

# 用形状分布识别圆环体

马元魁, 张树生, 白晓亮, 范海涛

MA Yuan-kui, ZHANG Shu-sheng, BAI Xiao-liang, FAN Hai-tao

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

The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

E-mail: yuankuima@126.com

MA Yuan-kui, ZHANG Shu-sheng, BAI Xiao-liang, et al. Torus recognition based on shape distributions. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(34): 10-12.

**Abstract:** Torus and its parameters recognition algorithm based on shape distributions and minimum oriented bounding box is given. Firstly, the basic voxel is normalized by constructing its minimum oriented bounding box. Secondly, its D2 shape distribution curve is constructed, and the values of Earth Mover's Distance (EMD) compared with the corresponding curves of the normal sphere and circle respectively and the corresponding radii of the tube are computed. Finally, the radii are compared and the parameters can be obtained by the bounding box. This algorithm need not interactive manipulation and has a strong antinoise ability to recognize the basic voxel with small changes of shape.

**Key words:** reverse engineering; feature recognition; torus; shape distribution

**摘 要:**给出了一种结合最小有向包围盒以及形状分布的识别圆环体及其参数的算法。首先建立基本体素的最小有向包围盒,对体素进行标准化;然后生成其 D2 形状分布曲线,计算此曲线分别与标准球体形状分布曲线、标准圆形状分布曲线的 EMD(Earth Mover's Distance)值以及相应的副半径;最后通过比较两个副半径的大小来判断此体素是否为圆环体,并由最小有向包围盒的边长给出圆环体的参数。该算法不需要任何交互操作,而且能够识别发生一定外形改变的圆环体,抗噪能力强。

**关键词:**逆向工程;体素识别;圆环体;形状分布

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.34.004 **文章编号:** 1002-8331(2009)34-0010-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391.72

在基于“体”的逆向工程特征建模中,体素识别是进行模型重构的依据和桥梁。随着基于特征的逆向工程技术的出现,基于测量点的特征识别技术的研究越来越受到关注,研究人员主要采用的方法为神经网络方法。文献[1-2]采用神经网络方法分别实现了 5 种和 9 种常见特征识别,神经网络特征识别方法避免了复杂搜索匹配过程,具有训练学习功能,但是神经网络方法处理逆向工程特征识别也有明显的缺点。在实际处理中,零件往往会出现磨损和缺口。神经网络方法尚未解决非完整几何特征的识别问题,在处理带有倒角、倒圆等加工特征的识别时,神经网络方法在特征定义与代码化的前处理过程方面比较复杂,特征类别的扩展性差。

圆环体是实体几何造型系统中的基本体素之一,在几何造型和工程实际中都有着广泛的应用。文献[3]给出了一种求解最小二乘拟合模型的圆环特征参数提取算法,该算法需要设定初始值进行迭代运算,且对初始值比较敏感。给出了一种结合最小有向包围盒以及形状分布的识别圆环及其参数的算法,该算

法不需要任何交互操作,抗噪能力强,对于发生了外形改变的圆环,该算法也能做到一定程度的识别。

形状分布算法<sup>[4]</sup>是一种用于计算三维实体随机(可能是退化的)形状信号的方法,目的是对三维实体相似性进行简单而有效的度量。其主要思想是通过形状函数测量三维实体,即采用实体表面随机采样点间的几何属性(距离、角度等)的概率分布作为形状比较的基础,通过计算概率分布曲线之间的函数距离,做出相似性判定。提供了一个非常有用的三维形状区分器,非常适合作为识别或相似性检索系统的预分类器。采用 D2 形状分布函数,即对随机点对之间的欧氏距离进行统计,得到体素的形状分布曲线(或直方图),利用 EMD(Earth Mover's Distance)距离函数<sup>[5]</sup>来衡量两条曲线的相似性程度,达到对基本体素进行分类的目的。

## 1 标准圆环体 D2 形状分布曲线生成

假设算法输入  $R+r=5\text{ mm}$ , 且以  $z$  轴为对称轴,以坐标原点

**基金项目:**国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60573177);陕西省教育厅专项基金项目(No.09JK491)。

**作者简介:**马元魁(1980-),女,博士研究生,主要研究方向为计算机辅助几何设计、计算机图形学与逆向工程;张树生(1956-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为 CAD & CG、图形图像处理与逆向工程;白晓亮(1975-),男,博士,讲师,主要研究方向为计算机图形学、逆向工程、CAD/CAM;范海涛(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为计算机图形学、逆向工程、CAD/CAM。

