

# 平面舱壁类型的船舱点云分割方法

杨泽鑫<sup>1</sup>, 程效军<sup>1,2</sup>, 李 泉<sup>1</sup>, 胡敏捷<sup>3</sup>, 欧 健<sup>3</sup>, 辛佩康<sup>1</sup>, 郭 王<sup>1</sup>

<sup>1</sup>同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

<sup>2</sup>同济大学现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092;

<sup>3</sup>上海船舶研究设计院, 上海 201203

**摘要** 针对船舱复杂构件点云提取存在人工成本高、效率低的问题, 提出了一种适用于平面舱壁类型船舱点云的分割方法。通过种子点集构建、点云法线估计及直线拟合的方式建立以船舱纵向为  $X$  轴、横向为  $Y$  轴、竖向为  $Z$  轴的独立坐标系, 以简化分割算法的复杂度; 根据船舱内部复杂构件的分布特性, 制定最佳分割次序, 基于随机采样一致性算法拟合平面的思想有序地分割船舱构件点云。选用两组不同结构的船舱点云数据进行算法验证, 实验结果表明: 该方法能够从不同结构的船舱散乱点云中快速、准确地自动分割出主要构件点云, 可靠性强, 具有较高的实用价值。

**关键词** 遥感; 点云分割; 随机采样一致性算法; 船舱构件提取; 三维激光扫描

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1010006

## Segmentation of Point Cloud in Tank of Plane Bulkhead Type

Yang Zexin<sup>1</sup>, Cheng Xiaojun<sup>1,2</sup>, Li Quan<sup>1</sup>, Hu Minjie<sup>3</sup>,

Ou Jian<sup>3</sup>, Xin Peikang<sup>1</sup>, Guo Wang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Tongji University, Shanghai 200092, China;

<sup>3</sup>Shanghai Merchant Ship Design and Research Institute, Shanghai 201203, China

**Abstract** To solve the high labor cost and low efficiency problems of complex tank members extraction, we propose a point cloud segmentation algorithm which is applicable to tank of plane bulkhead type. The steps of this approach are as follows: the original point cloud is firstly transformed to the independent coordinate, whose  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  axes are defined as the longitudinal, transverse and vertical directions of tank, based on seed sets building, normal estimation and linear fitting; then clouds of each tank member are segmented in the best order by plane fitting of random sample consensus (RANSAC) method according to the distribution of complex tank members. Experimental results on two sets of point clouds show that the proposed algorithm can quickly, accurately and automatically segment the clouds of main members from unorganized clouds, which demonstrate the high reliability and practical value of the proposed method.

**Key words** remote sensing; point cloud segmentation; random sample consensus algorithm; tank members extraction; three-dimensional laser scanning

**OCIS codes** 280.3640; 150.6910; 150.1135

## 1 引言

三维激光扫描技术近年来得到迅猛发展, 可以快速、大面积获取扫描对象表面的高分辨率三维坐标数

收稿日期: 2017-05-17; 收到修改稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)、上海船舶研究设计院科技项目(JSJC2013206C204)

作者简介: 杨泽鑫(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事点云处理方面的研究。E-mail: zxyang15@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数字近景摄影测量方面的研究。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn(通信联系人)

据<sup>[1-2]</sup>,可以解决船舶舱室容积精确、快速测量的专业问题<sup>[3]</sup>。舱容传统计量方法包括几何测量法和容量比较法<sup>[4]</sup>。几何测量法存在采样点密度不足、人为影响因素大、精度差等缺陷;容量比较法则因成本高、占用船舶时间长而只能在特殊场合使用。而三维激光扫描技术弥补了传统计量方法的不足,为解决复杂船舱的容积计量难题提供了全新的技术手段。

三维激光扫描技术在船舱计量中的应用主要可分为逆向建模<sup>[1-2]</sup>和点云切片<sup>[3]</sup>两种思路。无论基于何种思路计算舱容,都必须先分离船舱内的各个构件点云。然而,由于船舱内存在不同结构特点的复杂构件,现有点云分割算法无法直接应用于船舱点云分割。目前,船舱点云数据的分割仍然大量依赖人机交互,工作量大,自动化程度低。针对上述问题,本文提出了一种适用于平面舱壁类型船舱点云的分割方法。结合种子点集构建、点云法线估计以及直线拟合建立船舱独立坐标系并完成点云坐标转换,使船舱纵、横舱壁点云分别平行于 $X$ 、 $Y$ 轴分布;综合考虑船舱复杂构件的分布特点,基于随机采样一致性(RANSAC)算法<sup>[5]</sup>拟合平面的思想,按顺序依次分割出船舱构件点云。

