

CATIA V5 环境下基于产品数模的三坐标 测量机测点自动采样

曲学军, 李海圀, 樊龙欣, 孟 飙, 刘 春

(沈阳航空航天大学 航空航天工程学部, 沈阳 110136)

摘要: 为了实现 CAD 与 CAIP (计算机辅助测量规划) 的集成, 提出了一种基于产品三维模型的 CMM (三坐标测量机) 测量点采样方法。该方法从产品的 IGES 文件中有效识别型面形状与边界定义, 采用均匀采样与依曲率变化二次采样相结合的策略, 针对各个型面类型制定专门的信息处理机制, 实现测量点的自动采样, 并通过转换在参数平面中判断采样点与裁剪区域的隶属关系, 以有效剔除无效采样点; 通过典型飞机部件外形曲面的采样点生成结果表明, 该方法能有效应用于飞机的测量规划中。

关键词: 测量点采样; 测量规划; 三坐标测量机; 产品数模

Automatic Acquiring of Measurement Points for CMM under CATIA V5 Based on Digital Model of Product

Qu Xuejun, Li Haigu, Fan Longxin, Meng Biao, Liu Chun

(School of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University; Shenyang 110136, China)

Abstract: To integrate the CAIP system with the CAD system, a sampling approach of measurement points for CMM based on the 3D digital model of product is proposed. The method identifies shape and boundary information from IGES files with respect to the product. After that, it carries out special mechanism for each type of surface shape, to acquire measurement points automatically, based on algorithm of combining the even sampling method with the equal curvature sampling method. In addition, the delete of invalid measurement points is performed by transforming the judgment of membership of the measurement point and the cutting area into the parameter plane of the surface. Practical examples of generating measurement points of typical aircraft shapes show that the proposed approach can be applied to the measurement plan of aircraft shapes effectively.

Keywords: sampling of measurement points; measurement plan; three coordinate measurement machine; digital model of product

0 引言

测量点自动采样技术作为 CAIP 中的核心技术, 包含了从产品模型信息识别、测量点采样等技术, 其每个环节的实现质量对最终检测规划的合理性有着决定性的影响^[1]。国外学者^[2-3]针对自由曲面的检测规划, 提出采用 NURBS 作为主要的建模实体, 对其中所涉及到的坐标系校正、测量点分布采样、测头补偿、以及路径的生成与优化都进行了较为详细的研究。在国内也对智能三坐标测量机的检测规划做了比较全面的研究^[4-6]。

尽管目前对于基于 CAD 平台的计算机辅助检测规划系统的研究较多, 但大都是基于对 UG 或者 Pro/Engineer 平台的二次开发, 而在 CATIA 环境下的测点规划研究则相对不足^[7]。作者在 CATIA 环境下, 研究 IGES (Initial Graphics Exchange Specification) 文件中零件型面信息识别、测量点采样分布等相关技术, 提出均匀采样与依曲率变化中点二次采样相结合的采样策略, 为检测规划系统的工程应用奠定技术基础。

1 IGES 中型面特征信息的识别

IGES 是进行产品模型数据交换而制定的标准, 在 IGES 文件记录了零件 CAD 模型中详细的几何信息, 而且数据量相对较小, 处理较为方便, 用于测量规划的制定最为合适^[8]。在 IGES 文件中, 零件各组成面通过基本的面素和它们的边界表达, 并使其组合形成完整的零件几何模型。IGES 中包含的要素可分为几何实体和非几何实体, 每一类型实体都有相应的实体类型号。实体的属性信息记录在目录段, 而参数数据记录在参数段。表 1 列出了 IGES 常用几何实体类型号与对应的实体类型。

表 1 IGES 常用实体类型号对照表

实体类型号	100	102	104	110	112	114	120	122	126	128	144
实体类型	圆弧	复合曲线	二次曲线	直线	参数曲线	参数曲面	旋转面	列表柱面	Nurbs曲线	Nurbs曲面	裁剪曲面

零件几何模型中各曲面在 IGES 文件中是用裁剪的参数化曲面 (144) 来表示的, 每个裁剪曲面有一个外边界和任意数量的内边界, 内边界各曲线及其内部区域均是相互分离的, 并位于外边界内部。参数段包含: 被裁剪曲面实体的元素索引段序号、内边界数目、外边界的元素索引段序号、各个内边界的元素索引段序号, 其定义如表 2 所示。其中, PTS 指向被裁剪的基曲面实体; 若外环边界是被裁剪曲面的边界, 则 $N1=0$, 否则 $N1=1$; $N2$ 为封闭的内环数目, 若无内环 $N2=0$; PTI

