

基于改进迭代最近点算法的两视角激光雷达数据配准

赵明波^{1,2} 何 峻¹ 罗小波¹ 付 强¹

(¹ 国防科学技术大学电子科学与工程学院自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073)

² 中国人民解放军 93246 部队, 吉林 长春 130051

摘要 两视角激光雷达数据配准是空地探测遮蔽目标研究领域中的一项重要内容, 迭代最近点(ICP)算法为其提供了理论基础, 但遮蔽条件下激光雷达数据的复杂性使 ICP 算法在对应点确定上面临很大困难。在分析 ICP 算法基本原理和遮蔽条件下激光雷达数据特点的基础上, 从控制点选择、对应点匹配和伪点对剔除三个方面给出了 ICP 算法的具体应用策略和改进措施, 并提出一种基于固定-自适应重叠率的伪点对剔除方法。详细阐述了基于改进 ICP 算法的两视角激光雷达数据配准的具体步骤, 并进行了实验验证。实验结果表明: 改进后的 ICP 算法能够有效实现了遮蔽条件下的激光雷达数据配准, 且与其他算法相比, 具有较强的稳健性和较高的配准精度。

关键词 图像处理; 数据配准; 迭代最近点; 激光雷达; 遮蔽目标; 点云数据

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.1128007

Two-Viewing Angle Ladar Data Registration Based on Improved Iterative Closest-Point Algorithm

Zhao Mingbo^{1,2} He Jun¹ Luo Xiaobo¹ Fu Qiang¹

¹ Automatic Target Recognition Key Laboratory, School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² No.93246 Troop, People's Liberation Army, Changchun, Jilin 130051, China

Abstract Two-viewing angle ladar data registration is an important content in the research filed of obscure target detection by air to ground. Iterative closest-point (ICP) algorithm provides the theoretical basis for it. But the corresponding points are difficult to be confirmed in the ICP algorithm due to the complexity of ladar data in the obscure condition. Based on the analysis of ICP algorithm fundamental principle and ladar data characteristics in the obscure condition, the application strategies and improvements of the ICP algorithm are proposed in three aspects, which are the support-points selecting, corresponding points matching and the pseudo-points removing. Moreover, a novel pseudo-points removing algorithm is proposed based on a fixed-adaptive overlap rate. Then the concrete steps of two-viewing angle ladar data registration using the improved ICP algorithm are elaborated, and lastly the experimental verification is carried out. The experimental results show that the improved ICP algorithm can effectively register the ladar data in the obscure condition, and has stronger robustness and higher registration accuracy compared with other algorithms.

Key words image processing; data registration; iterative closest point; laser radar; obscure target; point cloud data

OCIS codes 100.3010; 100.3190; 100.6890; 110.4155; 280.3640

1 引言

对遮蔽目标的探测长久以来一直是空地探测领域中的重要研究方向, 在反恐斗争、战术侦察等国防安全应用中具有重要意义^[1,2]。所谓遮蔽目标指的

是被伪装网、树木等各种人工或自然遮蔽物所遮挡的目标, 不同于开阔区域目标, 遮挡因素使得难以获取有效的目标信息。激光成像雷达的发展和应用于解决这一问题提供了极大的便利, 区别于传统的二

收稿日期: 2012-05-23; 收到修改稿日期: 2012-06-29

作者简介: 赵明波(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事精确制导与目标识别、激光雷达图像处理、目标检测与识别等方面的研究。E-mail: zhmb831019@163.com

导师简介: 付 强(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事精确制导与目标识别、雷达信号处理等方面的研究。E-mail: fuqiang1962@vip.sina.com

维成像探测系统[可见光、红外、合成孔径雷达(SAR)及多光谱等],其可以提供反映目标场景几何结构信息的距离像和三维点云数据^[3,4]。并且,由于激光雷达波束较窄,方向性好,可以一定程度上穿透遮蔽物获取部分目标信息^[5~7]。但在基于激光成像雷达的遮蔽目标探测中,一个重要问题是单视角观测条件下遮挡及自遮挡造成数据缺失,数据的信息量有限,需要进行多视角数据的配准与融合以提供更丰富的目标场景信息,为目标检测、识别服务^[8~10]。

目前,国内外开展这方面的研究较少。Vasile等^[11]对“Jigsaw”激光雷达数据进行处理时,通过提取旋转图像特征来进行对应点的选择和配对,然后应用迭代最近点(ICP)算法把其他视角数据向参考视角数据配准,最终实现多视角数据配准,但旋转图像特征模型库构建复杂。Chevalier等^[12,13]则通过构建目标场景顶视条件下的二维(2D)直方图,提取2D直方图的峰值来获取垂直结构特征(如树干等),对这些垂直结构特征进行匹配来实现不同视角下的激光雷达数据粗配准,最后应用ICP算法实现精确配准;但这种算法主要针对观测俯仰角较小(近似于平视)情况下的激光雷达数据,具有垂直结构的目标上观测点较多,易于提取特征,而空地观测中这一条件显然难以符合。马超杰等^[14]则通过对目标场景中的各个目标区域进行分割,提取每个目标区域的质心点进行对应点选择和配对,实现初始配准后应用ICP算法进行精确配准;但这种算法需要先对各个目标区域进行分割,较为适用于开阔、平坦的目标场景,难以适用于遮蔽条件下的激光雷达数据配准。值得注意的是,以上几种多视角配准算法均是以基于ICP算法的两视角数据配准为核心,只不过把研究重点放在了ICP算法的初值选择即粗配准上,没有对精确配准部分ICP算法的具体步骤进行深入研究。对ICP算法具体步骤的研究和改进则大多集中于逆向工程、文物保护和三维建模等测量精度较高、点密度较大和场景简单的应用中^[15,16],不适合遮蔽条件下的激光雷达数据配准。事实上,在空地探测的大多数应用中,空载平台一般都携带有惯导、全球定位系统(GPS)等定位、定姿系统^[7,9,11],虽然存在一定的位置、姿态误差,但可以为ICP算法提供较为合理的初值;更重要的是,遮挡因素造成的数据缺失使激光雷达数据结构复杂,难以直接应用ICP算法或已有改进算法进行配准,需要结合遮蔽条件下的激光雷达数据特点进行改进。因此,本文

把后者作为重点,以空地探测隐藏于树林里的军用车辆目标为应用背景展开研究。

本文分析ICP算法的基本原理和应用于遮蔽条件下的激光雷达数据配准时存在的问题,针对存在的问题和ICP算法中对应点的确定方法,给出相应的应用策略和改进措施。进一步提出基于改进ICP算法的两视角激光雷达数据配准算法,并对提出的算法进行实验验证,与标准ICP算法及其他改进算法进行对比分析,验证算法的有效性和多种条件下的配准性能,为下一步进行遮蔽条件下的多视角激光雷达数据配准、融合及遮蔽目标的检测、识别提供了基础和可能。