## 2 船舱点云分割方法

船舱点云分割方法分为独立坐标系建立和主要构件分割两大模块,算法框架如图1所示。

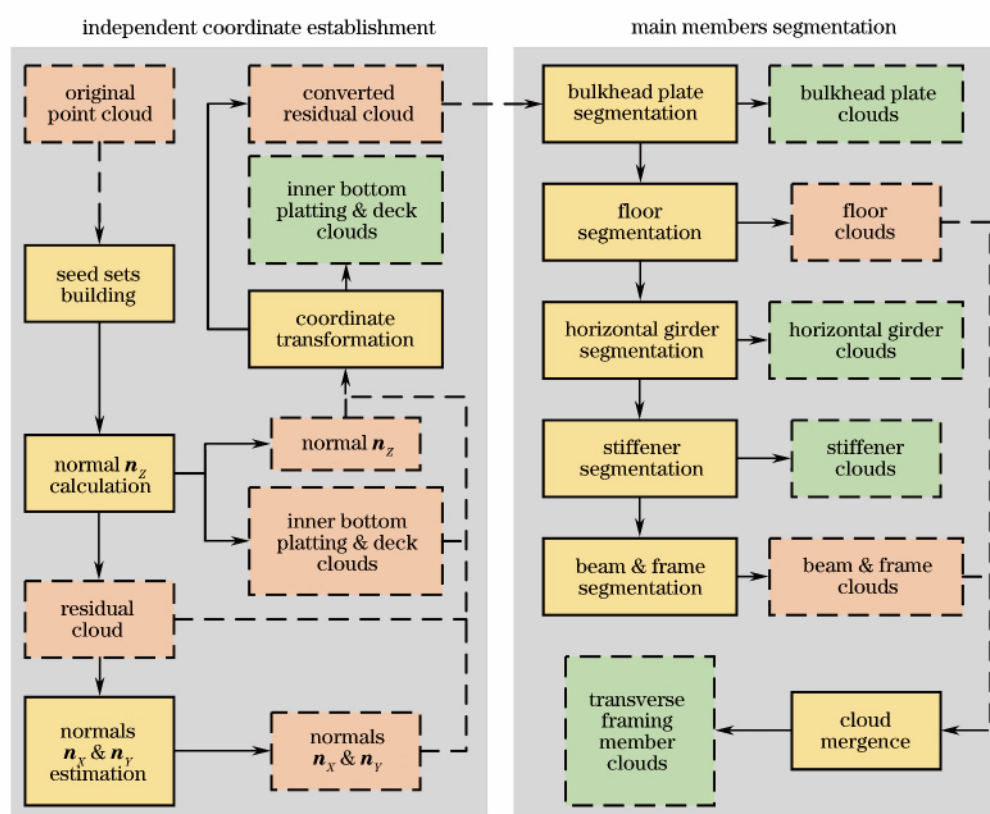


图1 算法框架

Fig. 1 Proposed algorithm framework

### 2.1 独立坐标系建立

船舱内大量的平面构件呈纵横交错分布,故其点云数据的坐标系以船舱纵向为 $X$ 轴,横向为 $Y$ 轴,竖向为 $Z$ 轴,这将大大简化分割算法的复杂度。采集数据时整平三维激光扫描仪,即可保证原始点云坐标系中的 $Z$ 轴为船舱竖向,但无法保证船舱纵、横向分别为 $X$ 、 $Y$ 轴。因此,需将原始数据转换到以船舱纵向为 $X$ 轴、横向为 $Y$ 轴、竖向为 $Z$ 轴的船舱独立坐标系中。

将原始点云 $P$ 按 $z$ 值大小升序排列,分别取出最大值 $z_{\max}$ 和最小值 $z_{\min}$ ,按给定种子点集厚度 $t^S$ (上标 $S$ 代表种子点集)构建内底板与甲板的种子点集 $P_I^S$ 和 $P_D^S$ 。

$$\begin{cases} P_1^S = \{p_1^S \in P \mid z_{\min} \leq z_1^S \leq z_{\min} + t^S\} \\ P_D^S = \{p_D^S \in P \mid z_{\max} - t^S \leq z_D^S \leq z_{\max}\} \end{cases} \quad (1)$$

采用 RANSAC 算法分别从  $P_1^S$  和  $P_D^S$  中拟合出内底板与甲板的平面参数  $C_1$  和  $C_D$ , 并分割出相应点云  $P_1$  和  $P_D$ 。具体步骤如下:

- 1) 从种子点集中随机选取不共线的 3 个种子点, 构建初始平面  $L_0: \alpha_0 x + \beta_0 y + \gamma_0 z + \delta_0 = 0$ ;
- 2) 计算种子点集中其余每个数据点至该平面的距离, 将距离小于给定距离阈值  $d$  的数据点存入局内点集, 统计局内点集的点数;
- 3) 根据循环阈值  $\varepsilon$  重复执行上述步骤, 比较每次求得的局内点集与现有点数最大的局内点集, 保留点数较大者为新的最优平面;
- 4) 输出点数最大的局内点集为最优平面点云, 根据该点云重新估计最优平面模型参数  $C = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta\}$ 。

