

三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用

张吉星¹ 程效军^{1,2} 程小龙¹

¹同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

²现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092

摘要 针对传统排水量计量方法工作强度大、效率低等缺点, 依托近年来迅速发展的三维激光扫描技术, 提出了一种基于点云切片技术的排水量计量方法。该方法将船舶点云沿着 z 轴分割成若干切片点云, 利用三角形面积法计算切片上下横截面面积, 最终计算出每个切片的体积并累加获得船舶排水量。此外, 通过建立船舶的三维模型, 利用软件获得对应高度的排水量, 并以此作为参考值与该方法的结果进行对比, 最后计算计量结果的相对扩展不确定度。经实验验证, 该方法能够以较高的精度获取船舶排水量, 为船舶排水量的计量提供了一种全新的技术手段。

关键词 测量; 排水量; 点云切片; 三维激光扫描技术; 三维模型; 相对扩展不确定度

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1204003

Application of Three-Dimensional Laser Scanning Technology in Measurement of Ship Displacement

Zhang Jixing¹ Cheng Xiaojun^{1,2} Cheng Xiaolong¹

¹College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

²Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of the National Administration of Surveying Mapping and Geoinformation, Shanghai 200092, China

Abstract Traditional methods of calculating displacement often have certain shortcomings and drawbacks such as high labor intensity and low efficiency. With the help of the 3D laser scanning technique, this paper introduces a displacement computation method based on point cloud slicing technique. The proposed method first segments the point cloud into several point cloud slices along z -axis. The triangle-area-integration method is adopted to calculate the cross-sectional area of each slice. The displacement can be calculated through the accumulation of each slice volume. To compare the results of the proposed methods, the displacement results of corresponding heights computed by commercial software are taken as a reference. Then we calculate the relative expanding uncertainty of the measurement results. The test results indicate that the proposed method can calculate the displacement with high accuracy, thus providing the displacement calculation with a new approach.

Key words measurement; displacement; point cloud slice; three-dimensional laser scanning technique; three-dimensional model; relative expanding uncertainty

OCIS codes 120.6650; 120.6085; 280.3640; 280.4750; 100.2000

1 引 言

船舶排水量的精确、快速测量是船舶计量部门迫切需要解决的专业问题。船舶的排水量是指船舶在一定的状态下, 在水中所排开水的体积(m^3)或者质量(t), 也是船舶自身质量。排水量又可分为轻排水量、重排水量和实际排水量三种: 1) 轻排水量又称空船排水量, 是船舶本身加上船员和必要的给养物品三者质量

收稿日期: 2016-07-21; 收到修改稿日期: 2016-09-25

作者简介: 张吉星(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维激光扫描数据处理方面的研究。

E-mail: 15900522279@163.com

导师简介: 程效军(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事三维激光扫描与近景摄影测量方面的研究。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

的总和,是船舶最小限度的重量;2)重排水量又称满载排水量,是船舶载客、载货后吃水达到最高载重线时的重量,即船舶最大限度的重量;3)实际排水量是船舶每个航次载货后实际的排水量。

目前国际上常用的方法是几何测量法,包括邦戎曲线法、静水力曲线法以及平均型吃水配合各种修正法^[1-2]。这些方法的基本原理都是利用全站仪测量船体一定高度的特征点拟合出断面的面积,再用断面面积乘以断面间的高度累加算出排水量。这些方法的优点是快速简便,但对于包含有大曲面构造的船体,几何测量法的测量精度难以满足船舶排水量精确计量的需求^[3]。因此,为了提高排水量计量的精度,需要进一步提高船体测量点的密度和数据完整性。

近年来迅速发展的三维激光扫描技术,可以弥补传统排水量计量方法的缺点。三维激光扫描技术可以大面积获取被测对象表面的三维坐标数据,并具有数据获取速度快、实时性强、数据量大、主动性强、点位密集、精度高等突出优点,已成功应用于文物保护、城市建筑测量、飞机船舶制造等领域^[4-5]。本文基于三维激光扫描技术对船舶排水量计量方法进行了研究,提出了一种基于点云切片技术的排水量计量方法,将船体表面空间的三维点云数据分层,利用每一层的切片点云数据计算该层的上下船体轮廓面积,再依据切片的厚度求得该层切片的体积,最后对每层切片体积进行累加计算不同高度的船体体积,计算出某一高度下的船舶体积在数值上就等于某一状态下船舶排开水的体积,依照此方法,即可获得船舶在不同状态下的实际排水量,即在不同的吃水深度时船舶所排开的水的体积。构建船体三维模型,并利用 Geomagic Studio 获取模型不同高度处的标准体积,与切片累加的体积进行对比,从而验证本文方法的精度。

