西北林学院学报 2019,34(5):141-146
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.05.22

基于 FPFH 特征和 NDT 算法的树木点云配准

杨玉泽,孙英伟,林文树*

(东北林业大学 工程技术学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘　要:为了提高海量林地三维点云数据配准的效率和精度,提出了一种基于快速点特征直方图(fast point feature histograms,FPFH)初始匹配与正态分布变换(normal distributions transform,NDT)精确配准相结合的配准算法。首先计算 2 个待配准点云的法向量,再使用 k-d 树结构对点云的 FPFH 特征进行加速计算。然后,根据 2 个点云相似的 FPFH 特征,使用采样一致性初始配准算法(sample consensus initial alignment,SAC-IA)求解初始变换矩阵、完成初始配准。最后,用 DNT 算法对点云体素化,并使用点云密度概率分布函数进行点云数据的精确配准。结果表明,FPFH-NDT 算法的平均配准误差(相应点对的平均距离)为 0.032 3 m,运行时间为 256.376 s;在 0.05～0.1 m 的点云采样阈值范围内,FPFH-NDT 算法的配准误差基本不受采样阈值变化的影响,其值稳定在 0.03 m 左右;当采样阈值>0.1 m 时,配准误差随采样阈值的增大而增大;算法的配准时间整体上随点云采样阈值增大而减少。传统 ICP 算法的平均配准误差和时间分别为 0.526 3 m和 14.5 s;FPFH-ICP 算法的平均配准误差和时间分别为 0.042 5 m 和 289.346 s。FPFH-NDT 算法与传统 ICP 算法相比在配准精度上有了很大的提高,与 FPFH-ICP 算法相比,在保证点云的配准精度的基础上,FPFH-NDT 算法降低了算法的运行时间,提高了点云配准效率。

关键词:树木;点云;初始配准;精确配准;正态分布变换

中图分类号:S758　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)05-0141-06

Tree Point Cloud Registration Based on FPFH Feature and NDT Algorithm

YANG Yu-ze,SUN Ying-wei,LIN Wen-shu*

(*College of Engineering and Technology,Northeast Forestry University,Harbin* 150040,*Heilongjiang,China*)

Abstract:Point cloud registration is one of the key issues in 3D digital processing technology and visual modeling. In order to improve the efficiency and accuracy of 3D point cloud data registration in massive forest land, a fast point feature histogram (FPFH) initial registration combined with normal distribution transformation (NDT) precise registration algorithm was proposed. The registration algorithm first calculated the normal vectors of two point clouds to be registered, and used the k-d tree structure to accelerate the calculation of the FPFH features of the point cloud and then according to the similar FPFH features of the two point clouds, the initial transformation matrix was solved by using the sampling consistency initial alignment algorithm (SAC-IA), and the initial registration was completed. Finally, the DNT algorithm was used to prime the point cloud, and the point cloud density probability distribution function was used to precisely register the point cloud data. The experimental results showed that the average registration error of the FPFH-NDT algorithm (the average distance of the corresponding point pairs) was 0.032 3 m, and the running time was 256.376 s. In the range of 0.05 m～0.1 m point cloud sampling threshold, the registra-

收稿日期:2018-10-20　**修回日期**:2019-04-03

基金项目:国家自然科学基金(31500587);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572016CB10);黑龙江省博士后基金项目(LBH-Z15007)。

作者简介:杨玉泽,男,硕士在读,研究方向:地面三维激光扫描。E-mail:yyzzibo@163.com

* **通信作者**:林文树,男,博士,教授,研究方向:森林环境与遥感监测、计算机建模和三维可视化的理论与应用研究。E-mail:linwenshu@nefu.edu.cn

tion error of the FPFH-NDT algorithm was basically unaffected by the sampling threshold change, and its value was stable at about 0.03 m. When the sampling threshold was greater than 0.1 m, and the registration error increased with the increase of the sampling threshold. The registration time of the FPFH-NDT algorithm generally decreased with the increase of point cloud sampling threshold. The average registration error and time of the traditional ICP algorithm were 0.526 3 m and 14.5 s, respectively; while the average registration error and time of the FPFH-ICP algorithm were 0.042 5 m and 289.346 s, respectively. Compared with the traditional ICP algorithm, the FPFH-NDT algorithm had greatly improved the registration accuracy, while compared with the FPFH-ICP algorithm, based on the accuracy of the registration of the point cloud, the operation time was reduced and the efficiency was improved for the FPFH-NDT algorithm.
Key words: tree; point cloud; initial registration; precise registration; normal distributions transform