根据求得的  $C_1$  和  $C_D$ , 计算两平面的法线均值  $n_z = [(\alpha_1 + \alpha_D)/2, (\beta_1 + \beta_D)/2, (\gamma_1 + \gamma_D)/2]$ 。采用主成分分析法(PCA)<sup>[6]</sup>, 估计第一剩余点云  $P_R^{(1)} = P - P_1 - P_D$  的表面法线  $\{n_R\}$ , 计算公式为

$$\begin{cases} D = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T, D \cdot v_j = \lambda_j v_j, & j \in \{0, 1, 2\} \\ \pm n = \{n_x, n_y, n_z\} = v_0, & \text{if } 0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $p_i$  为点  $p$  的  $k$  邻域点集  $P_k$  (由距离点  $p$  最近的  $k$  个点组成) 中第  $i$  点的坐标(列向量),  $\bar{p}$  为  $P_k$  的中心点的坐标,  $D$  为  $P_k$  的  $3 \times 3$  协方差矩阵,  $\lambda_j$  和  $v_j$  分别为  $D$  的第  $j$  个特征值和特征向量,  $n$  为点  $p$  的法向量。设置相机点为  $p_c = (x_{\min} - \Omega, y_{\min} - \Omega, z_{\min} - \Omega)$ , 其中  $\Omega$  为大于 0 的任意常数, 翻转所有法向与相机点方向夹角大于  $90^\circ$  的法线, 更新  $\{n_R\}$ 。

点云法线  $\{n_R\}$  可表示为图 2(a) 球坐标系中的一组角值  $(\varphi, \theta)^{[7]}$ ,

$$\varphi = \arctan\left(\frac{n_y}{n_x}\right), \theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{n_x^2 + n_y^2}}{n_z}\right), \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为原点与法线点的连线在  $XOY$  平面的投影线与  $X$  轴正方向之间的方位角,  $\theta$  为原点与法线点的连线与  $Z$  轴正向之间的天顶角,  $n_x, n_y$  和  $n_z$  分别为法线  $n$  在  $X, Y$  和  $Z$  轴上的投影分量。根据(3)式表达点云法线, 所形成的法线球被称为拓展高斯图像(EGI)<sup>[8]</sup>, 用以描述法线方向。 $\{n_R\}$  的 EGI 如图 2(b) 所示。靠近舷侧外板与船底板的船舱可能存在大面积倾式内底边板, 该区域估计出的大量法线会干扰纵、横舱壁板两条主法线的提取。为排除该影响, 剔除  $\{n_R\}$  中不与  $Z$  轴正交的法矢, 效果如图 2(c) 所示。此时  $\{n_R\}$  可直接由  $\varphi$  角表示, 以法线索引为横轴、 $\varphi$  角为纵轴, 采用 RANSAC 算法即可拟合出两条主法线  $n_X$  和  $n_Y$ , 如图 3 所示。图 3 中, 拟合主法线  $n_Y$  的法线数据较少, 这是因为舱体较窄, 水平扶强材与水平桁遮挡射向纵舱壁板的激光, 导致纵舱壁板数据缺失。图 4(a) 为数据采集示意图, 图 4(b) 为对应的纵舱壁点云。若数据缺失严重, 上述方法只能提取横舱壁板的法线  $n_X$ , 则将  $n_X$  水平旋转  $90^\circ$  作为纵舱壁板的法线  $n_Y$ 。

求得两条主法线后, 将内底板、甲板和剩余点云分别转换到以  $O(0, 0, 0)$  为坐标原点,  $n_X$  为  $X$  轴,  $n_Y$  为  $Y$  轴,  $n_Z$  为  $Z$  轴的船舱独立坐标系下。

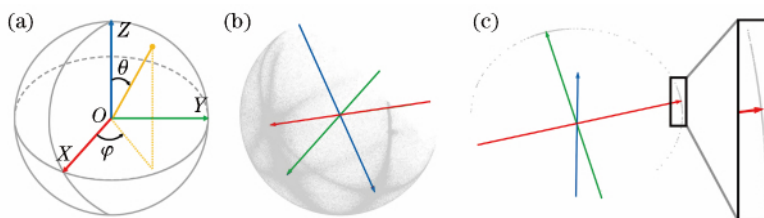


图 2 以球坐标表示的点云法线。(a) 球坐标系; (b) 拓展高斯图像; (c) 剔除无关法线的干扰

Fig. 2 Normals in spherical coordinates. (a) Spherical coordinate; (b) EGI; (c) irrelevant normal removal