2 船舶排水量的计算

对船体进行扫描,获取船体完整的激光点云数据,扫描的流程如图 1 所示^[6-8]。获取船体的点云数据后,需对点云进行配准、空洞修补、压缩等预处理,得到完整点云后,利用点云切片技术实现排水量的计算,点云处理的技术路线如图 2 所示。

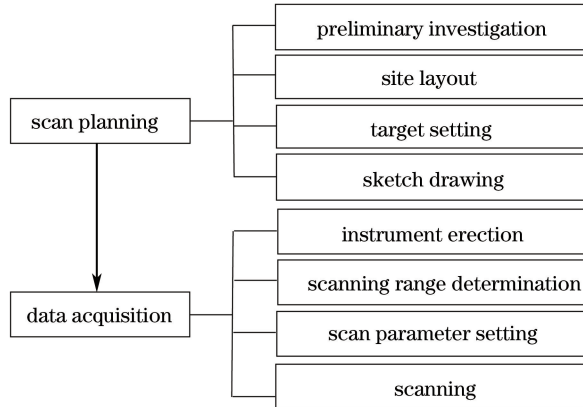


图 1 三维激光扫描仪数据采集流程

Fig. 1 Data collection process of 3D laser scanner

2.1 点云数据预处理

由于环境等因素,扫描过程中会产生许多噪声点,因此,需对点云进行预处理,预处理的结果直接影响后期的建模效率和精度。点云预处理主要包括点云配准、去噪、空洞修补以及压缩过程。

预处理可以通过预处理软件或算法实现。点云预处理操作在 FARO SCENE 中完成,然后将预处理后的点云数据以 txt 格式导出。

2.2 基于点云切片技术的排水量计算

2.2.1 点云切片的生成

设有散乱点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in \mathbf{R}^3$, \mathbf{R}^3 表示三维欧氏空间。则点集 P 的坐标范围是 $(x_{\min}, y_{\min}, z_{\min}) \sim (x_{\max}, y_{\max}, z_{\max})$ 。点云切片的生成可描述为采用一组平行平面按给定方向对三维点云进行划分^[9]。假设有一平行于 xoy 平面、法矢指向 z 轴正向的平面集 T ,且该平面集 T 由一组 z 坐

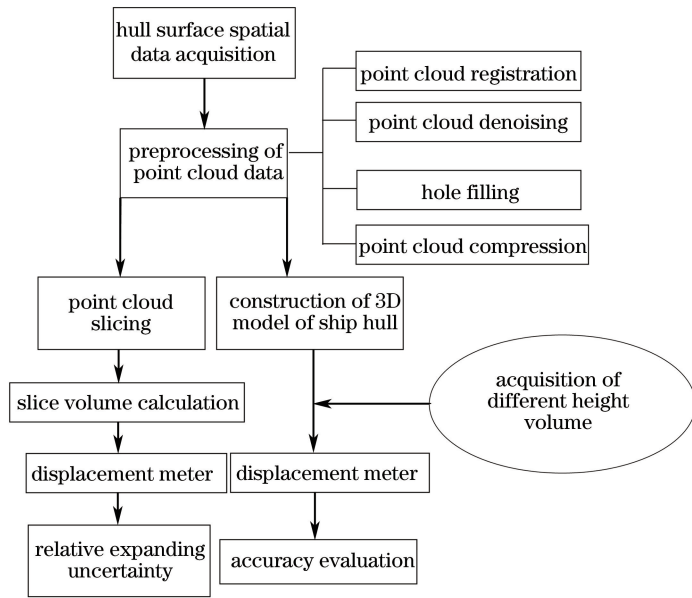


图 2 点云处理流程图

Fig. 2 Flow chart of processing point cloud

标序列表示为 $Z = (z_0, z_1, \dots, z_m)$ ，满足

$$\begin{cases} z_0 < z_1, \dots, z_m \\ z_0 = z_{\min}, z_m = z_{\max} \\ z_{\text{pitch}} = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{m} \\ z_i = z_0 + iz_{\text{pitch}}, i = 1, 2, \dots, m \end{cases}, \quad (1)$$

