

工业 CT 图像亚体素表面检测算法研究*

王 凯¹, 张定华¹, 赵歆波¹, 黄鹤龄², 刘 晶¹

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072 ;

2. 西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

摘要: 针对 ICT 图像序列, 研究了基于 Facet 模型和基于矩的亚体素表面检测算法, 并通过引入基于 Otsu 的阈值分割预处理环节, 大大减少了待处理体素的数目, 在很大程度上提高了原始算法的处理速度。最后在对航空发动机叶片仿真数据的实验中, 对比了算法处理效果, 结果表明两算法检测精度均可达 1/5 个像素以内, 预处理环节的引入可将原始算法速度提高约 4 倍。

关键词: 工业 CT; 亚体素表面检测; Facet 模型; 几何矩

中图分类号: TP 391.5 文献标识码: A

Research on Subvoxel Surface Detection Algorithms of ICT Images

WANG Kai¹, ZHANG Ding-hua¹, ZHAO Xin-bo¹, HUANG He-ling², LIU Jing¹

(1. The key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Xian 710072, China;

2. Northwestern Polytechnical University, Xian 710072, China)

Abstract: For ICT image sequence, two kinds of subvoxel surface detection algorithms: facet model-based method and moment-based method are studied. To solve the problem of large computation of both algorithms, a pre-processing procedure based on Otsu threshold segmentation is proposed, which can reduce the number of surface voxel candidates a lot and accelerate the original one greatly. Finally, we compare the two subvoxel edge detection algorithms in the experiment on aeroengine blade simulation data. The results show that both methods can achieve less than 1/5th pixel accuracy and the introduction of the pre-processing procedure can increase the speed about 4 times.

Key word: industrial computer tomography (ICT); subvoxel surface detection; facet model; geometric moment

引 言

工业 CT 技术作为 20 世纪 80 年代迅速发展起来并获得成功运用的一门高新技术, 由于其具有对内部结构的透视能力, 能非接触、不破坏地实现对物体内部结构与形状的测量分析, 并且具有检测速度快, 分辨率高等优点, 因此在工业界具有广泛的应用天地。然而, 在航空航天领域对产品精度要求较高, 通过提高硬件分辨率的方法来提高测量精度是不经济的和有限制的。因此我们将亚像素定位技术引入到 ICT 系统, 利用软件处理的方法来解决图像中目标的高精度定位问题。该技术利用预知的目标特征, 包括几何特征、灰度分布特征和几何与灰度耦合特征, 对图像目标

*收稿日期: 2005-06-08, *本文受自然科学基金(项目编号 50375126)和航空科学基金(项目编号 04153069)资助。

进行处理分析, 识别并确定与目标特征最吻合的位置。在此分析定位过程中采用浮点运算, 从而使精度达到像素内部, 实现对目标优于整像素精度的定位。

从 20 世纪 70 年代起就有不少专家提出了一些有效的 2-D 亚像素边缘定位方法。根据所重建的连续图像不同, 可将亚像素边缘检测方法归为两类: 一类是重建理想边缘图像, 即建立理想边缘的参数化模型, 并根据一些统计特征不变量架设理想边缘灰度分布和离散图像灰度分布之间的关系, 由不变关系建立方程可确定理想边缘的参数, 如基于矩的方法^[1,2,3]和基于局部能量的方法^[4]; 另一类是重建空间离散采样前的连续图像, 即用具有解析表达式的光滑曲面来拟合离散边缘图像的灰度分布, 并假设任何连续图像的灰度分布均可通过对离散图像的灰度分布进行曲面拟合精确重建, 利用连续图像特性即可确定亚像素边缘位置, 如 Haralick 1984 年提出的 2-D 方向导数边缘检测器^[5]。现有的 3-D 亚体素表面检测算法大多数是将 2-D 边缘检测方法直接扩展到 3-D。如: Wu Xiaogu^[6]将 Haralick 的 2-D 方向导数边缘检测器扩展到了 3-D, 通过三次多项式拟合 Facet 模型, 再根据 3-D 方向导数信息求得二阶过零点, 确定亚体素表面点位置。Luo^[7]提出了利用一、二阶空间矩拟合理想表面模型确定表面点位置、方向的方法。

