

一种基于复杂产品 ICT 切片图像的轮廓提取算法^{*}

范彦斌¹, 李西兵²

(1. 佛山科学技术学院 机电工程系, 广东 佛山 528000;

2. 齐齐哈尔大学 机械工程系, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 应用 ICT (industrial computed tomography) 成像与数字图像处理和 CAD 等综合技术已成为对复杂机械产品进行反求建模的重要手段之一。在针对 ICT 切片图像进行轮廓分割和数据提取时, 其轮廓数据的精确性对反求建模精度至关重要。在比较传统轮廓数据算法的基础上提出了一种改进的 ICT 切片图像轮廓边界分割与提取算法, 经过分析和比较, 该方法不但可提高边界轮廓数据的提取精度, 而且还具有计算速度快和计算开销少的特点。

关键词: 数字图像处理; 轮廓提取; ICT

中图分类号: TB22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 03-0021-04

随着数字图像处理技术的发展, 应用 ICT (industrial computed tomography) 成像与图像处理和 CAD 等综合技术已成为对复杂机械产品进行反求建模的重要手段之一。在 ICT 成像原理中, 当一束单一能量的 X 射线束通过一个具有均匀密度的物体时, 其总衰减是积累的且服从指数关系, 表示为:

$$I_t = I_0 \exp \left[- \sum_{i=0}^{N-1} \mu_i l_i \right] \quad (1)$$

式中, N 为 X 射线束经过物体中结构段的总数, I_0 是入射强度, I_t 是透射强度, l_i 是射线束通过物体中第 i 个结构段的长度, μ_i 是物体中第 i 个结构段的衰减系数。在 ICT 中, I_0 和 I_t 是由 X 射线探测器测出的。通过从许多不同的视角测量, 能够得出多个同样未知数的方程, 然后利用各种数学的方法解方程组可以解出各 μ_i ($i = 0, 1, \dots, N-1$), 即物体内部衰减系数的分布, 它可以通过制定灰度值与衰减系数的比例以图像的形式显示出来^[1]。

对于一幅机械零件产品的 ICT 图像切片, 由于其有图像部分不一定完全覆盖整个像素区域, 加之噪声信号的影响, 因此, 在背景像素、零件轮廓所占像素和零件实体所占像素之间存在一个灰度梯度变化。如果使用阈值进行二值化图像分割^[2], 即所有灰度值大于或等于某阈值的像素被判属于物体, 所有灰度值小于该阈值的像素被判属于背景, 那么就不可避免地造成有些边界像素的灰度值虽然小于阈值而被判属于背景, 被排除在物体之外, 从而造

成边界提取时有误差。为了克服误差的产生, Kirsch^[2,3] 分割法利用一个偏低的灰度阈值对梯度图像进行阈值化从而检测出物体和背景, 随着阈值的逐渐提高, 用接触点来定义边界。但该方法计算开销较大且精度不高, 对于包含多个物体的图像来说, 在初始阈值化步骤中不容易保证分割的正确性。

对于复杂精密零件 ICT 切片的轮廓检测和数据提取仅仅精确到像素级是不够的。本文针对如何提高 ICT 切片图像的轮廓数据精度, 提出了一种改进的快速算法。对于分辨率是 512×512 的图像, 该算法能够使图像的边界轮廓提取的精度成倍提高。

1 轮廓检测算法

在各种因素的影响下, 实际切片图像中背景像素和物体像素的灰度值在一定的灰度范围内变化, 因此对轮廓像素的数据提取采用相邻像素的灰度值来进行插值的计算方法。

由于每个像素的尺寸较小, 所以可以将物体轮廓曲线在单个像素内的变化简化为直线; 另外, 针对 ICT 切片图像来说, X 线的衰减与在该物质内的行进距离成正比^[4,5], 而灰度值是根据 X 线的衰减成比例来确定的, 通过实验得到背景灰度值是非曲直以 10 为中心分布的, 实体灰度值是以 245 为中心分布的。根据其线性关系, 采用灰度值为 $(10+245)/2=127.5$ 作为阈值进行计算。本文针对每一

