

文章编号 1004-924X(2010)02-0443-08

基于小波定位及 Facet 模型的 三维工业 CT 图像边缘检测

曾 理^{1,2}, 郭海燕², 马 睿²

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;
2. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

摘要:进行三维图像边缘检测时,利用 Facet 模型能够获得较精确的边缘信息,但耗时较多;而利用小波变换可获得较快的检测速度,但得到的边缘依赖于阈值的大小。综合上述两种方法的特点,提出了一种基于小波定位及 Facet 模型的三维边缘检测方法。首先,对工业 CT 三维图像进行三维小波变换,设定较小阈值,得到三维粗边缘,即对图像边缘进行粗定位;然后,针对粗边缘点逐个进行三维 Facet 拟合,得到实际边缘点,从而完成图像边缘的精确定位。该方法通过小波变换粗定位这一前处理过程减少了 Facet 拟合的体素点数,加快了 Facet 模型三维边缘检测的速度。实验结果显示,本文方法不仅能得到与直接 Facet 模型效果相当的边缘,还能使 Facet 模型三维边缘检测的速度提高 3.51~7.39 倍,而且图像边缘越简单加速比越高。实验结果表明,基于小波定位和 Facet 模型的边缘检测方法可满足工业 CT 三维图像边缘检测对精度和速度的要求。

关 键 词:工业 CT;三维图像;边缘检测;小波变换;Facet 模型

中图分类号:TG115.281;TP391 **文献标识码:**A

Edge detection of industrial CT 3D image based on wavelet locating and Facet model

ZENG Li^{1,2}, GUO Hai-yan², MA Rui²

(1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology
and System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In 3D edge detection for an industrial Computed Tomography(CT) image, the Facet model can be used to obtain the relatively precise image edge, but it will cost too much time. Otherwise, the wavelet transform method can be taken to detect 3D image edges in a shorter time, however, the edge information obtained depends on the threshold strongly. In combination with the characteristics of two methods above, a 3D edge detection method based on wavelet transform and Facet model is presented in this paper. Firstly, 3D wavelet transform is used for an industrial CT 3D image, and initial candidates of edge could be obtained by setting a smaller threshold. Through this step, the edge is located roughly. Then, 3D Facet model is used to decide if the candidate is the true edge, and the points

收稿日期:2008-12-23;修订日期:2009-02-25.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60672098;No. 60972104)

in rough edge are fitted one by one to realize the precise location of the image edge. The improved algorithm reduce the number of edge pixel candidates by the preprocessing of 3D wavelet transform, which improves the detection speed of the original 3D Facet model. Experimental results show that the proposed method not only can obtain the same image edge as that by original 3D Facet model but also can improve the image detection speed greatly. Obtained results indicate that the image detection speed has increased by 3.51—7.39 times as compared with that of original 3D Facet model, and the simpler the image edge is, the higher the accelerate ratio is. These results show that the 3D edge detection method based on wavelet transform and Facet model can meet the requirements of the 3D image in an actual industrial CT for high accuracy and high speed.

Key words: industrial CT; 3D image; edge detection; wavelet transform; Facet model

1 引言

图像的边缘检测^[1]是图像分割、区域形状提取和测量、目标区域识别等图像分析领域十分重要的基础。它往往是图像理解和分析的第一步工作,在工程应用中占有十分重要的地位。随着工业 CT 的发展,图像的三维边缘检测愈发重要。三维边缘检测对每一体素考虑其在空间中的邻域,能检测到物体在空间任意方向的边缘,而序列图像的二维边缘检测对物体在垂直于图像平面方向上的边缘却无能为力。