式中 z_{pitch} 是点云厚度, z_{\min}, z_{\max} 是点集 z 轴方向的最小值和最大值, m 为平面集 T 中平面的个数。

2.2.2 切片体积计算

船舶排水量的计算目的是获取排水量与高度间的关系, 即排水量表, 计算流程如图 3 所示。

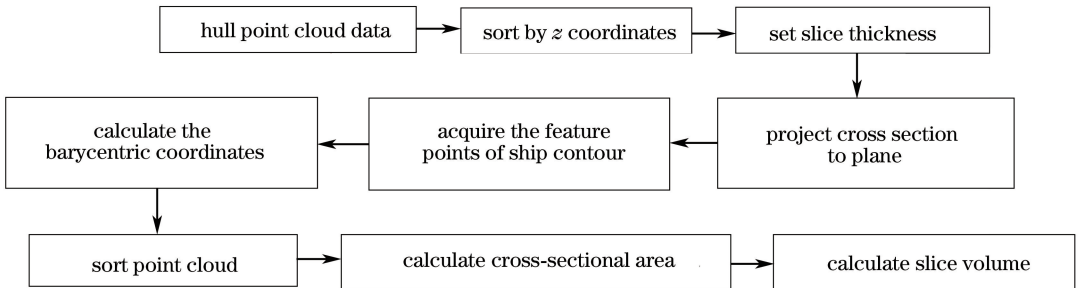


图 3 排水量计算流程图

Fig. 3 Flow chart of calculating displacement

将船体点云分割成若干切片, 切片上下表面为船体的横截面。再根据扫描分辨率, 取出横截面上下 5 mm 范围内的点云数据, 将其投影到 xoy 平面内, 获取船舶轮廓特征点云, 并计算轮廓点云的重心坐标; 再对轮廓点云进行排序, 相邻两点与重心组成一个三角形, 计算出三角形的面积, 将所有三角形面积相加即获得横截面面积。最后根据切片上下横截面面积和切片厚度计算切片的体积, 并将所有切片体积累加即获得排水量。

2.2.3 轮廓特征点提取

点云轮廓线生成主要有两类算法: 投影平面法和虚拟边缘法^[10]。投影法简便易行效率高, 但容易形成较多冗余点, 虚拟边缘法生成的轮廓点云质量更好, 但计算相对复杂。投影法冗余点较多的缺陷在后续特征点重心化环节可以得到解决, 因此采用该方法生成轮廓点云。

轮廓点云投影到平面后,再采用基于数字图像的方法提取轮廓点云数据的特征点,该方法由 Chen 等^[11]和 Zhang 等^[12]提出。通过定义数字栅格并设置数字栅格平面的边长快速提取特征点。不同的栅格边长会对特征点的提取精度和效率产生影响。若栅格尺寸过大,一个栅格内部将会落入更多的点,部分特征点会被删除;若尺寸过小,特征点增多,则会增加处理的时间成本。采用 Piegl 等^[13]提出的方法计算平面栅格的边长。

首先,遍历投影平面上所有的点,得到坐标范围为 $(x_{\min}, y_{\min}) \sim (x_{\max}, y_{\max})$ 的点集,并建立点集的最小包围盒,则栅格边长 S_{gri} 计算公式为

$$S_{\text{gri}} = \alpha \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})(y_{\max} - y_{\min})}{n}}, \quad (2)$$

式中 n 是点的个数, α 是用于调节栅格边长大小的尺度因子,最佳取值范围是 $[1, 1.5]$ ^[9],取 α 为 1.3。

将点云数据全部投影到栅格平面,将每个栅格内的点云数据重心化,取重心点作为特征点,则第 i 个栅格内的特征点坐标计算公式为

$$\begin{cases} \bar{x}_i = \sum \frac{x_k}{m} \\ \bar{y}_i = \sum \frac{y_k}{m} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 m 表示落入该栅格内的点数, (x_k, y_k) 表示栅格内点的坐标, $k=1, 2, \dots, m$ 。