2 ICP算法基本原理及问题分析

2.1 ICP算法基本原理

ICP算法最早是由Besl等^[17]以及Chen等^[18]分别先后提出的。前者提出的是基于自由曲面上的两个点集的配准方式,而后者利用的则是曲面点集与切平面之间的关系。迄今为止,ICP算法仍旧是有关三维重建、数据配准方面的主流算法,它的变种和衍生算法在各种类型的三维数据点配准问题中运用相当广泛^[19,20],本文把Besl与Mckay提出的ICP算法作为标准ICP算法。

假设两个三维点云数据集分别是 M 和 P ,并且有 $P \subseteq M$, M 为基准数据, P 为待配准数据, M 和 P 中的点分别表示为 m_i 、 p_i ,则标准ICP算法的主要步骤如下:

1) 搜索最近点:取某一点 $p_i \in P$,计算 M 中每个点与 p_i 的距离,并获得距离 p_i 最近的点 m_i ,这样 (p_i, m_i) 就构成了一组对应点对;对 P 中的每一个点都搜索其在 M 中的对应点。

2) 求解配准变换:计算某一刚体变换 RT ,使其能够让所有对应点对 (p_i, m_i) 的距离平方和最小。刚体变换 RT 表述为旋转矩阵 R 和平移矢量 T 的形式,即 $RT = (R, T)$ 。那么,该步骤就是最小化

$$E = \sum_{p_i \in P} \|m_i - (Rp_i + T)\|^2. \quad (1)$$

3) 应用变换:对 P 根据 RT 进行变换,即 $P^{k+1} = RP^k + T$ (k 表示迭代次数)。

4) 重复迭代:重复以上三个步骤,直至计算结果收敛或达到设定的迭代次数为止。

由上述步骤可以看出ICP算法在求解转换关系的过程中,同时存在着多个未知的关系:首先,两个点集之间的变换矩阵不知道;其次,两个点集之间

的点对对应关系也是未知的,同时确定这两组参数是不可能的。ICP算法所采用的解决办法就是首先变换矩阵固定(这就是对配准初值的要求),求解点对关系;然后再假设点对关系固定,求解变换矩阵;重复此过程,直至满足停止条件,得到最终的转换关系。因此,在ICP算法中有两个关键问题:初值的选取和对应点的确定。初值的选取直接影响最后的配准结果,如果初值选取不当,算法就有可能达到局部最小,造成迭代不能正确收敛;而对应点的确定方法则在较大程度上影响了迭代的收敛速度和配准精度,算法的大部分时间都花费在寻找点对的对应关系上,对应点的准确性则影响最终所得的配准精度和算法的稳健性。

2.2 问题分析

空地探测中遮蔽条件下的激光雷达数据由于受测量噪声、遮挡、自然环境和运载平台等因素的影响,主要存在以下特点:1)理论上,只要知道载体对地观测时的精确位置、姿态信息,把激光雷达数据转换到统一的地面局部坐标系下,就可以直接实现不同视角数据的配准,但由于惯导、GPS等定位、定姿系统的测量误差造成不同视角下的数据存在严重错位,需要进行精确配准;2)激光雷达的成像分辨率有限,且遮挡造成部分数据缺失,数据点之间的相关性相对较小,具有一定的散乱性,与逆反工程、文物保护和三维建模等应用中的测量数据相比,很难提取有效的平面、曲面等相关几何特征;3)遮挡造成不同视角数据之间的有效重叠区域有限,在对应点的搜索匹配中需要剔除非重叠区域的影响,构建合理准确的配准误差衡量标准;4)由于有效对应点的数量限制和地面军事目标几何结构特征的相似性,配准结果极易陷入局部最优。但是,空地探测的一些先天优势也为数据配准提供了一定的基础:1)运载平台的定位、定姿系统虽然精度有限,但可以为不同视角下的数据配准提供一定的初值,比无初值下的配准更加便利;2)运载平台的运动状态变化较小、速度有限、观测距离相对较远,因此不同视角之间的差别会相对较小,数据之间存在一定的共同观测区域,为最终完成配准提供了物理基础和可能性。

从以上ICP算法的基本原理和激光雷达数据特点可以看出,把ICP算法应用于空地探测中遮蔽条件下的激光雷达数据配准,初值选取问题已不是主要障碍,关键点在于对应点的确定方法,也是ICP算法的主体部分。遮蔽条件下的数据特性给对应点的确定带来了很大困难,并且ICP算法中对应点的

确定贯穿于算法的多个步骤,因此有必要结合数据特性对ICP算法中的对应步骤采取恰当的应用策略和改进措施。

3 应用策略及改进

ICP算法中对应点的确定主要通过控制点的选择、对应点的匹配和伪点对剔除几个步骤来实现。为了在空地探测遮蔽条件下的激光雷达数据配准中取得较好的应用效果,这里在简要分析对应步骤主要应用方法的基础上,结合本文背景下的数据特点,选择合适的策略,并主要对伪点对的剔除方法进行了改进。

1) 控制点选择。所谓控制点是指实际参与到ICP算法中的数据点。现在一般采取的选择策略有:①采用所有数据点;②均匀采样;③随机采样;④结合某种特征选择采样,例如基于法向量的分布、梯度和边缘点等。其中,第一种方法无效点过多且数据量较大,一般不被采用;第二、三种方法只能减少数据量,但并不能避免无效点的干扰;第四种方法则要求原始数据点密度较大,能够准确提取相关特征。显然,根据本文数据特点,这四类方法均不能直接适用。结合实际情况,位于树木等较高植被上的数据点由于风等因素的影响随视角变化较大;地面上的数据点无明显特征,相似区域过多;这两者都属于无效点,需要剔除。空地观测的激光雷达数据转换到局部地面坐标系下后,树木等植被、目标、地面在高度上具有明显的分层特征,利用这个特点选择一定高度阈值内的数据点,可以有效去除位于较高树木和地面等区域的无效点。

