

工业 CT 图像管道拟合

邹斌^{1,2}, 曾理^{1,2}, 马睿^{1,2}

ZOU Bin^{1,2}, ZENG Li^{1,2}, MA Rui^{1,2}

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

1.ICT Research Center, Key Lab of Optoelectronic Technology and System of MOE, Chongqing University, Chongqing 400044, China

2.College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China

E-mail: drlizeng@hotmail.com

ZOU Bin, ZENG Li, MA Rui. Fitting of industrial CT image pipes. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(11): 208-210.

Abstract: A fitting of industrial CT image sequences work's pipes is studied. Based on edge extraction of Facet model, this method makes three-dimensional cylindrical, elliptical cylindrical pipe fittings be turned into the central axis of the cross-section of two-dimensional curve(circle or ellipse) fittings. Compared with the traditional three-dimensional surface fitting, it is more efficient. Test of the actual engine CT images shows that this method can be used for the acquisition of pipelines' geometric parameters based on industrial CT images, so this method lays the foundation for reverse engineering based on ICT images.

Key words: industrial CT; Facet edge extraction; reverse; pipeline; image fitting

摘要:研究了工业 CT 图像序列中工件内部管道的拟合方法。在利用 Facet 模型提取管道边缘的基础上,将三维圆柱面、椭圆柱面管道的拟合转化为中心轴截面上的二维轮廓曲线圆、椭圆的拟合,与传统的三维曲面拟合相比,效率更高。通过对实际的发动机工业 CT 图像进行实验,结果表明该方法可以较准确地获取工件内部管道的几何参数,为基于工业 CT 的逆向工程打下基础。

关键词:工业 CT; Facet 边缘提取; 逆向; 管道; 图像拟合

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2010.11.063 **文章编号:**1002-8331(2010)11-0208-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391

1 引言

在 CAD/CAM(计算机辅助设计/计算机辅助制造)领域,随着科学技术及信息产业化的高速发展,传统的生产模式已发生了根本性的变化,直接对实物产品进行数字化、造型和设计的逆向工程技术成为研究热点^[1]。在逆向工程技术的诸多数字化方法中,工业 CT(Industrial Computerized Tomography, ICT)测量技术优越于其他技术的特点就在于它能够无损地提供实物复杂的内部结构,更有利于逆求出实物完整的几何参数。许多机械部件中含有管道,如圆柱和椭圆柱等,机械部件中管道的反求建模不同于一般自由表面重建,不宜采用自由曲面拟合计算获取表面模型,而是希望获得这些管道的几何参数,最后建立起具有特征意义的数字模型,供机械零件的 CAD/CAM 等使用。因此,机械部件中管道的拟合为整个部件的 CAD 建模打下了基础。

传统的曲面拟合方法,一般采用 Lukács^[2]提出的给定类型的二次曲面拟合方法,以逼近真实距离的“可信”距离平方和为目标函数进行迭代求解,这种方法使用的是局部优化技术,因

此需预先给定接近真值的几何参数预估值,而这个预估值很难给出,可靠性很低且迭代次数过多,收敛过慢。而该文的方法将三维圆柱面、椭圆柱面管道的拟合转化为中心轴截面上的二维轮廓曲线圆、椭圆的拟合,与传统的三维曲面拟合方法相比,效率更高。

获取实物的特征参数基于的是其形状信息,而 ICT 图像的轮廓正是结构形状的最好体现,所以提取边缘数据既是逆求的首要工作也是非常关键的一步。在诸多边缘检测算法中,基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法充分利用了相邻点的信息,具有抗噪能力强、定位精度高等优点,因此研究了基于 Facet 模型的边缘检测算法来提取各层 ICT 图像的边缘,然后采用 Freeman 链码跟踪法提取管道在各层 ICT 图像的二维轮廓(近似于圆或椭圆)并求取它们的质心,再通过质心拟合出中心轴并得到管道在垂直于中心轴截面上的模拟投影数据,最后采用最小二乘拟合圆算法或椭圆直接拟合算法来拟合出管道在中心轴截面上的圆和椭圆,即得到了圆柱和椭圆柱管道的各种几何参数。

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60672098);国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA04Z104)。

作者简介:邹斌(1984-),男,硕士研究生,研究方向:计算机图像处理算法与软件;曾理(1959-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向:图像处理;马睿(1982-),女,硕士,研究方向:图像处理。