**收稿日期:** 2009-09-07

**修回日期:** 2009-10-12

为中心,建立的空间直角坐标系下的标准圆环体。本算法的输出为 D2 形状分布曲线。

标准基本几何体素 D2 形状分布曲线生成的步骤可分为 3 步:(1)标准曲面上随机取点;(2)计算随机点对之间的距离;(3)构建形状分布曲线。

圆环体可以看作是由小圆  $C$  绕主轴  $z$  旋转一周得到的(如图 1),其中圆  $C$  的圆心运动轨迹圆  $D$  被称为圆环体的大圆,大小圆的半径分别为  $R$ (主半径)和  $r$ (副半径)。当主半径为零时,圆环体退化为球体,当副半径为零时,圆环体退化为  $xOy$  平面内的圆。

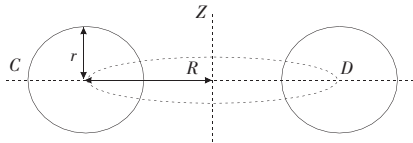


图1 圆环体截面图

圆环体的参数方程

$$\begin{cases} x=(R+r\cos\varphi)\cos\theta \\ y=(R+r\cos\varphi)\sin\theta \\ z=r\sin\varphi \end{cases} \quad \begin{matrix} 0\leq\theta\leq 2\pi \\ 0\leq\varphi\leq 2\pi \end{matrix} \quad (1)$$

所以随机取点过程可分为两个步骤:(1)随机选取大圆圆心角  $\theta\in(0,2\pi)$ ;(2)在随机选取的大圆圆心角处选取小圆圆心角  $\varphi\in(0,2\pi)$ 。

由圆环面积  $s$  与小圆圆心角  $\varphi$  之间的函数关系

$$s=r\theta(R\varphi+r\sin\varphi)$$

知  $\theta$  取定时,  $s$  与  $\varphi$  不成正比, 所以不能随机选取小圆圆心角  $\varphi\in(0,2\pi)$ 。而是令

$$\frac{R\varphi+r\sin\varphi}{2\pi R}=P$$

其中  $P$  为随机数  $P\in(0,1)$ , 所以由蒙特卡罗方法随机选取  $P\in(0,1)$ , 从方程  $R\varphi+r\sin\varphi=2\pi RP$  中解出  $\varphi$ , 得到  $\varphi$  的随机值。

当圆环体的大小圆圆心角取定以后, 利用式(1)即可得到随机点的坐标  $(x_0, y_0, z_0)$ 。

对于曲面上随机取到的两个点, 采用 D2 形状分布函数<sup>[4]</sup>, 即如下计算其距离(即欧式距离):

$$d^2=(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2$$

采用统计理论对随机信号进行参数化。由文献[4], 对随机点对之间的距离值进行统计, 需要对形状分布直方图的尺度进行归一化。按照大量 D2 距离的平均值对尺度自由度进行归一化: 首先计算大量采样得到的 D2 距离的平均值, 以 D2 距离的平均值的 1/50 作为区间长度, 然后计算落在每个区间内的 D2 距离个数, 以横轴表示距离值, 纵轴表示出现某一距离值的概率, 构建形状分布直方图(见图 2), 通过对形状分布直方图的

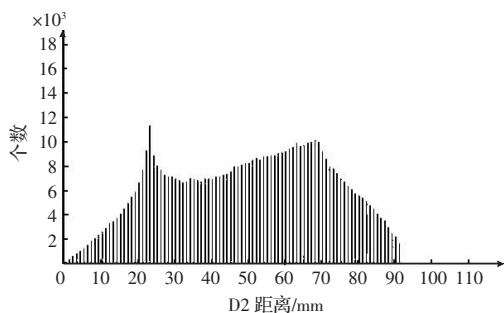


图2  $R=3.75, r=1.25$  的圆环形状分布直方图

拟合形成形状分布曲线(见图 3)。由此把一个三维实体模型参数化成了一个形状分布直方图(离散的)或形状分布曲线图(连续的)。

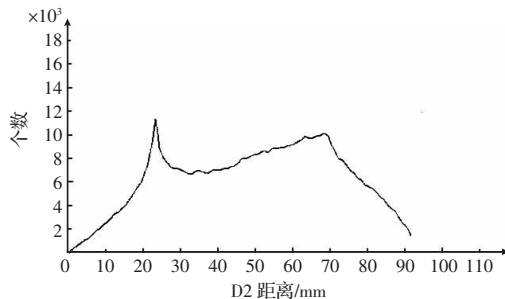


图3  $R=3.75, r=1.25$  的圆环形状分布曲线

## 2 标准圆环体副半径与 EMD 距离值的关系

形状分布图的比较是基本体素分类的关键, 通过比较两个或多个体素模型的形状分布图对基本体素进行自动分类。形状分布图的比较结果采用体素模型之间的距离来衡量。距离越大, 体素模型之间的差别越大。两个分布之间的距离包括 Minkowski 距离、 $\chi^2$  统计距离、二次距离等。该文采用的是 EMD 距离。