在森林资源调查中，由于 TLS(terrestrial laser scanning，TLS)是一种不接触非破坏性的三维测量技术，同时能生成多视角不同分辨率的点云且具有自动化处理数据的潜力，已被广泛的应用在林地单木树高、胸径等参数提取和三维模型重建[1-3]，而点云配准是实现单木几何参数提取及三维重建的关键环节。在 TLS 数据采集的过程中，由于被测物体空间位置、几何形状、环境和设备本身的影响，需要从不同的角度对被测物体进行扫描，接着通过坐标之间的转换将每站扫描获得的局部点云数据整合到同一坐标系下，这一过程叫做点云配准[4]。

目前国内外学者对点云配准已做了大量的研究和探索，其中最经典算法是 P. J. Besl *et al*[5] 最先提出的迭代最近点算法(iterative closest points，ICP)，该算法的配准精度和运行速度很大程度上取决于点云的初始位姿和数量大小。在初始位姿相近和点云数量较小时，ICP 算法的配准精度较高且运行速度较快；在初始位姿差异较大且点云数量较多时，该算法计算时间较长且容易陷入局部最优解。为了克服 ICP 算法的这些缺点，国内外学者在对 ICP 算法进行了大量改进和创新时，也提出了一些新的配准算法，Q. Y. Zhou *et al*[6] 提出了一种基于部分 3D 重叠表面的快速全局配准算法，该算法在配准速度上比 ICP 等局部迭代算法更快，精度较高。P. Bergström *et al*[7] 利用鲁棒性 M 估计来改进 ICP 算法，使用稳健的 M 估计来限制离群值的影响，证明了鲁棒方法优于最小二乘法。R. B. Rusu *et al*[8] 提出了一种基于 FPFH 特征的配准算法，该算法显著地提高了点云配准精度，不足之处在于降低了点云配准的效率。朱新宇等[9] 提出了一种基于主成分分析改进的 ICP 配准算法，不但保证了点云配准精度而且提高了点云配准效率。戴静兰等[10] 提出了一种基于曲率特征点和 k-d 树搜索改进的 ICP 算法，提高了 ICP 配准的精度，但当待配准点云数据过大时，该算法配准效率较低。杨小青等[11] 提出了一种基于相似三角形查找对应点改进的 ICP 算法，在配准精度和效率上较传统的 ICP 算法有大幅度提高。这些改进的 ICP 算法虽然在一定程度上提高了点云配准的精度和效率，但仍不能满足对于海量点云配准的要求。随着配准算法的进一步研究，基于正态分布变换(NDT)算法[12] 开始得到广泛的应用。郑芬等[13] 提出的基于改进 3D SIFT 的正态分布变换的点云配准算法，能够适用于不同角度的点云数据配准。王鹏等[14] 针对海量点云数据提出了基于拟牛顿法改进的 3D-NDT 点云配准算法，保证了传统 3D-NDT 算法的配准精度、提高了配准效率。NDT 算法中两幅待匹配点云间的匹配是通过最优化技术来确定。由于该算法在点云配准中不需要对特征点进行变换矩阵的计算，所以在配准海量点云数据方面，比 ICP 算法运行速度快、精度高[15]。与 ICP 算法相比，虽然 NDT 算法在点云配准的精度和效率上有了很大的提高，但仍需点云有较好的初始位姿，所以需要对点云数据进行初始变换配准，以提高点云配准的效率和精度。