图 4(a)表示按(2)式将空间点投影到栅格平面中;图 4(b)表示提取每一个栅格中的点云重心作为特征点。

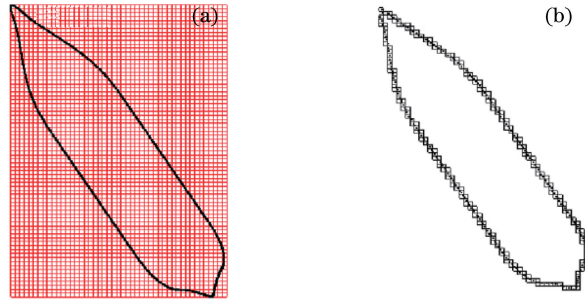


图 4 特征点的提取。(a)投影到栅格内的点云;(b)重心化后的特征点

Fig. 4 Extraction of feature points. (a) Point clouds projected into the grid; (b) feature points after the centralization of gravity

2.2.4 点云排序算法

采用三角形面积法计算横截面的面积时,要求轮廓点云上的两个点必须是相邻的,因此,要对散乱的轮廓点进行排序。通过计算各点到重心的极坐标角度并按照角度对点云进行排序,而计算各点到重心的极坐标角度可以转化为计算重心点和某一点组成的向量和 x 轴正方向 $[i=(1, 0)]$ 之间的夹角。步骤如下。

计算船舶轮廓点云的重心坐标。图 5 中 $O_g(x_g, y_g)$ 为轮廓点云的重心坐标,计算公式为

$$\begin{cases} x_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}, \quad (4)$$

式中 n 为轮廓点云的数量, x_i 为某点的横坐标, y_i 为某点的纵坐标。

以重心点纵坐标 y_g 为界,将点云分为上下两部分。

先对上半部分点云进行排序,假定上层点云中某点为 $A(x_i, y_i)$,则向量 $\overrightarrow{O_g A} = (x_i - x_g, y_i - y_g)$ 与单位向量 i 的夹角 ψ 的计算公式为

$$\psi = \langle \overrightarrow{O_g A}, i \rangle = \arccos \frac{\overrightarrow{O_g A} \cdot i}{|\overrightarrow{O_g A}| \times |i|}, \quad (5)$$

式中 $|\overrightarrow{O_g A}| = \sqrt{(x_i - x_g)^2 + (y_i - y_g)^2}$, $|i| = 1$, $\overrightarrow{O_g A} \cdot i = x_i - x_g$ 。

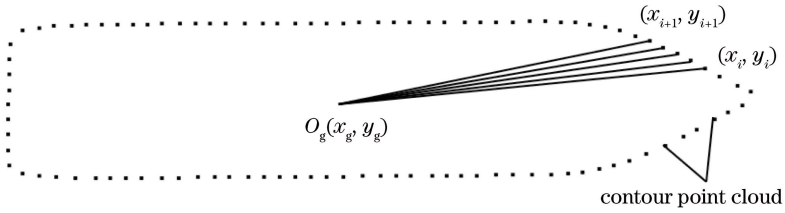


图 5 横截面面积计算示意图

Fig. 5 Sketch map of calculating cross-sectional area

计算出的 ψ 的值就是某点到重心的极坐标角度。然后对上半部分的各个点计算对应的极坐标角度,并对极坐标角度按照从小到大的顺序进行排序从而完成点云的排序。

对下半部分点云进行排序:利用(5)式计算出 ψ 值,此时 ψ 的值并不是某点到重心的极坐标角度,但两者之和等于周角。因此,此时某点到重心的极坐标角度等于周角与 ψ 之差。然后对下半部分的各点计算对应的极坐标角度,并对极坐标角度按照从小到大的顺序进行排序从而完成点云的排序。