2) 对应点匹配。对于 P 中的某一点 p_i ,需要通过合适的度量方法和匹配策略在 M 中找到与其对应的点 m_i ,称为对应点或匹配点。目前主要的方法有:①最近点法,即在 M 中选择距离 p_i 最近的点;②法向量射线法,即选择从 p_i 沿着其在 P 中的法向量射线与 M 的交点;③在以上两种方法基础上附加某种约束条件^[21],即要求对应点具有某种相同的特征,例如曲率、纹理等。由于遮蔽条件下激光雷达数据具有一定的杂散性,且分辨率有限,不利于获取某一点的法向量或曲率、纹理等特征,因此,选择第一种方法即最近点法作为对应点的搜索匹配策略。且相关研究表明^[20],最近点法虽然不是最快的,但它却是稳健性最好、运行最稳定的,不论是那种形式的三维点云数据配准,最近点法几乎都可以收敛到一个正确的结果。

3) 伪点对剔除。伪点对指的是事实上不存在对应关系的点对。由于在实际配准中,数据集 M 与 P 一般只有部分是重叠的,那么 P 中与 M 不存在重叠区域的部分在最近点搜索匹配中得到的对应点对就是伪点对。伪点对的存在会严重影响变换矩阵解算的精度和算法稳健性,需要剔除。目前比较典型的方法有:①剔除距离大于一定阈值的点对;②把对应点对按距离排序,剔除距离最大的 $n\%$ 的点对;③剔除距离大于所有对应点对距离标准差 n 倍的点对;④根据刚体不变性原则,剔除与邻域点对不一致的对应点对;⑤剔除位于边界的对应点对。研究表明,伪点对的剔除虽然对提高 ICP 算法的执行效率没有实质性的提高,但对提高 ICP 算法的稳健性具有重要意义,尤其在两个数据点集仅有部分重叠时作用更加明显。本文应用中,由于遮挡因素,数据缺失严重,在配准中的直接体现就是仅有部分重叠区域,因此,伪点对的剔除就显得异常重要。在上述伪点对的剔除方法中,方法一和方法三的参数不易控制,且物理意义较为模糊;方法四与方法五都需要数据点密度较大,且邻域点的一致性较好,但对于分辨率较低、杂散特征明显的三维点云数据来说,显得不太适用。在方法二中,可以把剔除掉的 $n\%$ 的伪点对理解为位于非重叠区域的点对,而 $1-n\%$ 可以理解为 P 在 M 中的重叠区域。定义 P 在 M 中的重叠率为

$$\eta = 1 - n\% = \frac{n_p}{N_p}, \quad (2)$$

式中 n_p 为 P 在 M 中存在真实对应点的点数, N_p 为 P 中数据点的总量。

但在实际应用中如何设置 η 却是一个难点。 η 过小,会出现仅有小部分数据对配准过程起作用,极易陷入仅有少部分相似区域配准而其他大部分区域未配准的情况。尤其在本文应用中,大部分地面军用车辆目标都具有较多的相似几何结构,极易出现这种问题。因此, η 一般不宜过小,大于 0.5 较好。相反,如果 η 选择过大,则会把过多的伪点对认为是正确对应点,造成配准误差。经多次试验,发现 η 设置为 0.7~0.8 时效果较好。虽然这个参数并不是真实的重叠率,但却可以获得较好的配准效果。这主要是因为虽然它仍然包含了部分非重叠区域的伪点对,但却剔除掉了大部分存在较大误差的伪点对,保留下来的伪点对由于误差较小对配准结果影响较小,反而由于数据点的空间分布较广,解决了低重叠率时相似区域造成的误配准问题。

采用恰当的固定参数 η 虽然能够获得较好的配准效果,但毕竟它不是真实情况下的重叠率,那么设想如果能够通过自适应的方式获取不同视角下观测数据的重叠率,则可能获得较好的配准效果。文献[22]中给出了一种基于黄金分割算法自适应迭代计算重叠率的方法,实验表明该重叠率计算方法取得了较好的效果,大部分情况下基本能够收敛到真实重叠率。但是,在实际应用中却发现这种自适应确定重叠率的方法还存在一些问题:① η 的自适应获取与 M 、 P 的初始位置、姿态错位有关系,不同初始错位条件下,造成 ICP 算法的收敛方向不同,个别条件下难以获取正确的重叠率;② η 的自适应获取与数据本身结构有较大关系,当 P 与 M 中部分数据空间分布较为集中时,易得到局部最优的虚假重叠率,一般这个重叠率较小,仅考虑了少部分数据,易造成较大程度的误配准。文献[22]之所以能够获得较好的配准效果可能与其采用的实验数据重叠率较高、物体细节较多、初始位置与姿态错位较小等因素有关。

因此,这里兼顾固定重叠率与自适应重叠率的优点,把二者综合起来考虑。由于恰当的固定重叠率不仅能剔除较大误差的伪点对影响,也能够有效避免采用自适应重叠率遇到的问题;且不需要迭代计算 η ,比自适应重叠率的执行速度要快。因此,把基于固定重叠率的伪点对剔除方法用在 ICP 算法执行的前几次迭代中,可以有效快速的使 P 配准到与 M 误差较小的范围内,达到基本配准。但是,采用固定重叠率可能会使对应点中含有部分伪点对,影响最后的配准精度。因此,在经过一定次数的迭代后,采用自适应重叠率计算方法来获取相对真实的重叠率,使用这个重叠率继续进行伪点对的剔除,这样可以有效提高最终的配准精度。

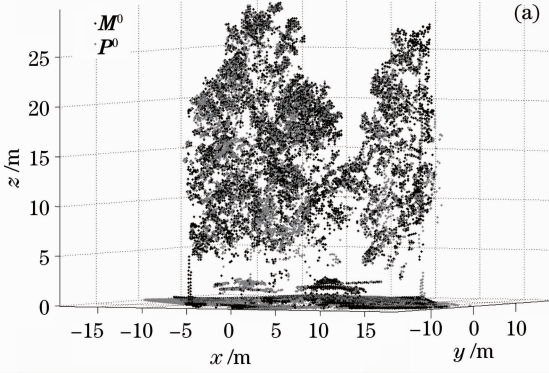
4 本文算法

以上已经阐述了 ICP 算法的基本原理和应用用于空地探测遮蔽条件下的激光雷达数据配准时存在的问题,针对存在的问题在对应点的确定方法上进行了改进。下面主要介绍基于改进 ICP 算法的激光雷达数据配准算法的主要步骤和流程图。

4.1 主要步骤

1) 确定初值。输入基准数据 M^0 和待配准数据 P^0 。 M^0 、 P^0 均是由激光成像雷达探测得到的原始角度-角度-距离像经去噪等预处理后,结合运载平台的位置、姿态信息转换到地面局部坐标系下的

三维点云数据(如图 1 为仿真得到的激光雷达点云数据^[23],黑色点为 M^0 ,灰色点为 P^0 ,观测俯仰角均为 60° ,方位角分别为 120° 、 135°)。同一目标场景选择的地面局部坐标系是一致的,如果运载平台没有定位、定姿误差,那么 M^0 、 P^0 中的重叠部分应该是