收稿日期: 2014-04-06; 修回日期: 2014-05-23。

基金项目: 航空科学基金 (2007ZD54004)。

作者简介: 曲学军 (1969-), 辽宁省沈阳市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事飞机数字化检测方向的研究。

刘 春 (1960-), 吉林省吉林市人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事飞机装配方向的研究。

指向裁剪曲面外环, PTI (1), ..., PTI (N2) 分别指向 N2 个内环。

表 2 IGES 文件中参数段裁剪曲面的存储结构

索引序号	0	1	2	3	4	5	6	7
实体元素	144	PTS	N1	N2	PTO	PTI (1)	...	PTI (N2)

CATIA 中被裁剪曲面的类型主要有 3 种: 列表柱面、旋转面以及 NURBS 曲面。各曲面边界曲线为包含圆弧曲线 (100)、直线 (110)、圆锥曲线 (104) 以及有理 B 样条曲线 (NURBS) (126) 等多种类型的子曲线段, 是由各子曲线段按照次序首尾相连所形成的封闭曲线 (102)。

1.1 NURBS 曲面在 IGES 中的表示形式

对于 u 向 m 次、 v 向 n 次的 NURBS 曲面 (如图 1 (a) 所示) 来说, 其双变量有理矢值函数表示为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \omega_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \omega_{i,j}}$$

$$(u, v) \in [u(0), u(1)] \times [v(0), v(1)] \quad (1)$$

式中, m 和 n 分别为曲面在 u 向和 v 向上控制顶点的个数, $b_{i,j}$ 构成 u 向和 v 向的控制顶点网格, $\omega_{i,j}$ 则是控制顶点 $b_{i,j}$ 的权因子, $N_{i,k}(u)$ 和 $N_{j,l}(v)$ 则分别为以 u 和 v 为参数的非均匀有理 B 样条基函数。在 IGES 文件中, NURBS 曲面的参数区记录了节点序列 U 和 V 、控制顶点坐标 $b_{i,j}$ 、 u 与 v 参数方向上 B 样条基函数的阶数、总和上限、权值序列以及各参数方向上的起始位置 $u(0)$ 、 $v(0)$ 和终止位置 $u(1)$ 、 $v(1)$ 。

1.2 列表柱面在 IGES 中的表示形式

列表柱面就是一条直线 (母线) 沿着一条曲线 (基准线) 拉伸而形成的曲面。其中, 基准线可以是直线、圆弧、圆锥曲线、参数样条曲线、有理 B 样条曲线、组合曲线等, 而母线是一条直线, 如图 1 (b) 所示。在 IGES 文件中, 列表柱面参数段列出了母线起始点坐标 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 、 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和指向基准线实体 DE 的指针。

1.3 旋转面在 IGES 中的表示形式

旋转面是由空间一条曲线 (母线) 围绕一条直线 (旋转轴) 旋转一定的角度所形成的曲面 (如图 1 (c))。在 IGES 文件的实体参数区旋转轴依次记录了起点坐标值的和终点坐标值, 以及旋转角度值。在 IGES 文件中, 还记录了旋转轴实体的指针、母线实体的指针以及旋转的起始角度与终止角度。

2 测量点采样策略

对于 NURBS 表示的自由曲面、母线为一般曲线且曲率变化不规律的旋转面、基准曲线为一般曲线的列表柱面来讲, 在这几种曲面上进行均匀采样, 并不能较好地满足测量精度和保证测量效率。为此, 我们提出了均匀采样与在曲率变动大处参数区间的中点采样相结合的采样方法: 即首先依据曲面的大小、总体形状以及精度要求估算大概的各参数方向上的采样步长和采样数, 再根据估计的采样步长对该曲面进行初采样, 进一步得到在各采样点处各参数方向上的曲率, 随后再计算两相邻采样点的曲率差, 判断若曲率差大于某一特定值, 则对这两个采样点的中间点进行采样, 循环判断, 直至曲率差小于该特定值。