最后,将上下两部分点云合并即可完成全部点云的排序。

2.2.5 排水量的计算

船舶轮廓点云排序后,即可利用三角形面积法计算切片高度 h 处横截面的面积,计算公式为

$$S_h = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \quad (6)$$

式中 n 为横截面点云的数量。

排水量计算思想是切片叠加。将船体沿着高度方向分割成若干个切片,计算每个切片的体积并叠加获得不同高度的排水量,切片体积和排水量的计算公式为

$$V_i = \frac{1}{3} (S_i + S_{i-1} + \sqrt{S_i S_{i-1}}) h, \quad (7)$$

$$V_{h_n} = \sum_1^m V_{h_i}, \quad (8)$$

式中 V_i 为第 i 个切片的体积, V_{h_n} 为高度 h_n 处的排水量, n 为高度 h_n 时所对应的切片的数量。

3 实例分析

3.1 实例

实验使用 Faro LS 880 扫描仪对某船体进行扫描,共设 13 个扫描站,预处理后的船舶点云效果图如图 6 所示,船舶三维模型则如图 7 所示。



图 6 船舶点云预处理后的效果图

Fig. 6 Effect graph of preprocessing point cloud of ship



图 7 船舶三维模型效果图

Fig. 7 Effect graph of 3D model of ship

3.2 最佳切片厚度的确定

切片的厚度直接影响排水量计量的精度,一般来说,切片的厚度越小,排水量计量精度越高,但同时也不可避免地带来计算效率的降低,因此,最佳切片厚度应同时考虑两者^[14]。为此,通过实验对切片厚度、计算时间与排水量计量精度之间的关系进行了分析,结果如图 8 所示。

从图 8(a)可看出,算法的执行时间随切片厚度的增大在减小,当厚度从 1 cm 增至 5 cm 时,算法的执行

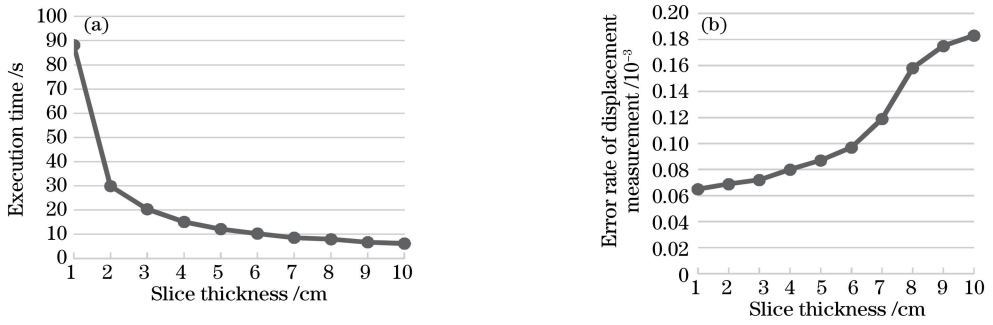


图 8 切片厚度与(a)执行时间、(b)排水量计量精度关系图

Fig. 8 Slice thickness versus (a) execution time and (b) measurement accuracy of displacement

时间大幅度减少,在 5~10 cm 的范围内,算法执行时间虽也在减少,但基本上已经趋于平缓,因此,此时的最佳切片厚度范围是 5~10 cm。从图 8(b)可以看出,排水量计量相对误差率随切片厚度的增加而增大,当厚度从 1 cm 增至 6 cm 时,精度虽在降低,但并不显著,且都保持在 1×10^{-4} 的误差要求范围内,在 6~10 cm 的范围内,精度大幅度降低,且已超出 1×10^{-4} 的误差要求,因此,最佳切片厚度的范围是 1~6 cm。

综合考虑两者,最佳切片厚度范围是 5~6 cm,选取切片厚度在 5 cm 时既能使算法保持较高的效率又能保持排水量的计量精度。

3.3 计算排水量

点云预处理后,即可按图 3 中的流程进行排水量的计算,实例中,切片的最佳厚度选定为 5 cm,利用(6)式计算横截面的面积,再利用(7)、(8)式计算排水量。同时,利用 Geomagic Studio 获取对应高度的排水量,并以此作为参考值,对算法的结果进行精度评价,如表 1 所示(实验中对船体进行简化处理,未考虑船体上螺旋桨等特殊构件)。

表 1 排水量数据

Table 1 Displacement data

Height /m	Calculated volume / m^3	Reference volume / m^3	Relative error rate / 10^{-3}
0.69	740.1635	740.1649	0.002
0.74	822.7105	822.7133	0.003
0.79	906.0985	906.1129	0.016
0.84	990.2865	990.3068	0.020
0.89	1075.2355	1075.261	0.024
0.94	1160.9135	1160.949	0.031
0.99	1247.3025	1247.349	0.037
1.04	1334.3795	1334.433	0.040
6.04	12401.5275	12402.49	0.078
6.09	12529.9735	12530.94	0.077
6.14	12658.6035	12659.59	0.078
6.19	12787.4145	12788.41	0.078
6.24	12916.4035	12917.41	0.078
6.29	13045.5615	13046.57	0.077
6.34	13174.8725	13175.90	0.078
8.74	19492.8085	19494.41	0.082
8.79	19625.8665	19627.50	0.083
8.84	19758.9635	19760.63	0.084
8.89	19892.1175	19893.81	0.085
8.94	20025.3265	20027.03	0.085
8.99	20158.5815	20160.29	0.085
9.04	20291.8785	20293.61	0.085
9.09	20425.1855	20426.96	0.087