自动配准的[图 1(a)],因此,转换关系初值设为

$$R^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T^0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

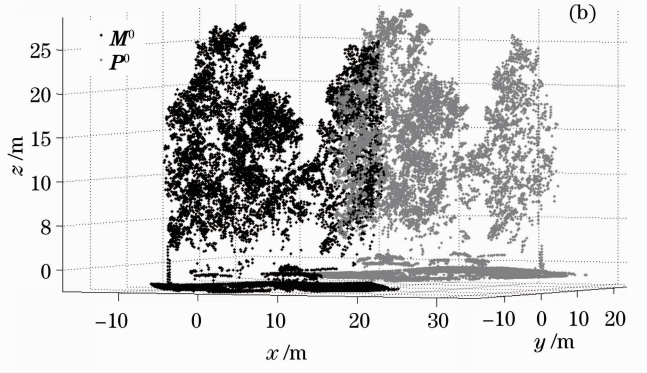


图 1 三维点云数据 M^0 、 P^0 。(a)不存在载体位置、姿态误差;(b)存在载体位置、姿态误差

Fig. 1 3D point cloud data M^0 , P^0 . (a) Without carrier position, attitude error; (b) with carrier position, attitude error

2) 选择控制点。根据第 3 节关于控制点选择方法的应用策略,去除位于较高树木和地面上的无效点。由于本文的重点是 ICP 算法,如何有效对地面进行估计并去除地面点并不是这里的研究重点,因此假设地面是较为平坦的,仅有小的起伏,地面数据点集中于最小高度值附近。对于地形较为复杂的观测数据可以先应用激光雷达数据滤波方面的算法对地面进行估计^[24],然后再剔除地面数据点,这里不再赘述。

在假设地面较为平坦的条件下,分别获取 M^0 、 P^0 中高度值最小的数据点并提取其高度值;结合实际情况设置高度阈值,选择位于该高度范围内的数据点为控制点;经高度阈值筛选后得到 M^0 、 P^0 中对应的点集 M^1 、 P^1 ,但一般在 ICP 算法的应用中选择数据点较多的数据集作为基准数据,因此检测 M^1 、 P^1 中数据点的个数并选择基准数据;最后得到实际参与 ICP 算法的基准数据 M (迭代过程中始终保持不变)和待配准数据 P^1 (1 表示第一次迭代),如图 2 所示(黑色点为 M ,灰色点为 P^1), M 和 P^1 中的数据点数量分别为 N_M 、 N_P ($N_M > N_P$)。

3) 搜索匹配对应点。按照第 3 节中的对应点匹配的应用策略,对 P^k 中的每个点 p_i^k 搜索匹配其在 M 中对应点 m_i^k ,并计算每个对应点对 (p_i^k, m_i^k) 之间的距离 d_i^k ,得到对应点对距离序列 $D^k = [d_1^k, d_2^k, \dots, d_{N_p}^k]$ 。这里在进行对应点搜索时,应用了 K-维(K-D)搜索树的方法来加快搜索速度^[25]。

4) 获取重叠率参数。根据第 3 节关于伪点对

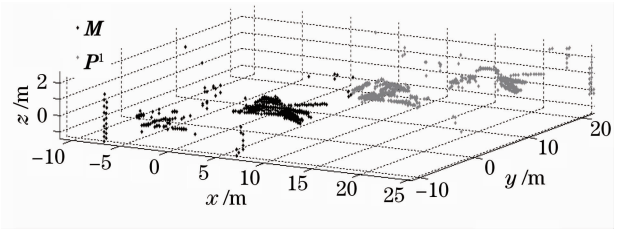


图 2 控制点选择后的三维点云数据 M 、 P^1

Fig. 2 3D point cloud data M and P^1 after the support-point selection

剔除中获取重叠率参数的改进方法,采用设置固定重叠率与计算自适应重叠率相结合的方法来获得数据 M 与 P^k 的重叠率参数 η^k 。这里需要根据实际情况确定一个固定重叠率与自适应重叠率切换的迭代次数阈值 N_{thr} 。当迭代次数 $k \leq N_{thr}$ 时,采用固定重叠率;反之,采用自适应计算重叠率 η^k 。但是,如果采用固定的 N_{thr} ,可能会出现 $k \leq N_{thr}$ 时就达到了 ICP 算法的迭代停止条件,这时仅考虑了固定重叠率参数下的对应点对,配准精度有限,需要强制执行基于自适应重叠率的 ICP 算法,因此,在这种条件下采用自适应确定 N_{thr} 。固定重叠率与自适应重叠率切换方法如下:

$N_{thr} = 30$; 固定重叠率 = 0.8;

If $k \leq N_{thr}$ & ICP 算法达到迭代停止条件

$N_{thr} = k$; $\eta^k =$ 自适应重叠率;

Else if $k > N_{thr}$

$\eta^k =$ 自适应重叠率;

Else

$\eta^k = \text{固定重叠率};$

End

5) 剔除伪点对。根据第3节伪点对剔除的应用策略,对 D^k 按照大小排序,得到 $D^k = [d_1^k, d_2^k, \dots, d_{N_p}^k]$,其中 $d_1^k, d_{N_p}^k$ 分别为 D^k 中的最小值和最大值。选择距离最小的 N_T ($N_T = N_p \cdot \eta^k$) 个点对 (p_i^k, m_i^k) 。

6) 解算变换矩阵。利用剔除伪点对后的 N_T 个对应点对 (p_i^k, m_i^k) ,通过单位四元数法^[25]解算当前迭代次数的姿态转换矩阵 R^k 与平移矢量 T^k 和累计姿态转换矩阵 R_{sum}^k 与平移矢量 T_{sum}^k

$$\begin{cases} R_{\text{sum}}^k = R^k R_{\text{sum}}^{k-1}, & R_{\text{sum}}^0 = R^0 \\ T_{\text{sum}}^k = R^k T_{\text{sum}}^{k-1} + T^k, & T_{\text{sum}}^0 = T^0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 (R^k, T^k) 是 P^k 至 P^{k+1} 的转换矩阵; $(R_{\text{sum}}^k, T_{\text{sum}}^k)$ 是 P^1 至 P^{k+1} 的转换矩阵。