本研究利用基于快速点特征直方图(FPFH)初始匹配与正态分布变换(NDT)精确配准相结合的配准算法，对水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)样地点云数据进行不同配准算法的点云配准，力求发现适合于林地海量点云数据的配准方法，从而提高地面三维激光扫描技术在林业中的广泛应用。

1 材料与方法

选取东北林业大学城市林业示范基地(45°43′10″N，126°37′15″E)中水曲柳样地作为试验对象，进行多站式地面三维激光扫描。因为扫描样地范围过大、树木枝干的相互遮挡以及风等环境因素的影响，扫描得到的点云数据噪声点较多，因此在配准前需要对点云数据进行预处理操作，来提高点云配准的精度和效率[16]。基于 FPFH 特征进行初始配准，并与 NDT 算法相结合进行点云精确配准。首先计算

2 个待配准点云的法向量,使用 k-d 树结构对点云的 FPFH 特征进行加速计算,得到目标点云和待配准点云的 FPFH 特征。再根据 2 个点云相似的 FPFH 特征,使用 SAC-IA 算法求解初始变换矩阵、完成初始配准。在初始配准的基础上,对点云体素化并计算点云的协方差矩阵和均值向量,求解点云的概率密度函数;然后利用每个映射点的概率分布之和代替点云的最优转换参数,使用 Hessian 矩阵法求解点云概率分布函数的最小值,得到最优的变换矩阵,完成点云数据的精确配准。具体的技术路线见图 1。

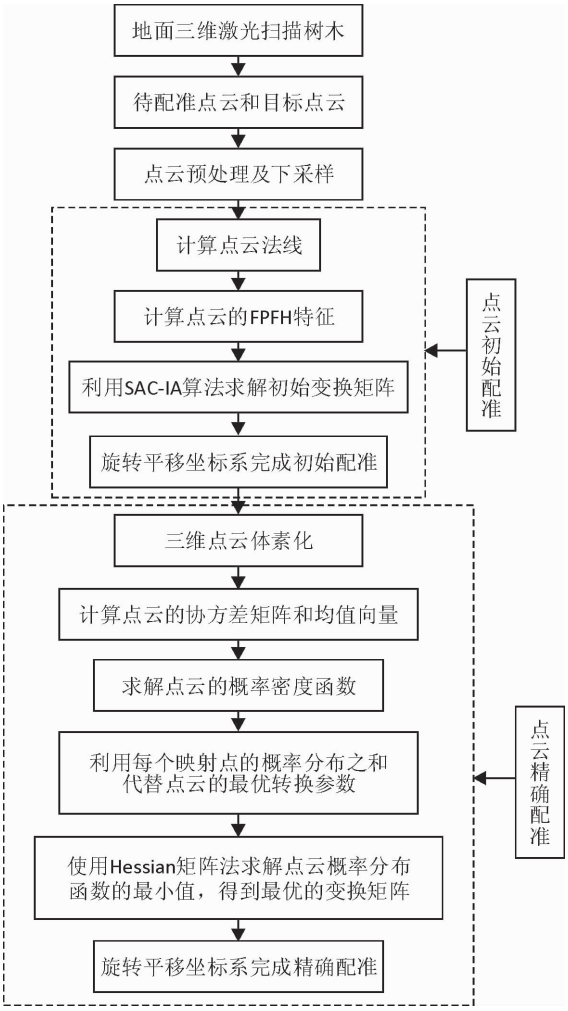


图 1　FPFH-NDT 配准技术路线

Fig. 1　FPFH-NDT registration technology route

1.1　基于 FPFH 特征的点云初配准

在点云的初配准中,首先计算下采样后点云数据中每个点的 FPFH,然后使用 SAC-IA 算法在目标点云中查找与待配准点云中具有相似 FPFH 特征的点,从这些相似点中构建对应点对应关系.并计算旋转变换矩阵,旋转平移待配准点云完成初始配准。关键点 FPFH 特征求解的算法理论依据如下:

点特征直方图(PFH)描述子[17]通过计算查询点与其邻域点法线方向之间的相互作用关系,形成一个对点云曲面 6 维姿态具有不变形且在不同的采样密度下具有鲁棒性的多维直方图,并用来描述点的局部特征信息。图 2 为 PFH 的计算原理示意图,其中 B_q 为待计算 PFH 的查询点,以搜索半径 r(图 2 中虚线圆)查询 B_q 所有 k 邻域点,并计算邻域内所有两点之间的欧式距离、法线的相对偏差,其计算的复杂度为 $O(nk^2)$。

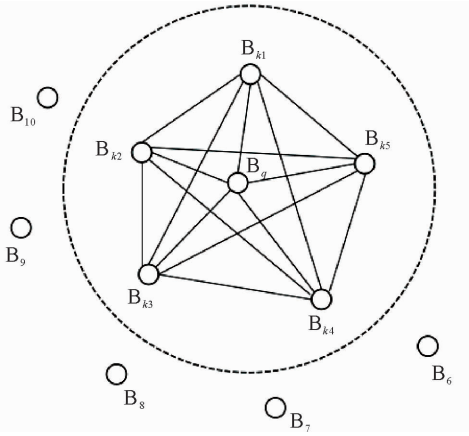


图 2　PFH 计算原理

Fig. 2　PFH calculation principle

FPFH 特征描述子是由 PFH 改进而来,它没有对全互连 B_q 点的所有邻近点进行计算,在确保能最佳描述点的几何特征的前提下,减少了算法的计算量,算法的复杂度由 $O(nk^2)$降低到 $O(nk)$;扩大了查询点的邻域范围,由原先最大半径 r 扩大到 $2r$;通过分解三元组,以 d 分离特征直方图的形式单独绘制各个特征维度,简化了合成直方图。图 3 为 FPFH 的计算原理图,对于查询点 B_q,其详细的 FPFH 特征计算过程参考张哲等[18]提出的基于关键点选择的快速点云配准算法。

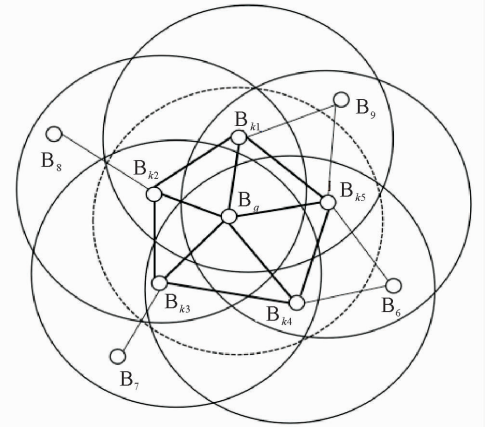


图 3　FPFH 计算原理

Fig. 3　FPFH calculation principle

1.2　基于 NDT 的点云精确配准

在点云精确配准中,NDT 算法因其在配准过程中使用点云的概率密度函数进行匹配,而不是利用对应点的特征进行匹配,所以相对于 ICP 算法,其

配准效率高且能够适用于海量点云的配准。NDT 算法的中心思想是将观察到的点云用高斯概率分布表示，找到待配准点云到目标点云的似然函数最优时的姿态，其算法详细的计算公式参考张晓等[19]提出的基于改进正态分布变换算法的点云配准。

2 结果与分析

为了验证 FPFH-NDT 算法对海量无序点云数据的可行性和有效性，选用东北林业大学城市林业示范基地水曲柳样地点云中两站数据作为点云配准数据，点云配准数据的扫描密度(2 个相邻点之间的平均距离)为 6 mm。配准运行平台是基于 Visual Studio 2013 和 PCL 数据库，计算机性能：Intel Core i5-7200U CPU@ 2.5 GHz 处理器，4GB 内存。

