

基于激光线扫方式的点云数据精简表达及 STL 文件生成方法

姚春荣 陈兆学 安美君 王远军

上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093

摘要 激光线扫方式扫描获取的点云数据量大,不利于存储、处理和分析,为此提出了一种基于向量夹角计算的点云数据精简表达方式及相应 STL 文件生成方法,可有效精简大量的点云数据,且能够通过保留数据对象的关键拐点而维持原有数据对象信息的完整性。基于邻近点分析生成 STL 文件的方法形成的三角面片之间无常规 STL 文件生成方法所具有的缝隙及畸变现象,因此,具有较大的适用性和实际参考价值。

关键词 图像处理;激光点云数据;线扫方式;数据精简;STL 文件

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101003

Simplified Expression of Point Cloud Data and STL File Generation Method Based on Laser Line Scanning Mode

Yao Chunrong Chen Zhaoxue An Meijun Wang Yuanjun

School of Medical Instrument & Food Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China

Abstract As the data volume of point clouds obtained by means of the laser line scanning mode is very large, and not convenient for storage, processing and analysis. A simplified expression of point cloud data based on vector angle computing as well as the corresponding STL file generation method is introduced. The proposed method can not only reduce point cloud data efficiently, but also reserve the integrity of the original data object information by retaining key inflection point data of the related object. Different from common generating method of the STL file, the gap and distortion between triangles are avoided by the STL file generation method based on adjacent points analysis and is of great applicability and practical reference value.

Key words image processing; laser point cloud data; linear scanning mode; data reduction; STL file

OCIS codes 100.1160; 100.6890; 120.2040; 120.5800; 120.6650

1 引言

计算机辅助设计(CAD)是采用计算机作为工具,将计算机用于产品的设计、制造和测试等过程的技术。目前大部分工业产品是根据二维或三维 CAD 模型设计制造而成的,在实际应用中常常需要根据产品实物生成物体的几何数据采集方式,可以快速获取目标表面高精度的三维几何数据模型。即根据已存在的产品实体或模型,反向推出产品设计数据,该过程也被称为逆向工程^[1]。三维激光扫描技术^[2]是一项新兴的获取三维空间数据模型,使得以非接触的方式获取三维物体的表面信息成为了可能。同传统的手段相比,该技术可以连续、自动、快速地采集大量目标物表面的三维坐标和相关数据,即通常所谓点云^[3]信息。其中除了具有空间位置信息以外,有的还包括颜色信息和强度^[4]信息。

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-05-26; 网络出版日期: 2015-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61201067)、上海市教委科研创新项目(13YZ069)

作者简介: 姚春荣(1990—),男,硕士研究生,主要从事立体视觉与图像处理方面的研究。

E-mail: yaochunrong1990@sina.com

导师简介: 陈兆学(1975—),男,博士,副教授,主要从事医学图像处理、医学信号处理、立体视觉等方面的研究。

E-mail: chenzhaoxue@163.com(通信联系人)

目前在 CAD 领域利用激光点云进行高精度测量与重建已成为趋势,同时也不可避免地带来了新的问题。利用三维激光扫描仪^[6]得到的数据形式为大量的实物表面点的空间坐标,数据量很大,而且容易存在随机噪声点、坏点和冗余点,不利于存储、传输和点云数据处理工作。在三维点云数据处理中,人机交互的方法是最简单而直接的方式。操作人员通过软件显示出图形,并找出明显的干扰点并予以删除。但是这种方法并不适合点云数据量特别大的情况,如通过激光点扫或线扫方式所获得的原始点云数据。因此有必要研究基于计算机实现原始点云数据精简和其中坏点和随机噪声点滤波的自动化算法,从而为后续的点云数据处理和分析奠定必要的基础。

