

基于自由曲面点云的快速原型制作技术研究*

孙玉文 贾振元

(大连理工大学现代制造技术研究所 大连 116024)

王越超 刘伟军

(中国科学院机器人学开放研究实验室)

摘要: 针对不附加任何拓扑和几何信息的云状数据三维重建问题, 提出了对点云直接进行分层处理快速制作原型的新方法。在对点集进行空间结构划分的基础上, 采用最小距离关联点对方法提取层面轮廓线数据, 并对其加以匀化和精整从而直接生成快速成形机的层片接口文件, 避免了常规方法存在的耗时和需要很高的造型技巧等不足, 而且片面的错误校验与修补等繁琐工作也将不再进行, 提高了快速成形前处理的效率, 非常适合分层实体制造(LOM)等成形工艺。

关键词: 反求工程 点云数据 直接分层 快速原型技术

中图分类号: TP391 TH12

0 前言

采用计算机视觉技术(如 ATOS 三维扫描仪)对自由曲面数字化得到的是庞大的点云数据^[1], 从如此海量的点集中恢复实体形状是一项具有挑战性的反求关键步骤, 即使采用先进的 CAD 软件也不可避免地存在交互、耗时等不足。当今市场竞争的国际化, 时间因素被提到了首位, 产品更新换代的步伐已经越来越快。在快速产品开发^[2](RPD)方式中, 实体的快速原型制作已处于相当重要的位置。为此, 反求工程与快速原型技术(RP&M)的集成已是势在必行^[3]。RP&M 是近年发展起来的一项高新技术, 是 RPD 中模型制作的最佳选择。要适应 RP&M 技术的特有要求, 反求中数据处理的方法也应有所不同, 这样才能实现两者的最佳统一, 提高集成的效率。

在常规的 RE/RPM 集成中^[4], 是采用对离散点重构三角网格模型并进而生成快速成形机 STL 接口文件的方式实现的。单纯的对点云数据逐点进行网格构造是非常困难的, 而且现在还没有一个通用的空间剖分算法, 因此不仅在重构效率上无法保证, 也使 STL 文件过长, 不利于 RP 工艺的后续处理^[5]。采用对点云直接分层的方式, 避免了这些中间过程, 也使得模型的表示更加简捷, 而且散乱数

据和断层测量数据能在本方法中得到统一的实现。更为重要的是, 由于越过了 STL 接口文件, 因此 STL 文件的正确性校验和错误修补等耗时工作将不再进行。通过对点云分层位向的最佳优化, 并且采用基于切片的自动支撑添加技术, 那么该方法的适用范围将会非常宽广。

1 层面轮廓线的提取方法

在反求工程中, 全部测量数据往往不能由一次测量获得。因此, 在直接分层前应对点云进行多视拼合、奇异点剔除、缺损修补和滤波等具体操作, 使之形成完整的点云集^[6]。此外, 还应选择合理的分层位向, 并将点集变换到新的坐标系下, 使分层的效果最佳。

1.1 点云模型的空间结构表示

实体的三维重建需要大量的数据, 尤其面对的是海量点集并要建立数据间的有效联系, 就必须对实体的空间结构进行正确描述。在基于体的表示方法(Volume based representation)中, 最小包容盒空间分解技术因其本身具有的层次化数据结构、空间易达性和数据的预分类性等优点, 在实体的内部检测、连接区域和近邻搜索等操作上非常便利, 也有助于理解模型中边、角、面的位置关系。首先, 由给定数据确定最小包容盒的最大值($x_{\max}, y_{\max}, z_{\max}$)和最小值($x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}$), 并依据测点密度将其划分成 $m \times f \times g$ 个体元。于是, 可得每个体元的长、宽、高为

* 国家自然科学基金(59975015)、辽宁省自然科学基金(2001102087)和中国科学院机器人学开放实验室基金资助项目。20010707 收到初稿, 20020428 收到修改稿

$$\begin{cases} x_l = (x_{\max} - x_{\min}) / m \\ y_w = (y_{\max} - y_{\min}) / f \\ z_h = (z_{\max} - z_{\min}) / g \end{cases} \quad (1)$$

这样, 对于点集中的任意一点 $V_i(x_i, y_i, z_i)$, 可方便的计算出该点沿长、宽、高方向的索引号 l 、 b 、 h , 由此可计算出该点所属体元编号为

$$K = l + b \times m + h \times m \times f \quad (2)$$

通过将所有的数据存入一个一维数组, 并将数据点序号追加到每个体元所对应的线性链表中, 就建立了点云模型的空间结构表示。如果一体元内包含测点则定义为实元, 反之为虚元。这样, 根据同一层面上的体元数据(等同二值图像), 就能快速地推断出该层面是否存在孔洞和边界情况。