* 收稿日期: 2003-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50175015); 广东省自然科学基金资助项目 (011824)

作者简介: 范彦斌 (1962 年生), 男, 博士, 教授; E-mail: fanyb@fosu.edu.cn

幅 ICT 切片图像都采用从左到右, 从下到上的顺序进行计算。简化方式的轮廓计算方法如图 1 所示,

图中列出了所有可能出现情况的物体轮廓边界示意图, 其右图为其对应的灰度值图。

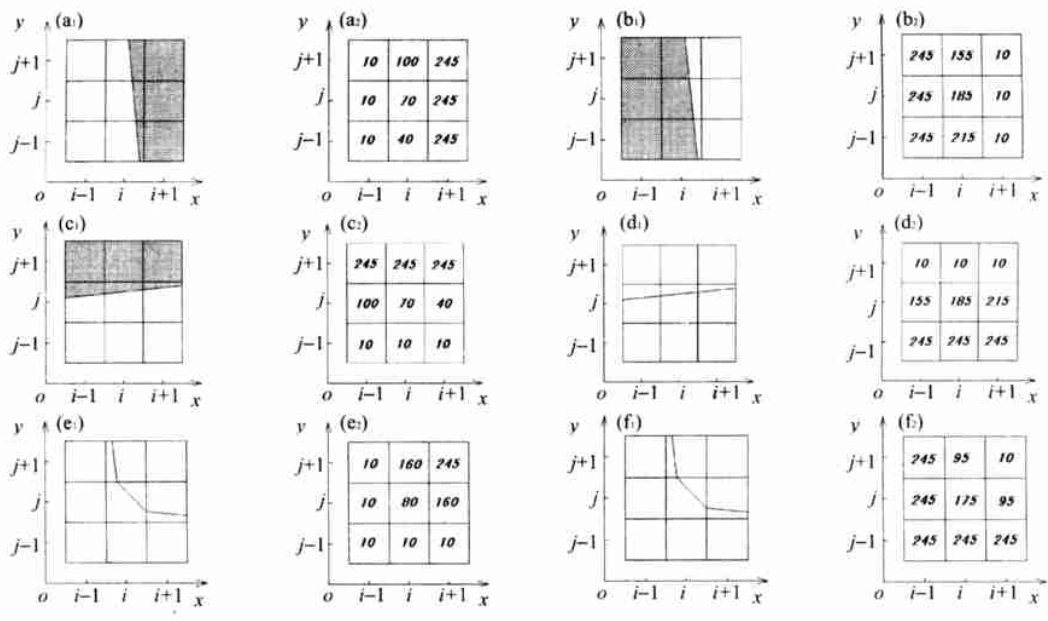


图 1 轮廓计算的分类

Fig 1 The sorting of contour computing

$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 为某物体切片按像素尺寸划分示意图

$a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ 为左图所对应的灰度值示意图

因为灰度值是处于 0 ~ 255 之间的正整数, 因此采灰度值为 128 来判断。

如图 1, e_1 所示;
或 $H_{i,j} \geq 128, H_{i+1,j} < 128, H_{i,j+1} < 128$, 如图 1, f_1 所示。

其计算公式为:

$$\begin{cases} x = i + 1 - \frac{H_{i+1,j+1} - 127.5}{H_{i+1,j+1} - H_{i,j}} \\ y = j + 1 - \frac{H_{i+1,j+1} - 127.5}{H_{i+1,j+1} - H_{i,j}} \end{cases} \quad (4)$$

(1) 若 $H_{i,j} < 128, H_{i+1,j} \geq 128, H_{i,j+1} < 128$, 如图 1, a_1 所示;
或, $H_{i,j} \geq 128, H_{i+1,j} < 128, H_{i,j+1} < 128$, 如图 1, b_1 所示。
其计算公式为:

$$\begin{cases} x = i + 1 - \frac{H_{i+1,j} - 127.5}{H_{i+1,j} - H_{i,j}} \\ y = j \end{cases} \quad (2)$$