通常,点云数据简化问题可描述为:点集 $P_M = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_M\}$ 表示一个嵌入三维空间的二维光滑流行表面 S ,在满足用户精度要求的条件下,点集 P_M 被简化为点集 $P_N (N < M)$,且 P_N 到原始采样表面 S 的距离最小。常用的点云简化算法包括包围盒法、随机采样^[6]、曲率采样、聚类法、迭代法^[7]、均匀网格法和几何图像法^[8]等。这些方法大多是针对一般点云数据而提出的通用简化算法,当应用于激光线扫方式所获得点云数据时,往往针对性不强而精简效率不高。如包围盒法是采用中心点代替小包围盒中点云,从理论上可以精简点云数据,节省空间。但对于线扫方式的点云数据,会破坏数据的真实性,改变原有目标对象特征。均匀网格法是基于中值滤波原理提出的算法,虽然可以很好地克服样条曲线的限制,但对于处理形状复杂或突变明显的物体表面的点云,会导致点云数据大量丢失,点云模型严重失真。随机采样一致性算法虽然稳健性强,高效高精度,但对于难以建立抽象对象的模型,在设置迭代上限情况下结果可能错误。结合激光线扫点云数据获取的特点研究有针对性的点云数据精简方法,将大大提高点云数据精简算法的速度和效率。

另外,在逆向工程过程中,由所获取点云数据直接生成立体光造型(STL)^[9]文件,可有助于实现高效地快速原型制造(RPM)集成^[10]。因此,由点云数据直接生成 STL 文件是当前研究的热点问题。作为 CAD 中描述三维几何形状的常用标准文件格式之一,STL 文件由一系列离散的三角面片数据组成,为多个三角形面片的集合。其中每个三角形面片有四个数据项表示,即三角形的三个顶点坐标和三角形面片的外法线矢量。常用的 STL 文件生成方法有球形法、平面德洛内法、 α 形法、场函数法及空间三角几何法^[11]等。由于 STL 文件不包含其中点云相关空间拓扑关系的数据,加上具体 STL 文件格式生成方法或从 CAD 软件到 STL 文件格式转换过程造成的问题,所产生的 STL 文件难免有特定的表达缺陷。其中,最常见的缺陷有缝隙(即三角形面片的丢失)、畸变(即三角形面片的所有边都共线)、三角形面片的重叠及歧义的拓扑关系等。如何在点云数据精简的基础上,生成不具有上述表达缺陷的 STL 文件,也是激光线扫点云数据精简和 STL 生成算法研究过程中所必须考虑的问题。

基于激光线扫方式^[12]所获得点云数据的特点,本文提出了一种通过向量夹角计算实现点云数据精简及基于邻近点分析生成 STL 文件的方法。基于向量夹角计算的激光线扫点云数据精简表达方法,对相邻数据点形成的空间向量夹角大小进行限定和约化而实现点云数据精简,基于邻近点分析的 STL 文件生成方法连接相邻扫描线上最近数据点构成三角面片。这种点云数据精简和 STL 文件生成方法可大大简化三维线扫方式的点云数据处理过程,对三维点云激光扫描技术的应用和发展有重要意义和价值。

2 基于向量夹角计算的激光线扫数据精简表达与基于邻近点分析的 STL 文件生成

2.1 基于向量夹角计算的激光线扫数据精简

基于向量夹角计算实现激光线扫点云数据精简的基本思想是以单根扫描线上点云数据为研究对象,通过计算并限定相邻三数据点间最大向量夹角(偏折角度)完成对点云数据中关键数据点的筛选而最终实现对点云数据的精简。其精简原理示意图如图 1 所示。

基于向量夹角计算的数据精简算法可具体描述如下。

步骤 1:以单根扫描线上点云数据为研究对象,设扫描线上数据点个数为 n ,各数据点需按 Y 轴数值由小到大依次进行排列,依次可表示为 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$,并且设定最大向量偏折角为 α 。

步骤 2:令 $m=1$,以数据点 P_m 为起始点。

步骤 3:数据点 P_{m+1} 和 P_{m+2} 分别向 P_m 作差向量,且向量之间形成的夹角为 β_m 。

步骤 4:比较 β_m 与 α 的大小,若 $\beta_m > \alpha$,保留数据点 P_{m+1} ,并以 P_{m+2} 为起始点,然后重复步骤 3,否则进行下一步。