图 4 表示待配准水曲柳样地点云的初始位姿，其中右侧红色点云为待配准点云，点云数量为 3968702；左侧蓝色点云为目标点云，点云数量为 7681284。在点云数据配准中由于初始点云数据量过大，所以需要对初始点云数据进行下采样，然而点云下采样的密度大小直接影响着算法的配准精度和运行时间，这就需要找到点云下采样最优的采样阈值。在研究中初始点云的采样阈值设为 0.05～0.2 m，并记录了不同采样阈值下的点云数量、点云配准误差以及算法运行时间(表 1)。随着采样阈值的增大，配准点云的数目逐渐减少、配准误差逐渐增大，而算法运行时间逐渐减少。为了进一步找出最优的采样阈值，构建采样阈值和配准误差、运行时间的变化曲线(图 5)。从图 5 中可以看出，当采样阈值取值从 0.05 m 增大到 0.2 m 时，点云配准总体耗时逐渐缩短。当采样阈值＜0.1 m 时，采样阈值的大小对配准误差影响不大，配准误差基本稳定在 0.032 m左右。而采样阈值＞0.1 m 时，配准误差随采样阈值的增大而增大。综合考虑采样阈值对配准误差和运行时间的影响，选取0.1 m作为点云下采样中点云的采样阈值。

图 6 为两点云 FPFH 特征半径为 10 cm 时的可视化直方图，横轴为直方图的 33 个区间，纵轴为点云数据落到某区间的比率，且每 11 个区间的比率之和为 100% ，可以看出两配准点云的 FPFH 特征具有相似的变化趋势，根据相似的 FPFH 特征查找相对应的点对。图 7 表示采样后 2 个点云中具有相似 FPFH 特征的点进行对应匹配的结果。从图 7 中可以看到对应点中有部分错误的对应关系，剔除错误的对应点并使用 SAC-IA 算法计算剩余正确对应点的初始变换矩阵，从而完成点云的初始配准(图 8)。从图 8 中可以看到虽然待配准点云与目标点云的空间距离极大的缩小，但仍然具有很大差距。最后再根据 NDT 算法，使用点云的概率密度函数对两点云进行精确匹配，结果见图 9。从图 9 中看出，红蓝 2 个点云模型已基本重合，配准后两点云的配准误差(对应点的平均距离)为0.032 3 m，满足精度要求。为了更直观的说明配准效果，将扫描的三站数据配准，截取配准后点云 1.3 m 处胸径的剖面图(图 10)，从图中红色圆圈标记中可以看出树干胸径剖面呈现圆形状，说明 3 个点云数据已基本配准。

表 1 不同采样阈值下的配准误差和运行时间

Table 1 Registration error and run time based on different sampling thresholds

采样阈值 /m	目标点云数目	待配准点云数目	配准误差 /m	运行时间 /s
0.05	164 675	138 877	0.032 3	1 388.031
0.06	127 403	105 817	0.032 1	847.365
0.07	102 630	84 577	0.032 5	709.844
0.08	85 417	69 454	0.032 4	464.959
0.09	72 568	59 476	0.032 1	338.831
0.10	63 000	51 183	0.032 3	266.376
0.11	55 350	45 070	0.034 5	245.365
0.12	49 496	40 167	0.037 5	193.773
0.13	44 437	36 133	0.039 1	159.983
0.14	40 248	32 876	0.039 9	152.078
0.15	36 661	29 821	0.041 4	142.649
0.16	33 868	27 446	0.042 3	120.456
0.17	31 078	25 329	0.043 7	98.955
0.18	28 853	23 629	0.045 1	85.662
0.19	26 932	22 118	0.046 1	81.451
0.20	24 961	20 654	0.047 1	76.947

为更进一步验证算法的有效性，比较了 FPFH-NDT 算法与 ICP、NDT 和 FPFH-ICP 3 种配准算法在同一数据且采样阈值为 0.1 m 下的运行时间和配准误差。4 种配准算法的结果(30 次取平均)见表 2。从表 2 能够看出，在同一试验数据下，ICP 和 NDT 两算法的运行时间基本相同，但 ICP 算法的配准误差要大于 NDT 算法的配准误差，这说明了 ICP 算法比 NDT 算法配准精度低、对初始点云的位姿要求较高。在没有进行粗配准时，两者的配准精度都不算很高，配准误差数量级为分米级，不能满足试验要求，这充分说明不管是ICP算法还是NDT

