

逆向工程中的测量数据精简技术研究

洪 军¹, 丁玉成¹, 曹 亮¹, 武殿梁²

(11 西安交通大学机械学院, 710049, 西安; 2. 上海交通大学机械学院, 200030, 上海)

摘要: 在分析角度 - 弦高联合准则法和包围盒法的工程适用特点的基础上, 提出了同时基于角度 - 弦高简化法和包围盒法的改进型数据的直接精简方法, 即利用包围盒法构造分割面, 利用分割面将数据点云处理成按扫描线存储的“结构化”测量数据, 再利用角度 - 弦高联合准则法逐线精简. 随后以铸造模板、汽车发动机罩及人头像为典型实例, 分别对具有不同表面特征的测量数据点云进行了数据精简验证. 结果表明, 提出的方法同时具备 2 种数据精简方法的优点, 且克服了该 2 种方法无法处理曲率变化大、附加特征多的表面测量数据的局限性, 能够对测量数据进行直接而有效地简化, 因此可以用于处理具有复杂附加特征的散乱测量数据.

关键词: 逆向工程; 非接触测量法; 数据精简

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)07 - 0661 - 04

Data Cloud Direct Reduction in Reverse Engineering

Hong Jun¹, Ding Yucheng¹, Cao Liang¹, Wu Dianliang²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on analyzing the applicability of chord and angle deviation criterion and enveloping box method, an improved direct data reduction method was proposed, in which two existing methods were combined. Enveloping box was applied to construct the segmenting planes, then process the data cloud into structured measured data stored according to the scanning lines; the chord angle deviation criterion was adopted to reduce the data sequentially. Some typical cases, such as casting molding board, automobile engine cover and human head sculpture, were chosen to verify this data reduction method. It is found that newly proposed method possesses the advantages of both chord angle deviation and enveloping box methods and breaks up the limitations of these two methods in case of sharp curvature variations and multiple additional features in measured data. Thus it can be utilized to reduce data directly and efficiently, especially the scattered data with complex additional features.

Key words: reverse engineering; noncontact measurement; data reduction

在逆向工程中, 非接触方法可快速获取待测表面的大量数据, 但所获得的测量数据点群一般密度很大, 而利用数据点云进行曲面重构、三角网格构造或用于评价被测曲面的误差, 一般都不需要过密的数据点, 特别是在被测曲面的曲率较小处. 在重构曲面时, 过密的点云不但计算量大, 而且可能影响其光顺性. 1 由于过密点云构造的三角面片模型过于巨

大, 因此存储、处理或显示都将消耗大量的时间和计算机资源. 另外, 用于误差评价时, 点云也不能过密, 否则计算量会更大, 将消耗大量的时间. 因此, 在逆向工程中测量数据的精简是数据预处理的重要工作之一.

Weir^[1]、Filip^[2]和 Sun^[3]等人采用包围盒法来简化测量点云, Eck^[4]利用简化和重构 STL 模型法

收稿日期: 2003 - 11 - 06. 作者简介: 洪 军 (1968 ~), 男, 副教授. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2002AA414110).

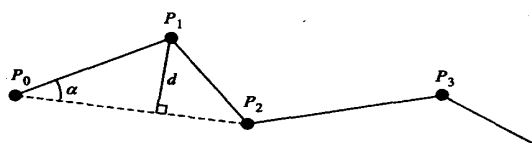
来简化测量点云,而 Hoppe^[5]和 Eck^[4]等人采用的 PM(Progressive Meshes)算法根据子区域的连续性来简化点云,适用于已经“结构化”了的数据点,例如按扫描线存储的数据点云。

文中提出一种改进型的数据直接精简方法,该方法的基本思路是将处理散乱点的包围盒法和处理按扫描线存储的角度-弦高联合准则法结合起来。首先,利用包围盒法构造分割面,由分割面将数据点云处理成按扫描线存储的“结构化”测量数据,再利用角度-弦高联合准则法逐线精简。由于包围盒的作用不再是直接精简数据点,所以能够处理曲率变化大、具有复杂附加特征的散乱测量数据。

1 角度-弦高联合准则法

激光扫描测量获得的数据点云往往是按扫描线存储的,由于扫描线上数据点的分布密度很大,同时扫描线的间隔也较大,因此本文采用逐点过滤法,利用给定的角度和弦高误差限来对单条扫描线上的点进行简化处理。逐点过滤法首先给定角度误差限和弦高误差限 d ,如图 1 所示。在相邻点相距较远时,即便夹角很小,弦高也可能很大,当相邻点相距很近时,即使弦高很小,角度也可能很大,所以应同时使用角度和弦高 2 种误差,并按如下步骤执行:

- (1) 确定 α 和 d ;
- (2) 从起点开始取相邻的数据点 P_0, P_1, P_2 ;
- (3) 对于相邻的 P_0, P_1, P_2 , 计算 $\overline{P_0 P_1}$ 到 $\overline{P_0 P_2}$ 的 d , $d = |\overline{P_0 P_1}| \sin \alpha$;
- (4) 若 $\alpha < \alpha_0$, 且 $d < d_0$ 成立, 则舍去 P_1 , 取 P_2 后的一点 P_3 , 若 P_3 不存在, 说明该扫描线上的点已经处理完毕, 转第(6)步, 若 P_3 存在则置 $P_1 = P_2, P_2 = P_3$ 转第(3)步;
- (5) 若 $\alpha > \alpha_0$, 且 $d < d_0$ 不成立, 则置 $P_0 = P_1, P_1 = P_2$, 取 P_2 后一点 P_3 , 若 P_3 不存在, 说明该扫描线上的点已经处理完毕, 转第(6)步, 若 P_3 存在则置 $P_2 = P_3$ 转第(3)步;
- (6) 判断是否所有扫描线均已取完, 如果没有则取下一条扫描线, 转第(2)步, 若已取完则说明测量



夹角: α ; d : 弦高; P_0, P_1, P_2, P_3 : 相邻数据点
图 1 角度和弦高示意图

数据简化完毕,并结束。

2 包围盒法简介

对于完全由散乱点组成的点云,上述方法不再适用,可以采用文献[1-3]的包围盒法,本节在曲面拟合方法上略作简化。

计算最大包围盒 $\{x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}\}$,为了解决数据点落到包围盒面上的情况,给定误差 ϵ_1 ,将包围盒各面以 ϵ_1 值向包围盒外侧偏移,以获得初始包围盒。在点云近似中心处取一个数据点 P_i ,然后以 P_i 为中心在点云中均匀地取 n 个点,这 n 个点要尽量覆盖整个点云,一般 n 取 24~32 时可以达到精度要求,而且计算时间也能接受^[3]。通过这 n 个点,利用最小二乘法拟合一张双参数二次曲面

$$S(u, v): S(u, v) = au^2 + buv + cv^2 \quad (1)$$

式中: u, v 为参数; a, b, c 为常系数。 a, b, c 可以在拟合时根据最小二乘法决定,参见文献[6]。

对于由 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 决定的 $S(u, v)$, 以及一个任意三角形 (P_A, P_B, P_C) , 顶点 P_A, P_B, P_C 均属于点集 P_i (见图 2)。根据文献[2,7]有

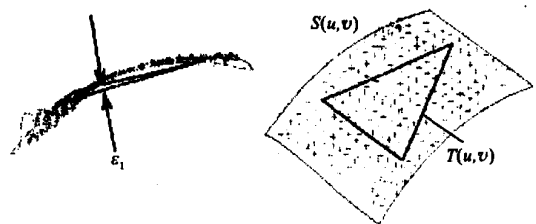
$$\sup_{(u,v) \in T} S(u, v) - T(u, v) = \frac{2}{9} L^2 (M_1 + 2M_2 + M_3) \quad (2)$$

$T(u, v)$ 是三角面片的函数,由式(2)可以计算出一个最大的三角形边长

$$L = 3 \left[\frac{1}{2(M_1 + 2M_2 + M_3)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中: M_1, M_2, M_3 分别为不等式(2)左端对 u, v 的二阶偏导数; L 为三角形与曲面间的最大距离误差。

由于 L 影响包围盒的边长 B , 因此每个包围盒最多可能与 26 个其他的包围盒相邻。在每个包围盒中含有一个点,这 26 个相邻盒可分为 3 类,即与中心盒面接触的 6 个包围盒,与中心盒边接触的 12 个和与点接触的 8 个包围盒。假定三角形的各节点均在各包围盒的中心,设相邻 2 点间的最大连线长为



(a) 侧向 (b) 轴侧
图 2 三角形与曲面之间的误差

l_{max} , 而 l_{max} 的点接触类型为

$$l_{max} = 3^{1/2} B \tag{4}$$

$$l_{max} = L \tag{5}$$

合并式(3)、式(4)、式(5)可得

$$B = \left(\frac{3 \cdot l}{2(M_1 + 2M_2 + M_3)} \right)^{1/2} \tag{6}$$

由式(6)对数据点云进行简化,其步骤如下:

- (1) 先构造初始包围盒;
- (2) 依照式(6)计算简化所需的新包围盒边长;
- (3) 将初始计算出的最大包围盒分割成相应数目的以 B 为边长的小包围盒群;
- (4) 对落在小包围盒中的点进行处理,仅留下最接近小包围盒中心的一个点.