对于 CT 断层图像, 由于其自身的序列连续性, 因此可以采用 3-D 亚体素表面检测算法, 充分利用相邻层的信息, 获得比 2-D 亚像素边缘检测更高的精度和更好的抗噪性。对于亚体素表面检测存在的计算量大、耗时较长的问题, 我们考虑分两步实现 ICT 图像序列的亚体素表面的快速定位。首先, 在预处理环节通过经典图像分割算子获得图像的边缘像素, 并将这些边缘像素及其邻域作为后续精定位的候选点集; 而后, 在精定位环节对前一步获得的候选点采用三维亚体素表面检测算法, 最终得到表面点的精确位置。

1 基于 Otsu

由于 3-D 亚体素表面检测算法计算复杂度高, 若要对图像中所有的体素进行处理, 时间耗费往往是让人难以忍受的。因此, 本文考虑通过缩减候选表面体素的范围, 减少待处理体素的个数, 以达到加速的目的。

最大类间方差法由 Otsu^[8]于 1978 年提出, 是引起较多关注的一种自动阈值求取方法。它是在判决分析最小二乘法原理的基础上推导出来的, 使目标类和背景类的类内方差最小、类间方差最大。本文基于这一方法进行预处理, 首先对原始切片图像采用 Otsu 方法进行阈值分割得到二值图, 再提取边缘并用结构元 (如图 1(a)) 膨胀, 若图像比较模糊, 可适当扩大结构元, 但同时增加的候选体素也会延长图像处理时间。预处理过程及最终获取的候选体素的范围如图 1 所示。

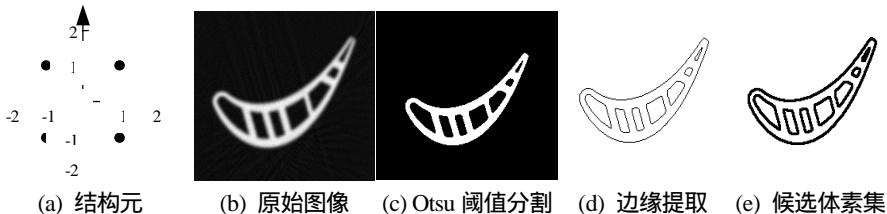


图 1. 基于 Otsu 的粗分割

2 亚体素表面精定位算法原理

2.1 基于 Facet 模型的亚体素表面检测算法

基于 Facet 模型的亚体素表面检测算法是一种曲面拟合方法, 通过计算沿灰度梯度方向上的二阶方向导数过零点获得表面点的准确位置。这里我们通过使用 Facet 模型来简化方向导数的计算。假设图像上每个 $5 \times 5 \times 5$ 的区域的灰度可表示为函数 f :

$$f(x, y, z) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4z + k_5x^2 + k_6y^2 + k_7z^2 + k_8xy + k_9xz + k_{10}yz + k_{11}xyz + k_{12}xy^2 + k_{13}xz^2 + k_{14}x^2y + k_{15}yz^2 + k_{16}x^2z + k_{17}y^2z + k_{18}x^3 + k_{19}y^3 + k_{20}z^3 \quad (1)$$

其中系数 k_1, k_2, \dots, k_{20} 可通过最小二乘拟合获得。

由于表面点发生在灰度梯度方向，因此我们只需确定沿梯度方向向表面点到体素中心的距离。为方便推导，将 f 改写为球坐标系下（公式(2)）的形式，其中参数 a, b 见图 2。

$$\begin{cases} x = r \sin b \cos a \\ y = r \sin b \sin a \\ z = r \cos b \end{cases} \quad (2)$$

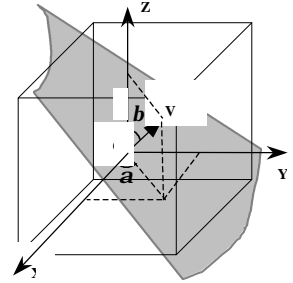


图 2. 表面体素

如果假设体素中心的坐标值为 $(0,0,0)$ ，那么 f, f', f'' 和 f''' 可表示为：

$$f_{a,b}(r) = k_1 + Ar + Br^2 + Cr^3, \quad f_{a,b}'(r)|_{r=0} = A \quad (3, 4)$$

