

文章编号: 1000-8055(2010)01-0175-05

涡轮叶片 CT 图像边缘提取的最优算子研究

孙晶晶, 杨 民, 刘静华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为了解决叶片计算机断层(computed tomography, 简称 CT)图像边缘提取精度低效率差的问题, 以解析法提取边缘的理论为基础, 推导了适用于 CT 图像边缘提取的最优算子, 并通过定量计算与模拟标准图像对最优算子的性能进行了分析, 结果表明最优算子在抗噪、定位精度以及单像素响应等方面都比传统的边缘提取算子更为优越. 实际应用最优算子提取的叶片边缘更光顺, 噪声点以及伪边缘更少, 进一步证明了最优算子在 CT 图像边缘提取方面有着明显的优势.

关 键 词: 边缘提取; 解析法; 计算机断层 (CT) 图像; 最优算子

中图分类号: V233

文献标识码: A

Research on optimal operator of blade edge detection from computed tomography images based on computational theory

SUN Jing-jing, YANG Min, LIU Jing-hua

(School of Mechanical Engineering and Automation,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the mathematical model and computational edge detection theory of Canny, an optimal operator for edge detection in computed tomography image processing was proposed in order to resolve the accuracy and efficiency problem in blade edge detection from computed tomography images. The quantitative analysis and simulation of standard images verify that, the performance of the optimal operator is better than the conventional operators in the signal-to-noise ratio (SNR), location and multi-response. The performance of the optimal operator is also verified by the practical computed tomography images. It is found that the edges of blade detected by the optimal operator are smoother, the noise points and false edges are less.

Key words: edge detection; computational approach; computed tomography; optimal operator

涡轮叶片作为航空发动机的重要零件之一, 其叶形及进排气孔形貌的获取以及在此基础上的改型设计一直是国内外关注的焦点, 而 CT(computed tomography) 技术作为一种可以无损地获取物体内外结构信息的检测手段也在这一领域获得了极大的重视^[1-2]. 然而由于 CT 成像系统点扩

展函数的调制, 理想的阶跃边缘在 CT 图像中会发生退化, 在边界点附近的 4~5 个像素范围内灰度值梯度都会发生较大变化, 因此较难确定真实的边缘位置; 此外由于涡轮叶片的密度较大, 引起的散射、硬化以及重建伪影现象都较为严重, 采用传统的 Robert 算子、Prewitt 算子、Sobel 算子等

收稿日期: 2008-12-30; 修订日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(60872080); 航天科技创新基金(CASC0410); 北京市科技新星基金(2005A14); 北京市教育委员会共建项目

作者简介: 孙晶晶(1982-), 女, 新疆维吾尔自治区哈密人, 博士生, 主要从事工业数字影像和计算机层析成像技术研究.

边缘检测算子提取涡轮叶片的边缘信息经常会引入众多噪声点和伪边缘,提取的效率和精度会大打折扣,无法适应实际应用中的需要。

为了解决上述问题,本文根据 Canny J 提出的解析法提取图像边缘的理论^[3],首先分析 CT 重建图像中边缘的性质,提出了用参数为 2.6563 的斜坡边缘作为 CT 重建图像中的边缘模型,进而利用解析法理论的三个评价边缘提取算子的指标来进行最优化设计,推导了适用于提取 CT 图像边缘的最优算子,使该算子在信噪比、定位精度、单像素响应等方面的性能大大提高,在涡轮叶片图像的边缘提取应用中具有更高的准确性,能大大降低后处理的复杂度,提高边缘处理的效率。

1 理论分析

1.1 解析法提取边缘的理论

根据 Canny J 提出的用解析法提取图像边缘的理论,可以用信噪比、定位精度、单像素响应三个指标来评价边缘检测算子的性能。在设计算子的过程中可以应用最优化理论对某一特定形式的边缘进行分析^[4-5],从而得到适用于提取该类型边缘的最优边缘提取算子。信噪比,边缘定位精度以及单像素响应的定量计算公式如下:

$$C_1 = \frac{\left| \int_{-w}^w e(-x) f(x) dx \right|}{\left[\int_{-w}^w f^2(x) dx \right]^{1/2}} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{\left| \int_{-w}^w f(-x) f'(x) dx \right|}{\left[\int_{-w}^w f'^2(x) dx \right]^{1/2}} \quad (2)$$

$$C_3 = \pi \left[\frac{\int_{-w}^w f^2(x) dx}{\int_{-w}^w f'^2(x) dx} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式(1)~(3)中 $e(x)$ 表示检测的边缘; $f(x)$ 表示待设计的边缘提取算子, w 为有限冲激响应滤波器,长度为 $2w+1$ 。