表 2 4 种配准算法配准误差和运行时间的比较

Table 2 Comparison on registration error and running time of four registration algorithms

实验数据	算法	迭代次数	配准误差 /m	配准时间 /s
水曲柳样地点云	ICP	30	0.526 3	14.5
	NDT	30	0.347 6	13.8
	FPFH-ICP	30	0.042 5	289.346
	FPFH-NDT	30	0.032 3	256.376

算法,它们对配准点云的初始位姿都有较高的要求。在两种算法的基础上加上 FPFH 和 SAC-IA 初始配准算法后,算法的配准误差从分米级降低到厘米级,点云配准精度提高,说明基于点的FPFH特征

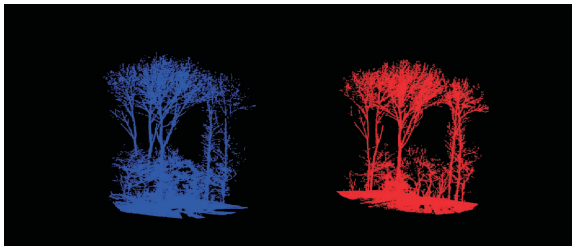


图 4　点云初始位姿

Fig. 4　Point cloud initial pose

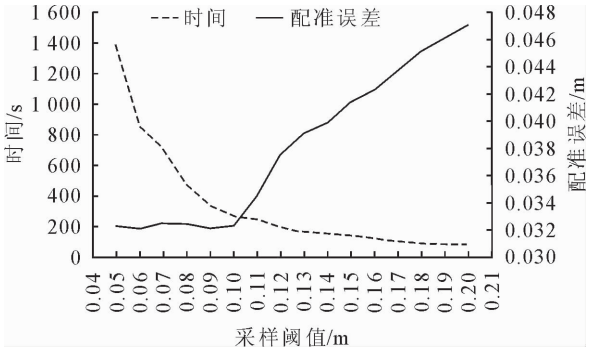


图 5　采样阈值与配准时间和配准误差变化曲线

Fig. 5　Registration time and registration error changed with sampling threshold

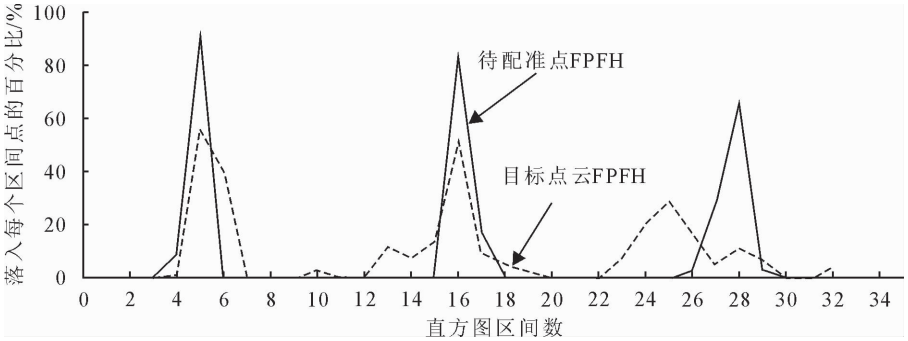


图 6　点云 FPFH 可视化直方图

Fig. 6　Point cloud FPFH visual histogram

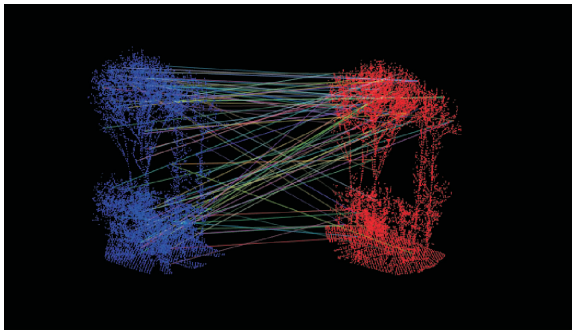


图 7　点云之间对应关系

Fig. 7　Correspondence between point clouds

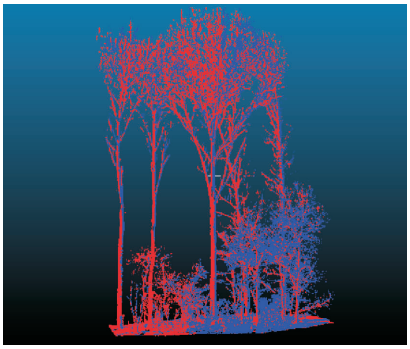


图 9　点云精确配准

Fig. 9　Point cloud precise registration

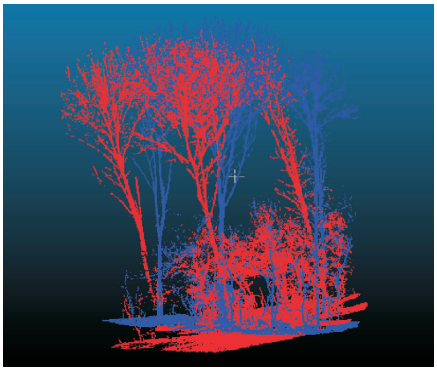


图 8　点云初始配准

Fig. 8　Point cloud initial registration