收稿日期:2008-10-06 **修回日期:**2008-12-22

2 基于 Facet 模型的亚像素边缘检测算法

Facet 模型是由 Robert M. Haralick^[3]于 1984 年首先提出的, 假定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, Haralick 称这样的一个区域为一个 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。对一幅图像而言, 它可以用若干个相互连接着的 Facet 来近似。

2D Facet 模型利用当前像素 2D 邻域中的灰度值拟合二元三次多项式, 记为:

$$f(x, y) = k_1 + k_2x + k_3y + k_4x^2 + k_5xy + k_6y^2 + k_7xy^2 + k_8x^2y + k_9x^3 + k_{10}y^3 \quad (1)$$

这里的 x, y 分别表示像素在长、宽方向上的坐标。2D 邻域可以取为 5×5 像素集, 通过该 5×5 数据集用最小二乘法拟合上式, 求得待定系数 k_1, k_2, \dots, k_{10} 。

用 Facet 模型进行边缘检测是先对原始图像作正交多项式最佳曲面拟合, 然后根据多项式的一、二、三阶导数确定边缘像素并进一步定位亚像素边缘位置。

为了推导, 将上述的 2D Facet 模型改写为极坐标形式, 令

$$\begin{cases} x = \rho \sin \alpha \\ y = \rho \cos \alpha \end{cases}, \text{代入式(1)有:}$$

$$\begin{aligned} f_a(\rho) = & k_1 + (k_2 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha)\rho + (k_4 \sin^2 \alpha + k_5 \sin \alpha \cos \alpha + \\ & k_6 \cos^2 \alpha)\rho^2 + (k_7 \sin^3 \alpha + k_8 \sin^2 \alpha \cos \alpha + \\ & k_9 \sin \alpha \cos^2 \alpha + k_{10} \cos^3 \alpha)\rho^3 \end{aligned} \quad (2)$$

极坐标形式下多项式的一、二、三阶导数分别为:

$$\begin{aligned} f'_a(\rho) &= (k_2 \sin \alpha + k_3 \cos \alpha) + A\rho + B\rho^2 \\ f''_a(\rho) &= A + 2B\rho \\ f'''_a(\rho) &= B \end{aligned} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} A &= 2(k_4 \sin^2 \alpha + k_5 \sin \alpha \cos \alpha + k_6 \cos^2 \alpha) \\ B &= 3(k_7 \sin^3 \alpha + k_8 \sin^2 \alpha \cos \alpha + k_9 \sin \alpha \cos^2 \alpha + k_{10} \cos^3 \alpha) \end{aligned}$$

可以通过 $f'_a(\rho)$ 得出。通过求 $f'_a(\rho)|_{\rho=0}$ 最大值, 可得梯度方向:

$$\sin \alpha = \frac{k_2}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}} \quad \cos \alpha = \frac{k_3}{\sqrt{k_2^2 + k_3^2}}$$

梯度模值为:

$$f'_a(\rho) = \sqrt{k_2^2 + k_3^2}$$

计算 $f_a(\rho)$ 前三阶导数 $f'_a(\rho), f''_a(\rho), f'''_a(\rho)$, 由以下准则判断是否为边缘像素:

(1) 计算 $f'_a(\rho), f'_a(\rho) \neq 0$, 且必须大于阈值 T , T 由实验而定;

(2) 计算 $f''_a(\rho), f''_a(\rho)$ 应小于 0;

(3) 令 $f''_a(\rho) = 0$, 求出 $\rho = -\frac{A}{B}$, $|\hat{\rho}|$ 应小于 0.5, 即为半个像素。

如果满足以上 3 个条件, 即可认为待处理像素是边缘像素, 其准确位置可以通过下式计算出:

$$\begin{cases} \hat{x} = x_i + \hat{\rho} \sin \alpha \\ \hat{y} = y_i + \hat{\rho} \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

式中, \hat{x}, \hat{y} 是边缘点坐标的估计值, x_i, y_i 是像素整数坐标。

利用 Facet 模型, 获得工业 CT 图像序列的各层切片边缘点, 具有定位准确, 抗噪能力强等特点。

3 管道的拟合

3.1 管道中心轴矢量的获取

在得到 ICT 图像序列的边缘图像之后, 采用 Freeman 链码跟踪法^[4]得到管道在各层切片的二维轮廓边缘点, 二维轮廓的质心即可表示为:

$$\begin{cases} \bar{x}_i = \frac{1}{N} x_{ij} \\ \bar{y}_i = \frac{1}{N} y_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