根据上述三个公式,只要有待检测边缘的数学模型,就可以利用最优化理论设计滤波器使上述三个公式取值达到最大^[5],从而在进行边缘提取时既可以保证对弱边缘进行响应,又保证将边缘准确定位,同时尽可能只有一个峰值响应。Canny 在文献^[3]中也根据解析法提取边缘的理论推导了阶跃边缘的最优算子,并提出用 Gauss 函数的一阶导数(在本文中记作 DGAUSS 算子)

作为近似的最优算子。DGAUSS 算子近年来也在 CT 图像的边缘提取研究中得到了一定的应用^[5],但是文献^[6-7]在实践中也发现 DGAUSS 算子并不是对各种图像都能得到满意的结果,需要针对各种图像中边缘的特性进行优化设计最优算子,才能得到较为满意的边缘信息。因此为了能更好地提取 CT 图像中涡轮叶片的边缘,需要先分析得到 CT 图像中边缘的模型 $e(x)$,进而利用解析法理论进行优化设计,得到各方面性能都比较出色的最优算子 $f(x)$,才能保证用最优算子 $f(x)$ 提取得到的边缘结构信息更加真实可靠。

1.2 CT 图像中边缘的模型

理想状态下,图像中的边缘应该是阶跃形式的,然而由于 CT 成像系统的点扩展函数无法实现理想状态下的冲击响应^[8],因此 CT 图像中的边缘会发生退化,在边界点附近的 4~5 个像素范围内灰度值梯度都会发生较大变化,因此很难确定真实的边缘位置。本文采用圆盘法来测定 CT 重建系统的点扩展函数^[8],测试用铝制圆盘的 CT 图像如图 1 所示,测试得到的系统点扩展函数如图 2 所示。该点扩展函数和阶跃边缘卷积后会得到具有振铃效应的类斜坡边缘。实际中 CT 重建系统中不可避免地会夹杂噪声,类斜坡边缘的振铃效应削弱,可以近似地看成是斜坡边缘,因此可以用式(4)所示的斜坡边缘的数学模型来近似描述 CT 图像中的边缘

$$e(x) = \begin{cases} 1 - \exp(-sx)/2 & x \geq 0 \\ \exp(sx)/2 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$e(x)$ 的一阶导数如式(5)所示,可以发现在边缘点处的一阶导数为 $e'(0) = \frac{s}{2}$,因此模型 $e(x)$ 中

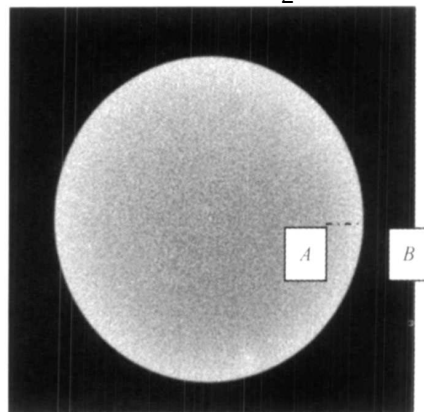


图1 铝制圆盘的 CT 图像

Fig. 1 CT image of aluminum disc

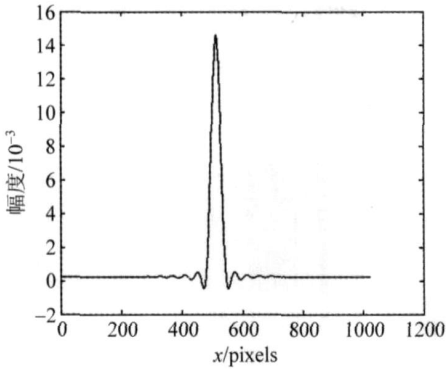


图 2 CT 系统的点扩展函数
Fig. 2 Point spread function of CT system

的参数 s 可以通过边缘点的斜率计算得到 $s = 2e'(0) = 2.6563$.

$$e(x) = \begin{cases} \text{sexp}(-sx)/2 & x \geq 0 \\ \text{sexp}(sx)/2 & x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

图 3 为真实的 CT 图像边缘与边缘模型的对比图,实线为铝制圆盘 CT 图像中 AB 剖线的灰度曲线,点画线为加入 20 % 高斯噪声的边缘模型. 通过对比可以看出,斜坡边缘模型可以很好地反映 CT 图像中边缘的特性,因此 CT 图像中的边缘可以看成是加入了高斯噪声的参数为 2.6563 的斜坡边缘.

