

基于 B 样条曲面拟合的文物表面重建方法研究

张 洋, 岳东杰, 朱邦彦

(河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要 地面三维激光扫描技术具有传统文物测绘方法无法比拟的优势, 它的出现为高精度的文物测绘提供了新的思路。在建立文物数字模型的过程中, 针对文物表面多为不规则自由曲面的实际情况, 采用双三次 B 样条曲面拟合的方法对三维激光扫描仪采集的某铜像的面部点云数据进行表面重建, 得到了铜像面部的三维数字模型。

关键词 地面三维激光扫描 点云 B 样条 文物测绘 自由曲面重建

1 引 言

我国是历史悠久的文明古国, 五千多年的历史留给了我们众多珍贵的文物。各式各样的文物是我们中华民族悠久历史文化的见证, 具有着重要的历史、艺术和科学价值。文物的数字化展示和数字博物馆的建立是近年来研究的热点^[1]。对文物进行三维立体建模能够建立文物的永久、完整、准确的数字档案; 数字博物馆的建立能够使得人们通过电脑目睹文物的全貌, 从而缓解旅游推广和文物保护之间的矛盾。三维激光扫描技术是一种先进的全自动高精度立体扫描技术, 它不仅具有获取速度快、精度高、实时性强、全数字化等特点, 而且能够制作形式多样的数字产品, 通过对文物进行扫描得到文物的真三维数字模型, 实现了文物的三维可视化, 能在三维虚拟环境中实现多角度浏览和漫游, 对于建立文物永久的数字档案、保存和恢复文物原貌、文物的研究等方面均有着重要的意义。

大部分的文物的表面都是由自由曲面所构成, 它们往往都具有生动的外形和良好的美学效果如石雕、青铜器、玉器等, 但无法用平面或者二次曲面等准确的数学表达式来表示, 因此对这些具有自由曲面的文物的数字模型重建工作是一个亟待解决的问题。在计算机辅助设计和制造系统中, 双三次 B 样条曲面以其具有 C^2 连续、局部性质等良好性质已成为几何造型的核心。利用 B 样条曲面来构造自由曲面能够较好地真实曲面进行逼近, 得到光顺性好、精度高的自由曲面模型。

2 B 样条曲线曲面

2.1 B 样条曲线曲面的表达式

一条 K 次的 B 样条曲线可以表示为一段有理多项式函数: $p(u) = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,k}(u)$ 。其中 $d_i (0, 1, \dots,$

$n)$, 称为控制顶点, 又称控制多边形 $N_{i,k}(u) (i = 0, 1, \dots, n)$; 为第 i 个 k 次 B 样条基函数; u 为数据点 p_i 在参数域上的参数值。B 样条是由一个称为节点矢量的非递减参数 u 的序列 $u_0 \leq u_1 \leq \dots \leq u_{n+k+1}$ 所决定的 k 次分段式。根据 B 样条的递推定义, B 样条基函数^[2] 可以由下式表示:

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

本文采用三次均匀 B 样条的方法, 它的矩阵表达式为:

$$\begin{aligned} p_i(u) &= \frac{1}{6} [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -1 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_i \\ d_{i+1} \\ d_{i+2} \\ d_{i+3} \end{bmatrix} \\ &= f_1(u)d_i + f_2(u)d_{i+1} + f_3(u)d_{i+2} + f_4(u)d_{i+3} \quad (2) \end{aligned}$$

式中 $d_i, d_{i+1}, d_{i+2}, d_{i+3}$, 为特征多边形顶点, u 为参数, $u \in [0, 1]$ 。

2.2 B 样条曲线曲面拟合算法

对地面三维激光扫描采集的数据进行 B 样条曲线拟合时, 根据给定的点列 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 计算控制顶点 $d_j (j=1, 2, \dots, n+1, n+2)$, 并且要求拟合出的三次 B 样条曲线通过点列 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$, $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 并以为曲线段的结点, 即把首末数据点分别作为曲线的首末端点, 并把内数据点依次作为每段曲线的分段连接点。各段的 B 样条曲线的首点为:

$$p_i = p_i(0) = \frac{1}{6} (d_i + 4d_{i+2} + d_{i+3}), i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

最后一条 B 样条曲线的末点为:

$$p_n = d_{n+2} \quad (4)$$

由上式可知:方程个数为 n 个而需要的控制顶点的数量为 $n+2$ 个,那么根据给定的点列 $p_i (i=1, 2, \dots, n)$ 计算控制顶点 $d_j (j=1, 2, \dots, n+1, n+2)$ 需要补充两个边界条件才能使方程组解唯一。确定边界条件的方法有给定切矢边界条件和自由端点条件^[3],如图一为用 B 样条曲线对离散点进行曲线拟合实验。