7) 计算配准误差。把解算得到的 R^k, T^k 应用于待配准数据 P^k 中的有效点 $[p_1^k, p_2^k, \dots, p_{N_T}^k]$,对应到 M 中的有效点 $[m_1^k, m_2^k, \dots, m_{N_T}^k]$,可计算出当前迭代次数的配准误差为

$$e^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_T} \|m_i^k - (R^k p_i^k + T^k)\|^2}{N_T} \quad (5)$$

8) 判断是否停止迭代。根据实际情况,设置 ICP 算法的最大迭代次数 N_{iter} 、最小配准误差阈值 e_{thr} 和配准误差变化阈值 Δe_{thr} 。如果 $k \geq N_{\text{iter}}$ 或 $e^k <$

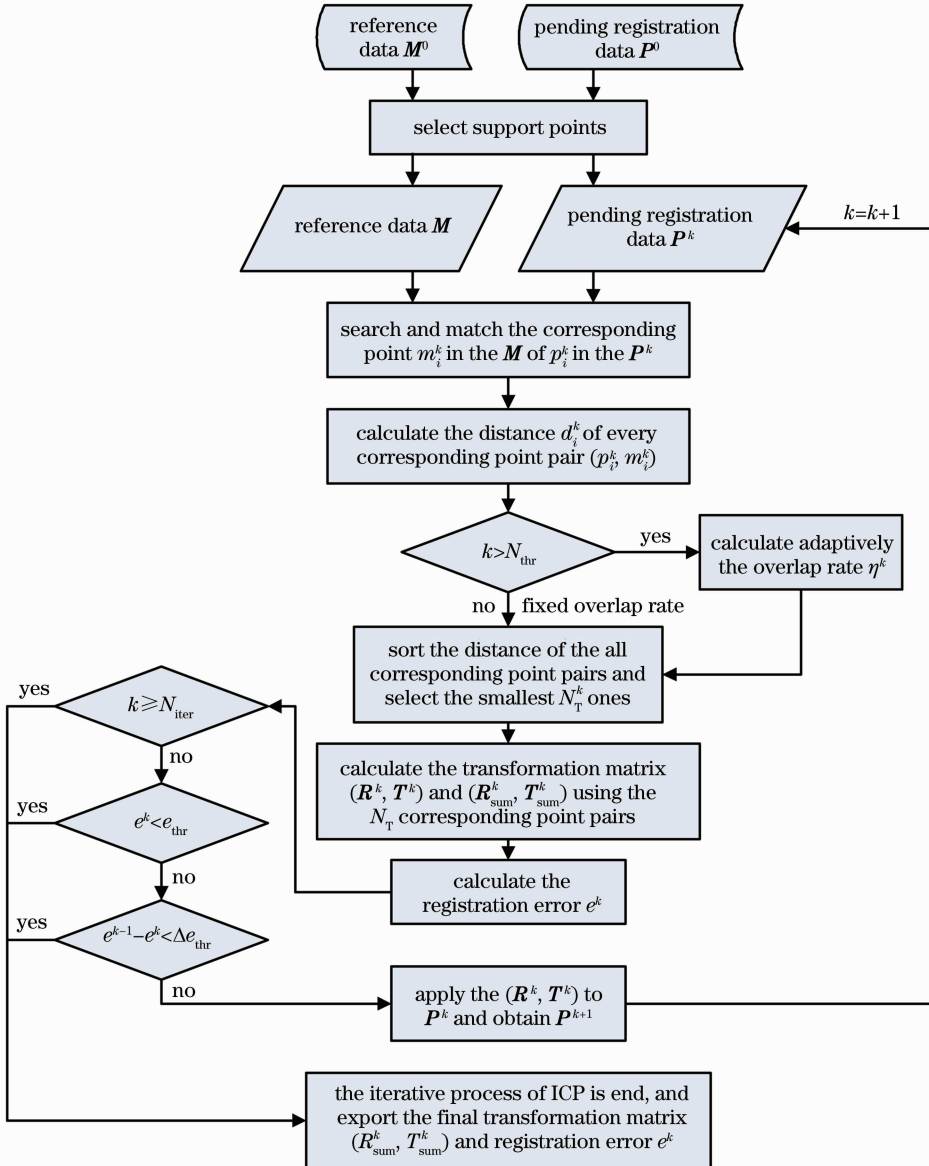


图3 本文算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

e_{thr} 或 $e^{k-1} - e^k < \Delta e_{\text{thr}}$ 任一条件满足,则迭代结束并输出最终得到的累计旋转矩阵 $\mathbf{R}_{\text{sum}}^k$ 、平移矢量 $\mathbf{T}_{\text{sum}}^k$ 及配准误差 e^k 。否则,对 P^k 中的所有点 p_i^k 应用变换矩阵 \mathbf{R}^k 、 \mathbf{T}^k ,得到 P^{k+1} 中的点 p_i^{k+1} , $k = k + 1$,转至步骤 3) 进入下一次迭代

$$p_i^{k+1} = \mathbf{R}^k p_i^k + \mathbf{T}^k. \quad i = 1, \dots, N_P \quad (6)$$

4.2 算法流程图

根据以上基于改进 ICP 算法的激光雷达数据配准算法的主要步骤,下面给出算法的流程图,如图 3 所示。

5 实验验证

5.1 算法验证

取图 1(b) 所示的遮蔽条件下的激光雷达数据对本文算法进行验证,图 1(b) 中的数据经控制点选择后得到如图 2 所示的控制点数据 \mathbf{M}, \mathbf{P}^1 。设置迭代停止条件 $N_{\text{iter}} = 100$ 、 $e_{\text{thr}} = 0.01 \text{ m}^2$ 、 $\Delta e_{\text{thr}} = 10^{-4} \text{ m}^2$,应用改进后的 ICP 算法,迭代 45 次后达到停止条件,得到最终旋转变换矩阵 $\mathbf{R}_{\text{sum}}^{45}$ 和平移矢量 $\mathbf{T}_{\text{sum}}^{45}$ 及最终配准误差 $e^{45} = 0.0106 \text{ m}^2$ 。应用 $\mathbf{R}_{\text{sum}}^{45}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{sum}}^{45}$ 对 \mathbf{P}^1 进行变换,得到如图 4(a) 所示的对控制点数据的配准结果(黑色点为 \mathbf{M} ,灰色点为 \mathbf{P}^1),对比图 2,可见配准效果良好。进一步应用 $\mathbf{R}_{\text{sum}}^{45}$ 和 $\mathbf{T}_{\text{sum}}^{45}$ 对图 1(b) 中所示的原始待配准数据 \mathbf{P}^0 进行变换,得到如图 4(b) 所示的配准结果(黑色点为 \mathbf{M}^0 ,灰色点为 \mathbf{P}^0),对比图 1(b)、图 1(a),较好地实现了 \mathbf{P}^0 与 \mathbf{M}^0 的配准。

