

精密零件边缘检测^{*}

郝建军, 吕 威, 余永维

(重庆理工大学 汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 重庆 400050)

摘要:针对边缘检测中检测精度与抗噪性能之间的矛盾,在分析边缘检测方法的基础上,提出了采用优化 Gabor 滤波算法降低图像噪声和采用多尺度小波检测理论提取图像边缘相结合的方法,实现了零件的在线高效精确检测。试验结果表明,该方法不仅可有效抑制噪声,而且能得到高精度的零件边缘形状。

关键词:零件检测;机器视觉;边缘检测;Gabor 滤波;多尺度方法

中图分类号: TG87

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2010)06-0064-03

机器视觉系统作为现代制造业自动化的重要组成部分,可确保零件在线检测的准确性与高效性^[1]。机器视觉系统中最为关键的一步就是开发边缘检测算法。其算法的检测精度和抗噪能力决定了视觉系统的优劣,同时算法计算的复杂程度和应用方便与否也决定了视觉系统的可行性及成本^[2]。由于检测精度与抗噪能力之间互为矛盾,相互间存在制约关系^[3]。因此,本文中在分析边缘检测方法的基础上,提出了一种改进 Gabor 滤波算法与多尺度小波检测理论相结合的算法来提取图像边缘,研究其在精密零件尺寸检测系统的应用。

1 传统边缘检测算子分析

图像的边缘定义为2个强度明显不同的区域的过渡,边缘点对应于二阶微分幅度大的点,也对应于二阶微分的零交叉点^[4]。因此,利用梯度模极大值或二阶导数过零点提取边缘就成为较常用的方法。传统的边缘检测方法大都依据这种特性,一般的做法是求得图像的梯度模后,选取合适的阈值便可得到图像的边缘。运用卷积运算实现相应算法是最为主要的手段^[5],目前常用的边缘检测算子为以下几种。

1.1 Sobel 算子

Sobel 算子是1组方向算子,从不同的方向检测边缘。他是在图像空间利用2个方向模板与图像进行邻域卷积来完成的。这2个方向模板1个检测垂直边缘,1个检测水平边缘,算子如下:

$$s_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad s_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sobel 算子利用相邻像素点的灰度加权算法,根据在边缘点处达到极值这一现象进行边缘检测。其算法在空间上易于实现,对噪声具有平滑作用^[5]。但是,该算法在抗噪声好的同时也存在检测出伪边缘、定位精度不高的缺点。

1.2 Canny 算法

在 Canny 算法中,使用了高斯滤波器和他的一阶差分,主要对水平方向与垂直方向进行处理,然后利用线性插值的方法来求得边缘的角度和梯度,并使用双阈值算法检测和连接边缘,对所得像素梯度进行“非极大限制”,这样获得的图像边界较细,定位精度较高^[6]。其缺点是很容易产生双边缘,并且对噪声敏感。

1.3 Robert 算子

Robert 算子是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子,其特点是简单直观,但经其图像处理后的结果边缘不是很平滑。经分析,由于 Robert 算子通常会在图像边缘附近的区域内产生较宽的响应,故采用 Robert 算子检测的边缘图像常常需做细化处理,边缘定位的精度不是很高。

其他方法还有如 Prewitt 和 Laplace 算子等。总的来说,这些方法都采用不同的算子提取灰度差值。当在图像中有阴影和噪声等因素的影响时,将导致太多的边缘像素,使这些传统的算子出现边缘定位不准和漏检的缺点,也使视觉系统难于辨别目标的边界及重要边缘。可以肯定,用单一尺度的边缘检测算子不可能检测出图像所有的边缘。因此,为避免在滤除噪声时影响边缘检测的正确性,可用多尺度的方法检测边缘^[7]。

* 收稿日期:2010-03-16

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目资助(KJ070610)

作者简介:郝建军(1963—),男,博士,主要从事测控技术、机电传动等研究。

2 基于 Gabor 小波的边缘检测

小波变换由于具有良好的时频局部特性及多尺度分析能力,已成为检测突变信号强有力的工具。用他来检测边缘,通常采用 2 个(或多个)尺度的小波对图像进行变换,得到图像不同尺度的边缘细节,然后像一般的多尺度边缘检测那样,用大尺度滤波可靠地进行边缘检测,用小尺度滤波进行边缘的精确定位。该检测方法的出现,为图像边缘提取提供了新的思路和新的技术途径。

2.1 Gabor 小波检测理论

Gabor 小波变换近年在信息处理方面得到广泛应用。研究发现,Gabor 小波可提取图像在特定区域内的多尺度、多方向频率特征。Gabor 小波函数定义为^[8]

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} (e^{i\omega x} - e^{-i\omega^2\sigma^2/2}) = e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \sin[\omega(x\cos\theta + y\sin\theta)] \quad (1)$$