Facet 模型是 Haralick^[2]于 1984 年提出的,它以精度高、抗噪性强的特点在边缘检测中得到青睐并广泛应用。Wu 等人^[3]于 1999 年将 Haralick 的 2D 方向导数边缘检测器扩展到了 3D,通过三次多项式拟合 Facet 模型,进而确定空间边缘的位置。但是由于 3D Facet 模型要在每个体素点的邻域内做曲面拟合,计算量非常大,在三维数据处理中的时间消耗将是无法接受的,这限制了其在实际工业中的应用。2005 年,王凯等人^[4-5]提出了采用 Otsu 阈值分割获得初始边缘候选点集,然后运用 Facet 模型对候选点集精确判断的 Facet 加速算法;2007 年,王凯等人^[6]通过采用正交多项式基拟合 3D Facet 模型,并将 3D 卷积核分解为 3 个 1D 卷积核的方法,降低了复杂度,在保证原始算法精度不变的前提下,将原始算法处理速度提高约 2 倍。

在图像处理中,小波变换的模极大值点对应于灰度的突变点^[7],为了排除因噪声而引起的模极大值点,可以通过对小波变换模设定阈值来确定图像的边缘。基于小波变换的边缘检测方法可

以有效地抑制噪声,计算量不大,但其检测边缘依赖于阈值的选择^[8]。当阈值较小时,边缘附近的非边缘点会被误判为边缘,这样得到的就是包含真实边缘的粗边缘;当阈值较大时,有些真实边缘点会被误判为非边缘点,这样得到的就是缺损的断裂边缘。所以仅对图像做小波变换也很难得到精确真实的边缘。

本文在上述文献的基础上,研究了 3D Facet 模型的加速问题。利用小波变换^[7-10]的特点,首先对三维数据做 3D 小波变换,设定较小阈值,得到边缘的初始候选点集,然后在候选点集的基础上做 3D Facet 拟合,进行精确定位,最终得到边缘的精确位置。

2 算法原理

2.1 三维 Facet 模型

二维 Facet 模型仅利用一幅图像的灰度信息,不考虑与当前像素关联的上下几幅图像的信息,这导致了其无论在精度还是去噪方面都不如三维 Facet 模型优越。

Facet 模型是由 Robert M. Haralick 于 1984 年首先提出^[2]。假设一幅图像已经被划分为若干个连接着的区域,每个区域满足一定的灰度分布和形状限制,Haralick 称这样的—个区域为一个 Facet。灰度分布要求每个 Facet 的灰度函数是其对应区域内象元行与列的多项式函数,形状限制主要是考虑特性的平稳性。按照上述说法,一幅图像可以用若干个相互连接着的 Facet 来近似。在 2D 图像中,一个 Facet 上的灰度被描述为 Facet 内像素坐标的二元函数;在 3D 数据中,一个 Facet 上的灰度被描述为 Facet 内体素坐标的

三元函数。

文献[3]中将 Haralick 二维三次 Facet 模型

$$f(x, y, z) = k_1 + k_2 x + k_3 y + k_4 z + k_5 x^2 + k_6 y^2 + k_7 z^2 + k_8 xy + k_9 xz + k_{10} yz + k_{11} xyz + k_{12} xy^2 + k_{13} xz^2 + k_{14} x^2 y + k_{15} yz^2 + k_{16} x^2 z + k_{17} y^2 z + k_{18} x^3 + k_{19} y^3 + k_{20} z^3, \quad (1)$$

其中, x, y, z 分别表示体素在长、宽、高三个方向上的坐标。三维邻域一般取 $5 \times 5 \times 5$ 体素集, 并通过该邻域体数据用最小二乘法拟合式(1), 从而求得待定系数 k_1, k_2, \dots, k_{20} 。

在三维空间中, 矢量 v 的方向可以用角度 α 和 β 表示, 如图 1 所示。

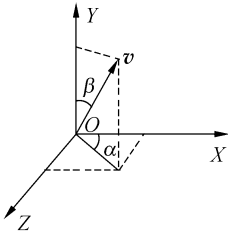


图 1 三维空间中向量方向

Fig.1 Vector direction in 3-D space

推广到三维, 利用当前体素的 3D 邻域灰度来拟合针对当前体素的三元三次多项式。即:

这样, 空间体素坐标 (x, y, z) 可表示为:

$$\begin{cases} x = \rho \sin \beta \cos \alpha \\ y = \rho \sin \beta \sin \alpha \\ z = \rho \cos \beta \end{cases}, \quad (2)$$