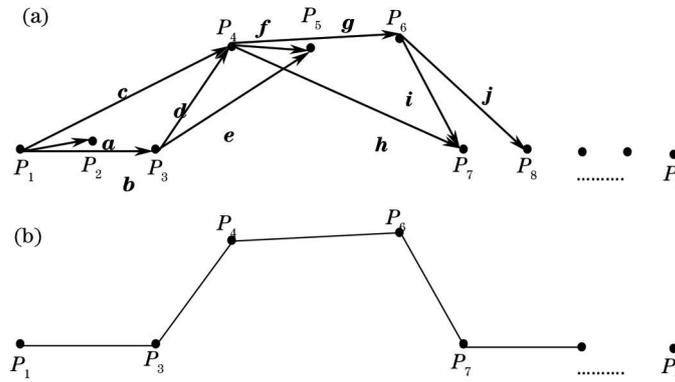


图1 基于向量夹角计算点云数据精简原理示意图。(a) 精简前;(b) 精简后
Fig.1 Diagram of data simplification of point cloud based on vector angle computing.

(a) Before simplification; (b) after simplification

步骤5: 滤除数据点 P_{m+1} , 并以 P_m 点为起始点, 重复步骤3。

使用向量夹角算法对数据精简表达, 可根据不同研究对象所对应的扫描曲线曲率大小设定合适的最大向量偏折角, 能够在保持原有数据对象几何信息的完整度基础上有效地实现程度可控的点云数据精简。为了更好地显示精简之后的点云数据, 可通过折线将扫描线上各关键数据点先后顺次相连, 形成精简后的连续三维点云图像^[13]。

2.2 基于邻近点分析的 STL 文件生成

邻近点分析的基本思想为根据数据精简表达之后单根扫描线上各关键数据点的关系, 以各扫描线 TXT 数据为基本单位, 重新规定三维数据点动态二维数组分布且将扫描线按照扫描先后顺序依次标号, 同时设第 N 条扫描线数据点个数为 $P(N)$ 。

定义1: 如果扫描线 N 上数据点个数 $P(N)$ 多于扫描线 $N+1$ 数据点个数 $P(N+1)$, 则称扫描线 N 上所有的数据点为主点, 扫描线 $N+1$ 上所有的数据点为辅点。同理, 如果扫描线 N 数据点个数 $P(N)$ 少于扫描线 $N+1$ 数据点个数 $P(N+1)$, 则称扫描线 $N+1$ 上所有的数据点为主点, 扫描线 N 上所有的数据点为辅点。

定义2: 通过线段相连法, 以一个主点与之空间距离最短的辅点连接, 则此辅点称为主点对应的辅点。

定义3: 以逆时针方向连线, 若主点对应的辅点连线构成的三角形, 则称主三角形; 若主点对应的点为邻近主点对应的辅点构成三角形, 则称辅三角形。

基于邻近点分析的 STL 文件生成具体过程如下。

1) 若扫描线 S 数据点个数多于扫描线 $S+1$ 数据点个数, 即 $P(S) > P(S+1)$, 称扫描线 S 数据点为主点, 扫描线 $S+1$ 数据点为辅点。则有两种情况:

① 若主点与邻近主点对应的辅点不相同, 可构成主三角形和辅三角形。三角形顶点按逆时针方向分别为:

主三角形: a 为第一个主点; b 为第一个主点对应的辅点; c 为第二个主点对应的辅点。构成如图 2(a) 所示三角形。

辅三角形: a 为第一个主点; b 为第二个主点对应的辅点; c 为第二个主点。构成如图 2(b) 所示三角形。

② 若主点与邻近主点对应的辅点相同时, 可构成主三角形。三角形顶点按逆时针方向分别为:

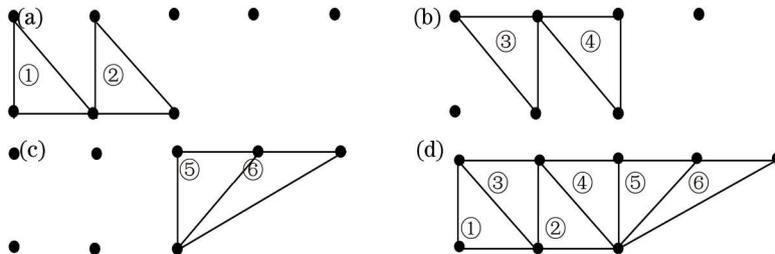


图2 $P(S) > P(S+1)$ 时构成的三角形

Fig.2 Triangles constructed while $P(S) > P(S+1)$

主三角形: a 为第一个主点; b 为第一个主点对应的辅点; c 为第二个主点。构成如图2(c)所示三角形。

综上,扫描线 S 数据点多于扫描线 $S+1$ 数据点时,则可构成的三角形如图2(d)所示。

2) 若扫描线 S 数据点少于扫描线 $S+1$ 数据点,即 $P(S)<P(S+1)$,称扫描线 $S+1$ 数据点为主点,扫描线 S 数据点为辅点。则也有两种情况。

① 若主点对应的辅点不相同,可构成主三角形和辅三角形。三角形顶点按逆时针方向分别为:

主三角形: a 为第一个主点; b 为第二个主点对应的辅点; c 为第一个主点。构成如图3(a)所示三角形。

辅三角形: a 为第一个主点; b 为第二个主点; c 为第二个主点对应的辅点。构成如图3(b)所示三角形。

② 若主点对应的辅点相同时,可构成主三角形。三角形顶点按逆时针方向分别为:

主三角形: a 为第一个主点; b 为第二个主点; c 为第一个主点对应的辅点。构成如图3(c)所示三角形。

综上,扫描线 S 数据点少于扫描线 $S+1$ 数据点时,则可构成的三角形如图3(d)所示。

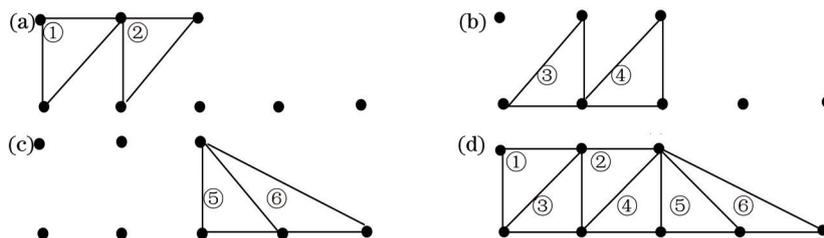


图3 $P(S)<P(S+1)$ 时构成的三角形

Fig.3 Triangles constructed while $P(S)<P(S+1)$

激光线扫数据的特点是针对特定坐标 (X, Y) 处 Z 值而最终获取的空间点云数据,所以对激光线扫方式获取的点云而言为有序数据。根据激光线扫方式扫描数据特点,所提出的基于邻近点分析的STL文件生成方法基本思想类似于通过网格覆盖目标对象表面,且此网格为大量相邻的空间三角形构成,因此所构成的三角面片无空隙现象。通过线段相连法,以一个主点与之空间距离最短的辅点连接,且一个主点只对应唯一辅点,主点之间无重复定义,这样就不会形成重复相连情况,即无重叠现象。基于邻近点分析的STL文件生成具体流程如图4所示。

3 实验结果与讨论

为了验证本文算法的有效性,进行了基于向量夹角计算的数据精简与基于邻近点分析的STL文件生成实验。实验点云数据采集以空间实物为研究对象。

为说明不同精简角度对数据的影响,实验以计算器数据模型为例,精简角度在 $1^\circ\sim 5^\circ$ 之间,精简效果如图5所示。从图5可以看出,设定的向量偏折角 α 越大,精简数据量越多,但需根据实际不同的研究对象设定合适的最大向量偏折角,以保证精简后的研究对象点云数据几何数据的完整性及细节特征不能缺失。精简比例及细节影响如表1所示。

为充分验证基于向量夹角计算的数据精简算法的有效性及其适用性,实验采用5组空间实物扫描模型,同时为了对精简之后的点云数据更好显示,通过各精简后扫描线上各关键数据点按扫描顺序顺次相连,可形成完整连续的三维点云图像,如图6所示。