式中: ω 为二维中心频率矢量; θ 为方向角; σ 为 Gabor 小波变换标准方差。可以看到,Gabor 小波实质上是由 1 个复指数信号调制二维高斯函数得到的。

设 CCD 获得的图像函数为 $I(x, y)$,则在图像上某像素点 (x_0, y_0) 的 Gabor 小波变换为图像函数与式(1)的卷积

$$F(\omega, \sigma, \theta) = I(x, y) \cdot G(x, y) \Big|_{x=x_0, y=y_0} = \iint I(x, y) G(x - x_0 \Delta x, y - y_0 \Delta y) dx dy \quad (2)$$

式中: Δx 和 Δy 为采样间隔。

由于 Gabor 小波集具有非正交特性,故图像过滤后会有一定的冗余信息。同时在滤波器参数的设计中,若尺度与方向选择过多,会增加计算量和冗余信息;太少又会丢失部分有用的边缘信息。

2.2 零件边缘检测方法

在项目研究中,可将零件边缘检测过程分为如图 1 所示的几个步骤。图中,对输入的精密零件灰度图像进行低通滤波或其他预处理,可以降低噪声的影响。由于 Gabor 小波具有明显的尺度和方向选择性,在空间和频域内有较好的局部性,故采用 Gabor 小波算子对图像进行滤波及边缘提取,确定出较为准确的、符合实际的图像边界信息。在输入图像中,边缘特征是图像灰度值发生突变的反映,所以在边缘区域主要是高频分量,因而只要 Gabor 滤波器在边缘特征处的响应为局部最大值,就可获得零件的边缘形状^[9-10]。

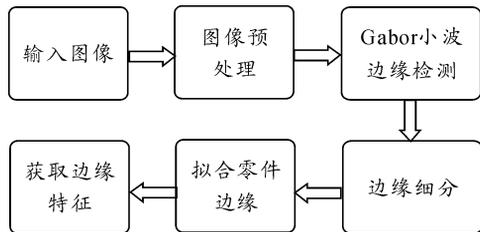


图 1 零件边缘检测流程

在以上步骤中,边缘检测与分割是提取数字图像几何特征处理的第 1 步,也是最为重要的 1 步。因此,在本文中只论述基于 Gabor 小波边缘特征提取算法。

2.3 边缘提取算法

本文中提出的新算法,其理论依据是前面论述的 Gabor 小波理论。通过实验经验,并根据应用要求,可获得优化 Gabor 小波算法。在零件边缘检测中实现步骤如下。

1) 确定 Gabor 小波滤波器的中心频率 ω 与方向 θ ,组成 $\omega \times \theta$ 个滤波器;并在不同的频率与方向下,确定各滤波器的标准方差 σ 。根据实验要求,在精密零件的边缘检测中,利于图像的局部性,以 Gabor 小波为母小波,经适当膨胀(尺度)和旋转变换,可取 5 个不同的中心频率 $\omega \in \{1, 2, \dots, 5\}$ 和 8 个不同的方向 $\theta \in \{0, \frac{\pi}{8}, \frac{2\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}, \frac{4\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}, \frac{6\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}\}$,得到组合后的 40 个 Gabor 小波滤波器。而 σ 的取值则由不同频率下各滤波器的带宽决定

$$\sigma = \frac{1.177(2^\varphi + 1)}{(2^\varphi - 1)\omega} \quad (3)$$

式中: φ 表示不同频率下,Gabor 小波滤波器的带宽。

2) 在各频率下,进行不同方向的 Gabor 小波变换与图像函数的卷积变换,得到其响应函数 $F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)$,及其变化率 $\Delta F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)$ 。对响应函数求平滑导数为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial x} &= F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x + \frac{\omega_i \sigma_i}{2}, y) - \\ &F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x - \frac{\omega_i \sigma_i}{2}, y) \\ \frac{\partial F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial y} &= F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y + \frac{\omega_i \sigma_i}{2}) - \\ &F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y - \frac{\omega_i \sigma_i}{2}) \end{aligned} \quad (4)$$

在 x, y 轴的变化率为:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta F_x(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial x} &= \min \left\{ \Delta F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x - \frac{3\omega_i \sigma_i}{2}, y) - \right. \\ &F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x + \frac{3\omega_i \sigma_i}{2}, y) \left. \right\} \\ \frac{\Delta F_y(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial y} &= \min \left\{ \Delta F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y - \frac{3\omega_i \sigma_i}{2}) - \right. \\ &F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y + \frac{3\omega_i \sigma_i}{2}) \left. \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