其中 ρ 为向量长度, 即邻域体素点到当前中心点的距离。将(2)代入(1)并求导数有:

$$f_{\alpha, \beta}(\rho) = k_1 + A\rho + B\rho^2 + C\rho^3, \quad (3)$$

$$f_{\alpha, \beta}'(\rho) = A + 2B\rho + 3C\rho^2, \quad (4)$$

$$f_{\alpha, \beta}''(\rho) = 2B + 6C\rho, \quad (5)$$

$$f_{\alpha, \beta}'''(\rho) = 6C, \quad (6)$$

其中:

$$A = k_2 \sin \beta \cos \alpha + k_3 \sin \beta \sin \alpha + k_4 \cos \beta, \quad (7)$$

$$B = k_5 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha + k_6 \sin^2 \beta \sin^2 \alpha + k_7 \cos^2 \beta + k_8 \sin^2 \beta \cos \alpha \sin \alpha + k_9 \sin \beta \cos \alpha \cos \beta + k_{10} \sin \beta \sin \alpha \cos \beta, \quad (8)$$

$$C = k_{11} \sin^2 \beta \cos \alpha \sin \alpha \cos \beta + k_{12} \sin^3 \beta \cos \alpha \sin^2 \alpha + k_{13} \sin \beta \cos \alpha \cos^2 \beta + k_{14} \sin^3 \beta \cos^2 \alpha \sin \alpha + k_{15} \sin \beta \sin \alpha \cos^2 \beta + k_{16} \sin^2 \beta \cos^2 \alpha \cos \beta + k_{17} \sin^2 \beta \sin^2 \alpha \cos \beta + k_{18} \sin^3 \beta \cos^3 \alpha + k_{19} \sin^3 \beta \sin^3 \alpha + k_{20} \cos^3 \beta, \quad (9)$$

由式(4)、(7)得:

$$f_{\alpha, \beta}'(\rho) |_{\rho=0} = k_2 \sin \beta \cos \alpha + k_3 \sin \beta \sin \alpha + k_4 \cos \beta. \quad (10)$$

通过求(10)的最大值, 可以得到梯度模值和梯度方向分别为:

$$f_{\alpha, \beta}' = \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}, \quad (11)$$

$$\sin \alpha = k_3 / \sqrt{k_2^2 + k_3^2}, \quad (12)$$

$$\cos \alpha = k_2 / \sqrt{k_2^2 + k_3^2}, \quad (13)$$

$$\sin \beta = \sqrt{k_2^2 + k_3^2} / \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}, \quad (14)$$

$$\cos \beta = k_4 / \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}. \quad (15)$$

根据式(4, 5, 6)所计算的前三阶导数, 由以下的准则判断当前点是否为边缘点:

(a) 计算梯度模值 $f_{\alpha, \beta}'$, $f_{\alpha, \beta}' \neq 0$ 且 $f_{\alpha, \beta}' > T$ (当 $f_{\alpha, \beta}' \leq T$ 时认为是噪声), T 的值由实验来确定;

(b) 计算 $f_{\alpha, \beta}'''(\rho)$, $f_{\alpha, \beta}'''(\rho)$ 应小于零, 即 $C < 0$, 表示定义边缘点沿梯度方向二阶方向导数在零交叉处是负斜坡;

(c) 令 $f_{\alpha, \beta}''(\rho) = 0$, 求得 ρ 的估计值 $\rho_e = -B/3C$, $|\rho_e|$ 应该小于半个体素, 即 $|\rho_e| < 0.5$ 。

若当前处理体素满足以上三个条件, 则可判断为边缘体素, 其准确位置可以通过下式计算:

$$\begin{cases} x_e = x_i + \rho_e \sin \beta \cos \alpha \\ y_e = y_i + \rho_e \sin \beta \sin \alpha \\ z_e = z_i + \rho_e \cos \beta \end{cases}, \quad (16)$$

其中 x_e, y_e, z_e 是边缘点坐标的估计值, x_i, y_i, z_i 是边缘点的体素整数坐标。当需要亚体素边缘时, 计算 x_e, y_e, z_e ; 当只需体素边缘时, 计算 x_i, y_i, z_i 即可满足要求。