1.2 层面轮廓线数据的计算方法

当分层高度确定后, 则该截面轮廓仅与其上下邻域有关, 称之为相关区域。而且, 距离该截面越近的点, 对轮廓重构的贡献越大。因此, 把参与该层截面重构的点称之为关联点, 否则为非关联点。依据这个原则, 提出了基于最小距离关联点对的线面截交方法。设某一层面的高度为 h , 取相关区域高度为 $\pm \Delta h$, 其中 Δh 为一定值, 称之为带宽, 可参照空间分割中的体元高度进行选取。于是, 以该层面为中截面形成一条形窄带。这样在区域 $[h - \Delta h, h]$ 内的点形成下邻域点集 Γ_1 , 区域 $[h, h + \Delta h]$ 内的点构成上邻域点集 Γ_2 。

如图 1 所示, 首先在上邻域 Γ_1 中找出一一点 P 在下邻域 Γ_2 中的最小距离点 Q , 设 PQ 之间的长度为 L_1 。同样, 在 Γ_2 中找出点 Q 在 Γ_1 中的最小距离点 R , 设 QR 之间的长度为 L_2 , 如果点 R 与 P 重合, 则点 P 、 Q 构成最小距离关联点对, 并将点 P 、 Q 记下; 否则, 记录点 Q 、 R , 这两点构成最小距离关联点对, 另一点 P 即为非关联点。重复进行上述过程, 遍历整个邻域点集后将最终形成一个最小距离关联点对集合。在实际的点集处理中, 也经常要作出垂直于某一确定曲线的系列截形。因此, 不失一般性, 设过一确定点 V 的空间截面法矢为 n_V , 则该截面的方程 $r(u, v)$ 为

$$r(u, v) = V + ua + vb \quad (3)$$

式中 $a = n_V \times \lambda$

$$b = n_V \times a$$

λ ——不平行于 n_V 的点云坐标系中任一坐标轴单位矢量

于是可得点集中一点 P 与该截面的位置关系为: 若 $n_V \cdot (P - V) > 0$, 则在截面的上部; 反之在

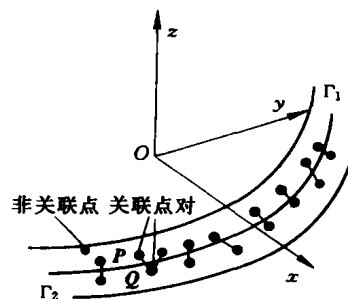


图 1 线面截交法

下部。计算该点到截面的距离, 即 $h = |n_V \cdot (P - V)|$, 以判断其是否在相关区域内。这样在得到截面的邻域点集后, 就可以找出所有的最小距离关联点对。不妨设一点对为 $P_1 \leftrightarrow P_2$, 令 $\kappa = (P_1 - P_2)$, 则可得该点对连线方程为

$$R(t) = P_2 + t\kappa \quad (4)$$

因该直线与已知截面相交, 所以有

$$t = [n_V \cdot (V - P_2)] / (n_V \cdot \kappa) \quad (5)$$

于是可得点对连线与该截面的交点 ξ 为

$$\xi = P_2 + [n_V \cdot (V - P_2)] \kappa / (n_V \cdot \kappa) \quad (6)$$

这样通过将关联点对连线集与该分层面截交, 就得到了该层截面轮廓上的系列数据点, 克服了单纯对点集投影存在的精度问题^[7]。只要最小距离点对的矢径 ($R = P_2 - P_1$) 与其导矢满足 $R \cdot \Delta R < 0$, 所得的结果都是正确的, 对于工程中的局部邻域点集处理是完全可行的。实际操作中为提高精度而加密轮廓数据时, 每点可取两个最近距离点, 但其实现原理并没有改变。

1.3 轮廓数据的后处理

采用最小距离关联点对方法提取的轮廓数据是无序的, 还要形成有序轮廓。由于从实体中截取的轮廓线均为简单闭曲线, 因此任意两条闭曲线间只可能出现公共点, 而不会出现公用交线。此外, 在 LOM 加工中, 当某一闭曲线所围面积小于成形光斑, 或者当两个闭曲线邻接过近时通常要做简化处理, 因而相对于从图像中提取的轮廓线要简单得多, 提出的体元边界追踪并结合方向转角测试的界点序化方法, 可有效处理这一问题。

