

文章编号:1000-582x(2001)04-0022-04

基于坐标测量机的曲面自适应采样和网格生成

陈浪, 秦大同, 谢勇

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:自由曲面的数字化是自由曲面重建的关键技术之一。如何在三坐标测量机上合理地对自由曲面进行采样,将关系到曲面重建精度和测量效率等重要问题。作者提出以物体重心坐标为数学模型的采样算法,该方法具有保存曲面拓扑信息和网格自组的功能,能够较准确地反映曲面的形状特征,同时对算法得到的网格数据进行了分析和处理,为坐标测量机的采样提供了一条简洁而高效的途径。

关键词:自由曲面;自适应网格;曲面采样;测量规划

中图分类号:TP 391.72

文献标识码:A

反求工程(RE)是从一个已有的物理模型产生出相应的CAD模型或实体模型的过程。反求工程作为复杂工业产品设计与制造的重要技术手段之一,深受CAD/CAM领域和工程界的广泛重视。特别是自由曲面测量、重建造型与加工技术作为复杂曲面产品反求工程的“瓶颈”问题,是今后一个时期的研究热点^[1]。随着计算机技术、自动控制技术、计算机辅助设计及计算机辅助加工等技术的发展,三坐标测量机(CMM)因其测量精度和智能化程度较高,为越来越多的用户所广泛采用,测量对象几乎包括各种机械零件,应用于从产品研制到产品最终检验的各个环节。三坐标测量机(CMM)也应用于自由曲面的反求工程中,它通过对自由曲面工件进行测量,将采集到的数据进行处理以生成待求曲面的等距曲面,最后通过测头半径补偿,从而输出待求自由曲面^[2-3]。

曲面数字化,即是从一系列离散的采样点提取曲面原始形状信息,是曲面重建的关键技术之一。由于复杂曲面自身的特点,曲面上各处的曲率变化是不均匀的。为了保证尽可能、精确地提取原始曲面的形状信息,采样点的疏密程度必须随着曲率的变化而变化^[4]。“曲面—曲线—点集—测点集”的分解是实现曲面数字化的基本思想。等间距扫描采样是简单易行的采样路径规划方法,根据采样定理,可以通过提高采样频率改善采样精度,但缩小采样间距将显著地降低数字化效率。因此,研究如何在一定采样点数目下尽可能真实地反映曲面原始形状,对提高自由曲面数字化

精度和效率具有重要意义。直观上,采样点的疏密应随曲面曲率变化而变化,曲率越大采样点应越密,反之亦然。

本文深入研究了基于形状特征的曲面数字化方法,并在此基础上对数字化网格进行了分析和处理,为三坐标测量机的采样提供了一条高效而简洁的采样轨迹。

1 基于曲面形状特征采样的数学模型

为了清楚地阐明基于曲面形状的自适应思想,考察如图1所示的物体重心原理。如将物体分割成许多微小体积,每一小块体积受的重力为 p_i ,其作用点为 $M_i(x_i, y_i, z_i)$,如图1所示。设重心坐标 $C(x_c, y_c, z_c)$

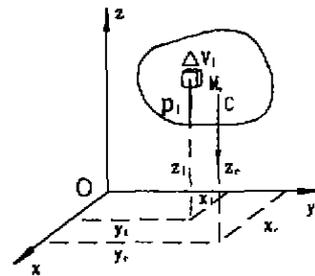


图1 物体重心坐标

为则物体重心的坐标公式为:

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (1a)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i y_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (1b)$$

• 收稿日期:2000-09-17

作者简介:(1968-),男,四川泸州人,重庆大学博士研究生,主要从事CAD/CAM技术及反术工程的研究。

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^n p_i z_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (1c)$$