上述 Facet 模型的算法, 能够获得高精度的图像边缘, 但是对每个体素点都要计算系数 k_1 ,

k_2, \dots, k_{20} , 这样的计算极其耗时, 时间复杂度非常高, 导致其在实际的三维应用中受到了限制。所以, 三维 Facet 模型的加速是一项值得研究并有实际价值的工作。

2.2 基于三维小波的 Facet 加速

对于 Facet 加速问题, 我们考虑首先使用其它方法确定粗略的初始边缘, 然后针对粗略边缘点用 3-D Facet 模型来精确定位。Mallat 小波变换模极大值算法能够提取较粗的边缘, 这个特点使得它恰好适合作为我们的预处理步骤, 提取粗略的初始边缘点。

Mallat 小波变换的模极大值算法^[11] 首先定义两个小波函数, 分别是二维光滑函数对 x 和 y 的偏导数。为了适应三维边缘提取, 将 Mallat 小波变换模极大值算法的思想扩展到三维^[12], 使用三维小波变换。

定义三个方向小波函数, 分别为三维光滑函数 $\theta(x, y, z)$ 对 x, y, z 的偏导数。使用高斯函数作为光滑函数, 尺度取 1。即:

$$\theta(x, y, z) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2}\right),$$

则三个方向小波为:

$$\begin{cases} \Psi_1(x, y, z) = \frac{\partial\theta(x, y, z)}{\partial x} = -x \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2}\right) \\ \Psi_2(x, y, z) = \frac{\partial\theta(x, y, z)}{\partial y} = -y \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2}\right) \\ \Psi_3(x, y, z) = \frac{\partial\theta(x, y, z)}{\partial z} = -z \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2}\right) \end{cases}$$

三维小波变换为:

$$W_k f(x, y, z) = f(x, y, z) * \Psi_k(x, y, z), k=1, 2, 3$$

其中符号 * 表示三维卷积。小波变换模定义为:

$$Mf(x, y, z) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 (W_k f(x, y, z))^2}, \quad (17)$$

然后通过寻找模的局部极大值点来确定边缘点。为消除噪声引起的模极大值点, 设置一个阈值 MT, 模大于阈值 MT 的体素点为边缘点。边缘提取依赖于阈值的大小, 当阈值较小时边缘较粗, 而当阈值较大时边缘容易断裂。本文通过实验设定较小阈值, 得到较粗的边缘, 作为后续处理的候选集。

我们的加速算法先采用基于三维小波变换的边缘检测算法提取初始边缘点, 再在初始边缘点

的位置使用 3D Facet 模型进一步处理, 确定精确的三维边缘。算法步骤如下:

① 读取一系列图像数据, 得到 3D 体数据。

② 根据三个方向小波做三维小波变换, 得到每个体素点的小波变换系数。

③ 根据式(17)计算每个体素的小波变换模值, 通过实验选择适当的阈值 MT, 从而得到粗略的初始边缘点。

④ 在每个初始边缘点处, 读取其在原始图像中 $5 \times 5 \times 5$ 邻域的灰度值, 用最小二乘法拟合式(1), 从而求得待定系数 k_1, k_2, \dots, k_{20} 。

⑤ 根据上面求得的待定系数, 计算 $f_{\alpha, \beta}'$, α, β , 进而计算 A, B, C 。

⑥ 根据 2.1 节中的三条准则(a)、(b)、(c)判断该初始边缘点是否为边缘体素。

(a) 若 $f_{\alpha, \beta}' \leq T$, 选择下一个初始点, 转④;

(b) 若 $f_{\alpha, \beta}'''(\rho) = C \geq 0$, 选择下一个初始点, 转④;