## 2.2 船舱主要构件分割

船舱主要由舱壁与横向加强框架组成。舱壁按照结构特点可分为平面舱壁和槽形舱壁。平面舱壁由平舱

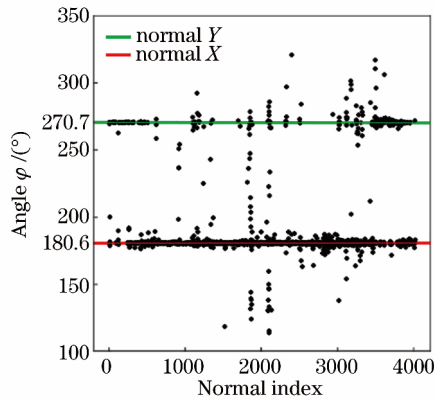


图 3 主法线拟合

Fig. 3 Principal normal fitting

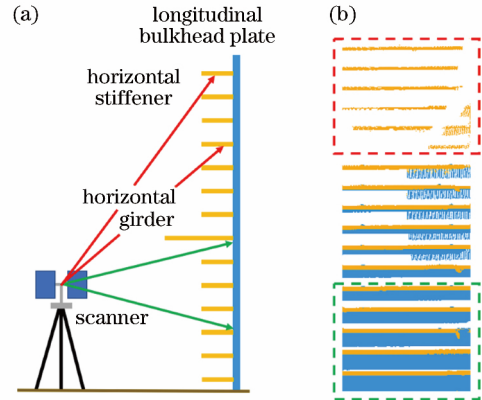


图 4 纵舱壁板数据缺失。(a) 数据采集;(b) 纵舱壁点云

Fig. 4 Data incompleteness of longitudinal bulkhead plate.

(a) Data acquisition; (b) point cloud of longitudinal plane bulkhead

壁板和加强骨架构成,其中骨架又可分为扶强材和桁材;槽形舱壁利用舱壁板的折曲代替骨架的作用。横向加强框架作为保证船体横向强度的重要构件,主要由肋板、肋骨和横梁组合而成<sup>[9]</sup>。本文方法基于平面拟合的思想分割构件点云,故只适用于平面舱壁类型的船舱点云数据。图 5 为平面舱壁类型船舱的结构示意图。

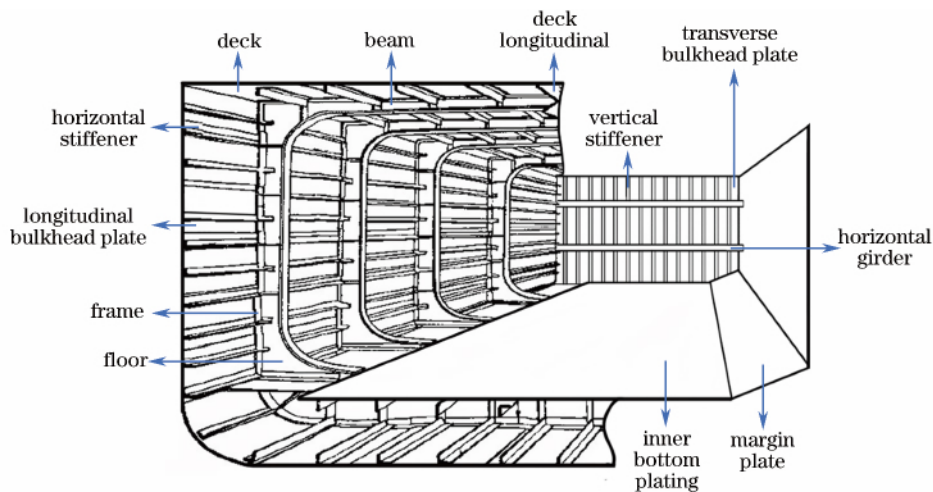


图 5 平面舱壁类型船舱的结构示意图

Fig. 5 Illustration of the structure of plane bulkhead type tank

从图 5 中可以看出,船舱中部分舱壁板表面焊有扶强材与桁材,且扶强材均穿透肋板分布,结构复杂。考虑以上特点,提出一种有序的基于 RANSAC 拟合平面的船舱主要构件点云分割算法:

1) 舱壁板点云提取。从  $P_R^{(1)}$  中取出  $y_{\max}$ 、 $y_{\min}$  和  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$ , 参照 2.1 节构建纵舱壁板和横舱壁板的种子点集各两个,采用 RANSAC 算法从 4 个种子点集中分别提取两片纵舱壁板点云  $P_{LB}$ 、 $P_{LB}^*$  和两片横舱壁板点云  $P_{TB}$ 、 $P_{TB}^*$ 。为了避免可能存在的倾式内底底板干扰后续分割,基于剔除舱壁板的点云和(1)式再次构建  $P_1^s$  作为倾式内底底板的种子点集,执行 RANSAC 算法以探测倾式内底底板平面。此时,RANSAC 算法随机采样 3 个不共线种子点  $\{p_1, p_2, p_3\}$  构建初始平面时须满足(4)式,以避免肋板、垂直桁等大面积平面点云被错误识别。若倾式内底底板存在,该部分点云  $P_M$  将被提取;若不存在,则  $P_M = \emptyset$ 。

$$\begin{cases} \overrightarrow{p_1 p_2} \times \overrightarrow{p_1 p_3} \cdot \mathbf{n}_x \neq 0 \\ \overrightarrow{p_1 p_2} \times \overrightarrow{p_1 p_3} \cdot \mathbf{n}_y \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

2) 肋板点云分割。在  $X$  轴的约束下,循环执行 RANSAC 算法从第 2 剩余数据  $P_R^{(2)} = P_R^{(1)} - (P_{LB} \cup P_{LB}^*) - (P_{TB} \cup P_{TB}^*) - P_M$  中拟合所有肋板的平面参数  $C_{F,i}$  (下标  $i$  表示序号,下同)并分割相应点云



$P_{F,i}, i=1,2,\dots,\xi, \xi$ 为肋板总个数。其中 X 轴的约束是指算法在构建初始平面时要求平面法线与 X 轴平行。由于船舱内底板表面和肋板周围通常架设管道,基于平面拟合分割肋板点云会导致错分割<sup>[10]</sup>,即错误地将管道点云分割出来。采用稀疏局外点去噪(SOR)算法<sup>[6]</sup>从每一个  $P_{F,i}$  中提取错分割的管道点云,并将其合并至剩余点云中,更新肋板点云  $P_{F,i}$  及第 3 剩余点云  $P_R^{(3)} = P_R^{(2)} - \bigcup_{i=1}^{\xi} P_{F,i}$ 。

3) 水平桁点云分割。在 Z 轴的约束下,从第 3 剩余数据  $P_R^{(3)}$  中拟合所有水平桁的平面参数  $C_{HG,i}, i=1,2,\dots,\phi, \phi$ 为水平桁总个数。为了防止基于  $C_{HG,i}$  提取水平桁平面点云  $P_{HG,i}$  时误分出横梁点云,结合水平桁焊接于舱壁板表面的特性,计算待提取点到最近纵舱壁板的距离,过滤距离大于距离阈值  $d_{HG}$  的点。

4) 扶强材点云分割。以步骤 1) 构建纵、横舱壁板种子点集的参数从最新的剩余点云  $P_R^{(4)} = P_R^{(3)} - \bigcup_{i=1}^{\phi} P_{HG,i}$  中构建扶强材种子点集并估计点云法线。如 2.1 节拟合平均法线,若平均法线平行或正交于 Z 轴,说明舱壁板表面焊接扶强材,则依据舱壁板平面参数及给定的距离阈值  $d_s$  分割出扶强材点云  $P_s$ 。扶强材点云以舱壁板数为单位,取值范围为  $\{0,1,2,3,4\}$ 。

5) 横梁及肋骨点云分割。基于二维 Delaunay 的 alpha-shape 算法<sup>[11]</sup>提取肋板点云  $P_{F,i}$  轮廓,设定距离阈值  $d_{TFM}$ ,形成以肋板点云轮廓为截面、宽度为  $d_{TFM} \times 2$  的包围盒,从剩余点云中分割出横梁及肋骨点云。

6) 横向加强框架点云合并。将步骤 2) 提取的肋板点云与对应的步骤 5) 提取的横梁及肋骨点云逐一合并,组成完整的横向加强框架点云。

### 3 实验分析

#### 3.1 实验数据

实验使用 FARO Focus 3D 120 三维激光扫描仪采集两艘油船的船舱点云,每个船舱均布设两个测站进行 360°扫描,设置扫描分辨率为 1/4,扫描质量为 4 倍。使用 FARO SCENE 软件对原始点云进行配准、压缩及剔除离群点等预处理,所得船舱 A 点云点数为 6001790,平均点间距为 0.017 m;船舱 B 点云点数为 4849539,平均点间距为 0.016 m。图 6 显示了两个船舱的灰度影像、尺寸信息及点云配准效果图。由图 6 可见,船舱 A 呈长方体,横向加强框架较复杂;船舱 B 存在上倾式内底边板,管道排列密集。