5.2 算法性能对比分析

前面 5.1 节用遮蔽条件下的激光雷达数据对本文改进的 ICP 算法进行了验证,实验结果表明算法是切实可行的,配准效果良好,这里进一步对算法的性能进行分析。本文中的 ICP 算法主要在伪点对剔除方法上进行了改进,为了检验改进算法的性能,分别对未剔除伪点对的 ICP 算法(算法一)、基于自适应重叠率的 ICP 算法(算法二)、基于固定重叠率

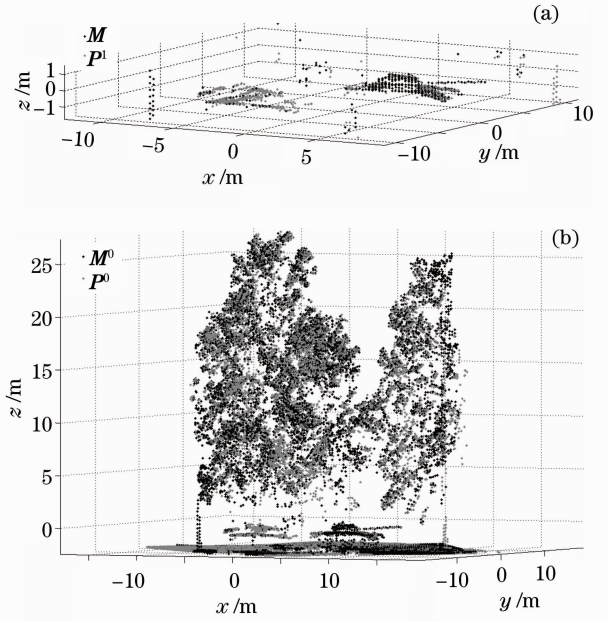


图 4 配准结果。(a)对控制点数据 \mathbf{P}^1 和 \mathbf{M} ; (b)对原始数据 \mathbf{P}^0 和 \mathbf{M}^0

Fig. 4 Registration results. (a) Support-point data \mathbf{P}^1 and \mathbf{M} ; (b) original data \mathbf{P}^0 and \mathbf{M}^0

的 ICP 算法(算法三)和基于固定—自适应重叠率的 ICP 算法(算法四)四种算法进行仿真实验,并分析对比它们的性能。

1) 对比不同初始错位条件下的配准性能。为避免控制点选择方法的影响,直接选用图 5 中的控制点数据 \mathbf{M}, \mathbf{P} 作为四种算法的处理对象(黑色点为 \mathbf{M} ,灰色点为 \mathbf{P} 或 \mathbf{P}^1 ,观测俯仰角均为 60° ,方位角分别 $255^\circ, 270^\circ$)。为体现不同初始错位条件的影响,首先使初始 \mathbf{M}, \mathbf{P} 按理想条件下对准,即无载体位置、姿态误差[图 5(a)];然后按一定的姿态角、位置误差对 \mathbf{P} 进行转换,得到实际 ICP 算法中的待配准数据 \mathbf{P}^1 [图 5(b)]。设 X、Y、Z 轴上的姿态角误差分别为 α, β, γ ,位置误差分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, α, β, γ 均取 $[-2^\circ, 2^\circ]$ 上均匀分布的随机数, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 均取 $[-10 \text{ m}, 10 \text{ m}]$ 上均匀分布的随机数,按照(7)式变换即可得到待配准数据 \mathbf{P}^1

$$\mathbf{P}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{P} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}. \quad (7)$$

分别应用四种算法使 \mathbf{P}^1 向 \mathbf{M} 配准,并计算配准误差。由于算法一中没有对伪点对剔除,把大量的错误对应点作为有效点对处理,如果按照第 4 节

中的方法仅考虑有效对应点对计算配准误差,算法一的配准误差将远大于其他算法;而算法二即使在错误重叠率和错误配准结果的条件下也可能得到较

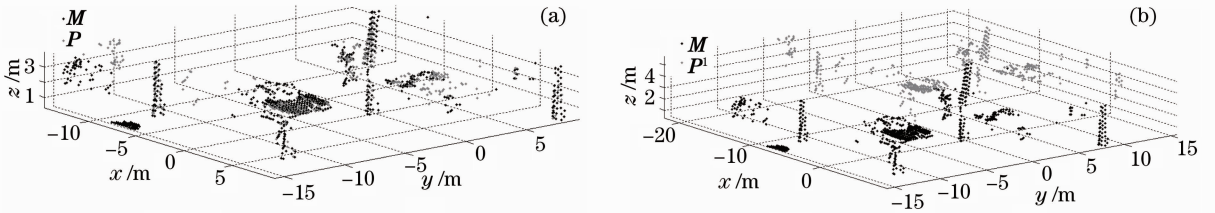


图 5 控制点数据。(a)对准情况;(b)加载初始错位情况

Fig. 5 Support-point data. (a) Alignment; (b) loading the initial dislocation

小的配准误差(重叠率较小,仅有少部分配准时)。因此,为准确衡量各种算法的实际配准效果,重新定义一个实验中应用的配准误差测度。应用 ICP 算法得到的最终变换矩阵对 P' 进行变换,得到配准后的数据 P' ,考虑把无初始错位情况下的 P 作为配准结果 P' 的参考对象,则实验配准误差 e_{exp} 定义为

$$e_{exp} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} \|p_i - p'_i\|^2}{N_p}, \quad (8)$$

式中 p_i, p'_i 为 P 与 P' 中的对应点, N_p 为 P 中的数据点数量。

按照上述方法分别取 100 组不同的 $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 对四种 ICP 算法进行测试,并分别统计它们得到的实验配准误差(如图 6,对应表 1 中 $225^\circ \sim 270^\circ$ 的结果)。从图 6 中可见,在不同的初始错位条件下,算法四的配准效果最好,算法三次之,算法一最差(配准误差对应右边坐标纵轴);算法二在大部分条件下能获得较好的配准效果,优于算法三,次于算法四,但在个别初始错位条件下,易陷入了局部最优(图 6 中蓝色曲线的尖峰处),无法完成正确配准,甚至比算法三还差。以上实验结果验证了本文第 3 节关于伪点对剔除方法的分析,也证明了算法四的优越性。