其中 \bar{x}_i, \bar{y}_i 分别为图像序列中第 i 张切片的管道二维轮廓质心的行、列坐标。 x_{ij}, y_{ij} 为该序列图像跟踪后的管道边缘点的行、列坐标。采用空间直线最小二乘平均直线方程^[5]来表示中心轴方程, 方程如下:

$$\begin{cases} x = a_1 + b_1 z \\ y = a_2 + b_2 z \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$a_1 = \frac{\sum z_i^2 \sum x_i - \sum x_i z_i \sum z_i}{(n+1) \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2}$$

$$a_2 = \frac{\sum z_i^2 \sum y_i - \sum y_i z_i \sum z_i}{(n+1) \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2}$$

$$b_1 = \frac{(n+1) \sum x_i z_i - \sum x_i \sum z_i}{(n+1) \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2}$$

$$b_2 = \frac{(n+1) \sum y_i z_i - \sum y_i \sum z_i}{(n+1) \sum z_i^2 - (\sum z_i)^2}$$

其中 x_i, y_i, z_i 为空间直线的 N 个采样点的坐标, 在文中将各图像跟踪后的管道质心坐标代入式(6)即可以得到中心轴矢量。

3.2 管道旋转

得到管道的轴向矢量后, 可以得到中心轴与 $x-y$ 平面的夹角 θ 。如让 $x-y$ 平面与中心轴垂直, 只需中心轴向 Z 轴方向旋转 θ 的余角即可。设定旋转轴为同时与中心轴与中心轴在 $x-y$ 平面的投影相交垂直的直线, 于是由空间坐标旋转公式得到管道边缘点在旋转之后坐标为:

$$(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}) = [x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} a_x^2(1-\sin\theta) + \sin\theta & a_x a_y(1-\sin\theta) + a_x \cos\theta & a_x a_z(1-\sin\theta) - a_x \cos\theta \\ a_x a_y(1-\sin\theta) - a_x \cos\theta & a_y^2(1-\sin\theta) + \sin\theta & a_y a_z(1-\sin\theta) + a_y \cos\theta \\ a_x a_z(1-\sin\theta) + a_x \cos\theta & a_y a_z(1-\sin\theta) - a_y \cos\theta & a_z^2(1-\sin\theta) + \sin\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $\mathbf{A} = (a_x, a_y, a_z)$ 为旋转轴的单位矢量; (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 为图像序列号为 i , 跟踪后边缘点的空间坐标; $(x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij})$ 为该边缘点在旋转变换后的坐标值。

3.3 二维曲线的拟合

通过文献[6]可以得到: 若已得截平面, 其法矢与管道的轴矢量平行, 若管道为理想圆柱面、椭圆柱面等, 则截平面与管

道的截交线必为圆、椭圆等,且管道上每一点在截平面上的投影点必落在截交圆、截交椭圆之上。获取管道上所有的边缘点在旋转变换后的坐标值后,将所有的边缘点投影到 $x-y$ 平面上,则它们的投影应在一个圆或者椭圆的附近。对于截交圆和截交椭圆,分别采用文献[7]和文献[8]给出的算法来拟合。文献[7]给出了一种最小二乘拟合圆算法,通过该算法能够准确得到拟合圆的圆心和半径。文献[8]给出了一种直接拟合椭圆的算法,通过该算法能够得到椭圆的各个参数,再结合中心轴矢量,可获得圆柱或椭圆柱的几何参数。通过以上方法,可避免个别边缘点定位不准的影响,而且效率较高。

4 实验及结果

为了验证文中的三维曲面拟合算法,对实际的工业 CT 图像进行实验,选取发动机切片序列^①的前 108 张图像;图 1 显示的为前 9 张图像,对发动机内部部分圆柱面、椭圆柱面进行拟合。首先对所有切片采用基于 Facet 模型的边缘检测算法提取整幅图的边缘,得到边缘图序列;图 2 显示的为前 9 张切片图像的边缘图。其次用 Freeman 链表跟踪法分离管道目标的边缘;图 3 显示的为第 1 张切片跟踪后的目标图像;图 4 为跟踪后目标图像附到原图的效果图。最后采用文中的方法拟合出圆柱面管道和椭圆柱面管道,如图 5;图 6 为将拟合的管道放入发动机三维图像中的效果图。表 1 给出了拟合的管道各个参数。