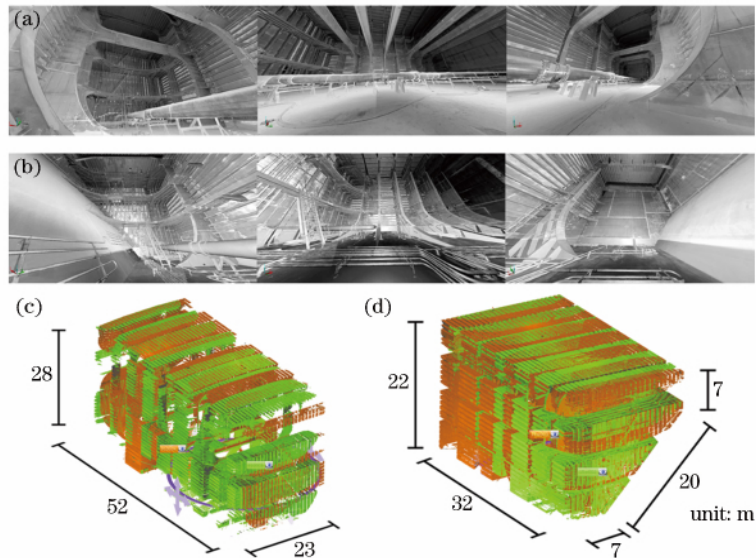


图 6 实验船舱的灰度影像、尺寸信息及点云配准效果图。(a)船舱 A 影像;(b)船舱 B 影像;(c)船舱 A 点云;(d)船舱 B 点云

Fig. 6 Grayscale, size information and registered point cloud of experimental data. (a) Image of tank A;

(b) image of tank B; (c) point cloud of tank A; (d) point cloud of tank B

#### 3.2 参数确定

表 1 为本文算法所涉及的参数,其数值为本次实验数据所取得的值。其中,  $t^s$  和  $\epsilon$  的取值是多次实验对比求得的最优经验值。 $d_B$  和  $d_F$  的赋值与点云平均点间距及点云配准误差有关,通过实验验证,取 4 cm 可

避免平面过分割<sup>[10]</sup>。其余距离阈值根据构件尺寸确定： $d_{HG}$  设置为水平桁厚度的  $1/2$ ， $t_{HG}$  设置为水平桁宽度； $t_S$  取值为扶强材宽度，本实验甲板纵骨宽度  $t_{DL}$  和纵舱壁板扶强材宽度  $t_{LS}$  均为  $0.5\text{ m}$ ，横舱壁板扶强材宽度  $t_{TS}$  为  $0.6\text{ m}$ ； $t_{TFM}$  赋值为横向加强框架厚度最大值（强横梁与横梁宽度之和）的  $1/2$ 。

表 1 实验参数

Table 1 Parameters of experiment

Parameter	Descriptor	Value
$t^S$	Thickness of seed sets for bulkhead plate segmentation	3 m
$\epsilon$	Maximum number of iterations for RANSAC method	1000
$d_B$	Maximum distance from points to planar model for bulkhead plate segmentation	4 cm
$d_F$	Maximum distance from points to planar model for floor segmentation	4 cm
$d_{HG}$	Maximum distance from points to planar model for horizontal girder segmentation	18 cm
$t_{HG}$	Distance threshold from points to the nearest longitudinal bulkhead plate for horizontal girder segmentation	1 m
$t_{DL}$	Distance threshold from points to deck for deck longitudinal segmentation	0.5 m
$t_{LS}$	Distance threshold from points to bulkhead plate for longitudinal-bulkhead-plate-stiffener segmentation	0.5 m
$t_{TS}$	Distance threshold from points to bulkhead plate for transverse-bulkhead-plate-stiffener segmentation	0.6 m
$t_{TFM}$	Distance threshold from points to floor for transverse framing member segmentation	0.8 m

### 3.3 算法有效性分析

在配置为  $2.9\text{ GHz}$  Intel Core i5 双核 CPU、 $16\text{ GB}$  内存的计算机上，基于 PCL 库和 C++ 进行算法测试。针对点数为  $6001790$  的船舱 A 点云和点数为  $4849539$  的船舱 B 点云，本分割算法耗时分别为  $334\text{ s}$  和  $268\text{ s}$ ，效率高。

图 7 为分割船舱 A 点云的效果图，图 8 为船舱 B 点云分割结果的细节图。综合图 7 和图 8 可发现，船舱内的各构件点云均被正确分割，特别是针对交错的肋板和扶强材点云，其分割效果显著。