在算法开始, 要首先确定出该层轮廓线点集的所属体元, 从而快速建立起该层面的体元数据轮廓, 这个过程可采用左向优先算法完成。如图 2 所示, 从层面上的任一边界体元开始, 沿 8 个方向按左向优先的方法, 根据节点查表次序表 1 查找下一个体元直至满足结束条件。在提出所有的边界环后, 比较各环间是否存在局部重合情况。如果一

封闭环不存在重合情况, 则从该环中任取一点作为始点, 并在其逆时针方向找出其最小距离点作为下一轮廓点, 如此依次进行, 就可追踪出该轮廓。如果两环间存在重合部分, 则要在重合部分进行方向转角测试。首先找出导向点的邻接点集, 计算每个邻接点的邻接方向矢量与导向矢量的点乘, 然后判断是否存在分支。如果存在分支, 如图3, 选取最左面的分支并从中找出最小距离点作为下一轮廓点, 然后将该点从另一边界环中去除; 否则直接选取最小距离点作为轮廓下一节点。如此反复进行, 直到遍历所有封闭环, 就能追踪出完整的轮廓线图。

表1 节点查找次序表

前一节点	下一节点查找次序	前一节点	下一节点查找次序
0	3 4 5 6 7 0	4	7 0 1 2 3 4
1	3 4 5 6 7 0 1	5	7 0 1 2 3 4 5
2	5 6 7 0 1 2	6	1 2 3 4 5 6
3	5 6 7 0 1 2 3	7	1 2 3 4 5 6 7

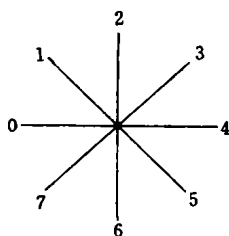


图2 8方向编码

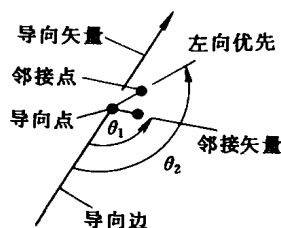


图3 邻接点分支测试

2 轮廓数据点匀化与精整处理

在自由曲面点云中, 如需进一步提高层面轮廓线精度和匀化数据点, 可采用等弦长取点和曲面局部逼近思想进行轮廓点匀化和精整处理。为避免显式曲面拟合存在的奇异现象发生, 应在每个匀化生成点处建立局部标架 $\{c; e_1, e_2, e_3\}$, 并进行局部坐标变换, 如图4, 从而对该邻域进行二次曲面逼近以实现精整。为此, 必须首先计算出该匀化生成点处曲面法矢(h 轴方向, 指向点集外侧), 并确定出标架的坐标轴方向矢量。设一匀化生成点 c 的逆序邻域点集为 $\{v_i | i=1, \dots, n\}$, 则该点的单位法矢 n_c 为

$$n_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(v_{i-1} - c) \times (v_i - c)}{|(v_i - c) \times (v_{i-1} - c)|} \quad (7)$$

$$n_c = n_c / |n_c|$$

式中 $v_c = v_n$

由此可知过点 c 的切平面方程为

$$n_c \cdot (x - c) = Ax + By + Cz + D = 0 \quad (8)$$

令 $d_j = Ax_j + By_j + Cz_j + D$, $v_j^p = v_j - d_j n_c$, 则标架的 h 轴单位矢量 $e_3 = n_c$, u 轴单位矢量 $e_1 = (v_1^p - c) / |v_1^p - c|$, v 轴单位矢量 $e_2 = e_3 \times e_1$, 于是可知该邻域点集中一点在局部标架下的坐标分量为

$$(u_j, v_j, d_j) = [(v_j^p - c) \cdot e_1, (v_j^p - c) \cdot e_2, d_j] \quad (9)$$

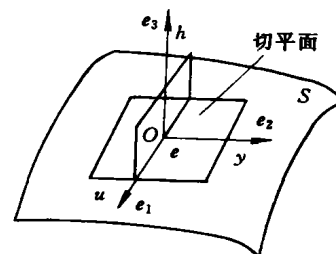


图4 局部标架

采用二次曲面逼近匀化生成点 c 处的点云局部区域, 令 $z(u, v) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{i-j,j} u^{i-j} v^j$, 对 c 点的邻域点集进行最小二乘拟合, 有

$$J = \min_{a_{i-j,j}} \sum_{k=1}^n [z(u_k, v_k) - d_k]^2 \quad (10)$$

为保证法方程组的系数矩阵是满秩阵, 邻域点个数须大于6, 此时方程可得唯一解 $a_{i-j,j}^*$ 。在点 c 处沿层面轮廓线的法向任取一点 g , 则在局部标架下该法线方程为

$$r = k_u t e_1 + k_v t e_2 + k_h t e_3 \quad (11)$$

式中 $k_u = (g - c) \cdot e_1$, $k_v = (g - c) \cdot e_2$, $k_h = (g - c) \cdot e_3$ 。将该法线与逼近曲面求交, 所得交点就是匀化生成点 c 的精整值, 这只需要解一个一元二次方程求出相应的 t 值。即

$$t = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4a a_{00}^*}) / (2a) \quad (12)$$

