆民,等. 基于支持向量机回归的小尺寸零件精密测量[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(4):558-563.
HE Q W, WANG L SH, LIU Q M, *et al.*. Precision measurement for small size parts based on support vector regression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):558-563. (in Chinese)

- [4] 何斌,马天予,王运坚,等. 数字图像处理[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.
HE B, MA T Y, WANG Y J, *et al.*. *Digital image processing*[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 章毓晋. 过渡区和图象分割[J]. 电子学报, 1996, 24(1):12-17.
ZHANG Y J. Transition region and image segmentation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1996, 24(1):12-17. (in Chinese)
- [6] 李清顺. 基于过渡区的图象分割[D]. 武汉:武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,2005.
LI Q SH. *Image Segmentation Based Transition Region* [D]. Wuhan: State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [7] 刘则毅. 科学计算技术与 Matlab[M]. 北京:科学出版社,2001.
LIU Z Y. *Science Computing Technique and Matlab*[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

作者简介:



张之敬(1951 -),男,陕西米脂人,教授,博士生导师,主要从事航空宇航制造和精密微小型零件制造等方面的研究。E-mail:zhzhj@bit.edu.cn



金鑫(1971 -),女,黑龙江双城人,工学博士,讲师,主要从事微制造数字仿真方面的研究。E-mail:goldking@bit.edu.cn



杜芳(1978 -),女,河北石家庄人,博士研究生,主要从事微小型零件光学检测等方面的研究。E-mail:dufang_email@yahoo.com.cn



张林(1982 -),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事快速检测方面的研究。E-mail:silver_fox@bit.edu.cn