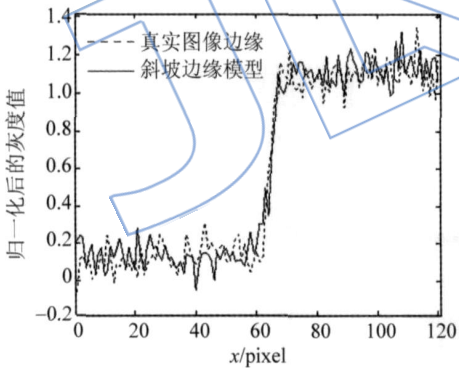


图 3 斜坡边缘模型与真实 CT 图像边缘的对比图
Fig. 3 Comparing ramp edge model with edge of real CT image

1.3 滤波算子的优化设计

以上节得到的斜坡边缘模型为基础,按照解析法提取边缘的理论可以建立需要优化的三个函数如下:

信噪比

$$C_1 = \frac{\int_w f(x) [1 - \exp(x)] dx}{\sqrt{\int_w |f(x)|^2 dx}} \quad (6)$$

边缘定位

$$C_2 = \frac{s^2 \int_w f(x) \exp(sx) dx}{\sqrt{\int_w |f'(x)|^2 dx}} \quad (7)$$

单像素响应

$$C_3 = \frac{1}{w} \frac{\int_w |f'(x)|^2 dx}{\int_w |f''(x)|^2 dx} \quad (8)$$

其中 $f(x)$ 就是有待优化设计的最优算子. 将上述三个准则结合起来,采用最优化理论设计最优算子,使得算子的综合性能达到最优. 最终的优化方程为

$$P = \frac{s^4}{w^2} \cdot \frac{\left| \int_w f(x) [1 - \exp(x)] dx \int_w f(x) \exp(x) dx \right|^2}{\int_w |f'(x)|^2 dx \int_w |f''(x)|^2 dx} \quad (9)$$

对滤波器 $f(x)$ 做出以下的简单假设:滤波器 $f(x)$ 应该为奇函数;滤波器 $f(x)$ 应该满足当 $|x| > w$ 时 $f(x) = 0$,且为光滑过渡 $f(\pm w) = 0$.

应用最优化理论和上述的假设,得到能够使 得式(9) 取得最大值的滤波器 $f(x)$

$$f(x) = e^{Ax} [K_1 \sin(Ax) + K_2 \cos(Ax)] + e^{-Ax} [K_3 \sin(Ax) + K_4 \cos(Ax)] + K_5 + K_6 e^{sx} \quad (-w \leq x \leq 0) \quad (10)$$

考虑到最优算子的截止频率应该不小于 CT 系统的截止频率,相对应可以确定参数 $w = 3$,最优算子的其他参数可以通过优化计算得到. 适用于 CT 图像边缘提取的最优算子的各项参数如表 1 所示.

表 1 最优滤波器的参数取值	
Table 1 Value of the parameters in optimal operator	
参数	取值
w	3
A	2.3907
s	2.6563
K_1	0.5567
K_2	2.3045
K_3	-0.1344
K_4	-0.0388
K_5	-1.1657
K_6	-1.1

利用式(1)~(3)还可以定量计算 DGAUSS 算子和本文提出的最优算子在提取 CT 图像边缘时的性能,具体的对比结果如表 2 所示。

表 2 最优算子与 DGAUSS 算子的性能分析与对比
Table 2 Performance of optimal operator comparing with DGAUSS

算子名称	信噪比	定位精度/ (1/pixel)	单像素响 应/pixel	综合性能 P
DGAUSS 算子	1.2531	0.4024	0.1016	0.0536
最优算子	1.8041	0.4752	0.2378	0.2039

可以看出虽然在文献[3]中,DGAUSS 算子是阶跃边缘的近似最优算子,其边缘提取的性能比较好,然而当边缘的形式变为斜坡边缘后,DGAUSS 算子的边缘提取性能迅速下降。而本文提出的最优算子由于在推导的过程中考虑了 CT 图像中边缘的性质,因此在信噪比、定位精度、单像素响应和综合性能四个方面要远远优于 DGAUSS 算子,其中信噪比是 DGAUSS 算子的 1.44 倍,定位精度是 DGAUSS 算子的 1.18 倍,单像素响应性能是 DGAUSS 算子的 2.74 倍,综合性能是 DGAUSS 算子的 3.80 倍。

2 性能分析

2.1 标准图像分析

为了验证最优算子在提取 CT 图像边缘时的性能,本文采用了如图 3 所示的模拟 CT 图像(长度为 128 个像素的水平直线)作为测试的标准图像,测试图像中标准边缘的位置如图 4 中白线所示。

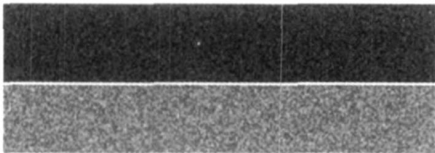


图 4 测试图像
Fig. 4 Testing image

分别用 DGAUSS 算子以及本文推导的最优算子进行边缘提取操作(具体算法参见文献[3]),其结果如图 5、图 6 所示。将两种算子提取的边缘与标准图像中的边缘位置进行对比,并对结果进行统计,可以计算出两种边缘提取算子提出的边缘的正确率分别为 57.0%和 79.7%。标准图像的