式中 $a = a_{20}^* k_u^2 + a_{11}^* k_u k_v + a_{02}^* k_v^2$, $b = a_{10}^* k_u + a_{01}^* k_v - k_h$ 。计算时取绝对值最小的 t 值并带入法线方程即可得到精整值。如此顺序进行, 就实现了整个轮廓的匀化和精整。

3 接口处理

当前的快速成形机一般均采用等层厚成形, 因此只要采用上述算法按成形厚度要求依次提取点云截面轮廓线并进行匀化和精整, 也就完成了对点云的直接分层, 接下来的工作是生成快速成形机的切片接口文件。虽然STL文件已成为事实上的标准

格式,但存在着文件过大、容易出错、逼近效果差等不足^[8]。对点云数据直接生成 CLI 格式的层片文件,具有精度高、数量小、速度快的优点,可解决 STL 文件的许多缺陷。

CLI 文件的格式比较简单,可以根据层面轮廓线提取结果非常方便地生成该层片接口文件。当轮廓数据输入分层软件后,进行轮廓线特征分析,再作支撑添加处理,就得到了 RP 机的制作文件,从而完成用切片数据直接驱动 RP 机的过程。当然,在 LOM 工艺中根本不必制作支撑,因而处理起来更为简单。这种直接分层方法虽然直接,但由于缺少 CAD 几何模型,所以对模型的修改操作困难。因此,如果需要其几何模型,可根据分层结果重构其 CAD 几何模型,已有多种方法可供参考,这里不再赘述。

4 应用实例

为验证本文所提方法的精度,进行了理论曲面的分层处理测试,并对常规分层与直接分层方法的分层精度进行了比较,选取的典型测试曲面为复合指数方程,在 1×1 的分层区域内按 40×40 网格均匀布点,并附加了方差为 0.005^2 的高斯白噪声,其中最大误差为 0.017 2,测试结果如表 2 所示。在直接分层中,采用最小距离点方法提取的层片轮廓精度与常规分层方法大致相同,而精整后的轮廓精度则有明显提高。

表 2 分层精度结果比较

分层厚度		分层数		三角化方法	
0.02		20		两边之和最小	
常规方法		直接分层		精整处理	
平均误差	最大误差	平均误差	最大误差	平均误差	最大误差
0.003	0.014	0.003	0.014	0.002	0.009

在自由曲面原型快速制作的工程验证上,先后用三维视觉扫描仪和激光数字化仿形仪分别采集了人体躯干模型和童车座模型数据,并用 4 mm 带宽进行了算例测试。为便于比较,选取层厚为 0.5 mm 毫米。从初始分层精度上看,已达到了由 STL 模型得到的轮廓精度(已做比较),满足了成形设备的精度要求。从数据量上看,也比采用 STL 文件大为减少,数据压缩的效果非常明显。图 5、6 给出了童车座的原始点云和直接分层结果。从图 6 可以看出,尽管点云中的大量参考平面点也参与了重构过程,但最终结果并未受到影响,最底层的轮廓线精度依然很高,这也正是本文方法的优势所在,人工干预少。

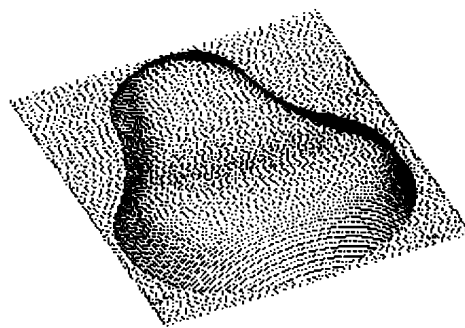


图 5 童车座原始点云

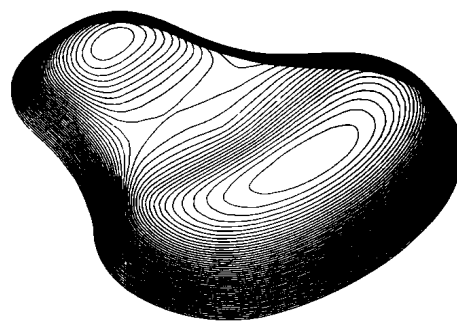


图 6 直接分层轮廓

5 结论

本文为获得面向 RP&M 技术的自由曲面点云的快速原型制作方法,提出对点云数据直接进行分层处理的新构想与具体实施方法,以期实现反求工程与快速成形技术的直接集成,提高产品原型快速制作的能力。