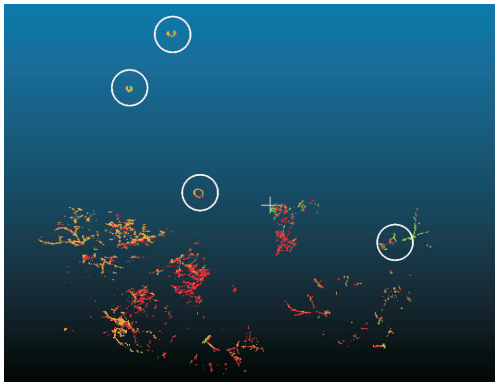


图 10　点云精确配准剖面图

Fig. 10　Sectional view of the point cloud precise registration

的初始配准方法能够满足 ICP 和 NDT 对点云初始位置的要求。但是 FPFH-NDT 算法的配准误差略小于 FPFH-ICP 的配准误差，这进一步充分说明相较于 NDT 算法，ICP 算法配准精度低、对点云的初始位姿的要求更高。另外，FPFH-NDT 算法也比 FPFH-ICP 算法运行速度快、时间少。综上所述，改进后的 NDT 算法能很好的应用到林地点云数据配准中。

3 结论与讨论

针对 ICP 算法收敛速度慢、对待配准点云的初始位置要求高和不适用海量林地点云数据配准的问题，提出了一种基于快速点特征直方图(FPFH)初始匹配与正态分布变换(NDT)精确配准相结合的配准算法，并得出结论：在 0.05～0.1 m 的点云采样阈值范围内，FPFH-NDT 算法的配准误差基本不受采样阈值变化的影响，其值稳定在 0.03 m 左右；当采样阈值＞0.1 m 时，配准误差随采样阈值的增大而增大。当点云的采样阈值＝0.1 时，FPFH-NDT 算法的配准精度和效率达到最佳平衡。FPFH-NDT 算法的配准时间整体上随点云采样阈值增大而减少。FPFH-NDT 算法平均配准误差(相应点对的平均距离)为 0.032 3 m，算法运行时间为 256.376 s。FPFH-NDT 算法与传统 ICP 算法相比在配准精度上有了很大的提高，与 FPFH-ICP 算法相比在保证点云的配准精度的基础上，降低了算法的运行时间，提高了点云配准效率。这说明了 FPFH-NDT 算法能很好适用于海量林地点云数据配准。

研究中还存在不足之处，配准点云数据为相邻两测站数据，没有考虑两测站点云数据之间的点云重合度对点云配准精度和效率的影响；算法运行时间较长，需要继续优化改进 NDT 算法中网格划分的方法，并结合 GPU 多线程并行优化方法提高本研究算法的配准效率。

参考文献：

[1] 高士增. 基于地面三维激光扫描的树木枝干建模与参数提取技术[D]. 北京：中国林业科学研究院，2013.

