

文章编号 1004 924X(2001)03 0223-03

# 应用 NURBS 实现飞机叶片的三维重构

齐涤非, 杨劲松, 刘国淦, 辛宏伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 CAD 应用技术室, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对光学叶片表面测量系统的三维重构问题, 提出采用 NURBS(非均匀有理 B 样条) 重构叶片断层曲线以及叶片曲面, 并介绍了 NURBS 的基本理论。同时应用三维图形标准以及图形函数库在 VC6.0 平台上完成该软件的编制。

关键词: 三维重构; B 样条; 曲线; 曲面; OpenGL

中图分类号: TB237 文献标识码: A

## 1 引言

传统的叶片检测手段是采用大量成本高的检测模板(检测样板)来检测叶片叶身。这种检测方法效率较低, 所引入的人为因素和其他因素所产生的误差较大, 不适应大规模生产。另外由于叶片在非常高的温度环境下工作, 对它本身的硬度要求非常高, 所以加工叶片用的刀片大多数是从国外购进, 这些刀片的价格昂贵, 使得叶片的加工成本很高。为了提高检测效率, 提高检测精度和降低叶片成本, 根据用户需要, 自行研制和开发了一种利用光学干涉测量技术的叶片三维表面测量设备。针对该设备中采集来的数据, 在 VC++ 6.0 平台上开发出叶片三维表面测量系统, 对采样数据进行三维重构、分析、比较并进一步来指导加工。

曲面的三维重构(曲面拟合)方法很多, 例如 Shepard, Multiquadric 方法和薄板样条法, 有限元方法, 偏导数的估计和最小模网络法- MNN 法<sup>[1]</sup>, 最小能量法<sup>[2]</sup>, 非均匀有理 B 样条<sup>[3,6]</sup>等等。在选择拟合函数时, 该拟合函数应具有以下特点: 1) 多项式表达; 2) 具有局部控制能力; 3) 保证计算精度; 4) 几何特征(信息)不失真; 5) 能表达各种曲线和曲面。在这些拟合函数中只有 NURBS 具有以上全部特点, 并且它属于 Bezier 函数簇能和其他

CAD 软件兼容, 从而可以进一步扩展该软件的功能。由于它具有  $C^2$  连续性, 可以得出任意点处的 2 阶偏导数(曲面曲度), 使得原有几何图像不失去内部特性。另外它在仿射坐标系下(指缩放、旋转、平移)数学表达式保持不变。

基于 NURBS 重构函数, 采用 OpenGL<sup>[7]</sup> 提供的图形接口和图形库, 在微型计算机(PIII450)上实现高质量、真实、有效的三维叶身曲面渲染<sup>[8]</sup>, 并使用显示列表以及图形加速卡提高图形的显示效率。

## 2 非均匀有理 B 样条(NURBS)定义和基本性质

NURBS 是 Non-Uniform Rational B-Splines 的缩写, 称为非均匀有理 B 样条。它是建立于有理 Bezier 曲线基础上对非有理 B 样条的归一化。而有理 Bezier 曲线又是对 Bezier 曲线的归一化。

$p$  阶的 NURBS 是用一个矢量值的分段有理多项式函数表达的<sup>[3]</sup>。表达式如下:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n n_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n n_{i,p}(u) w_i} \quad (1)$$

其中, 矢量  $P_i$  就是所谓的控制多项式,  $w_i$  是指对应每个控制点的权值,  $n_{i,p}(u)$  是节点矢量

$$U = \left\{ \underbrace{a_0, \dots, a_{p+1}}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p+1}, \underbrace{b_0, \dots, b_p}_{p+1} \right\} \quad (2)$$

区间内的  $p$  阶非周期  $B$  样条。其中,  $m = n + p + 1$ , 假设权值  $w_i$  为非负, 可保证用  $NURBS$  拟合的曲线都含在控制多项式的包络线内。

在本文中, 已知  $NURBS$  曲线通过的型值点, 只需反算出控制点矢量就可知道叶片的  $NURBS$  表达式, 并进行下一步的计算。在这里采用的算法为全局逼近算法<sup>[6]</sup>, 在全局插值算法中, 插值函数决定于全部数据点的函数值, 当增加、删除或改变一个点的位置或函数值时, 插值函数必须重新计算, 但是全局插值方法得到的插值曲面往往比局部插值算法的结果更加美观。具体过程是先根据型值点求出节点矢量  $U$ , 然后从一阶  $NURBS$  曲线算起, 判断型值点与曲线之间的误差是否在给定误差阈限内, 如果大于误差阈限, 则升一阶再进行计算, 直到在给定误差阈限内, 退出程序。

在得出  $NURBS$  曲线的表达式后, 就可以根据该表达式求出对应于某一个  $u$  值所对应的点, 并可以得出此点的一阶导数, 二阶偏导数...直到  $n - 2$  阶偏导数, 并能进行其他的数据处理和计算。标准叶片的具体重构过程如下:

重构叶盆、叶背;

```
{ 读入叶盆、叶背三维数据;
  用函数反算叶盆、叶背节点矢量;
  输入 NURBS 的阶数和逼近精度;
  采用全局逼近算法 globalApproxErrBnd3() 构造叶盆、
  叶背曲线;
```

```
  用函数 skinV() 生成叶盆、叶背曲面; }
```

重构左右叶缘;

```
{ 读入左右叶缘的半径, 起点、终点、以及中心点;
  保持  $C^1$  连续, 计算起始角和终止角;
  用函数 makeCircle() 构造左、右叶缘;
  用函数 skinV() 生成左右叶缘曲面; }
```

进入绘制过程;