(1) 对点云数据进行直接分层,避免了数据模型的中间转化,提高了快速成形的前处理效率,具有很强的工程应用价值,非常适合 LOM 工艺。

(2) 采用初始分层与匀化和精整相结合的手段,可以减少存储信息,在保证重构精度的前提下实现了数据的精确压缩。

(3) 提出的基于最小距离关联点对的轮廓数据提取方法,实用可靠、人工干预少,能自动避开干扰点影响,达到了点云三角化网格模型的切片精度指标。

(4) 完善方法的实现手段与具体处理中的细节问题,并根据切片自动添加支撑,将是下一步工作的方向。

参 考 文 献

- 1 来新民,黄田,曾子平,等.基于 NURBS 的散乱数据点自由曲面重构.计算机辅助设计与图形学学报,1999,11(5): 433~436

(下转第 83 页)

- 6 葛安林. 车辆自动变速理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1993

SIMULATION ON DYNAMIC CHARACTERISTIC OF A PARALLEL HYBRID CAR WITH A METAL BELT-PLANETARY GEAR CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION

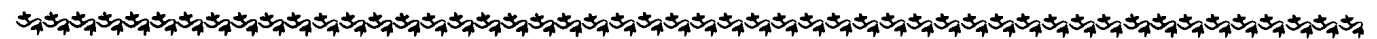
Sun Dongye Qin Datong
(Chongqing University)

Abstract: In order to reduce the pollution caused by a normal car at low speeds especially in the urban area, a parallel hybrid car with a metal belt-planetary gear continuously variable

transmission (CVT) is researched. Compared to a normal electric car with gear transmission system, it has many advantages such as a larger starting torque, a lower power, a lighter weight and so on. The simulation equations on the dynamic characteristic of electric car with a DC motor is established using bond graph theory. The control rules of the armature current of motor and ratio of continuously variable transmission are obtained. The design method of a parallel hybrid car is established.

Key words: Hybrid car Continuously variable transmission
Bond graph Simulation

作者简介: 孙冬野, 男, 1966 年出生, 工学博士, 副研究员。从事汽车系统动力学, 工程机械设计理论的研究工作。发表论文 40 篇, 参加国家自然科学基金和国家“八五”科技攻关等多项课题的研究, 获机械工业部科技进步二等奖 2 项。



(上接第 59 页)

- 2 Bullinger H J, Warschat J. Rapid product development—an overview. *Computers in Industry*, 2000, 42(2): 99~108
- 3 Chen Y H, Wang Y Z. Data reduction in integrated reverse engineering and rapid prototyping. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1999, 12(2): 97~103
- 4 Chen Y H. Integrated reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 34(1): 481~484
- 5 孙玉文, 王小明, 刘健. 反求工程中复杂多面体模型的网格简化算法. *中国机械工程*, 2001, 12(8): 922~925
- 6 孙玉文, 王小明, 刘健. 三维面形测量中的基于神经网络的数据修补技术. *计量学报*, 2001, 22(1): 7~11
- 7 Lee Kwan H, Woo H. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 2000, 38(1): 21~38
- 8 Stroud, Xirouchakis P C. STL and extensions. *Advances in Engineering Software*, 2000, 31(1): 83~95

RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING BASED ON CLOUD DATA FROM FREE-FORM SURFACE

Sun Yuwen Jia Zhenyuan
(Dalian University of Technology)
Wang Yuechao Liu Weijun

(Robotics Laboratory, Chinese Academy of Science)

Abstract: Physical model recovered from cloud data only with coordinate information is of great importance in the integration of reverse engineering and rapid prototyping technology. A new method, that rapidly generates prototype from sampled points, is proposed. Based on establishing the spatial partitioning representation of point cloud, the contour data in each layer is firstly calculated and sequenced, then amended to generate exact slice file. It overcomes lots of drawbacks in traditional integration such as consuming time and needing expert modeling skills. Moreover, without the intermediate transactions of STL file, the work of checking and repairing mistakes of facets is avoided. It is very suitable for laminated object manufacturing and greatly improves the pretreatment efficiency of RP technology.

Key words: Reverse engineering Data cloud

Direct slicing Rapid prototyping

作者简介: 孙玉文, 男, 1971 年生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进制造技术、反求工程、CAD/CAM 等。已发表论文 10 余篇