显然,重心坐标 $C(x_c, y_c, z_c)$ 是它邻近各小块体积分的加权平均值。这个原理可以应用于曲面的数字化采样。

一个三维曲面可以描述为

$$S = \{p(u, v) \mid (u, v) \in D^1\}$$

式中, $p(u, v)$ 是三维空间点, D^1 是参数 u, v 的连续参数域。若曲面用 M 个采样点来离散, 则定义采样点的下标集合为 D , 即

$$D = \{1, 2, \dots, M\}$$

定义相应于采样点的参数 $w_i(u_i, v_i)^T$, 其中 $i \in D$, 则参数域上采样点集合为

$$W = \{w_i \mid i \in D\}$$

若 N_i 为第 i 个采样点的邻域集合, 则所有邻域集合的集合 N 为

$$N = \{N_i \mid i \in D\}$$

式中, $i \in N_j$, 若 $i \in N_j$, 则 $j \in N_i$ 。 N_i 可以定义为网格的四邻域或八邻域, 也可以采用非均匀的邻域形式。现在的问题是如何用给定的采样点去最好地表征曲面, 即是怎样根据曲面的曲率变化来布置采样点的疏密程度。

在参数域上, 类比于方程(1), 采样点的优化位置满足下面的非线性方程系统^[5]:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \frac{\sum_{j \in N_i} r(w_j) u_j}{\sum_{j \in N_i} r(w_j)} \\ v_i &= \frac{\sum_{j \in N_i} r(w_j) v_j}{\sum_{j \in N_i} r(w_j)} \end{aligned} \right\} \quad \forall i \in D \quad (2)$$

上式改写为

$$w_i = \frac{\sum_{j \in N_i} r(w_j) w_j}{\sum_{j \in N_i} r(w_j)} \quad \forall i \in D \quad (3)$$

式中, $r(w) (> 0)$ 是一个标量形状函数, 反映曲面的弯曲程度, 其大小通常取决于曲面曲率或曲面方程的导数。

2 形状函数的描述

2.1 形状函数的定义

形状函数 $r(w)$ 定义为^[3]

$$r(w) = r(u, v) =$$

$$q + \frac{k(u, v) - \min_{u,v} k(u, v)}{\max_{u,v} k(u, v) - \min_{u,v} k(u, v)} \quad (4)$$

式中: q —控制曲面离散点间形状函数 $r(w)$ 的比值, 其值大于零; $k(u, v)$ —曲面的弯曲度; $\max_{u,v} k(u, v)$ —曲面弯曲度的最大值; $\min_{u,v} k(u, v)$ —曲面弯曲度的最小值。

形状函数 $r(w)$ 类比于重心坐标公式中的重力 p , 它是曲面形状特征的描述函数。从形状函数的大小中反映出曲面的弯曲程度, 即是在函数值 $r(w)$ 高的区域, 曲面弯曲的程度较大, 采样点就较密集; 在函数值 $r(w)$ 低的区域, 曲面的弯曲程度较小, 采样点也就较稀疏。

2.2 弯曲度的选取

弯曲度的定义关系到形状函数是否能准确地反映曲面的形状特征, 合理地定义和选取弯曲度是确定形状函数的关键。一般有如下两种定义: 一是, 给定一个曲面, 其表述为如下形式

$$S = \{p(u, v) = (u, v, z(u, v))\}$$

则弯曲度选取为

$$k(u, v) = \frac{(z_{uu}^2 + z_{vv}^2)^{1/2}}{(1 + z_u^2 + z_v^2)^{3/2}} \quad (5)$$

式中 z_u, z_{uu} 分别是 z 对 u 的一阶和二阶偏导数, 这个公式是由平面曲线的曲率公式演化而来的。

二是, 把曲面的法曲率引入到弯曲度的评价中, 从而定义弯曲度为^[6]

$$k(u, v) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} / 2 \quad (6)$$

式中, k_1, k_2 是曲面的两个主曲率, 它们是曲面所固有的几何不变特征。

比较而言, 前一种定义较直观且计算简单, 但对曲面的几何不变特征描述不够精确。后一种定义在一定程度上体现了曲面的几何特征, 且对弯曲度进行了数学解释, 即弯曲度是曲面一点两个主曲率的均方值。不足之处是计算相对复杂, 必须计算曲面的主曲率。