[2] 张珊珊，孟园，林文树. 基于三维激光扫描技术的单木参数提取精度研究[J]. 西北林学院学报，2017，32(5)：189-196.
ZHANG S S，MENG Y，LIN W S. Extraction precision of forest parameters at single-tree level based on 3D laser scanning technology[J]. Journal of Northwest Forestry University，2017，32(5)：189-196. (in Chinese)

[3] 夏明鹏，官凤英，范少辉，等. TLS 技术在森林资源调查中的应用现状与展望[J]. 西北林学院学报，2018，33(3)：238-244.
XIA M P，GUAN F Y，FAN S H，*et al*. Application status and prospect of TLS in forest resources inventory[J]. Journal of Northwest Forestry University，2018，33(3)：238-244. (in Chinese)

[4] 周春艳，李勇，邹峥嵘. 三维点云 ICP 算法改进研究[J]. 计算机技术与发展，2011，21(8)：75-77，81.

[5] BESL P J，MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，1992，14(2)：239-256.

[6] ZHOU Q Y，PARK J，KOLTUN V. Fast global registration[C]. Berlin，German：Springer，European Conference on Computer Vision，2016：766-782.

[7] BERGSTROM P，EDLUND O. Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares[J]. Computational Optimization and Applications，2014，58(3)：543-561.

[8] RUSU R B，BLODOW N，BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]. Piscataway，NJ：IEEE，2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation，2009：3212-3217.

[9] 朱新宇，万剑华，刘善伟，等. 改进的 ICP 点云配准算法[J]. 海洋测绘，2015，35(2)：77-79.

[10] 戴静兰，陈志杨，叶修梓. ICP 算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报，2007，12(3)：517-521.

[11] 杨小青，杨秋翔，杨剑，等. 应用改进 ICP 算法的点云配准[J]. 计算机工程与设计，2015，36(9)：2457-2461.
YANG X Q，YANG Q X，YANG J，*et al*. Point cloud registration based on improved ICP algorithm[J]. Computer Engineering and Design，2015，36(9)：2457-2461. (in Chinese)

[12] BIBER P，STRAßER W. The normal distributions transform：a new approach to laser scan matching[C]. Piscataway，NJ：IEEE，Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems，2003：2743-2748.

[13] 郑芬，CHELLALI R，代满意. 基于改进型 3D SIFT 正态分布变换算法的点云配准[J]. 计算机应用，2017，37(10)：2875-2878.

[14] 王鹏，李少达，赵雪. 基于拟牛顿法改进的 3D 正态分布变换点云配准算法[J]. 地理信息世界，2017，24(5)：50-52.
WANG P，LI S D，ZHAO X. An improved 3D normal distribution transformation point cloud registration algorithm based on Quasi-Newton method[J]. Geomatics World，2017，24(5)：50-52. (in Chinese)

[15] MAGNUSSON M，NUCHTER A，LORKEN C，*et al*. Evaluation of 3D registration reliability and speed-a comparison of ICP and NDT[C]. Piscataway，NJ：IEEE，2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation，2009：3907-3912.

[16] 李广云，李明磊，王力，等. 地面激光扫描点云数据预处理综述[J]. 测绘通报，2015(11)：1-3，31.

[17] 马大贺，刘国柱. 改进的基于 FPFH 特征配准点云的方法[J]. 计算机与现代化，2017，267(11)：46-50.
MA D H，LIU G Z. Improved method of point cloud registration based on FPFH feature[J]. Computer and Modernization，2017，267(11)：46-50. (in Chinese)

[18] 张哲，许宏丽，尹辉. 一种基于关键点选择的快速点云配准算法[J]. 激光与光电子学进展，2017，54(12)：155-163.

[19] 张晓，张爱武，王致华. 基于改进正态分布变换算法的点云配准[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(4)：100-109.