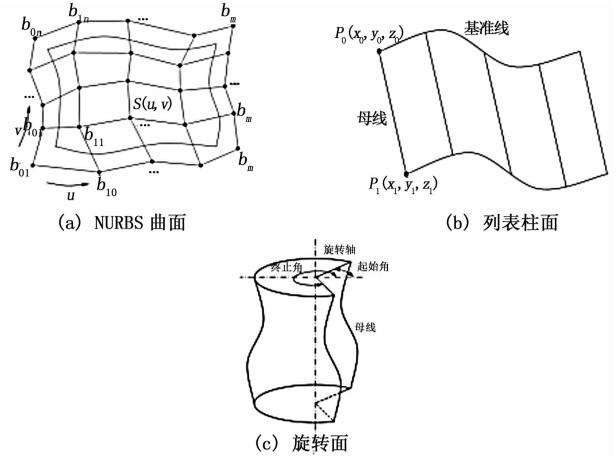


图 1 3 种常见曲面示意图

2.1 NURBS 曲面采样

在曲面的 uv 参数平面内, 沿 u 向以参数步长 a , v 向以参数步长 b 进行等参数采样, 获取的采样点参数可表示为:

$$\begin{cases} u'_s = (s-1) \cdot a, & s = 1, 2, \dots, \frac{u(1)-u(0)}{a} \\ v'_t = (t-1) \cdot b, & t = 1, 2, \dots, \frac{v(1)-v(0)}{b} \end{cases} \quad (2)$$

将参数 u'_s 与 v'_t 代入式 1 中, 可获得各采样点的三维坐标 $S(u_i, v_i)$ 。

曲面 S 在点 $S(u'_s, v'_t)$ 处的 u 向与 v 向的等参数线分别表示为:

$$\begin{cases} S(u'_s, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{i,j} N_{i,k}(u'_s) N_{j,l}(v) \omega_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u'_s) N_{j,l}(v) \omega_{i,j}}, & u \in [u(0), u(1)] \\ S(u, v'_t) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v'_t) \omega_{i,j}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,k}(u) N_{j,l}(v'_t) \omega_{i,j}}, & v \in [v(0), v(1)] \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (3) 计算两等参数线在 (u'_s, v'_t) 的曲率 $k^u(u'_s, v'_t)$ 与 $k^v(u'_s, v'_t)$, 作为曲面 S 在点 $S(u'_s, v'_t)$ 处的曲率评价指标。

依据测量要求来确定 u 方向上曲率差参照值 Δ_u 和 v 向曲率差参照值 Δ_v , 并在两参数方向上对相邻采样点的曲率值进行比较, 以确定采样点插入策略:

1) 如果 $|k^u(u'_{s+1}, v'_t) - k^u(u'_s, v'_t)| \leq \Delta_u$ 且 $|k^v(u'_s, v'_{t+1}) - k^v(u'_s, v'_t)| \leq \Delta_v$, 则不进行采样点插入。

2) 见图 2 (a), 如果 $|k^u(u'_{s+1}, v'_t) - k^u(u'_s, v'_t)| > \Delta_u$ 且 $|k^v(u'_s, v'_{t+1}) - k^v(u'_s, v'_t)| \leq \Delta_v$, 则在 u 向插入中间采样点 $S((u'_{s+1} + u'_s) / 2, v'_t)$; 对于分割后的两参数区间 $[u'_s, (u'_{s+1} + u'_s) / 2]$ 与 $[(u'_{s+1} + u'_s) / 2, u'_{s+1}]$, 分别重复上述过程, 直到条件 1 满足。

3) 见图 2 (b), 如果 $|k^u(u'_{s+1}, v'_t) - k^u(u'_s, v'_t)| \leq \Delta_u$ 且 $|k^v(u'_s, v'_{t+1}) - k^v(u'_s, v'_t)| > \Delta_v$, 则在 v 向插入中间采样点 $S(u'_s, (v'_{t+1} + v'_t) / 2)$; 对于分割后的两参数区间 $[v'_t, (v'_{t+1} + v'_t) / 2]$ 与 $[(v'_{t+1} + v'_t) / 2, v'_{t+1}]$, 分别重复上述过程, 直到条件 1 满足。