3 算法实现及算法举例

3.1 算法实现

式(3)可以通过如下迭代算法求解,

$$w^{(t+1)}_i = \frac{\sum_{j \in N_i} r(w_j) w_j}{\sum_{j \in N_i} r(w_j)} \quad \forall i \in D \quad (7)$$

这里, t 是迭代次数。

显然, w_i 是它的邻域值的加权和。在迭代循环过程中, w_i 要实时更新网格节点矢量, 这充分反映了迭

代过程中网格的实时变化。在迭代过程求解中,收敛准则可以根据实际情况选取。

准则 1:

$$\|w^{i+1} - w_i\| < \delta$$

式中, $\| \cdot \|$ 是 2-范数, δ 是给定的精度。

准则 2:

$$i \leq N$$

式中, N 是给定的迭代次数。

求解前可加上一些边界条件。例如,参数域的四个角点总是不变;其它的边界点只能沿着边界移动;域中的内部点可以自由移动。

3.2 算法举例

设有双正弦曲面 $p(u, v) = 0.35 \times (\sin(2\pi u) + \sin(2\pi v))$, $u, v \in [0, 1]$, 图 2 显示了从离散网格到自适应网格的过程。其中采样离散网格为 $18 \times 18, q = 0.25$ 。

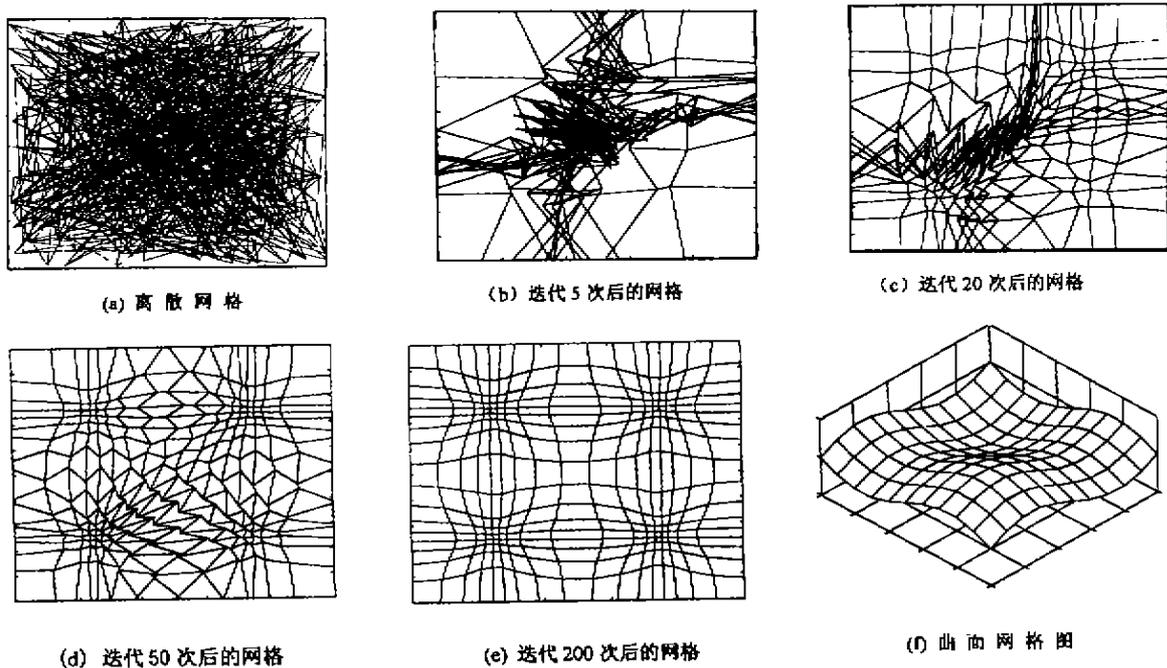


图 2 自适应网格的生成

4 测量路径的规划

由于网格反映了曲面的形状特征,因此自适应网格的形成应成为下一阶段测量采样的依据。应该看到,虽然最终网格反映了曲面曲率的变化趋势,但网格图终究不是很规则的,如图 2(e) 所示。在三坐标测量机上,为了提高测量效率,自由曲面采样通常采用扫描方式:即建立自由曲面工件坐标,移动测头至测量起点,固定某一坐标(比如 y 轴)值,使测头沿着曲面在相应的坐标平面(oxz)平面内以扫描方式采点测量至曲面边界端。接着,在坐标 y 轴方向移动测头一个增量,继续以上述方式在 oxz 平面内扫描测量。依次遍及整个待测曲面。为了适应自由曲面的扫描测量方式,需要对最终的网格数据进行分析 and 处理。在这里,采用了“大曲率模式”,即是每将每组数据点所对应的曲率值进行分析,然后找出其中曲率最大的数据点,以此数据点为基准将同组数据点进行重新规划,最终得到一条条规则

的路径。图 3 是采用此方法处理后的网格。

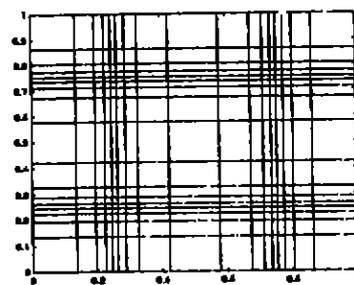


图 3 规则采样网格

图 3 所示的采样网格,不仅保留了曲面的几何特征,而且使网格更加规则化,为曲面坐标采样提供了简洁的测量路径。对于其它复杂的曲面,也可以采用上述方法进行处理,只是需要将复杂曲面分割为一个个简单的曲面,最后再将各个简单曲面拼合成一个整体曲面。

5 结论

本文以自由曲面在三坐标测量机上数字化为研究对象,从重心概念推导出基于形状函数的采样算法。该算法能产生具有自适应、自组织能力的较规则网格。该网格不仅反映了曲面的几何特征,而且还为采样路径的产生提供了可靠的依据,从而提高采样效率。

参考文献:

- [1] KOSTERS. Curvature-dependent parameterization of curves and surfaces [J]. *Comput.-Aided Des.*, 1991, 23(8): 569-579.
- [2] WERNER A, SKALSKI K. Reverse engineering of free-form surfaces [J]. *Materials Processing Technology*, 1998, 76: 128-132.
- [3] S Z LI. Adaptive sampling and mesh generation [J]. *Comput-Aided Des.*, 1995, 27(3): 235-240.