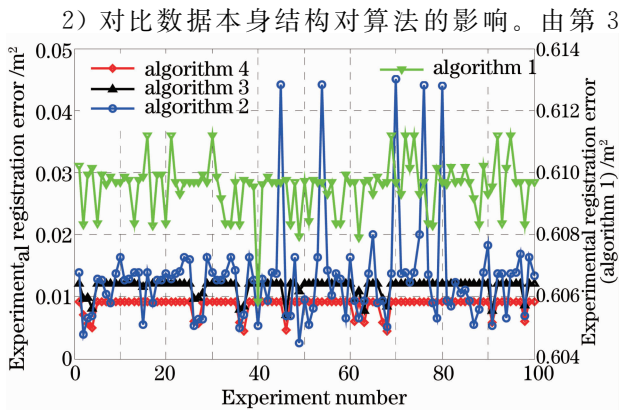


图 6 四种 ICP 算法的实验配准误差统计结果

Fig. 6 Experimental registration error statistics of the four ICP algorithms

节的分析可知,重叠率的自适应获取与数据本身结构有较大关系。当 P' 与 M 中部分数据空间分布较为集中时,易得到局部最优的虚假重叠率,一般这个重叠率较小,仅考虑了少部分数据,易造成较大程度的误配准。例如图 7 中的情况(黑色点为 M ,灰色点为 P' ,观测俯仰角均为 60° ,方位角分别 $0^\circ, 15^\circ$,圆圈标记处空间分布集中),应用算法二对其进行配准,得到如图 8(a)中的配准结果,可见很明显出现了误配准(对比图 8 右侧圆圈标记处)。应用算法四得到如图 8(b)所示的配准结果,可见明显优于算法二,配准效果良好,这主要是因为算法四先用固定重叠率对 P' 与 M 进行了初始配准,使 ICP 算法易于向正确的方向收敛。

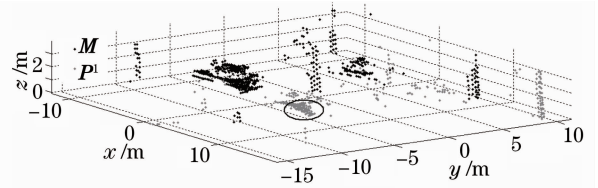


图 7 部分数据空间分布较为集中的三维点云数据 M, P'

Fig. 7 Partial 3D point cloud data M and P' concentrated in spatial distribution

3) 综合对比四种算法的配准性能。选用多组不同视角下的控制点数据 M, P 进行实验,每组 M, P 按照 1) 中的方法取 100 组不同的 $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 对四种 ICP 算法进行测试,并分别统计它们得到的平均实验配准误差和配准成功次数(见表 1)。配准成功与否根据每次配准得到的实验配准误差大小来决定,设置一个实验配准误差阈值 e_{exp_thr} ,当实验配准误差小于这个阈值时就是配准成功,否则失败。其中 e_{exp_thr} 一般取激光雷达数据分辨率的平方,这里设为 $0.15^2 = 0.0225 \text{ m}^2$ 。

由表 1 可以看出,从综合对比结果来看,算法四最优,算法三次之,算法二个别情况下较好,算法一最差。算法三虽然与算法四性能相当,但大部分情况下,算法四的平均实验配准误差小于算法三,且在 $15^\circ \sim 30^\circ, 345^\circ \sim 0^\circ$ 观测视角下,算法四明显优于算

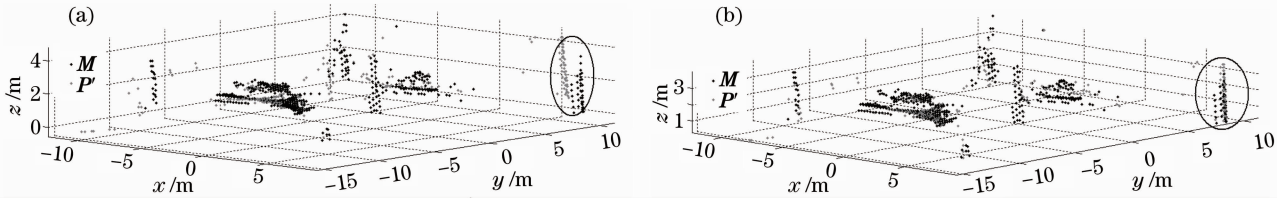

 图8 配准后的三维点云数据 M, P' 。(a)算法二;(b)算法四

 Fig. 8 3D point cloud data M and P' after the registration. (a) algorithm 2; (b) algorithm 4

表1 应用四种ICP算法处理不同视角下的控制点数据得到的实验统计结果

Table 1 Experimental statistical results of the support-point data in different viewing angles by four ICP algorithms

Views of support-point data (azimuth 1-azimuth 2, pitches are all 60°)	Times of successful registration/mean of the experimental registration error /m ²			
	Algorithm 1	Algorithm 2	Algorithm 3	Algorithm 4
0°~15°	0/0.1320	0/1.8316	100/0.0034	100/0.0034
15°~30°	0/0.3390	63/0.2250	0/0.0444	97/0.0152
30°~45°	0/0.7811	43/0.7090	100/0.0070	100/0.0032
45°~60°	0/0.0254	100/0.0032	100/0.0029	100/0.0027
60°~75°	95/0.0195	0/0.7144	100/0.0020	100/0.0019
75°~90°	0/0.0298	0/0.6240	100/0.0091	100/0.0101
90°~105°	0/0.0471	0/3.0302	100/0.0114	100/0.0076
105°~120°	0/0.1488	0/0.8864	100/0.0021	100/0.0013
120°~135°	0/0.5487	56/0.0701	100/0.0044	100/0.0064
135°~150°	0/0.0428	0/0.3829	100/0.0093	100/0.0031
150°~165°	0/0.2376	25/0.0663	100/0.0022	100/0.0019
165°~180°	0/1.3340	0/0.7675	100/0.0024	100/0.0038
180°~195°	0/0.0465	37/0.3941	100/0.0037	100/0.0035
195°~210°	100/0.0147	8/0.1031	100/0.0012	100/0.0006
210°~225°	0/4.5080	0/0.7053	100/0.0012	100/0.0009
225°~240°	0/0.1416	100/0.0072	100/0.0148	100/0.0081
240°~255°	0/0.0597	100/0.0024	100/0.0039	100/0.0026
255°~270°	0/0.6095	95/0.0131	100/0.0117	100/0.0086
270°~285°	0/0.2259	0/1.1815	100/0.0087	100/0.0070
285°~300°	0/0.0406	0/4.6346	100/0.0136	100/0.0127
300°~315°	0/0.0477	0/0.3782	99/0.0162	100/0.0109
315°~330°	0/0.0279	100/0.0087	100/0.0105	100/0.0049
330°~345°	0/0.1083	2/0.4687	100/0.0148	100/0.0039
345°~0°	0/0.1222	0/1.1195	0/0.0387	70/0.0264