$$f_{a,b}''(r) = 2B + 6Cr, \quad f_{a,b}'''(r) = 6C \quad (5, 6)$$

其中， $A = k_2 \sin b \cos a + k_3 \sin b \sin a + k_4 \cos b$

$$B = k_5 \sin^2 b \cos^2 a + k_6 \sin^2 b \sin^2 a + k_7 \cos^2 b + k_8 \sin^2 b \cos a \sin a + k_9 \sin b \cos a \cos b + k_{10} \sin b \sin a \cos b$$

$$C = k_{11} \sin^2 b \cos a \sin a \cos b + k_{12} \sin^3 b \cos a \sin^2 a + k_{13} \sin b \cos a \cos^2 b + k_{14} \sin^3 b \cos^2 a \sin a + k_{15} \sin b \sin a \cos^2 b + k_{16} \sin^2 b \cos^2 a \cos b + k_{17} \sin^2 b \sin^2 a \cos b + k_{18} \cos^3 a \sin^3 b + k_{19} \sin^3 b \sin^3 a + k_{20} \cos^3 b$$

根据公式(4)，可得体素中心的梯度模值和方向：

$$f_{a,b}' = \sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}, \quad \sin a = \frac{k_3}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}, \quad \cos a = \frac{k_2}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}} \quad (7, 8, 9)$$

$$\sin b = \frac{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}}, \quad \cos b = \frac{k_4}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2 + k_4^2}} \quad (10, 11)$$

根据式(4,5,6)计算出的前三阶导数，由以下准则判断是否为表面体素：

- 1) 计算 $f_{a,b}'$ ， $f_{a,b}' > T > 0$ ，当 $f_{a,b}' \leq T$ 时即认为是噪声， T 由实验确定；
- 2) 计算 $f_{a,b}'''$ ， $f_{a,b}''' < 0$ ，即定义表面点沿梯度方向二阶方向导数零交叉处是负斜坡；
- 3) 令 $f_{a,b}'' = 0$ ，求出 $\hat{r} = -\frac{B}{3C}$ ， $|\hat{r}|$ 应小于 0.5，即半个体素；

若满足以上三个条件，即可认为待处理体素是表面体素，其准确位置为：

$$\hat{x} = x_i + \hat{r} \sin b \cos a, \quad \hat{y} = y_i + \hat{r} \sin b \sin a, \quad \hat{z} = z_i + \hat{r} \cos b \quad (12)$$

其中， $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 是表面点坐标的估计值， x_i, y_i, z_i 是体素整数坐标。

2.2 基于矩的亚体素表面检测算法

基于矩的亚体素表面检测算子是一种参数化模型方法，其三维表面模型如图 3(a)。球半径为 R ，表面参数为 $(a, b, h, \mathbf{a}, \mathbf{b})$ ，其中 a 为背景灰度值， b 为对比度， h 为原点到平面的距离， \mathbf{a} 为平面法矢在 $X-Y$ 面上的投影相对于 X 轴的角度， \mathbf{b} 为平面法矢相对于 Z 轴的角度。

对于上面的理想表面模型，在实际计

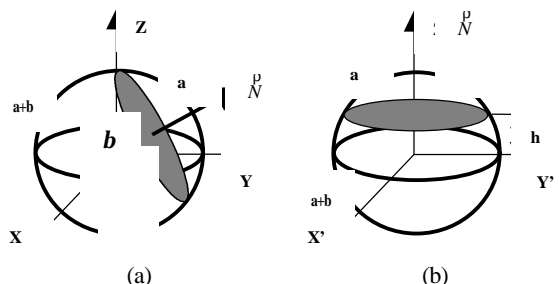


图 3. 理想表面模型: (a) 旋转前; (b) 旋转后

算模型几何矩的过程中, 为了简化问题求解, 将模型旋转至平面法矢与 Z 轴重合, 得到旋转后的新模型 (如图 3(b))。根据旋转前后几何矩的关系, 可以得到:

$$M'_{000} = M_{000} \quad (13)$$

$$M'_{100} = M_{100} \cos a \cos b + M_{010} \sin a \cos b - M_{001} \sin b \quad (14)$$

$$M'_{010} = -M_{100} \sin a + M_{010} \cos a \quad (15)$$

$$M'_{001} = M_{100} \cos a \sin b + M_{010} \sin a \sin b + M_{001} \cos b \quad (16)$$

$$M'_{002} = M_{200} \cos^2 a \sin^2 b + 2M_{110} \cos a \sin a \sin^2 b + 2M_{101} \cos a \cos b \sin b + M_{020} \sin^2 a \sin^2 b + 2M_{011} \sin a \cos b \sin b + M_{002} \cos^2 b \quad (17)$$