- [4] 侯宇,李刚. 自由曲面的测量与重建[J]. *计量学报*, 1999, 20(4): 252-255.
- [5] 王建华,林其骏. 复杂型面中测头中心的轨迹曲面及测头半径的三维补偿[J]. *计量学报*, 1994, 15(2): 108-113.
- [6] 梅向明,黄敬之. 微分几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.

Study on Adaptive Sampling and Mesh Generation of Free-form Surfaces Based on Coordinate Measuring Machine

CHEN Lang, QIN Da-tong, XIE Yong

(State Key Lab of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Digitizing of free-form surfaces is one of key technologies on the reconstruction of free-form surfaces. It is important to know how to sample properly free-form surfaces on CMM, which concerns the reconstruction accuracy of free-form surfaces and measuring efficiency. The mathematical model of sampling algorithm is proposed based on the concept of the center of gravity. Using the method, the topological information of surfaces can be preserved, and sampling mesh can be self-organized. By analyzing and dealing with mesh data received from sampling algorithm, one approach with brevity and higher efficiency is provided on CMM.

Key words: free-form surfaces; adaptive mesh; surface sampling; measuring plan

(责任编辑 成孝义)

(上接第 21 页)

ZOOM FFT Technology Based on Analytic Signal and Band-Pass Filter

GUO Yu, TAN Bao-ping, JI Yao-bo, QIN Shu-ren

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper deals on the method of ZOOM FFT based on analytic signal and band-pass filter, which is different from other methods of ZOOM FFT. It is used on computer with larger zoom ratio; higher compute speed and so on than other ways for offline testing. It provides a new method for the development of Virtual Instruments on ZOOM FFT analysis.

Key words: analytic signal; band-pass filter; ZOOM FFT; Virtual Instruments

(责任编辑 成孝义)