如表 1 所示,获得的排水量的相对误差均能保持在 1×10^{-4} 内,满足 $|y_a - y_b| \leq U$, U 表示排水量的最大限差。此外,通过实验验证,实例中采用的扫描仪的点位精度为 ± 2.17 mm,点云配准精度为 ± 2.5 mm,从而计算得出横截面面积的相对精度为 $1/7400$,最终排水量的相对精度为 3.5×10^{-4} ,相对扩展不确定度为 0.7×10^{-3} (置信系数 $k=2$)。

4 结 论

提出了一种基于点云切片技术的排水量计量方法。利用全站仪进行计量的传统方法存在着点集密度小、断面面积计算精度低和断面间的高度选取随意等缺陷。立足于点云切片,并应用数字图像处理的方法提取了船舶轮廓特征点云,高精度地计算出切片上下横截面的面积,综合考虑算法执行效率和排水量计量精度两方面因素,分析确定出最佳切片厚度,使之可以适应不同的点云数据。实验结果表明能够以较高的精度实现船舶排水量的计量,为船舶排水量的计量提供了一种全新的技术手段。

参 考 文 献

- 徐洪祥, 马俊园, 杨 奥, 等. 船舶排水量不同计算方法的对比与分析[J]. 中国集体经济, 2012, 10: 186-187.
- 崔建辉, 赵 猛, 王永洲. 邦戎曲线与静水力曲线计算船舶排水量的比较[J]. 航海技术, 2013(3): 25-28.
- Hu Minjie, Yan Li, Zhang Yi. The research of tank capacity measurement technology depends on 3D reconstruction[J]. Journal of Ship Design, 2012(1): 61-66.
胡敏捷, 阎 利, 张 毅. 基于舱室三维重建模型的舱容计量技术研究[J]. 船舶设计通讯, 2012(1): 61-66.
- Zhao Qinyang. 3D laser scanner data acquisition system developed [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008: 6-8.
赵庆阳. 三维激光扫描仪数据采集系统研制[D]. 西安: 西安科技大学, 2008: 6-8.
- Tan Kai, Cheng Xiaojun. TLS laser intensity correction based on polynomial model[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0314002.
谭 凯, 程效军. 基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0314002.
- Liang Xuemin. A study on the capacity measurement techniques for the large oil storage caves [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014: 30-32.
梁雪敏. 大型储油洞穴容量计量技术研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014: 30-32.
- Zhou Xiaoxue. 3D laser scanner technology applying in vertical metal tank capacity measurement [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014: 23-28.
周晓雪. 三维激光扫描技术在立式金属罐容量计量中的应用研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014: 23-28.
- 程效军, 贾东峰, 程小龙. 海量点云数据处理理论与技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014: 6-9.
- Cheng Xiaojun, Jia Dongfeng, Liu Yanping. A fast contour generation algorithm of massive point cloud data[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(10): 1559-1563.
程效军, 贾东峰, 刘燕萍. 海量点云数据轮廓特征线的快速生成算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1559-1563.
- Liu G H, Wong Y S, Zhang Y F, *et al.* Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping [J]. Computer-Aided Design, 2002, 35(7): 633-645.
- Chen Y H, Ng C T, Wang Y Z. Data reducing in integrated reverse engineering and rapid prototyping[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 1999, 12(2): 97-103.
- Zhang Y F, Wong Y S, Loh H T, *et al.* An adaptive slicing approach to modeling cloud data for rapid prototyping[J]. Journal of Materials Process Technology, 2003, 140(1-3): 105-109.
- Piegl L A, Tiller W. Algorithm for finding all k nearest neighbors[J]. Computer-Aided Design, 2002, 34(2): 167-172.
- Fang Fang, Cheng Xiaojun. A fast data reducing method for massive scattered point clouds based on slicing [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(11): 1353-1357.
方 芳, 程效军. 海量散乱点云快速压缩算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(11): 1353-1357.