2), $v'_{i+1}]$, 分别重复上述过程, 直到条件 1 满足。

4) 见图 2 (c), 如果 $|k''(u'_{s+1}, v'_i) - k''(u'_s, v'_i)| > \Delta_u$ 且 $|k''(u'_i, v'_{i+1}) - k''(u'_s, v'_i)| > \Delta_v$, 则在 u 向与 v 向同时插入中间采样点 $S((u'_{s+1} + u'_s)/2, v'_i)$ 与 $S(u'_s, (v'_{i+1} + v'_i)/2)$, 同时, 还需插入中间采样点 $S((u'_{s+1} + u'_s)/2, (v'_{i+1} + v'_i)/2)$ 。对于分割后的参数区间 $[u'_s, (u'_{s+1} + u'_s)/2]$ 与 $[(u'_{s+1} + u'_s)/2, u'_{s+1}]$, $[v'_i, (v'_{i+1} + v'_i)/2]$ 与 $[(v'_{i+1} + v'_i)/2, v'_{i+1}]$, 分别重复上述过程, 直到条件 1 满足。

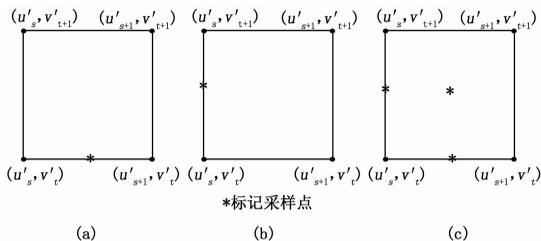


图 2 按照曲率变化中点二次采样的方法

2.2 列表柱面的采样

列表柱面在母线方向无曲率变化, 因此沿该方向采用均匀采样的方法。而在基准线方向, 如果基准线是直线或圆弧线, 则无曲率变化, 故也采用均匀采样; 但如果基准线为其它类型的曲线时, 则采用均匀采样与等曲率采样相结合的方法: 即首先在基准线方向均匀采样, 再在曲率变化大处插入采样点。下面以基准线为 NURBS 曲线的列表柱面为例予以介绍。

1) 从 IGES 文件中提取定义基准线的 NURBS 曲线控制顶点、节点序列、参数起始与终止值等参数, 确定基准线的数学表示:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^e b_i N_{i,k}(u) \omega_i}{\sum_{i=0}^e N_{i,k}(u) \omega_i}, u \in [u(0), u(1)] \quad (4)$$

2) 根据被测表面形状和测量精度要求, 确定母线方向采样点个数 m 与基准线方向上采样点个数 n 。

3) 在基准线上进行均匀采样, 得到采样点集 $p(u_f)$, $f = 1, 2, \dots, n$, 其中各采样点的参数值确定为:

$$u_f = u(0) + (f-1) \cdot \frac{[u(1) - u(0)]}{n-1} \quad (5)$$

式中, $u(0)$ 和 $u(1)$ 分别为参数域的起点与终点值。

4) 计算各采样点处曲率 $k(u_f)$ 并确定曲率差参考值 Δk 。

5) 考查各参数区间 (u_f, u_{f+1}) , $f = 1, 2, \dots, n-1$, 如果 $|k_{f+1} - k_f| > \Delta k$, 则该区间曲率变化较大, 在该区间的中点插入参数值: $u = (u_{f+1} + u_f)/2$, 并计算插入点处的采样点与曲率, 同时动态更新采样点数 n 、参数值序列 u_f 、采样点序列 $p(u_f)$ 与曲率序列 $k(u_f)$ 。

6) 重复步骤 5) 直至所有参数区间的曲率变化均小于给定的参考值。

7) 从 IGES 文件中提取定义直母线的起始点坐标 s 与终止点坐标 t , 并计算母线的长度 l 和其单位方向矢量 v :

$$l = |t - s| \quad v = \frac{t - s}{|t - s|}$$

则曲面上 $n \times m$ 个采样点可确定如下:

$$p_{f,h} = p(u_f) + (h-1) \cdot \frac{l}{m-1} \cdot v;$$

$$f = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

2.3 旋转面的采样

对于位于空间任意方位的旋转轴, 如果利用坐标变换, 将旋转轴转换到与坐标系的某一轴线 (本文取为 Z 轴) 重合, 则会简化采样点的生成并提高算法效率。将旋转轴 (起点坐标为 $s(x_s, y_s, z_s)$, 终点坐标为 $t(x_t, y_t, z_t)$) 变换至与 Z 轴重合的算法如下:

1) 执行平移变换, 使点 s 与坐标系的原点重合, 相应的坐标变换矩阵为:

$$T_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_s \\ 0 & 1 & 0 & -y_s \\ 0 & 0 & 1 & -z_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 首先执行绕 X 轴逆时针旋转 α 角的变换, 使旋转轴 st 落在 XOZ 坐标平面上, 再执行绕 Y 轴顺时针旋转 β 角的变换, 使旋转轴 st 与 Z 轴重合, 变换矩阵分别为:

$$T_{rx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{ry} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3) 对于曲线也需执行上述变换, 以式 4 表示的 NURBS 曲线为例, 仅需对其各控制顶点执行以下变换:

$$b'_i = T_m \cdot T_{rx} \cdot T_{ry} \cdot b_i, i = 0, 1, \dots, e$$

由 NURBS 曲线的几何不变性, 以新控制顶点序列定义的 NURBS 曲线即为旋转变换后的曲线。经过上述变换, 该旋转面可视为由曲线绕 Z 轴旋转所形成。

旋转面的特点是沿曲面周向无曲率变化, 因此沿该方向采用均匀采样的方法。而在母线方向, 如曲线类型是直线或圆弧, 也采用均匀采样; 但如果母线为其它类型的曲线时, 则采用均匀采样与等曲率采样相结合的方法: 即首先在母线方向均匀采样, 再在曲率变化大处插入采样点。下面以 NURBS 曲线所表示的母线为例, 介绍旋转面采样点的计算过程:

1) 采用均匀采样与等曲率采样相结合的方法 (参见 2.2 节), 提取曲线上的采样点, 设为 $p(u_i) = (x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

2) 确定周向初始采样点的个数为 m , 则沿周向上第 j 个采样点的角度为:

$$\theta_j = \theta_s + (j-1) \frac{\theta_t - \theta_s}{m-1}, j = 1, 2, \dots, m$$

式中, θ_s 为起始角, θ_t 为终止角。

3) 将母线上的每一采样点按前述角度依次旋转, 获得旋转曲面上各采样点 $p_{i,j}$ 坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{i,j} \\ y_{i,j} \\ z_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j) & -\sin(\theta_j) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_j) & \cos(\theta_j) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$$

在获得旋转面的采样点后, 还需将旋转轴变换至原来所在

位置, 同时对采样点施加相同的变换, 即:

$$p'_{i,j} = (T_m \cdot T_{rx} \cdot T_{ry})^{-1} p_{i,j}, i = 0, 1, \dots, n; j = 0, 1, \dots, m \quad (7)$$

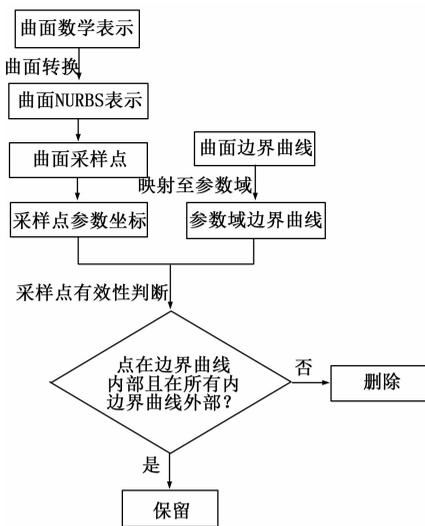
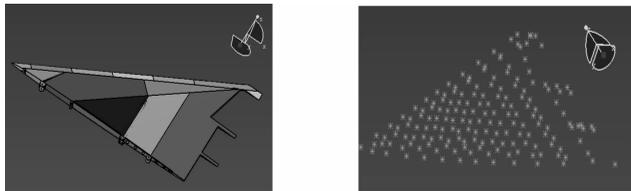


图 3 无效采样点的剔除

4 实例

在 CATIA V5 环境下, 以 CAA (Component Application Architecture) 为开发平台, 开发了采样点自适应生成系统。在采样点生成过程中, 系统内部自行完成对于曲面裁剪部分采样点的剔除, 得到实际曲面形状相吻合的测量点。下面以某型飞机机翼及副翼表面为例, 说明系统的应用情况。