从图6可以看出,点云数据精简算法对各类目标均可以可控精度保证用较少的点表示点云数据,且都能够有效保留数据对象中的关键拐点信息。因此,所提出的基于向量夹角算法实现激光线扫点云数据精简具有较高的精简效率和较大的适应性和灵活性。同时为说明本文算法相比常用精简算法在线扫方式获取的点云数据精简效果更好,通过与包围盒法对比实验可以看出,常用算法对于线扫方式的点云数据,破坏数据的真实性,改变原有目标对象特征,基本不能显示原有的细节特征及深度信息,如图7所示。

本文方法本质上将扫描线上相邻关键拐点之间的数据用连接它们的直线段来代替,进而达到点云数据精简的目的。针对该方法,如果采用球形STL生成法将精简后的点云数据直接转换成STL文件,显然不会出现理想的结果。为了验证本文方法有效性,基于球形STL生成方法将如图6所示原始点云数据进行STL文件转换,转换结果如图8所示。显然,直接对激光线扫原始点云数据进行一般STL转换,不仅数据量大,耗时长,且从实验结果图像可以看出,构成的三角面片之间存在明显的缝隙及畸变现象。

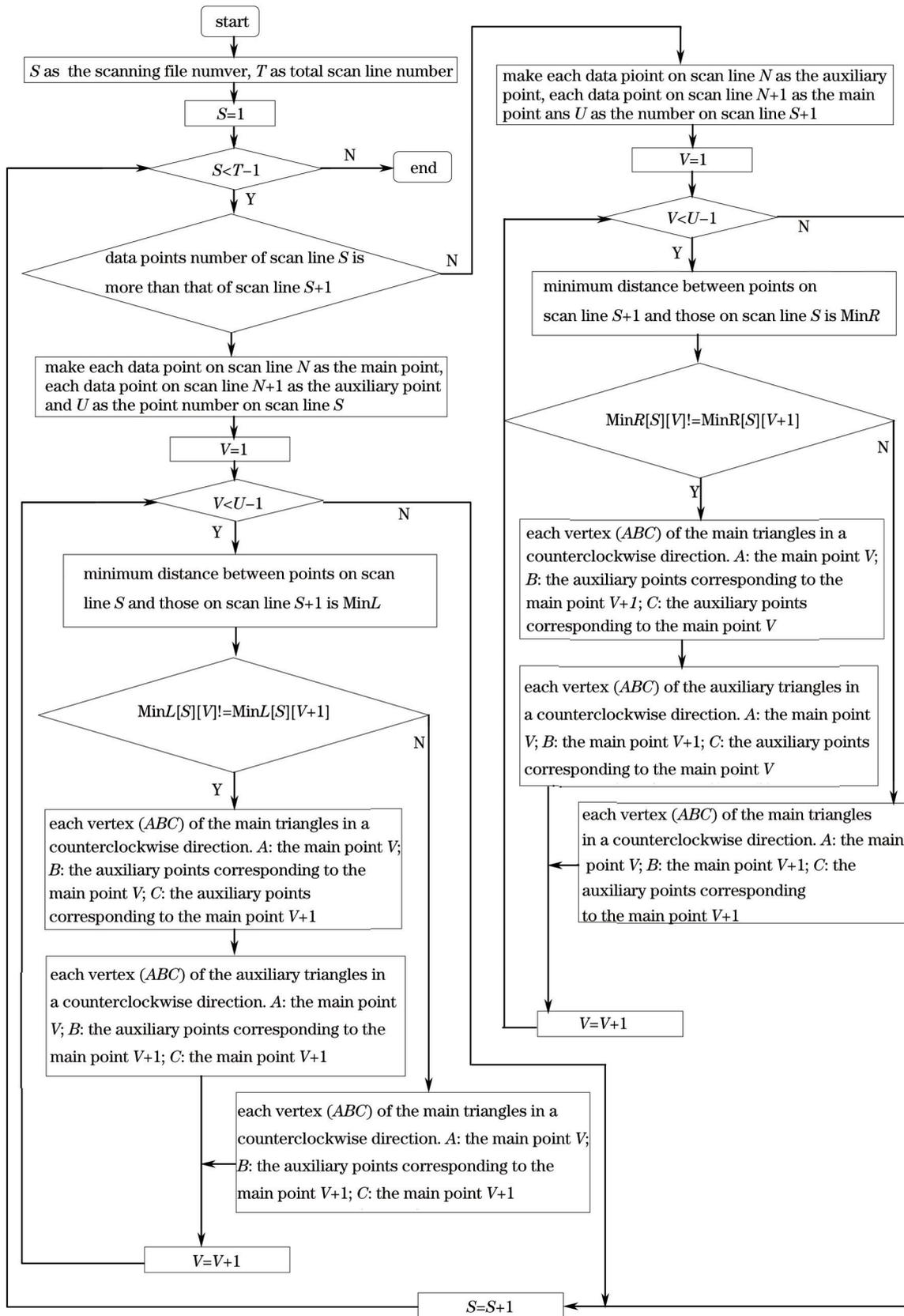


图 4 基于邻近点分析的 STL 文件生成流程图

Fig.4 Flow chart of STL file generation method based on adjacent points analysis

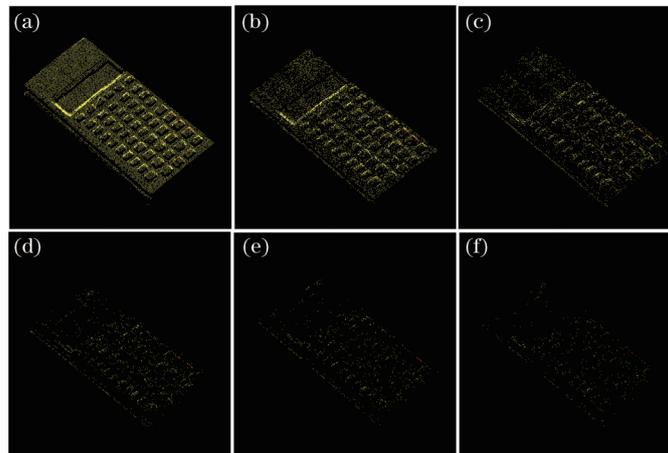


图5 不同精简角度对数据细节的影响。

(a)原始点云数据; (b) $\alpha = 1^\circ$; (c) $\alpha = 2^\circ$; (d) $\alpha = 3^\circ$; (e) $\alpha = 4^\circ$; (f) $\alpha = 5^\circ$

Fig.5 Effect on data details by different angles.

(a) Original point cloud data; (b) $\alpha = 1^\circ$; (c) $\alpha = 2^\circ$; (d) $\alpha = 3^\circ$; (e) $\alpha = 4^\circ$; (f) $\alpha = 5^\circ$

表1 不同精简角度对数据影响的比较

Table 1 Comparison of effect on data details by different angles

Calculator model	Simplified points	Simplified proportion	Boundary /details
Original point cloud	223398		border & details are complete and clear
$\alpha = 1^\circ$	110089	50.72%	boundary is complete and details are clear
$\alpha = 2^\circ$	53533	76.04%	boundary is complete and details features are slightly clear
$\alpha = 3^\circ$	29920	86.61%	boundary is complete and main features are clear
$\alpha = 4^\circ$	19952	91.07%	boundary is complete and main features are slightly clear
$\alpha = 5^\circ$	14740	93.40%	boundary is complete and details are missing