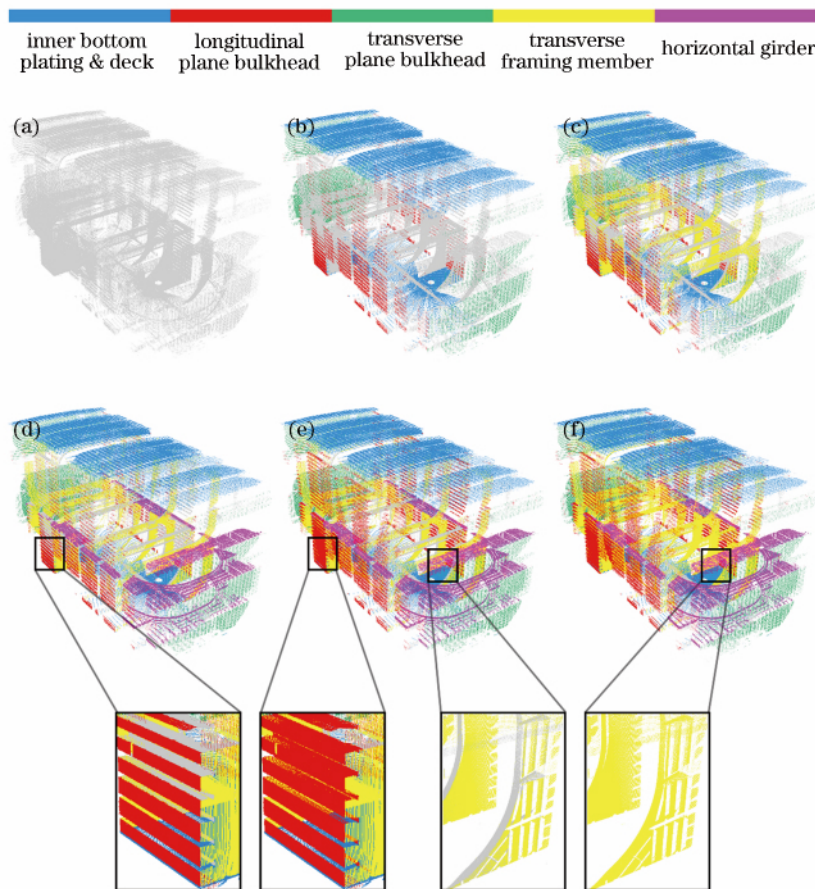


图 7 船舱 A 点云分割效果图。(a)原始点云；(b)舱壁板提取；(c)肋板分割；(d)水平桁分割；(e)扶强材分割；(f)横向加强框架合并

Fig. 7 Point cloud segmentation results of tank A. (a) Original point cloud; (b) bulkhead plate segmentation; (c) floor segmentation; (d) horizontal girder segmentation; (e) stiffener segmentation; (f) transverse framing member mergence

为了定量评价本文方法的精度,分别计算两组分割结果的精确率和召回率<sup>[12]</sup>。精确率是指正确分割点占实际分割点的比例。召回率是指正确分割点占应该分割点的比例。

$$\begin{cases} Q_P = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FP}} \times 100\% \\ Q_R = \frac{n_{TP}}{n_{TP} + n_{FN}} \times 100\% \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $Q_P$  为精确率,  $Q_R$  为召回率,  $n_{TP}$  为真阳性点数(即被正确分割的点数),  $n_{FP}$  为假阳性点数(即被错误分割的点数),  $n_{FN}$  为假阴性点数(即被漏分的点数)。表 2 为两组船舱点云分割结果的精确率和召回率。由表 2 可以发现,两组分割结果的精确率均高于 96%,召回率均高于 94%,说明本文方法能有效地分割不同结构的平面舱壁类型的船舱点云,稳健性高。