法三(表1中加粗部分)。算法二则由于数据本身结构或初始错位的影响很多情况下难以配准,且配准失败时配准误差一般较大,甚至高于算法一。因此,相比其他算法,本文算法性能更好,稳健性更强,更适应于遮蔽条件下的激光雷达数据配准。

6 结 论

在基于ICP算法的空地探测遮蔽条件下的激光雷达数据配准中,初值选取问题不是主要障碍,对应点关系的确定成为研究的主要内容。遮蔽条件下

的激光雷达数据的复杂性给ICP算法中对应点关系的确定带来了严重困难,在分析数据特点和ICP算法基本原理的基础上,从控制点的选择、对应点的匹配和伪点对的剔除三个方面给出了相应的应用策略和改进措施,并重点对伪点对的剔除方法进行了改进,提出了一种基于固定-自适应重叠率的伪点对剔除方法。在此基础上,详细阐述了基于改进ICP算法的激光雷达数据配准的具体实现步骤,并进行了实验验证。实验结果表明:改进后的ICP算法能够有效实现遮蔽条件下的激光雷达数据配准;

通过与其他几种算法对比,本文算法在不同的初始错位条件下、不同数据结构下均具有较强的稳健性和较高的配准精度。应用本文算法,可以进一步实现多视角(大于等于3)激光雷达数据配准和融合,为基于激光成像雷达的遮蔽目标检测、识别提供了基础和条件。

参 考 文 献

- 1 D. Letalick, J. Ahlberg, P. Andersson *et al.*. 3-D Imaging by Laser Radar and Applications in Preventing and Combating Crime and Terrorism [R]. Sweden: FOI-Swedish Defence Research Agency, 2004
- 2 Chen Huajie, Zhang Yu, Zeng Liang *et al.*. Target covered by camouflage netting detection based on multi-band and polarization SAR image fusion [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **38**(7): 106~118
陈华杰, 张 渝, 曾 亮 等. 伪装网遮蔽目标多波段多极化 SAR 图像融合检测[J]. 光电工程, 2001, **38**(7): 106~118
- 3 Jiang Haijiao, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0514001
姜海娇, 来建成, 王春勇 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0514001
- 4 Zhou Qin, Zhang Xiuda, Hu Jian *et al.*. Noise analysis of staring three-dimensional active imaging laser radar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908005
周 琴, 张秀达, 胡 剑 等. 凝视成像三维激光雷达噪声分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0908005
- 5 D. Ludwig, A. Kongable, S. Krywick *et al.*. Identifying targets under trees-Jigsaw 3D-LADAR test results [C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 16~26
- 6 O. Steinvall, H. Larsson, F. Gustafsson *et al.*. Performance of 3-D laser radar through vegetation and camouflage [C]. *SPIE*, 2005, **5792**: 129~142
- 7 M. Vaidyanathan, S. Blask, T. Higgins *et al.*. Jigsaw phase III: a miniaturized airborne 3-D imaging laser radar with photon-counting sensitivity for foliage penetration [C]. *SPIE*, 2007, **6550**: 6550N
- 8 C. W. Trussell, D. N. Barr, B. W. Schilling *et al.*. Multi-aspect high-resolution lidar data collection [C]. *SPIE*, 2003, **5086**: 104~111
- 9 R. M. Marino, W. R. Davis, G. C. Rich *et al.*. High-resolution 3D imaging laser radar flight test experiments [C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 138~151
- 10 Guo Yulan, Lu Min, Tan Zhiguo *et al.*. Fast target recognition in lidar using projection contour features [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0209003
郭裕兰, 鲁 敏, 谭志国 等. 采用投影轮廓特征的激光雷达快速目标识别[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0209003
- 11 A. N. Vasile. Pose Independent Target Recognition System Using Pulsed Lidar Imagery [D]. Lexington: Massachusetts Institute of Technology, 2004
- 12 T. Chevalier, P. Andersson, C. Grönwall *et al.*. Methods for Ground Target Detection and Recognition in 3-D Laser Data [R]. Sweden: FOI-Swedish Defence Research Agency, 2006
- 13 G. Tolt, A. Wiklund, P. Andersson *et al.*. Registration and change detection techniques using 3D laser radar data from natural environments [C]. *SPIE*, 2006, **6396**: 63960A
- 14 Ma Chaojie, Yang Hua, Li Xiaoxia *et al.*. Implementation of automatic target recognition by imaging lidar in complex scenes [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(7): 1714~1721
马超杰, 杨 华, 李晓霞 等. 复杂场景下应用成像 Lidar 的自动目标识别[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(7): 1714~1721
- 15 He Wenfeng. Range Registration for 3D Reconstruction of Large-Scale Scenes [D]. Beijing: Peking University, 2004
何文峰. 大型场景三维重建中的深度图像配准 [D]. 北京: 北京大学, 2004
- 16 Xue Yaohong. Research on Technology of Point Clouds Registration and Subdivision Surface [D]. Changchun: Jilin University, 2010
薛耀红. 点云数据配准及曲面细分技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010
- 17 P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 239~256
- 18 Y. Chen, G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images [J]. *Image and Vision Computing*, 1991, **10**(3): 2724~2729
- 19 Li Shifei, Wang Ping, Shen Zhenkang. A survey of iterative closest point algorithm [J]. *Signal Processing*, 2009, **25**(10): 1582~1588
李世飞, 王 平, 沈振康. 迭代最近点算法研究进展 [J]. 信号处理, 2009, **25**(10): 1582~1588
- 20 Gao Pengdong. Research and Application of Range Image Registration and Surface Subdivision [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006
高鹏东. 深度像配准及曲面细分技术的研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2006
- 21 Hao Zhicheng, Zhu Ming. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 702~707
郝志成, 朱 明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准 [J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 702~707
- 22 Lü Weiping. Research and Implement of Multi-views Range Image Registration [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2008
吕渭萍. 多视点深度图像的配准方法研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2008
- 23 Zhao Mingbo, He Jun, Fu Qiang. Simulation modeling and analysis of full-waveform lidar signatures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0628002
赵明波, 何 峻, 付 强. 全波形激光雷达回波信号建模仿真与分析 [J]. 光学学报, 2012, **32**(6): 0628002
- 24 G. Sithole, G. Vosselman. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds [J]. *J. Photogrammetry & Remote Sensing*, 2004, **59**(1-2): 85~101
- 25 Chen Chu. The Study of Depth Map Registration Based on Laser Scanning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005
陈 楚. 基于激光扫描的深度影像配准方法的研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005

栏目编辑: 李文誌