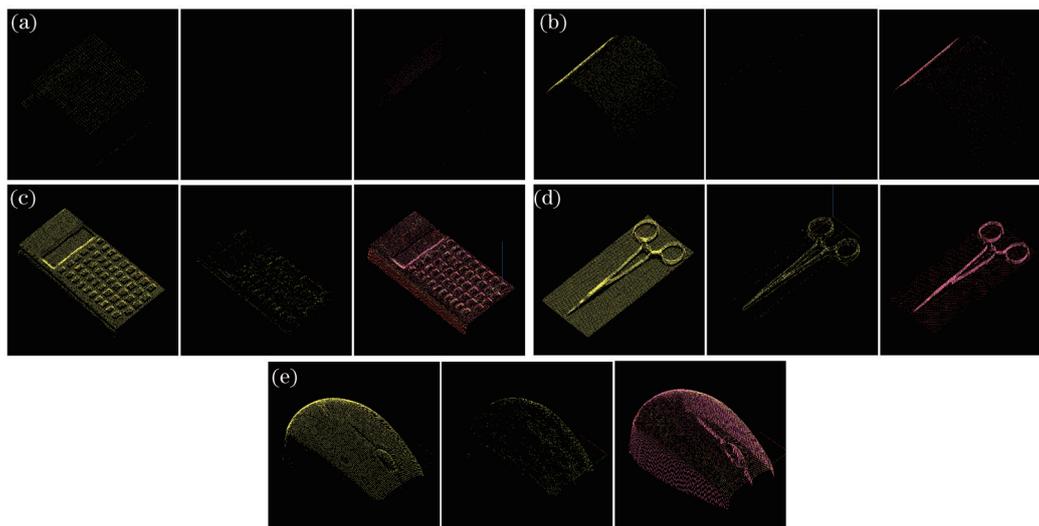


图6 基于向量夹角计算的点云数据精简。

(a) 平面模型; (b) 曲面模型; (c) 计算器模型; (d)手术剪模型; (e) 鼠标模型

Fig.6 Data simplification of point cloud based on vector angle computing.

(a) Plane model; (b) surface model; (c) calculator model; (d) surgical shear model; (e) mouse model

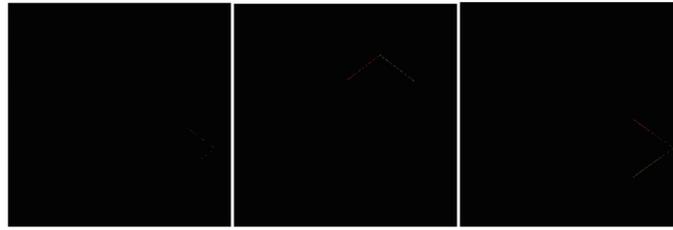


图7 基于包围盒法点云数据精简

Fig.7 Data simplification of point cloud based on bounding box

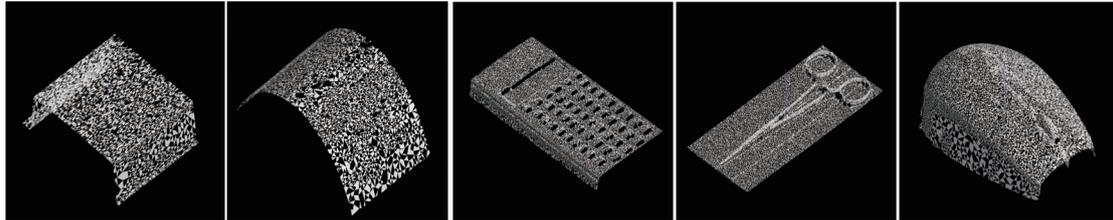


图8 球形法生成 STL 文件

Fig.8 STL files generation based on spherical method

采用基于邻近点分析的 STL 文件生成方法对基于向量夹角计算方法所精简后点云数据进行 STL 文件转换的结果如图 9 所示。从总体上说,每增加一个三角网格,意味着增加一个数据点,因此其总体时间复杂度为 $O(m)$, m 为数据点个数。与空间散乱数据三角网格典型算法的时间复杂度比较如表 2 所示。从实验结果可以看出,本文方法所生成的 STL 文件视觉效果有明显改善,本文算法不仅使得处理的点云数据量大大减少,且构成的三角面片无空隙及重叠现象,不失为一种非常有效的 STL 文件生成方法。