其中, i, j 为切片中某像素的位置; $H_{i,j}$ 为像素 (i, j) 的灰度值; X, Y 为轮廓边界在像素 (i, j) 中的坐标值。

对于得到的轮廓边界数据使用一个三维数组将其保存, 数组的大小为切片图像像素数的 2 倍, 分别用来存放轮廓边界点的 x, y 值, 如轮廓边界象素点 (i, j) 的存放形式为: $A[i][j][0] = x, A[i][j][1] = y$ 。警惕同时对轮廓边界象素点进行灰度值标定, 最后对标定的像素采用轮廓跟踪方法把对应在三维数组中的轮廓数据按轮廓跟踪的顺序读取出来, 并依次保存在数据文件中, 其跟踪准则与方法见参考文献^[6,7]。

2 轮廓提取和误差分析

如图 2 左图所示为某发动机涡轮叶片的 ICT 切片, 在分辨率为 512×512 像素, 采用的单元像素面积尺寸为 $0.256 \text{ mm} \times 0.256 \text{ mm}$ 时, 对发动机涡

轮叶片分别使用改进的轮廓边界分割与提取算法和基于传统的方法（二值化方法，即对 ICT 切片进行二值化处理，当某像素灰度值小于阈值时，令其灰度值为 0；当某像素灰度值大于或等于阈值时，令其灰度值为 255）进行轮廓提取。采用改进的轮廓算法提取后的切片轮廓如图 2 右图所示，采用传统的轮廓算法提取后的切片轮廓与图 2 右图一样，二者之间的区别在于：改进的轮廓算法在进行轮廓提取时需把经判断后计算得到的数据保存下来，而传统的方法在进行轮廓提取时只需判断就可以了。采用改进的轮廓算法进行轮廓提取时，把由式（2）、（3），和（4）计算得到的数据保存在一个大小为 $512 \times 512 \times 2$ 的数组中。为了对提取的数据能够进行 NURBS 曲线拟合^[8]，在轮廓数据提取时必须按相邻的顺序把轮廓数据提取出来，其提取方法如下：

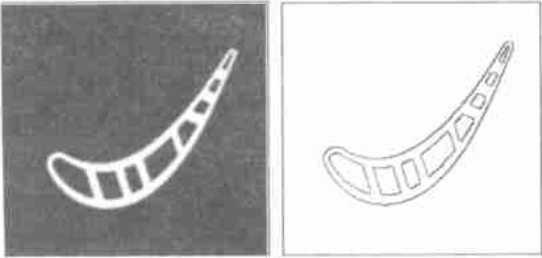


图 2 发动机叶片的切片和轮廓边界
Fig. 2 Aircraft engine blade slice and its boundary outline

（1）首先按照从左到右，从下到上的顺序探测准则进行搜索，找到的第一个黑色像素点一定是最左下方的边界像素点，记为 E_0 。因为 E_0 是切片最左下方的像素点，所以，它的左上、上、右上、右的 4 个相邻像素点中至少有一个是边界像素点，将上面 4 个方向中从左上方开始按顺时针以 45° 的角度增量找到与 E_0 为第一个相邻的边界像素点记为 E_1 。

（2）以 E_1 为原点，将 E_0 到 E_1 的方向矢量逆时针旋转 90° 后作为当前的搜索方向，因为只有在这个方向上才可能有轮廓像素点的存在。从 E_1 开始，按当前搜索方向，以顺时针方向和 45° 的角度增量找到与 E_1 为第一个相邻的边界像素点记为 E_2 。

（3）如果 E_2 与 E_0 相同，这表明已经搜索了一圈，程序运行可结束；否则从 E_2 点开始重复 2) 的方法继续寻找，直到找到与 E_0 相同的像素点为止，从而得到所有的轮廓像素点 $E_0, E_1, \dots, E_n$ ，再添上相应切片位置的 Z 坐标值且按顺序保存到数据文件中。

对基于上述两种方法提取后的边界轮廓数据进行 NURBS 曲线拟合，如图 3 所示，曲线 1 为实际轮廓曲线，曲线 2 为用传统方法进行轮廓数据提取后得到的轮廓曲线，而曲线 3 使用改进的方法得到的轮廓曲线。可见曲线 3 与曲线 1 几乎重合。对拟合后的 NURBS 曲线均匀采集 200 个数据点进行误差分析，得到其拟合误差分布如图 4 所示。