EMD 距离<sup>[5]</sup>是一种有效的且被广泛使用的计算集合间或向量间距离的方式。它能只通过一次线性规划计算出两个具有不等(或相等)权值分布的不同(或相同)大小的集合或向量的距离。其主要思想是: 空间  $S$  中分布着  $m$  堆土  $p_i, i=1, 2, \dots, m$ , 每堆土的质量为  $w_{p_i}$ , 同时分布有  $n$  个土坑  $q_j, j=1, 2, \dots, n$ , 每个坑可以装土的质量为  $w_{q_j}$ 。现把所有土填到这些坑内, 寻求需要做功的最小值。由此, 把其中一个体素模型的形状分布映射成土堆, 另一个体素模型的形状分布映射成土坑, 就把体素模型的相似性度量问题转化成了计算 EMD 的问题。

当圆环主半径为零时, 圆环体退化为球体, 当圆环副半径为零时, 圆环体退化为  $xOy$  平面内的圆, 所以标准圆环体可以看作是标准球体和标准圆的中间状态。设定标准球体( $R=0$  mm,  $r=5$  mm)和标准圆( $R=5$  mm,  $r=0$  mm), 在 0~2.5 mm 之间按照步长值 0.25 采样取值建立标准圆环体模型, 首先由标准圆环体 D2 形状分布曲线生成算法得到一系列的圆环体形状分布曲线, 其次计算这一系列形状分布曲线与标准体素库中标准球体形状分布曲线和标准圆形状分布曲线的 EMD 函数距离值:  $EMD_1$  和  $EMD_2$ , 如表 1。

表1 标准圆环副半径查询表 mm

$r$	$EMD_1$	$EMD_2$	$r$	$EMD_1$	$EMD_2$
0	0.510 844	0	1.50	0.357 944	0.624 429
0.25	0.497 302	0.156 050	1.75	0.366 841	0.672 236
0.50	0.445 435	0.263 022	2.00	0.368 356	0.685 596
0.75	0.418 428	0.363 872	2.25	0.361 597	0.678 950
1.00	0.392 644	0.459 378	2.50	0.305 802	0.664 264
1.25	0.369 468	0.550 213			

然后, 如图 4 建立采样圆环体副半径与  $EMD_1$  和  $EMD_2$  的关系。

可以发现, 随着圆环体的副半径  $r$  的逐渐增大,  $EMD_1$  呈单调递减趋势, 而  $EMD_2$  呈现两段单调趋势。通过拟合这两条曲线, 可得到圆环体的副半径  $r$  与 EMD 距离值之间的关系:

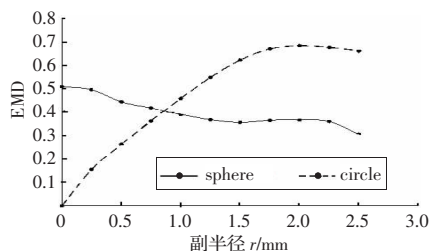


图4 EMD距离与圆环体副半径关系

$$EMD_1 = f(r), EMD_2 = g(r)$$

即可通过 EMD 值反求得到圆环体的副半径  $r$ :

$$r = f^{-1}(EMD_1), r = g^{-1}(EMD_2)$$

### 3 一般圆环体的识别

在机械零件设计领域,根据应用场合和发挥的功能不同,产品的形状和大小都存在很大的差异,要对形状尺寸和大小尺寸参数都发生了改变的同类基本体素分类,进行体素标准化是一个必要的步骤。对被测体素进行标准化的过程包括建立基本体素的最小有向包围盒,以及在此基础上进行平移、旋转和缩放操作。三维空间中的最小有向包围盒指的是三维物体的最小外接长方体,使用优化方法,例如多维下降单纯形法<sup>[6]</sup>来求取逼近最小有向包围盒的长方体来近似代替最小有向包围盒。在该文中约定:若体素的最小有向包围盒为某一给定边长  $k$  (文中取  $k=10$  mm) 的立方体,则称该体素为标准体素。

圆环体的几何形状是轴对称的,其最小有向包围盒是一个长方体,且长方体的两个底面为正方形,最小有向包围盒的正方形(底面)边长的一半对应圆环体的主半径与副半径长度的和,包围盒高的一半对应圆环体副半径的长度。

一般圆环体识别的算法步骤:

(1)建立体素的最小有向包围盒

最小有向包围盒函数的一组输出参数为:最小有向包围盒的任意一个顶点  $O$  的坐标,与此顶点对应的三条边的方向矢量  $X, Y, Z$  及其长度  $L=\{l_0, l_1, l_2\}$ 。其中长度相等的两条边定义成方向矢量  $X, Y$ 。