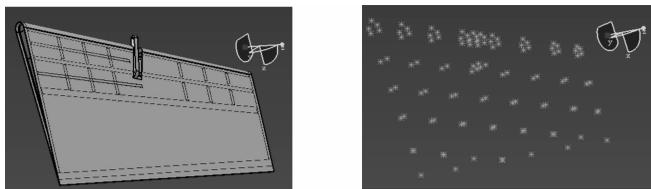
1) 某型飞机机翼蒙皮曲面模型如图 4 (a) 所示, 该零件蒙皮曲面由 20 张不同类型的曲面光滑拼接组成, 并在机翼后缘副翼、襟翼处形成裁剪曲面。系统从所存储的 Iges 文件中读取曲面的数学表示, 并自动生成蒙皮表面的采样点集合, 结果如图 4 (b) 所示。其中机翼前缘曲面为列表柱面表示, 且曲率变化剧烈, 系统采用了均匀与等曲率采样相结合的采样点生成算法, 通过对获取采样点的曲率分析可知, 各采样点曲率符合程度很好; 而对于曲率变化平缓的上下蒙皮曲面, 主要采用均匀采样方法生成测量点, 同时在曲率变换较大的局部区域结合了等曲率采样技术。而对于后缘副翼、襟翼处的蒙皮曲面, 系统采用第 3 节中的方法自动对无效采样点进行了删除。



(a) 机翼数字化模型 (b) 生成的采样点

图 4 某型机翼蒙皮表面采样

2) 图 5 (a) 为某型飞机副翼的 3D 模型, 其表面由上蒙皮表面, 下蒙皮表面和前缘曲面组成。其中前缘曲面为旋转面, 在旋转面的周向上采用均匀采样法生成采样点, 而在沿母线方向上则采用均匀采样与等曲率采样相结合的方法生成采样点; 上下蒙皮表面为 Nurbs 曲面, 整体曲率变化较小, 主要采用均匀采样方法生成测量点, 同时在曲率变换较大的局部区域结合了等曲率采样技术。采样点生成结果如图 5 (b) 所示。



(a) 副翼数字化模型 (b) 生成的采样点
图 5 某型飞机副翼蒙皮表面采样

5 结论

研究了 IGES 文件中提取零件型面信息, 并针对不同各类型面特征, 自动生成 CMM 测量点的采样策略。在此基础上, 基于 CATIA 的 CAA 二次开发平台, 实现了算法功能, 并以典型飞机曲面为例, 验证了方法的有效性。为建立针对所有类型表面的采样点自适应生成系统, 为实现 CAIP 与 CAD 的集成奠定了基础。研究表明:

1) 将 IGES 文件中目录条目段和参数数据段结合起来, 针对各个型面类型制定专门的信息处理机制, 从产品模型定义中有效识别型面形状与边界定义, 是实现 CAD 与 CAIP 集成的必要途径。

2) 应用均匀采样与等曲率采样相结合的方法, 可优化各类型面的采样点分布, 在满足测量要求的同时提高测量效率。

3) 将位于裁剪区域中的无效采样点的剔除转换到参数平面中进行, 可以有效剔除无效采样点, 并简化计算。

参考文献:

[1] Brecher C., Vitir M., Wol J. f.. Closed-loop CAPP/CAM/CNC process chain based on STEP and STEP-NC inspection tasks [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, 19: 570-580.

[2] Steven N. S.. Hierarchical Constraint Satisfaction For High-level Dimensional Inspection Planning [A]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning [C]. 2009: 374-380.

[3] Mohaghegh K., Sadeghi M. H., Abdullah A.. Reverse engineering of turbine blades based on design intent [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32 (9/10): 1009-1020.

[4] 赵 韩, 刘达新, 董玉德, 等. 基于 CAD 的三坐标测量机检测规划系统的开发 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (9): 1846-1853.

[5] 洪 军, 李宝童, 张浩锋, 等. 基于多种反求方法集成的复杂结构零件测量过程规划技术 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (12): 128-136.

[6] 刘达新, 董玉德, 赵 韩, 等. 基于三维 CAD 和 CMM 的计算机辅助检测规划系统的研究与实现 [J]. 中国机械工程, 2009, 20 (8): 2207-2213.

[7] 杜福洲, 梁海澄. 基于 MBD 的航空产品首件检验关键技术研究 [J]. 航空制造技术, 2010, 23: 56-59.

[8] 张东民, 吴艳云. 基于三维 CAD 数模的现代测量技术 [J]. 机械设计与制造, 2010, 2: 176-178.

[9] 张浩锋, 阎海红, 李宝童, 等. 面向复杂结构零件的逆向测量规划技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14 (7): 1403-1409.

[10] 廖 菲, 曾 韬. 基于三坐标测量机的曲面测量规划方法 [J]. 微计算机信息, 2010, 26 (4-1): 153-154.

[11] 闫 亮, 郑联语. 面向闭环制造的分层检测规划系统 [J]. 航空精密制造技术, 2010, 46 (4): 46-49.