(c) 若 $|\rho_e| \geq 0.5$, $\rho_e = -B/3C$, 选择下一个初始点, 转④。

⑦ 对于满足三条准则的体素, 标记为边缘体素, 并可以通过式(16)计算出其准确位置, 即亚体素边缘点位置。然后选择下一个初始点, 转④。

基于 3D Facet 模型的边缘检测算法原来需要对图像中的每个体素点都用 3D Facet 模型进行处理, 而我们改进的加速算法中只对初始边缘点用 3D Facet 模型进行处理。一般初始边缘点只占整个 3D 数据很少的一部分, 所以大大地减少了处理时间, 实现了加速的目的。另外, 用小波变换模极大值算法提取初始边缘点的同时, 也消除了部分噪声, 因此改进算法也具有更好的抗噪能力。

3 实验结果与分析

文中所有实验均在处理器为 Intel Centrino Duo T2450, 主频 2.0 GHz, 内存 1.0 GB 的 PC 上采用 VC++6.0 编程实现完成。

3.1 加速对比实验

针对实际发动机的 CT 切片序列图像(共 108 张, 分辨率 256 pixel \times 256 pixel, <http://www.volren.org>), 分别用原始 3D Facet 算法和

基于 3D 小波变换的 Facet 改进算法做了对比实验。其中 Facet 判断准则(a)中阈值 $T=15$, 三维小波变换模阈值 $MT=400$ 。

原始 3D Facet 算法处理发动机切片序列用时 6 222 s, 我们的加速算法用时 1 772 s, 速度提高 3.51 倍, 达到了我们加速的目的, 为实际应用提供了方便。图 2 为原始序列切片图像的三维显示图(采用 3DMed 2.0 软件显示, <http://www.3dmed.net>), 从中可以看出发动机的大致整体结构。



图 2 原始系列图片三维显示

Fig. 2 3 dimensional display of original slices

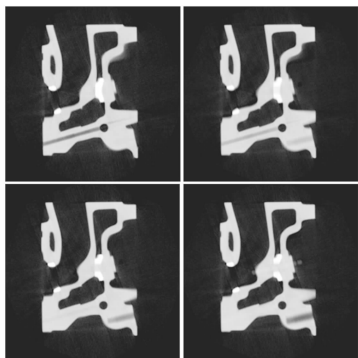


图 3 原始切片 12-15

Fig. 3 Original slices 12-15

图 3 为原始实验数据的第 12~15 张切片, 图 4 为使用原始 facet 算法边缘检测后的第 12~15 张切片, 图 5 为使用加速算法边缘检测后的第 12~15 张切片。实验中, 将切片序列图像读入三维数组, 用上述两种三维边缘检测算法检测边缘, 然后再显示三维边缘结果的部分二维切片。

首先通过观察两组边缘结果并比较发现原始算法和加速算法在精度上并无差异。由于图像并没有尺寸标注, 所以使用下面的方法说明两组结果的精度是否有差异。分别对两组结果图像中的部分区域先进行分割, 然后再计算被分割的小区域的面积, 通过计算两者面积的差值来比较边缘