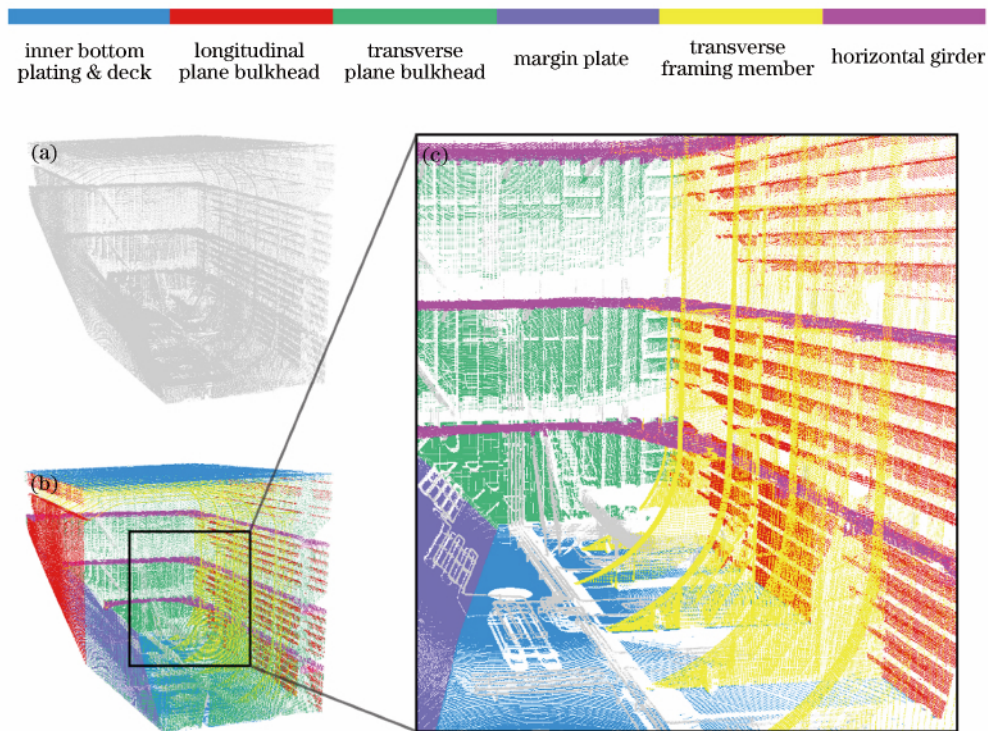


图 8 船舱 B 点云分割结果细节图。(a)原始点云;(b)分割结果;(c)细节效果

Fig. 8 Detail maps of point cloud segmentation results of tank B. (a) Original point cloud; (b) segmentation result; (c) detail of segmentation result

表 2 分割结果分析

Table 2 Analysis of segmentation results

Member	Tank A		Tank B	
	Precision / %	Recall / %	Precision / %	Recall / %
Inner bottom plating	98.46	99.94	98.31	99.90
Deck	98.82	99.89	98.10	99.92
Longitudinal bulkhead plate	97.23	98.77	98.13	99.78
Transverse bulkhead plate	98.79	99.03	98.91	99.85
Margin plate			99.78	97.91
Transverse framing member	99.65	98.13	99.48	99.01
Horizontal girder	98.63	98.01	99.72	97.52
Stiffener	97.56	95.76	96.49	94.61

## 4 结 论

快速、准确地自动分割包含复杂构件的船舱点云,是三维激光扫描技术在舱容计量中应用的重要环节。基于该背景,提出一种适用于平面舱壁类型的船舱点云分割方法,解决了当前船舱构件点云提取大量依赖人工、效率较低的问题,具有较高的实用价值。通过对实际船舱点云进行分割实验,结果表明,本文方法能够准确地从不同结构的船舱点云中分割出主要构件点云,可靠性强,自动化程度高。但是,对于船舱内质量较差的附属构件(管道与扶梯)点云,本文算法未能取得理想的分割效果。因此,下一步的研究工作将着重于该部分点云的自动提取。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Jixing, Cheng Xiaojun, Cheng Xiaolong. Application of three-dimensional laser scanning technology in measurement of ship displacement[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1204003.  
张吉星, 程效军, 程小龙. 三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1204003.
- [2] Cheng Xiaojun, Jia Dongfeng, Cheng Xiaolong. Theory and technology of processing of massive point cloud data[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.  
程效军, 贾东锋, 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.
- [3] Hu Minjie, Yan Li, Zhang Yi. The research on calibration of tank capacity using 3D laser scanning[J]. Journal of Ship Design, 2011(1): 60-64.  
胡敏捷, 阎利, 张毅. 三维激光扫描技术在大型舱容测量中的应用研究[J]. 船舶设计通讯, 2011(1): 60-64.
- [4] Hu Minjie, Deng Fei, Li Jing. A research on cabin volume measurement technology based on photogrammetry[J]. Journal of Ship Design, 2016(S2): 89-94.  
胡敏捷, 邓非, 李静. 立体影像法船舱容量测量技术研究[J]. 船舶设计通讯, 2016(S2): 89-94.
- [5] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.
- [6] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, *et al.* Towards 3D point cloud based object maps for household environments[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2008, 56(11): 927-941.
- [7] Hetzel G, Leibe B, Levi P, *et al.* 3D object recognition from range images using local feature histograms[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001(2): 394-399.
- [8] Rusu R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[D]. Munich: Technische Universitaet Muenchen, 2009.
- [9] Xiang Yang, Tang Hanqiu. Ship structure and deck equipment[M]. Beijing: China Communications Press, 2009.  
向阳, 唐寒秋. 船舶结构与设备[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [10] Awwad T M, Zhu Q, Du Z, *et al.* An improved segmentation approach for planar surfaces from unstructured 3D point clouds[J]. The Photogrammetric Record, 2010, 25(129): 5-23.
- [11] Edelsbrunner H, Kirkpatrick D, Seidel R. On the shape of a set of points in the plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1983, 29(4): 551-559.
- [12] Yang B, Dong Z, Liu Y, *et al.* Computing multiple aggregation levels and contextual features for road facilities recognition using mobile laser scanning data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 126: 180-194.