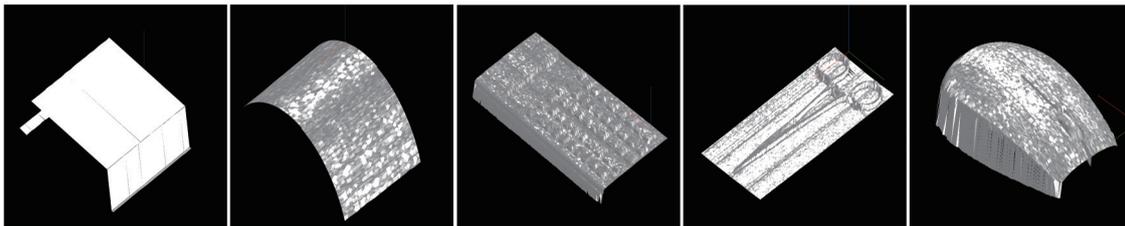


图9 基于邻近点分析的 STL 文件生成

Fig.9 STL file generation method based on adjacent points analysis

表 2 不同算法时间复杂度比较

Table 2 Comparison of time complexity for various algorithms

Algorithm / method	Plane Delaunay	Field function method	Spherical method	Method of α	Proposed algorithm
Complexity	$O(M \log M)$	$O(M \log M)$	$O(M^2)$	$O(M^2)$	$O(M)$

4 结 论

在激光线扫方式三维点云数据处理过程中,为尽可能简化点云数据量及降低点云数据复杂度,并保持原有点云数据信息的完整度,提出了基于向量夹角计算的点云数据精简算法,此方法不仅可以可控精度有效精简大量的点云数据,而且有效保留了扫描对象中关键数据点,确保用较少的数据点表示尽可能丰富的信息。同时针对精简后的点云数据进一步提出了基于邻近点分析的 STL 文件生成方法,能够保证后续形成的三角面片之间无缝隙、畸变及重叠等现象,取得了很好的效果。提出的方法对各类以线扫方式所获得的点云数据目标具有较大的适用性和实际参考价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Shuyi, Qian Xingsan. Respiratory face mask design based on reverse engineering[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2006, 28(1): 68-70.
- 王殊轶, 钱省三. 基于逆向工程的呼吸面罩设计[J]. 上海理工大学学报, 2006, 28(1): 68-70.

- 2 Zhang Mingyang, Tang Bihong, Li Haolin. New method of measurement of cylindricity based on 3D laser sensors[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(3): 285-288.
张明阳, 汤碧红, 李郝林. 基于三维激光传感器的圆柱度测量新方法[J]. 上海理工大学报, 2013, 35(3): 285-288.
- 3 Liu X. Functional surface reconstruction from unorganized noisy point clouds[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2015, 12(3): 366-372.
- 4 Zhang H, Wang J, Fang T, *et al.*. Joint segmentation of images and scanned point cloud in large-scale street scenes with low annotation cost[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2014, 23(11): 4763-4772.
- 5 Chen Kai, Zhang Da, Zhang Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812003.
陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812003.
- 6 Lei Yuzhen. Research on Some Key Technologies of 3D Point Cloud Data Processing[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
雷玉珍. 三维点云数据处理中的若干关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- 7 Hulik R, Spangel M, Smrz P, *et al.*. Continuous plane detection in point-cloud data based on 3D hough transform[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(1): 86-97.
- 8 Mayer C, Metscher B D, Müller G B, *et al.*. Studying developmental variation with geometric morphometric image analysis (GMIA)[J]. Plos One, 2014, 9(12): e115076.
- 9 Ma Shumei. Study on Key Technologies for Integrated Reverse-Engineering Faced Product Rapid Development[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
马淑梅. 面向产品快速开发的集成逆向工程若干关键技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- 10 Ouvrard, R, Trigeassou J C. On embedded FIR filter models for identifying continuous-time and discrete-time transfer functions: The RPM approach[J]. International Journal of Control, 2011, 84(3): 616-632.
- 11 Chen Jianshu. Study on Hollowing STL Model and Shape Follow-Up Technology in Rapid Prototyping[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
陈建树. 快速成形中STL模型的镂空与随形技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- 12 Hu Jinzhong, Yu Xiaofen, Peng Peng, *et al.*. Layout optimization of three-dimensional coordinate measurement system based on laser multi-iteration[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108006.
胡进忠, 余晓芬, 彭鹏, 等. 基于激光多边法的坐标测量系统布局优化[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108006.
- 13 Song Wei, Li Xiaolei, Zhang Ya'nan, *et al.*. OpenGL simulation for 3-CCD target positioning system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101204.
宋薇, 李小磊, 章亚男, 等. 基于OpenGL的3-CCD靶定位仿真系统[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 101204.

栏目编辑: 苏 岑