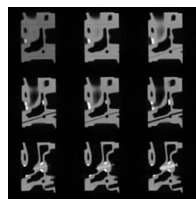


图1 发动机的前9张切片

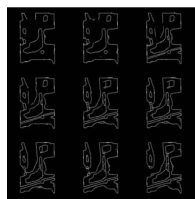


图2 前9张切片边缘

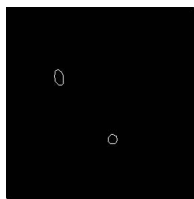


图3 采用 Freeman 跟踪法搜索出目标



图4 目标边缘附到原图

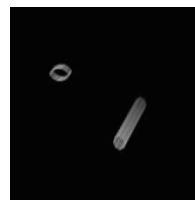


图5 拟合的圆柱、椭圆柱管道

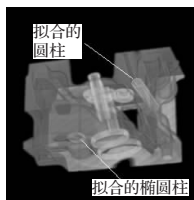


图6 将拟合好的管道放入发动机三维图像中效果图

表1 重构管道柱面的几何参数 像素

	轴向矢量		半径	
圆柱面	(0.003 5, 0.008 3, 1)		6.262 3	
椭圆柱面	(0.114, 0, 0.993)		长轴	短轴
			12.283	2.098 3

5 结论

研究了一种三维管道的拟合方法,并将其应用于实际工业 CT 图像中,实验结果表明该方法能较准确地测量管道的几何参数。在该方法中,基于 Facet 模型的边缘检测算法不仅能提取更接近实际物体的轮廓边缘,而且抗噪声能力强,能提供高精度的边缘数据。再采用 Freeman 链表跟踪法将管道分离出目标边缘点,最后根据特定类型曲面(圆柱面、椭圆柱面)的几何性质,采用截面投影拟合的方法求解其几何参数。在计算过程中使用到了所有测量数据点的位置信息,可以较准确地估算三维管道的几何参数,为基于 ICT 的逆向工程打下基础。

参考文献:

- [1] 金涛,童水光.逆向工程技术[M].北京:机械工业出版社,2003:129-158.
- [2] Lukács G, Marshall A D, Martin R R. Faithful least squares fitting of spheres, cylinders, cones, and tori for reliable segmentation[C]// Proc of 5th European Conf on Computer Vision (ECCV'98), 1998: 671-686.
- [3] Haralick R M. Digital step edges form zero crossing of second directional derivatives[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 26(2): 211-229.
- [4] 何斌. Visual C++ 数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 386-393.
- [5] GB/T 11336-04 中国国家标准: 直线度误差检测[S]. 2004.
- [6] 曲学军. 基于表面法矢的散乱数据分割与几何特征提取[J]. 机械学报, 2007, 43(9): 228-234.
- [7] 刘志刚, 鲍加贞, 汤时虎. 基于 VC 的最小二乘拟合圆在 LAMOST 中的应用[J]. 现代制造工程, 2008(1): 94-96.
- [8] 陈基伟. 椭圆直接拟合算法研究[J]. 工程勘察, 2007(6): 49-51.
- [9] 曲学军, 杨亚文, 韩志仁. 基于散乱数据表面法矢的二次曲面拟合[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 1018-1023.

(上接 207 页)

的动态负荷协调优化控制方法。根据建立的房间负荷与各支路流量的关系模型,求得各支路流量,并以此为依据推算出各支路的水力失调度。由水力失调度的大小确定了最不利支路的位置,并通过水系统的系统流量调节和动态优化函数实现了对水泵和调节阀的协调优化控制。通过上述分析可知:该协调优化方法相比于传统的水泵变频控制方法而言,水泵能耗平均低 21% 左右。这不仅可以改善各管路水力的稳定性,而且还能最大限度地提高变频控制系统的节能效果。

参考文献:

- [1] 李建兴,涂光备,涂岱昕.多泵并联水系统的技术经济分析[J].流体机械,2004,32(10):38-41.
- [2] 姚国梁.空调变频水泵节能问题探讨[J].暖通空调,2004,34(6):32-34.
- [3] Lu Lu, Cai Wenjian, Xie Lihua, et al. HVAC system optimization—in-building section[J]. Energy and Buildings, 2005, 37: 11-22.
- [4] 哈尔滨建筑工程大学. 供热工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
- [5] 中国有色工程设计研究总院. GB50019-2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.