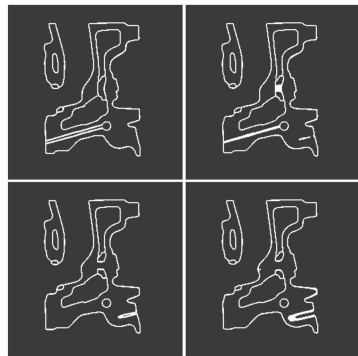


图 4 原始 facet 算法边缘检测后第 12~15 切片

Fig. 4 Slices 12~15 by using original facet algorithm

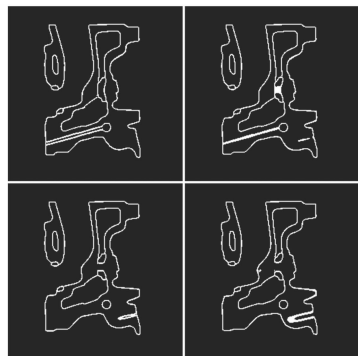


图 5 加速算法边缘检测后第 12~15 切片

Fig. 5 Slices 12~15 by using improved algorithm

提取精度的差异。比较结果如表 1 所示。由表 1 可以得到原始算法和加速算法在边缘提取能力和精度上是相当的。

另外, 观察图 4 及图 5, 我们会发现边缘中有一些区域边缘(图像中表现为白色块状或条状), 如图 4 中切片 13 的中心部分。这也正是三维边缘比二维边缘的优越之处。仔细观察, 我们可以发现出现区域边缘的位置, 正是其上下两层形状发生变化的过渡区域, 它也即是物体在垂直于切片方向上的边缘, 对图像的三维分析有着至关重要的作用。由于二维边缘提取方法对每个像素仅仅考虑单一切片上的信息, 它检测不到这种垂直方向的边缘。三维边缘提取方法虽然时间复杂度高, 但它是图像三维分析的基础, 所以研究它的加速方法是非常必要的。

3.2 其它加速实验

为了验证我们加速算法的准确性、有效性以及加速程度, 针对其它实际三维 CT 切片对象及部分仿真对象, 做了相关对比实验, 结果如表 2 所示。

为了对实验对象的整体外观有所了解,对原始实验数据进行三维显示(采用 3D Med 2.0 软件显示),如图 6 所示(从左到右从上到下依次为茶壶、摩托车电机、仿真球、一半仿真头骨)。

由表 2 所示的加速程度及图 6 的外观显示可以看出,改进的算法能够加速约 3.51~7.39 倍,具体加速的倍数取决于对象的边缘的复杂程度,边缘体素点个数占整个图像体素点个数的比例越小,加速的倍数越高。同时,由表 2 的时间对比可以看出,原始 3D Facet 模型用于三维边缘检测需耗时几个小时,这样的时间花费是实际应用所无法接受的。本文提供的加速方法,在不降低精度的前提下,把时间基本控制在半个小时左右或更

少,这为高精度的 3D Facet 模型应用于实际 3D 图像处理提供了依据和方法。

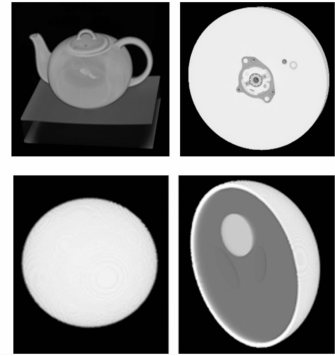


图 6 实验数据的三维显示

Fig. 6 3 dimensional display of experimental data

表 1 两组边缘结果分割对象后的面积比较

Tab. 1 Area comparison between the divided object of two groups of results

	切片 12 分割部分	切片 13 分割部分	切片 14 分割部分	切片 15 分割部分
原始算法与加速算法精度比较				
原始 3D Facet 提取边缘后分割计算的面积 S1	191.5 pixel ²	13 068.5 pixel ²	115 pixel ²	1 635.5 pixel ²
加速 3D Facet 提取边缘后分割计算的面积 S2	191.5 pixel ²	13 068 pixel ²	115 pixel ²	1 635.5 pixel ²
(S1-S2)/S1	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2 加速时间对比表

Tab. 2 Comparison of acceleration

序号	实验对象	运行时间 1:	运行时间 2:	加速倍数
		原始 3D Facet	本文加速 3D Facet	
1	发动机(256 pixel×256 pixel×108 pixel)	6 222 s	1 772 s	3.51 倍
2	茶壶(256 pixel×256 pixel×178 pixel)	10 221 s	2 060 s	4.96 倍
3	摩托车电机(512 pixel×512 pixel×18 pixel)	4 158 s	700 s	5.94 倍
4	仿真球(128 pixel×128 pixel×128 pixel)	1 792 s	307 s	5.84 倍
5	仿真头骨(256 pixel×256 pixel×256 pixel)	14 848 s	2 010 s	7.39 倍

3.3 对噪声的鲁棒性实验

为了验证本文算法对噪声的鲁棒性,我们做了相应的加噪实验。首先对实际发动机的 CT 切片序列图像(共 108 张,分辨率 256 pixel×256 pixel),添加均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声。图 7 为第 97 张切片的原图和加噪图显示。对加噪切片序列,用本文基于 3D 小波变换的 Facet 改