(2)体素标准化

以  $O$  点为新的坐标原点,以方向矢量  $X, Y, Z$  为新的坐标轴  $x, y, z$  方向,对最小有向包围盒进行平移、旋转变换;以  $k/L$  为比例对最小有向包围盒进行比例变换。

(3)生成 D2 形状分布曲线

此步骤与标准圆环体 D2 形状分布曲线生成算法只在曲面上随机取点环节不同,其他两个环节:计算随机点对之间的距离,构建形状分布曲线则完全一致。

因为该算法输入为基本体素的三角网格模型,由对被测实体的三角网格模型进行体素分割得到,所以随机取点过程可分为两个步骤:(1)随机选取三角面片  $T_j$ ; (2)在随机选取的三角面片  $T_j$  上随机取点。

在三角面片随机取点时,首先生成一个与  $T_j$  对应的平行四边形(如图 5),随机点  $P$  的位置由下式得到

$$P = P_1 + s(P_2 - P_1) + t(P_3 - P_1)$$

$s, t$  是介于区间  $[0, 1]$  间的随机数。当  $s+t < 1$  时,  $P$  点即为所取随机点,否则只需  $(s, t) \rightarrow (1-s, 1-t)$ 。

(4)计算此曲线与标准球体形状分布曲线以及标准圆形状

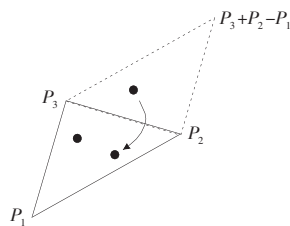


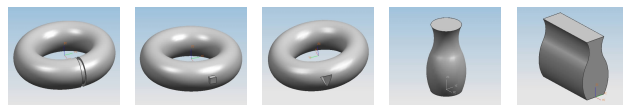
图5 三角面片上随机生成点示意图

分布曲线的 EMD 值:  $EMD_1$  与  $EMD_2$ 。

(5)通过函数表达式  $r_1 = f^{-1}(EMD_1)$ ,  $r_2 = g^{-1}(EMD_2)$  计算出  $r_1, r_2$ 。若  $r_1 = r_2$ , 或  $|r_1 - r_2| \leq \varepsilon$ , 其中  $\varepsilon$  为用户给定误差值, 则此体素为圆环体。

### 4 算法实例

测量了几种典型几何体素作为例子来说明该算法的应用。如图 6 所示。



(a)带滚槽圆环体 (b)带凸起圆环体 (c)带缺损圆环体 (d)旋转体 (e)拉伸体

图6 体素实例

表 2 中的结果为用图 6 中 5 个体素以及长方体(三边长  $a=b=c=10$  mm)、圆台体(高  $h=10$  mm, 底直径  $D=10$  mm, 上直径  $d=3$  mm)计算得到的  $EMD_1$  与  $EMD_2$ , 以及相应的副半径之差。

表2 EMD 值以及副半径之差

	mm				
	$EMD_2$	$r_2$	$EMD_1$	$r_1$	$ r_1 - r_2 $
(1)带滚槽圆环体	0.538 306	1.213 32	0.375 978	1.170 92	0.042 40
(2)带凸起圆环体	0.540 119	1.218 54	0.374 913	1.188 43	0.030 11
(3)带缺损圆环体	0.542 364	1.225 03	0.374 799	1.190 35	0.034 68
(4)旋转体	0.718 425	2.887 33	0.154 830	2.715 78	0.171 55
(5)拉伸体	0.720 875	2.894 68	0.165 447	2.705 90	0.188 78
(6)长方体	0.733 515	2.929 42	0.199 217	2.671 67	0.257 75
(7)圆台	0.666 491	1.710 31	0.248 514	2.611 08	0.900 77

尽管表 2 中的(1)~(3)圆环体外形上已经发生了改变,这种改变可能是由实际加工的需要造成的,也有可能是因为长期使用造成的磨损,还有可能是搬运中碰撞导致的破坏,但从表 2 中的数据可以看出:(1)~(3)中根据外形改变后的圆环体计算得到的副半径之差小于 0.05 mm, 而(4)~(7)中根据非圆环体计算得到的副半径之差远远大于 0.05 mm, 所以可以判定(1)~(3)均为圆环体。

### 5 小结

给出了一种综合最小有向包围盒以及形状分布的识别圆环体及其参数的算法。首先建立基本体素的最小有向包围盒, 再进行平移、旋转和放缩, 得到标准化的基本体素。然后生成其 D2 形状分布曲线, 计算此曲线分别与标准球体形状分布曲线以及标准圆形状分布曲线的 EMD 值, 最后比较由已知的圆环副半径与 EMD 值的函数关系得到的两个副半径的大小, 若二

(下转 16 页)