模型关于 Z 轴对称, 故 $M'_{100} = 0$ 和 $M'_{010} = 0$, 代入式(14, 15), 得:

$$\tan a = \frac{M_{010}}{M_{100}}, \quad \tan b = \frac{\sqrt{M_{100}^2 + M_{010}^2}}{M_{001}} \quad (18, 19)$$

下面考虑旋转后的几何矩与表面参数的关系, 根据灰度函数在相应区域的积分, 可得到以下各阶矩:

$$M'_{000} = \frac{4}{3} pR^3 a + \frac{2}{3} pR^3 b - pR^2 h b + \frac{1}{3} p h^2 b, \quad M'_{001} = \frac{1}{4} pR^4 b - \frac{1}{2} pR^2 h^2 b + \frac{1}{4} p h^4 b \quad (20, 21)$$

$$M'_{002} = \frac{4}{15} pR^5 a + \frac{2}{15} pR^5 b - \frac{1}{3} pR^2 h^3 b + \frac{1}{5} p h^5 b \quad (22)$$

由上述 $M'_{000}, M'_{001}, M'_{002}$ 三个方程和式(13, 16, 17, 18, 19)就可以将 h, b 用旋转前的各阶矩表示:

$$h = \frac{1}{4M_b^2} [(5M_{200} - R^2 M_{000}) M_{100}^2 + (5M_{020} - R^2 M_{000}) M_{010}^2 + (5M_{002} - R^2 M_{000}) M_{001}^2 + 10(M_{001} M_{010} M_{011} + M_{001} M_{100} M_{101} + M_{010} M_{100} M_{110})] \quad (23)$$

$$b = \frac{4}{p} \frac{M_b}{(R^2 - h^2)^2}, \quad M_b = \sqrt{M_{100}^2 + M_{010}^2 + M_{001}^2} \quad (24, 25)$$

对于图 3 的理想模型, 将其离散化为 $n \times n \times n$ 的三维图像, 则该区域图像的矩 M_{pqr} 可通过对图像进行模板运算获得。表 1 给出了 $5 \times 5 \times 5$ 窗口 $M_{000}, M_{100}, M_{110}, M_{200}$ 的计算模板, 其余各阶矩的模板可以通过旋转变换获得:

$$C_{010} = C_{100} \cdot M_{R_z}(90^\circ), C_{001} = C_{100} \cdot M_{R_y}(-90^\circ), C_{101} = C_{110} \cdot M_{R_y}(-90^\circ) \quad (26, 27, 28)$$

$$C_{011} = C_{110} \cdot M_{R_x}(90^\circ), C_{020} = C_{200} \cdot M_{R_z}(90^\circ), C_{002} = C_{200} \cdot M_{R_y}(-90^\circ) \quad (29, 30, 31)$$

这里绕 X, Y, Z 轴的旋转可表示为:

$$M_{R_x}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \mathbf{q} & \sin \mathbf{q} \\ 0 & -\sin \mathbf{q} & \cos \mathbf{q} \end{bmatrix} M_{R_y}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q} & 0 & \sin \mathbf{q} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \mathbf{q} & 0 & \cos \mathbf{q} \end{bmatrix} M_{R_z}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q} & \sin \mathbf{q} & 0 \\ -\sin \mathbf{q} & \cos \mathbf{q} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32, 33, 34)$$

若由式(23, 24, 25)计算出的表面参数满足:

- 1) 对比度 $b > T$, 当 $b \leq T$ 时即认为是噪声, 阈值 T 由实验确定;
- 2) 距离 h 应满足 $\frac{n}{2} h \leq 0.5$, 即半个体素。则认为待处理体素是表面体素, 其亚体素位置可通过

下式计算出:

$$\hat{x} = x_i + \frac{n}{2} h \frac{M_{100}}{M_b}, \quad \hat{y} = y_i + \frac{n}{2} h \frac{M_{010}}{M_b}, \quad \hat{z} = z_i + \frac{n}{2} h \frac{M_{001}}{M_b} \quad (35)$$

其中, $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 为表面点亚体素坐标, x_i, y_i, z_i 为体素中心整数坐标。