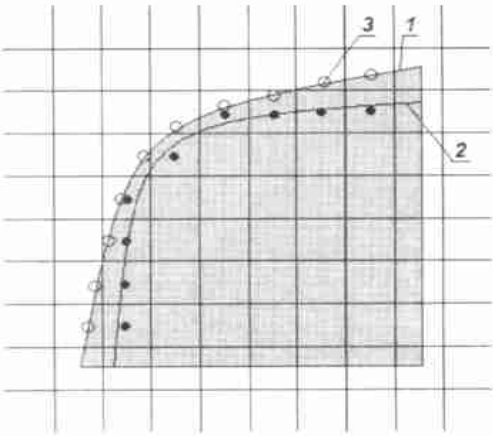


图 3 图像边界轮廓曲线
Fig. 3 Boundary outline curve of image

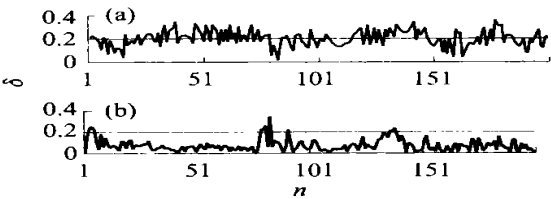


图 4 误差分布图
Fig. 4 Error distribution diagram
(a) 基于传统技术的轮廓曲线误差比较;
(b) 基于改进方法的轮廓曲线误差比较

图 4 (a) 中曲线轮廓的最大误差为 0.363 mm，最小误差为 0.019 mm，平均误差为 0.203 mm。图 4 (b) 中曲线轮廓的最大误差为 0.035 mm，最小误差为 0.0 mm，平均误差为 0.007 mm。

3 结 论

本文分别采用改进的轮廓边界分割与提取算法和基于传统的方法对航空发动机涡轮叶片的 ICT 切片图像进行了轮廓提取、曲线拟合及误差分析等方面的研究。通过分析比较，针对 ICT 切片图像的轮廓提取，本文提出的计算方法是可行的，并且具有精度成倍提高、计算速度快和计算开销少的特点。

参考文献:

[1] 李西兵, 范彦斌, 曾志新. 计算机图像处理技术在基于非接触测量反求建模中的应用[J]. 佛山科学技术学院学报, 2002(3): 14— 18.

[2] CASTLEMAN K R. Digital image processing[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 227— 229.

[3] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001: 178— 181.

[4] 王鸣鹏. 实用 CT 检查技术学[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2000: 28— 31.

[5] 高上凯. 医学成像系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 45— 49.

[6] 何斌, 马天予, 王运坚, 等. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

[7] 李兰友. Visual C++ . NET 图形图像编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[8] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 318— 325.

One of the Image Segmentation Algorithms for Digital ICT
Image Slices of Industrial Products

FAN Yan bin¹, LI Xi bing²

(1. Mechanical and Electronic Engineering Department, Foshan University, Guangdong Foshan 528000, China;
2. Mechanical Engineering Department, Qiqihar University, Heilongjiang Qiqihar 161006, China)

Abstract: It is one of the important methods to use the technology of the digital image processing and CAD for realizing a complex product redesign model based on the digital ICT (industrial computed tomography) image slices. A new algorithm for image segmentation and extracting edge information from real ICT image slices is introduced. In comparison with other methods, computer experiments are carried out and proved more efficient and accurate, and economical.

Key words: digital image processing; image segmentation; ICT

(上接第 20 页)

Study on the Dispersion of Nano-TiO₂ Powders

ZENG Yu yan^{1,2}, SHEN Pei kang¹, TONG Ye xiang²

(1. The State Key Laboratory of Optoelectronic Material Technologies //
School of Physics and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China;
2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The dispersion of nano titanium dioxide powder in various liquid media is studied. The composition used for dispersing the nano titanium dioxide powder is characterized by the combination of different solvents, surfactants and commercially available dispersants.

Key words: nano sized powder; TiO₂; dispersant; surfactant