测试结果显示最优算子提取的边缘受到噪声的影响较小,噪声点以及伪边缘大大减少,能够有效地提取出边缘的真实位置。

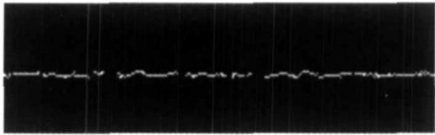


图 5 DGAUSS 算子提取的水平直线边缘
Fig. 5 Horizontal edge detected by DGAUSS

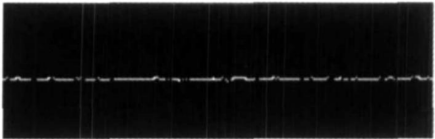


图 6 最优算子提取的水平直线边缘
Fig. 6 Horizontal edge detected by optimal operator

2.2 实验结果

本文采用航空涡轮叶片进行试验,采集该试件的 720 幅投影数据,射线源到探测器的距离为 1000 mm,采用 S-L (Shepp-Logan) 滤波重建,重建后的图像分别采用 DGAUSS 算子以及本文提出的最优滤波算子提取边缘,滤波器的尺寸为 16×16,取相同的双阈值进行边缘提取,得到的结果如图 7 和图 8 所示。



图 7 DGAUSS 算子提取的叶片边缘
Fig. 7 Edge of blade detected by DGAUSS

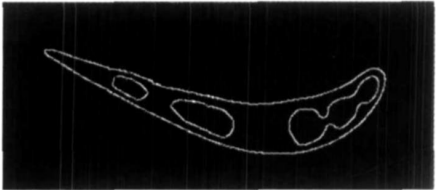


图 8 最优算子提取的叶片边缘
Fig. 8 Edge of blade detected by optimal operator

对 DGAUSS 算子提取的叶片边缘进行边缘追踪操作得到 61 条边缘,其中有 15 条伪影引起的伪边缘,还有 13 条边缘短枝,17 个噪声点以及 4 个断点,需要进行复杂的后处理,有些伪边缘和短枝甚至需要人工干预才可以去除,从而得到叶

片有意义的 4 条边缘结构信息;而对于最优算子提取的叶片边缘进行边缘追踪操作可以得到 8 条边缘,其中含有 4 个噪声点和一个断点,不存在边缘短枝,经过简单的去噪和断点连接操作就可以得到叶片有意义的 4 条边缘结构信息.

3 总 结

本文不仅分析了 CT 重建图像的边缘特性,也从解析法提取边缘的角度出发,推导了适用于 CT 图像边缘提取的最优算子.并对最优算子和目前边缘提取中常用的 DGAUSS 算子的性能进行了定量对比,其中最优算子的信噪比是 DGAUSS 算子的 1.44 倍,定位精度是 DGAUSS 算子的 1.18 倍,单像素响应性能是 DGAUSS 算子的 2.74 倍,综合性能是 DGAUSS 算子的 3.80 倍;此外 DGAUSS 和最优算子分别对模拟的标准图像提取边缘,提出的边缘的正确率分别为 57.0%和 79.7%;在真实的叶片图像提取中, DGAUSS 算子提取得边缘中含有 15 条伪边缘, 13 条边缘短枝,17 个噪声点和 4 个断点,而最优算子提取的边缘只含有 4 个噪声点和一个断点,具有更高的准确性,因此采用最优算子提取叶片的边缘能大大降低后处理的复杂度,提高边缘处理的效率.

参考文献:

- [1] Yancey R N. CT-assisted reverse engineering for aging aircraft resupply[C]// Non-Destructive Evaluation of Aging Aircraft, Airports, and Aerospace Hardware Conference II. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1998:211-216.
- [2] Castellan C, Dastarac D. Use of computed tomography slices 3D-reconstruction as a powerful tool to improve manufacturing processes on aeroengine components[C]// Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Montreal, Canada: American Institute of Physics, 2000:2107-2114.
- [3] Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698.
- [4] Petrou M, Kittler J. Optimal edge detectors for ramp edges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(5):483-491.
- [5] 王钰, 徐利兵. 一种基于改进边缘搜索和 CANN Y 算法的图像分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4):476-478, 482.
- WANG Yu, XU Libing. ICT image segmentation edge-searching edge-extracting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4):476-478, 482. (in Chinese)
- [6] Pellegrino F A, Vanzella W, Torre V. Edge detection revisited, edge detection revisited[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics: Part B - Cybernetics, 2004, 34(3):1500-1518.
- [7] Demigny D. On optimal linear filtering for edge detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(7):728-737.
- [8] 国防科学技术工业委员会. GB 5311-2004 工业 CT 系统性能测试方法[S]. 北京:国防科学技术工业委员会出版发行部, 2004.