表 1.5 5 5 采样窗的四个模板

.0000 02260 07873 02260 00000	-00000 -00666 00000 00666 00000	.00000 00430 00000 -00430 -00000	.00000 00207 00097 00207 00000
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	.00430 04338 00000 -04338 -00430	.00954 04760 00621 04760 00954
.07873 47815 61364 47815 07873	-05254 -18221 00000 18221 05254	.00000 00000 00000 00000 00000	.03396 07556 00804 07556 03396
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	-00430 -04338 00000 04338 00430	.00954 04760 00621 04760 00954
.00000 02260 07873 02260 00000	-00000 -00666 00000 00666 00000	-00000 -00430 00000 00430 00000	.00000 00207 00097 00207 00000
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	.00950 08486 00000 -08486 -00950	.00954 04760 00621 04760 00954
.32365 63938 64000 63938 32365	-23323 -25452 00000 25452 23323	.08486 10295 00000 -10295 -08486	.16925 11149 00846 11149 16925
.47815 64000 64000 64000 47815	-35944 -25488 00000 25488 35944	.00000 00000 00000 00000 00000	.27814 11171 00846 11171 27814
.32365 63938 64000 63938 32365	-23323 -25452 00000 25452 23323	-08486 -10295 00000 10295 08486	.16925 11149 00846 11149 16925
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	-00950 -08486 00000 08486 00950	.00954 04760 00621 04760 00954
.07873 47815 61685 47815 07873	-05254 -18221 00000 18221 05254	.03498 13615 00000 -13615 -03498	.03525 07556 00804 07556 03525
.47815 64000 64000 64000 47815	-35944 -25488 00000 25488 35944	.13615 10316 00000 -10316 -13615	.27814 11171 00846 11171 27814
.61685 64000 64000 64000 61685	-49203 -25488 00000 25488 49203	.00000 00000 00000 00000 00000	.40011 11171 00846 11171 40011
.47815 64000 64000 64000 47815	-35944 -25488 00000 25488 35944	-13615 -10316 00000 10316 13615	.27814 11171 00846 11171 27814
.07873 47815 61685 47815 07873	-05254 -18221 00000 18221 05254	-03498 -13615 00000 13615 03498	.03525 07556 00804 07556 03525
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	.00950 08486 00000 -08486 -00950	.00954 04760 00621 04760 00954
.32365 63938 64000 63938 32365	-23323 -25452 00000 25452 23323	.08486 10295 00000 -10295 -08486	.16925 11149 00846 11149 16925
.47815 64000 64000 64000 47815	-35944 -25488 00000 25488 35944	.00000 00000 00000 00000 00000	.27814 11171 00846 11171 27814
.32365 63938 64000 63938 32365	-23323 -25452 00000 25452 23323	-08486 -10295 00000 10295 08486	.16925 11149 00846 11149 16925
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	-00950 -08486 00000 08486 00950	.00954 04760 00621 04760 00954
.00000 02260 07873 02260 00000	-00000 -00666 00000 00666 00000	.00000 00430 00000 -00430 -00000	.00000 00207 00097 00207 00000
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	.00430 04338 00000 -04338 -00430	.00954 04760 00621 04760 00954
.07873 47815 61364 47815 07873	-05254 -18221 00000 18221 05254	.00000 00000 00000 00000 00000	.03396 07556 00804 07556 03396
.02260 32365 47815 32365 02260	-01466 -11920 00000 11920 01466	-00430 -04338 00000 04338 00430	.00954 04760 00621 04760 00954
.00000 02260 07873 02260 00000	-00000 -00666 00000 00666 00000	-00000 -00430 00000 00430 00000	.00000 00207 00097 00207 00000

C000

C100

C110

C200

3 实验及结果

实验针对 UG 建模获得的航空发动机空心涡轮叶片 CAD 模型, 采用自主开发的体积 CT 仿真系统获取二维切片图像序列, 再用上述算法对切片序列 412 幅图像进行处理, 最后对处理结果进行精度和速度分析。

图 4 为抽取第 227 层 CT 切片图像, 采用 Otsu 算法^[8]、3-D Facet 模型算法和 3-D 矩算法处理结果的对比图。从图中易见, 像素级精度的 Otsu 算法所得到的边缘在曲率小的地方会变成一条直线, 轮廓呈锯齿状, 而 3-D Facet 模型算法和 3-D 矩算法克服了以上问题, 轮廓较为光滑。