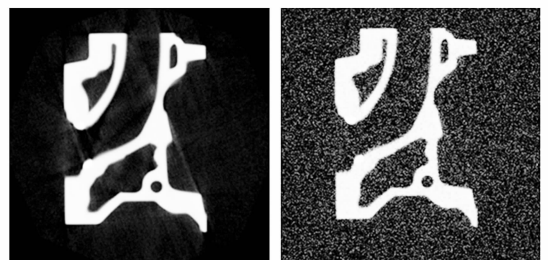


图 7 切片 97 的原图和加噪图

Fig. 7 Original image and image with noise of slice 97

进算法进行三维边缘检测,耗时 1 863 s,得到三维边缘数据。图 8 右为三维边缘结果的第 97 张二维切片显示,图 8 左为原始未加噪数据检测结果的第 97 张切片显示。

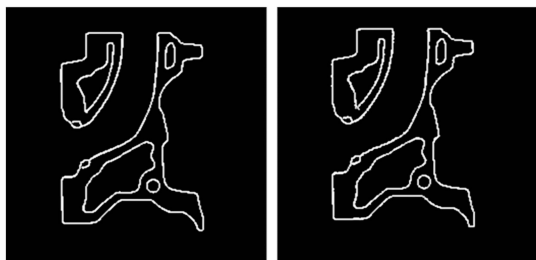


图 8 原图和加噪图的结果

Fig. 8 Results of original image and image with noise

由图 8 进行仔细比较可以看出,加噪后的图像检测结果与原图检测结果只在一些细节处有细微的差别,对整体的三维边缘检测结果并无影响。分析本文的改进算法,第一步三维小波变换本身对噪声就具有一定的抑制作用,第二步 3D Facet 算法的三条准则(见 2.1 节)中的准则(a)即是去除噪声的过程,当 $f_{\alpha,\beta}' \leq T$ 时被认为是噪声而去除。由此可见,本文算法对噪声具有较好的鲁棒性。

3.4 与 Canny 边缘检测算子的比较

常用的几种用于边缘检测的算子中,基于最优化算法的 Canny 边缘检测算子,因具有信噪比大和检测精度高的优点而被广泛应用。但目前,Canny 算子常被用来做二维边缘检测,当用来检测序列图像时,检测不到某些三维边缘。如图 9 所示,左图为本文方法检测结果的第 13 张二维切片显示,右图为原始数据的第 13 张切片的

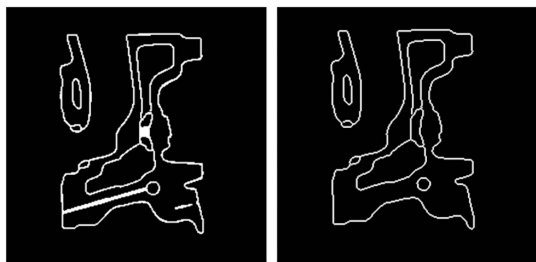


图 9 Canny 算子与本文方法结果

Fig. 9 Results of Canny operator and our method

Canny 算法边缘检测结果,原图见图 3 右上所示。

经对比可知,两个结果的边缘存在着一些区别,如左图中间等位置的块状区域边缘,在右图中并未得到体现,这就是二维边缘检测方法相对三维边缘检测方法的不足之处。由于它只考虑一张图像本身存在的信息,而不考虑与之相关的上下相邻图像的信息,所以检测不到一些对三维图像处理有着重要作用的三维边缘。

4 总 结

本文针对 3D Facet 模型在进行三维边缘检测时存在时间耗费大的问题,提出了基于 3D 小波变换的 3D Facet 模型的算法。首先采用三维小波变换边缘检测算法提取粗略的初始边缘点作为候选点集,然后在候选点集的基础上做 3D Facet 拟合,进行精确定位,最终得到边缘的精确位置。实验表明,文中算法能够在保持精度的前提下较为快速地检测出图像的三维边缘,加速约 3.51~7.39 倍,且对噪声具有较好的鲁棒性,使得 3D Facet 模型这一精确的边缘检测方法可以应用于实际的工业 CT 图像三维处理,对工业 CT 高精度快速检测具有现实意义。

参考文献:

- [1] 付树军,阮秋琦,穆成坡,等. 基于非线性扩散滤波的边缘检测和图像测量[J]. 光学精密工程,2007,15(2):289-293.
FU SH J, RUAN Q Q, MU CH P, et al.. Edge detection for image measurement based on nonlinear diffusion filtering [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):289-293. (in Chinese)
- [2] HARALICK R M. Digital step edges from zero

crossing of second directional derivatives [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1984, 6:58-68.