图1 离散点的 B 样条曲线拟合

对 B 样条曲线拟合推广到三维上可以得到 B 样条曲面的拟合算法。类似于 B 样条曲线的重建, B 样条曲面的拟合算法要求数据点阵的四个角点是拟合的 B 样条曲面的四个角点,其他数据点为相应的相邻曲面片的公共角点。B 样条曲面重建由两个过程形成,即首先根据点云数据沿 v (或 u 向) 计算控制多边形顶点,然后根据求得的多边形沿 v (或 u 向) 计算多边形网格。B 样条曲面重建的具体步骤如下:

(1) 根据给定的点云数据 $p_{i,j} (i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n)$, 适当的选取一个方向为 u 向, 另一个为 v 向;

(2) 对网格数据点进行参数化, 构造向和的节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{m+6}]$, $V = [v_0, v_1, \dots, v_{n+6}]$;

(3) 在节点矢量 U 上, 根据数据点列 $p_{i,j} (i=0, 1, \dots, r)$ 进行 B 样条曲线插值, 可以反算出截面曲线的控制顶点 $d_i(v_j) (i=0, 1, \dots, m)$, 当下标 i 遍历 u 参数定义域节点就可以反算出 $m+3$ 条截面曲线的控制顶点 $d_i(v_j) (i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n+2)$;

(4) 然后在节点矢量 V 上, 以步骤三得到的控制顶点 $d_i(v_j)$ 为数据点列进行曲线反算, 求的 $m+3$ 条 B 样条曲线及其控制点;

(5) 最后将所求得的控制顶点及节点矢量 u, v 代入曲面的正算过程, 就可生成一张插值与给定数据点的双三次 B 样条曲面。

3 点云数据拓扑关系的建立及四边域网格的构造

三维激光扫描仪扫描得到的是散乱

的点云数据, 没有明显的几何分布特征。而 B 样条曲面重构要求点云数据在空间中表现为四边域网格, 否则产生的 B 样条曲面可能产生畸变, 因此建模之前需要建立点云的拓扑关系并构建四边域网格。在获取数据过程中, 三维激光扫描的光源是由步进电机带动做线性步进转动测量数据点的, 扫描得到的数据具备扫描线特征, 但数据的存储是按点集的形式存储的, 没有反映扫描线特征, 本文将通过点集的分层和排序的方法恢复其扫描线特征建立拓扑关系, 并通过重采样的方法构造四边域网格^[4]。

三维激光扫描可以看作以垂直于某一坐标轴 (设为 X 轴) 的一个平面截取被测曲面而得到扫描线数据^[5], 把同一 X 值的扫描线数据定义为一层, 并把层与层之间的方向和扫描线的方向分别定义为向 u 和 v 向。每一层数据几乎都在一个平面内 (在测量误差范围内), 可以通过判断点集是否落在同一平面内来识别属于同一条扫描线的点, 实现数据的分层。

通过数据的分层, 点云被分为若干个层片, 建立了各层片间的关系, 还需要通过数据的排序进一步建立各层片内数据的拓扑排序。数据排序以对应当前点的距离最小值作为判断下一点的标准。层内的点序排列好后, 依据层片中每一个点所在固定轴的平均值建立层片的顺序。

点云的排序和分层建立了点云的拓扑关系, 但是每条扫描线上数据的点数和分布规律不相同。为了得到满足曲面重构所要的四边域型值点网格, 本文采用了重采样的方法。先对扫描线进行 B 样条曲线插值, 然后沿曲线均匀地采 n 个点, 得到均匀分布的 v 向型值点, 最终获得 u 向和 v 向分别具有 m 和 n 个点的四边域型值点网格。

4 铜像表面的双三次 B 样条曲面重建

4.1 点云数据的获取与预处理

本次使用 Trimble 三维激光扫描仪 GX 对某塑像进行扫描。为了获取目标的完整数据, 设立了三个测站对塑像进行多角度的扫描, 每个测站之间保证有 20%—30% 的重叠度^[6], 并保证每相邻测站之间有三个到四个公共标靶。点云扫描的每个测站是以该测站的仪器中心为坐标基准的, 首先进行点云的配准, 将不同测站所得点云数据变换到统一的坐标系中。扫描的点云数据中不可避免地会包含有与扫描目标无关的背景点, 并且由于目标体表面反射特性、仪器扫描精度、外界环境等因素的影响, 所扫描点云的表面会存在飞点, 在建模前必须对这些噪声点进行剔除。海量的点云数据对计算机的