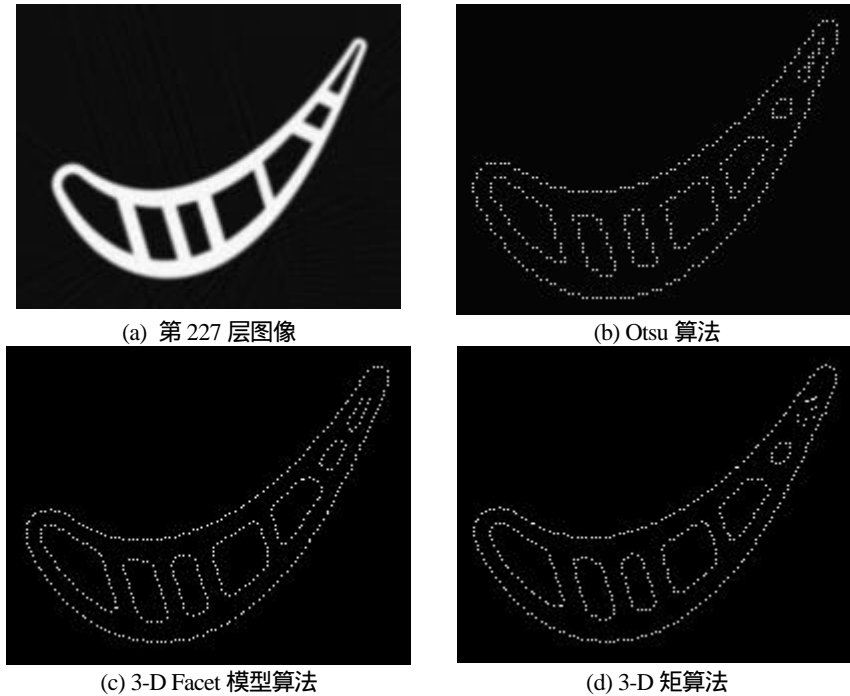


图 4. 不同算法处理结果比较

表 2 为对 412 幅序列图像采用 Otsu 算法、加速前后的 3-D Facet 模型算法、加速前后的 3-D 矩算法处理的精度和速度结果对比。其中误差定义为 412 幅切片图像提取出的表面点到原始 CAD

模型的平均距离:
$$Err = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (36)$$

其中, D_i 为输出的轮廓链上第 i 个点到 CAD 模型表面的距离。

4 结论

本文以 ICT 切片图像序列为研究对象, 通过引入三维亚体素表面检测算法, 并结合基于 Otsu 的阈值分割预处理环节, 可以快速精确地获得表面亚体素位置。最后通过对航空发动机叶片 CT 仿真图像序列的检测验证了算法的有效性。

表 2. 算法性能比较

<i>Algorithms</i>	<i>Error/pixel</i>	<i>Time/sec.</i>
Otsu 算法	0.492871	0.4215
原始 3-D Facet 模型算法	0.104261	20.1264
加速后 3-D Facet 模型算法	0.104261	5.4528
原始 3-D 矩算法	0.142101	16.4529
加速后 3-D 矩算法	0.142101	4.2540

注: 算法在 P4 2.8GHz 处理器下, 对 412 幅 512 512 的 16 位 TIFF 图像进行处理。

参考文献:

- [1] Tabatai A J, Mitchell O R. Edge location to subpixel values in digital imagery [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6: 188-201.
- [2] Lyvers E P, Mitchell O R. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11: 1293-1309.
- [3] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operator for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26 (2): 295-306.
- [4] Kisworo M, Venkatesh S. Modeling edges at subpixel accuracy using the local energy approach[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16: 405-410.
- [5] 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.
- [6] Wu Xiaogu, Wee W G. Surface detection with subvoxel accuracy using 3-D directional derivatives [A]. First Image Registration Workshop[C]. Greenbelt, USA, 1997.
- [7] Luo L, Coatrieux J L, Hamitouche C. A moment-based three-dimensional edge operator [A]. Twelfth Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society[C]. Philadelphia, USA, 1990.
- [8] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9: 62-66.

作者简介: 王 凯 (1980-), 女, 汉族, 陕西省西安市, 西北工业大学机电学院, 博士研究生, 主要从事工业 CT、计算机图形图像处理方面的研究。