3 改进的测量数据直接精简算法

上述 2 种数据的直接简化算法都具有较高的效率,但鉴于算法自身的特点,其适用范围均有限制.对于曲率变化大、附加特征多的表面测量数据,上述 2 种直接精简算法均难以得到直接应用.

改进的数据直接精简算法是将二者结合起来.其基本思路是,首先利用包围盒精简算法构造出包围盒,然后不直接使用一个个小包围盒来确定需要留下的点,而是利用包围盒的一个方向侧面族群来分割初始测量点云,获得沿该侧面的一条按扫描线有序排列的测量点群,然后应用角度-弦高联合准则来逐线精简,从而得到一个精简后的点云.随后再用另一个方向的侧面族群分割初始测量点云,应用角度-弦高简化法获得另一个精简后的点云.将 2 个精简后的点云叠加,即获得了最终的精简点云.由于角度-弦高联合准则法可以较好地保留特征点,本文算法还可以适用于附加特征较多的表面测量数据,完整的算法过程描述如下.

(1) 给定误差 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 ,其中 δ_1 的几何意义与角度-弦高联合准则法中的弦高误差意义类似.
 δ_2 、 δ_3 为角度-弦高联合精简法中的角度和弦高误差.
 δ_4 为构造扫描线时的误差值,它取决于点云分布密度,一般取小包围盒边长的 0.105 倍.若初始测量点云为按扫描线存储的“结构化”测量点云,则直接调用角度-弦高联合准则法进行数据精简.若用户认为被测表面变化平缓、附加特征较少,则直接调用包围盒法进行数据精简.

(2) 调用包围盒法的前 3 步,构造用于分割数据点云的包围盒群.

(3) 构造扫描线.以小包围盒的一个方向侧面族群中的每一个侧面来分割初始测量点云,将分割面两侧距离为 δ_4 范围内的点投影到分割面上,投影点和落于分割面上的点构成一条扫描线.依次处理每一个侧面,获得沿该方向的扫描线点群.

(4) 调用角度-弦高联合准则法对每条扫描线点群进行精简处理,获得一个精简后的点云.

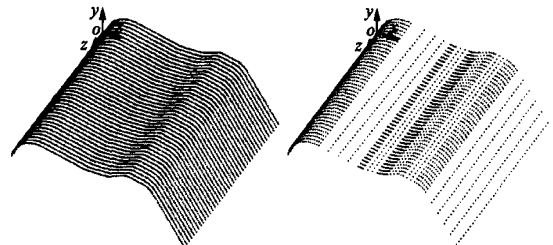
(5) 对于另一个侧面方向,重复第(3)、第(4)步,获得另一个精简后的点云.

(6) 将 2 个精简后的点云叠加,获得最终的精简后的测量点云.

4 测量数据直接精简应用举例

4.1 某铸造用模板表面测量数据的简化

图 3a 为某铸造用模板表面的初始测量点云,测量采用智泰公司的 LSH300 激光扫描测量机,该测量机基于光学的三角形原理,其测量精度为 ± 0.105 mm.在扫描线上按灰度取点,沿扫描线方向上的点的分布密度最大,测量时扫描线间的步距为 2 mm,初始测量点云约有 512 万个点.



(a) 初始测量点云 (b) 精简后的测量点云

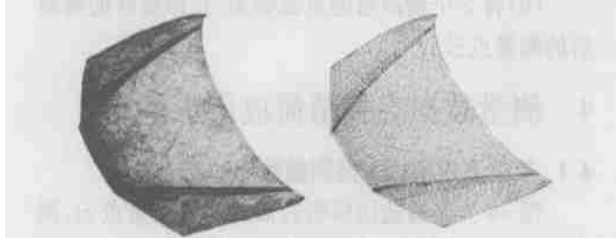
图 3 某铸造用模板表面测量点云的精简

该模板表面大多数为平面和圆弧面,少量的过渡面性质不明,在重构模板表面时,平面和大的圆弧面均不需要过密的点云,但在曲率较大的过渡面处需要分布密集的数据点.为此,直接调用角度-弦高联合准则法进行简化,简化时角度误差取 0.15° ,弦高误差取 0.108 mm,简化后的数据点云约为 0.19 万个点,见图 3b,图中可见在原有零件上的过渡面和圆弧面处含有较密集的数据点,而原有平面上的数据点非常稀疏.