- [3] WU X G, WEE W G. Surface detection with sub-voxel accuracy using 3D directional derivatives [J]. *SPIE*, 1999, 3586:319-329.

- [4] 王凯,张定华,赵歆波,等. 工业 CT 图像亚体素表面检测算法研究[J]. CT 理论与应用研究,2005,14(3):40-45.

WANG K, ZHANG D H, ZHAO Y B, et al.. Re-

- search on subvoxel surface detection algorithms of ICT images [J]. *CT Theory and Application*, 2005, 14(3): 40-45. (in Chinese).
- [5] 王凯, 张定华, 黄鹤龄, 等. 基于 3D Facet 模型的亚体素边缘检测算法研究[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(7): 865-868.
WANG K, ZHANG D H, HUANG H L, *et al.*. A study of subvoxel edge detection method based on 3D facet model [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(7): 865-868. (in Chinese)
- [6] 王凯, 张定华, 赵歆波, 等. 一种改进的基于 Facet 模型的亚体素表面检测算法[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(3): 343-347.
WANG K, ZHANG D H, ZHAO Y B, *et al.*. An improved subvoxel surface detection algorithm based on facet model [J]. *Mechanical Engineering of China*, 2007, 18(3): 343-347. (in Chinese)
- [7] 林晓梅, 李琳娜, 牛刚, 等. 基于小波边缘检测的图像去噪方法[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 88-93.
LIN X M, LI L N, NIU G, *et al.*. Image de-noising based on wavelet edge detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 88-93. (in Chinese)
- [8] 同武勤, 凌永顺, 黄超超, 等. 数学形态学和小波变换的红外图像处理方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(1): 138-144.
TONG W Q, LING Y SH, HUANG CH CH, *et al.*. Processing method of IR image based on mathematical morphology and wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 138-144. (in Chinese)
- [9] 曹万鹏, 陈刚, 车仁生, 等. 一种基于小波变换的照明无关边缘检测和模糊增强方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(7): 1143-1150.
CAO W P, CHEN G, CHE R SH, *et al.*. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7): 1143-1150. (in Chinese)
- [10] ZENG L, UNSER M, HUNZIKER P R, *et al.*. Four-dimensional wavelet compression of arbitrarily sized echocardiographic data [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2002, 21(9): 1179-1187.
- [11] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, 38(3): 617-643.
- [12] 罗一平. 真正三维小波变换技术及在视频编码中的应用[J]. *光学工程*, 2002, 29(2): 55-58.
LUO Y P. A true three-dimension wavelet transform technique and its application in video image coding [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(2): 55-58. (in Chinese)

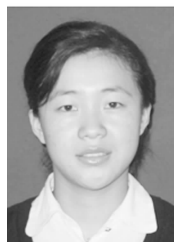
作者简介:



曾理(1959—),男,四川郫县人,博士,教授,博士生导师,1986年于四川师范大学获理学学士学位,1989年于大连理工大学获理学硕士学位,1997年于重庆大学获工学博士学位,2000年至2001年在瑞士巴塞尔大学作博士后研究.主要从事工业CT与图像处理方面的研究. E-mail: drlizeng@hotmail.com



马睿(1982—),女,宁夏人,硕士,2005年、2008年于重庆大学分别获学士、硕士学位,主要从事工业CT与图像处理方面的研究. E-mail: Mazhifang1932@163.com



郭海燕(1984—),女,吉林人,硕士研究生,2006年于重庆大学获学士学位,主要从事工业CT与图像处理方面的研究. E-mail: petrelguo@gmail.com.