存储空间和处理速度都提出较高的要求,因此在对数据点进行曲面重建前,在保证点云精度和建模质量的前提下,应对数据点云进行适当地精简。本文基于后处理软件 Realworks 对扫描的点云进行了配准、去噪及精简,点云配准、去噪后如图 2 所示,利用 Realworks 随机采样的方法对点云进行精简,如图 3。

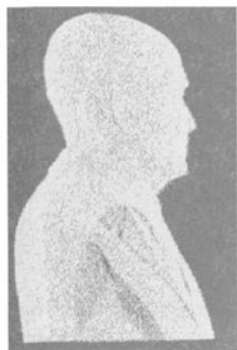


图 2 配准及去噪后的点云

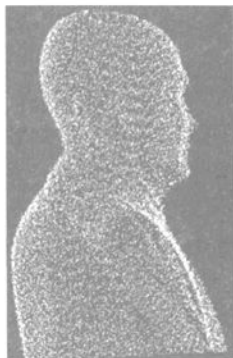


图 3 精简后的点云

4.2 曲面的重建

由于重建的表面比较复杂,有较大的曲率变化,对整个实体采用单片 B 样条构造曲面不仅难以构造四边域网格,而且可能因不满足网格变化一致性的要求而产生畸变的曲面。在进行曲面的建模时,首先应对所获得的点云数据进行区域分割,然后对单块的点云数据进行点云的分层、排序和重采样,构造满足 B 样条曲面重构所要的四边域型值点网格并进行单块曲面的拟合,最后将单块曲面进行

拼接就可以得到复杂曲面或实体的重构。本文以结构较为复杂的面部点云为例,其点云如图 4,运用 VBA 编制基于 AutoCAD 平台的曲面重构程序,实现了面部点云的重建,结果如图 5。美国 EDS 公司的软件 Imageware 具有较好的曲面构造的能力。利用 Imageware 软件通过内插构建曲面的方法也能够实现曲面的重建,结果如图 6 所示,通过比较可以看出其结果与基于 VB6.0 和 AutoCAD2004 编程实现的双三次 B 样条曲面拟合方法所得结果吻合较好。

5 结束语

地面三维激光扫描技术是刚刚兴起的一种新型的空间数据获取手段和技术,相对于传统的文物测绘方法,它在文物修复与保护、文物三维建模可视化、建立文物数字博物馆等方面都有着得天独厚的技术优势和广阔的应用前景。本文利用 B 样条曲面拟合的方法解决了大多数具有自由曲面的文物的曲面重建的问题,现阶段对于地面三维激光扫描点云的数据处理,如点云配准、数据精简、特征提取、数据分割、曲面拟合等方面仍需进一步的研究与改进,从而能够进一步提高曲面重建的精度和速度,得到更加形象逼真的文物数字模型。

参考文献

- 1 王昌翰,向泽君等. 三维激光扫描技术在文物三维重建中的应用研究. [J]. 城市勘测, 2010(6): 67 - 70.
- 2 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 科学出版社, 2000.
- 3 南良改. 基于三次 B 样条的三维重建方法的研究. [D]. 武汉理工大学 2009.
- 4 刘雯林. 三维散乱数据曲面重构技术综述. [J]. 工程图学学报, 2003(2): 143 - 147
- 5 慈瑞梅,李东波. 逆向工程中 NURBS 曲面重构技术研究. [J]. 南京理工大学学报, 2004(8): 390 - 394
- 6 郑德华,岳东杰,岳建平. 基于几何特征约束的建筑物点云配准算法. [J]. 测绘学报, 2008(4): 464 - 468.

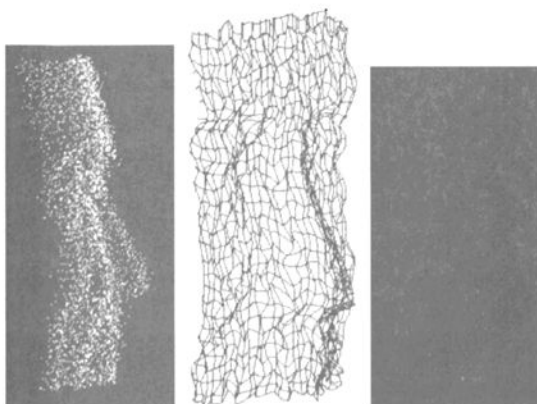


图 4 面部点云数据

图 5 重构的面部模型

图 6 Imageware 曲面重建