4.1.2 汽车发动机罩的测量数据简化

图 4a 为该发动机盖板经拼合后的各次测量点云,测量采用德国的 ATOS 系统,该系统为基于光栅投影测量原理的非接触式测量系统.采用本文算法精简时,由于发动机盖板表面变化平缓、曲率不大,

所以可以直接调用包围盒算法对其进行简化处理. 取包围盒扩大因子的 $\rho_1 = 5 \text{ mm}$, 取 $\rho_2 = 1 \text{ mm}$, 拟合双参数二次曲面时的点数 $n = 30$. 图 4b 为简化后的测量点云, 简化前测量点数约为 2213 万个, 简化后仅为约 312 万个, 可见大大减小了总的密度. 另外, 原有的各数据拼合后, 边界上都存在着重合区域, 该区域的数据密度较大. 进行数据简化后, 原有的重合区域与未重合区域的数据点密度相同, 因此数据简化也可以消除重合区域的冗余点.

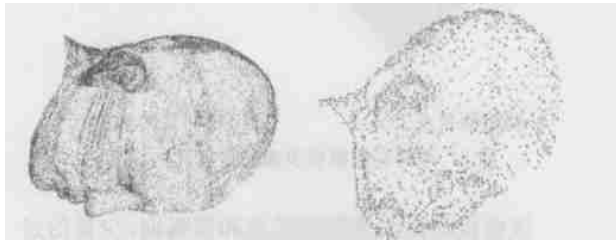


(a) 简化前 (b) 简化后

图 4 汽车发动机盖板的数据点云简化

4.1.3 人头像测量数据简化

图 5a 为人头像(一半)的初始测量数据, 测量仍采用德国的 ATOS 系统. 采用包围盒法对点云进行简化, 取包围盒的 $\rho_1 = 115 \text{ mm}$, $\rho_2 = 0.15 \text{ mm}$, $n = 30$, 简化前点云含有约 912 万个点, 处理后约有 1187 万个点.



(a) 初始点云 (b) 精简后的点云

图 5 人头像测量点云

当直接使用包围盒法简化后的点构造曲面时, 发现面部曲面与真实模型相差较大, 而且耳朵部分的拓扑结构不正确, 这是因为人面部的曲面曲率变化很大, 耳朵属于附加特征, 而包围盒法属于均匀减少数据的精简算法, 因此不适合处理此类问题.

使用上述的精简算法进行简化时, 取构造包围盒时的距离误差为 1 mm , 取扫描线点云简化时的角

度误差为 0.15° , 弦高误差为 1 mm , 最终获得简化后的点云见图 5b, 大约含有 317 万个点. 在鼻子、眼窝、耳朵等部位, 由于曲率大、表面变化陡峭, 因而保留了较多的测量点, 而面颊、脑门、头部等处的表面变化平缓, 保留的测量点也较为稀疏.

5 结论

实际应用表明, 采用角度 - 弦高联合准则法和包围盒法, 均能够对逆向工程中由非接触法获取的密集测量数据进行直接、有效地精简. 其中, 角度 - 弦高联合准则法适用于处理按扫描线存储的测量点云, 而包围盒法可以对散乱测量点云进行直接精简, 但仅适合精简曲面变化平缓、附加特征少的测量数据. 基于上述 2 种算法构造的数据直接精简方法可以适用于各类测量点云的直接精简, 对于曲率变化大、含有较多附加特征的完全散乱测量数据仍具有较好的精简效果.

参考文献:

- [1] Weir D J, Milroy M J, Bradley C, et al. Reverse engineering physical models employing wraparound B-spline surfaces and quadrics[A]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers [C]. Suffolk, UK: Professional Engineering Publishing Limited, 1996. 147 - 157.
- [2] Filip D, Magedson R, Markot R. Surface algorithms using bounds on derivatives[J]. Computer Aided Geometric Design, 1986, 3(2): 295 - 311.
- [3] Sun W, Bradley C, Zhang Y F, et al. Cloud data modelling employing a unified non-redundant triangular mesh [J]. Computer Aided Design, 2001, 33(2): 183 - 193.
- [4] Eck M, DeRose T, Duchamp T, et al. Multiresolution analysis of arbitrary meshes[A]. Proceedings of SIGGRAPH Computer Graphics [C]. New York: ACM, 1995. 82 - 90.
- [5] Hoppe H. Progressive meshes [A]. Proceedings of SIGGRAPH Computer Graphics [C]. New York: ACM, 1996. 99 - 108.
- [6] Ferrie F P, Lagarde J, Whaitte P. Darboux frames snakes and superquadrics: geometry from the bottom up [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(8): 71 - 83.
- [7] Piegel L A, Richard A M. Tessellating trimmed NURBS surfaces[J]. Computer Aided Design, 1995, 27(1): 16 - 26.

(编辑 管咏梅)