消除式中的非复数项,对 x, y 轴的导数重新整理得:

$$\begin{aligned} F_x(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y) &= M \left(\left| \frac{\partial \Delta F}{\partial x \partial x} \right| < \varepsilon \right) \frac{\frac{\partial F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial x}}{\Delta F_x(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)} \\ F_y(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y) &= M \left(\left| \frac{\partial \Delta F}{\partial y \partial y} \right| < \varepsilon \right) \frac{\frac{\partial F(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}{\partial y}}{\Delta F_y(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: M 为标识函数,表示局部复数特征。

3) 由于具有不同尺度的边缘特征可能出现在不同的

位置,特征一样的边缘也可能位于不同的区域,因此,为从这些具有相同边缘特征的图像中获取相应的辨别依据,在对边缘进行拟合前可将边缘特征图像膨胀化(梯度幅值)。其原理为

$$H(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y) = \frac{1}{\sqrt{F_x^2(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y) + F_y^2(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)}} * D\sigma \quad (7)$$

4) 由式(7)可知,不同方向的多尺度梯度函数为

$$H_{\theta_i}(\omega_i, \sigma_i, x, y) = \sqrt{\sum_k^n H^2(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)} \quad (8)$$

从而可获得8个方向的梯度函数,得到 $5 \times 8 = 40$ 个梯度函数,所以多尺度平均梯度函数为

$$H(x, y) = \sqrt{\prod_n^m H_{\theta_i}(\omega_i, \sigma_i, \theta_k, x, y)} \quad (9)$$

从而可得边缘细分函数为

$$E(x, y) = \frac{H(x, y) * H''(x, y)}{\nabla H(x, y) + \varepsilon} \quad (10)$$

3 实验结果分析

精密零件边缘检测的基本方法是通过 CCD 成像后,由数据采集卡将图像输入到计算机存储设备中。图像在生成和传输的过程中可能会受到各种噪声的干扰和影响,使图像质量下降。因此不能直接对图像进行边缘检测,而须对图像进行去噪和灰度增强等预处理。图2所示为精密零件边缘的检测与处理过程,其中(b)和(c)为图像的预处理,(d)为采用优化 Gabor 小波算法对(c)图像进行边缘检测及细分后的图像。从图2中(d)看出,合理选择优化 Gabor 小波算法的方向与尺度后,可获得较易辨别及有用的边缘像素,且定位精度高。相比其他边缘提取算法而言,优化 Gabor 小波算法适用于噪声较多,边缘较复杂的精密零件的检测。

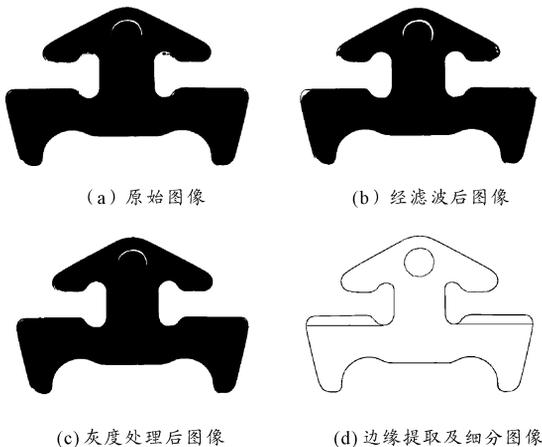


图2 精密零件的检测与处理

4 结束语

本文中提出了一种优化的 Gabor 小波算法,以实现精密零件的边缘特征检测。通过合理选择方向与尺度,获得了精确的边缘特征。为了检测零件是否合格,后期可对零件进行轮廓矢量化,获得其各边缘点的坐标值,并与设计图纸相比较。通过优化 Gabor 小波算法对精密零件的边缘检测,能使零件的检测精度得到大幅度提高,适应自动生产线的智能化要求。

参考文献:

- [1] 朱正德. 谈“机器视觉”在汽车制造业中的应用[J]. 中国测试技术, 2006, 32(5): 22-25.
- [2] 伍济钢, 宾鸿赞. 薄片零件机器视觉图像亚像素边缘检测[J]. 中国机械工程, 2009, 20(3): 297-300.
- [3] 徐宁. 一种基于机器视觉的余药在线检测方法[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 84-86.
- [4] 吴炯, 张秀彬, 张峰, 等. 数字图像边缘算法的实验研究[J]. 微计算机信息, 2004, 20(5): 106-107.
- [5] 严华, 殷国富, 宁芊. 一种机械零件图像边缘特征的提取方法[J]. 四川大学学报, 2008, 40(5): 181-184.
- [6] Canny John. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [7] MALLAT S G, ZHANG S. Characterization of Signals from Multi-scale Edge[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-732.
- [8] 成礼智. 小波与离散变换理论及工程实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] 苗亮亮, 李山, 苏宪龙, 等. 小波分析在图像边缘检测中的应用[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(3): 62-64.
- [10] 刘加伶, 杨帆, 龚箭. 一种基于融合技术的遥感图像边缘检测算法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2009(3): 445-448.

(责任编辑 周江川)