### 3 叶片曲面的渲染

OpenGL 是美国高级图形和高性能计算机系统公司 SGI 所开发的三维图形库, 它被设计成为适合于计算机环境下的三维图形应用编程界面 (API)。在 GLU 库中提供一个  $NURBS$  功能, 它是建立在 OpenGL 求解器命令之上的高层接口。我们利用该库中提供  $gluNurbsCurve$  和  $gluNurbsSurface$  函数很方便地绘制出叶身各断层曲线以及叶身曲面。为了使叶片显示效果更具有真实感, 在程序中添加了光照和材质功能。

由于叶身采集的数据较大而且重构精度较

高, 所以反算出的控制点很多, 在进行渲染时, 需要一定的时间。如果对渲染后的图像进行变换 (平移、旋转) 时, 显示速度会更慢。为了提高曲面的绘制效率, 在使用 OpenGL 三维图形加速卡的基础上, 在叶身三维曲面的绘制过程中采取了图形优化技术—显示列表。

显示列表是一组存储起来的 OpenGL 命令。引用显示列表时, 按顺序执行其中的 OpenGL 命令, 可以在程序中不同地方使用这些命令。与子程序不同的是, 这些命令是经过编译的, 执行效率高, 从而可以有效地提供 OpenGL 的绘图性能。OpenGL 显示列表是一系列命令的高速缓存, 而不是内存中的动态数据库, 不必进行内存管理, 使绘图性能大幅度地提高。即使使用显示列表只绘制一个简单图形, 也不会比 EXECUTE 模式的速度慢。

创建和执行显示列表的步骤是: 1) 建一个显示列表, 使用一对函数  $glNewList$  (GLuint list GLenum mode) 和  $glEndList$  (void) 来标志显示列表的开始和结束, 两者之间的命令被定义为一个由 list 标识的显示列表, 若把这些命令放入显示列表而不执行时, mode 为 GL\_COMPILE, 而把这些命令放入显示列表并同时立即执行时, mode 为 GL\_COMPILE\_AND\_EXECUTE。显示列表只存储数值, 在创建显示列表后, 即使所引用的数值有改变, 也不会影响显示列表的内容。2) 执行一个显示列表, 在创建显示列表后, 可以使用  $glCallList$  调用标识为 list 的显示列表, 可以对同一个显示列表调用多次。调用时, 显示列表中的命令将按排列的顺序依次执行。

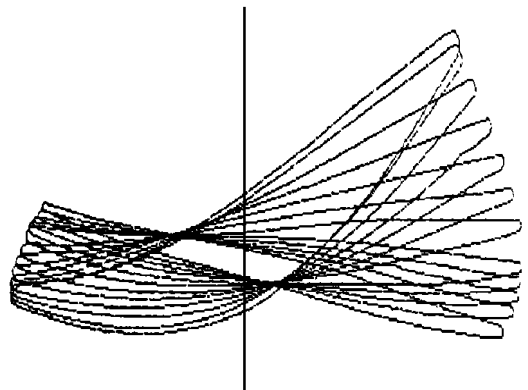


Fig. 1 Nominal blade curves



Fig. 2 Nominal blade surface

## 4 试验与结果

### 参考文献:

- [1] 唐泽圣, 等. 三维数据场可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999, 130- 148.
- [2] Fang Lian, David C. Gossard. Reconstruction of smooth parametric surfaces from unorganized data points[C], Proc. SPIE, 1992, 1830, 226- 236.
- [3] document/ an introduction to NURBS[EB/OL]. <http://www.yukon.genie.uottawa.ca/lavoie/software/nurbs>.
- [4] Sarvajit S. Sinha, Brian G. Schunk et al. Toward reverse engineering: accuracy of adaptive thir plate surface fitting[C]. Proc. SPIE, 1992, 1611: 532- 541.
- [5] Sarvajit S, Sinha Pradeep Senevratne. Single valueness, parametrization and approximating 3D surface using B-spline[C]. Proc. SPIE, 1993, 2031: 193- 204.
- [6] 卢振荣, 刘孝顺, 等. 计算机绘图简明教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997, 193- 207.
- [7] 贾志刚. 精通 OpenGL[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999, 57- 65.
- [8] Pieg1 Les A. On rendering of NURBS curves[C]. Proc. SPIE, 1610, 178- 189.

## 3D Reconstruction of aircraft blades with NURBS

QI Di fei, YANG Jir song, LIU Guo gan, XIN Hong-wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The paper presents the basic principle of non- uniform rational B- spline (NURBS) according to the data from an optical blade measurement system. By applying 3D graphic standard and library OpenGL, the drawing of blades on VC++ 6.0 platform has been accomplished.

**Key words:** 3D reconstruction; B- spline; curve; surface; OpenGL

作者简介: 齐涤非(1970- ), 女, 齐齐哈尔市人。1992年毕业于河北省燕山大学机械工程系, 现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所攻读硕士。

针对压气机的9级标准叶片以网格数据结构给出, 其标准叶片叶身共划分成12个断层, 每层上有120个样值点。经过光学检测仪器处理得到的叶片叶身数据分别以三维( $X, Y, Z$ )形式给出。为了使得叶片数据的重构具有比较光滑的形状, 又具有较高的近似精度, 采用4阶NURBS重构数据, 逼近精度为0.01mm。渲染后的标准叶片叶身断层曲线簇见图1, 叶身曲面见图2。

## 5 结 论

从图1、图2中可以看出, 采用NURBS重构后的叶片叶身曲面圆滑, 满足精度要求, 采用OpenGL渲染后的叶片图形真实感强, 另外通过使用显示列表使得叶片的显示效率大大提高。