基于分开－合并的激光雷达距离图像特征提取

满增光　叶文华　楼佩煌　肖海宁
南京航空航天大学，南京，210016

摘要：针对移动机器人依靠激光雷达感知环境的问题，提出一种基于分开－合并框架的直线特征提取算法。在分开阶段，用 IEPF(iterative end point fit)算法对采集的激光雷达数据集合进行递归分割。在合并阶段，对由两相邻数据集合构成的新集合同时用 EPF(end point fit)算法和总体最小二乘法进行拟合，如果两种拟合误差分别小于各自的阈值，则合并两个集合。合并阶段是一个递归过程，直到所有的两相邻数据集合都不满足上述合并条件才终止算法。对比实验结果表明，该算法大大降低了 IEPF 算法固定阈值所带来的过分割和欠分割的可能性，得到了很好的直线特征提取结果。

关键词：移动机器人；直线特征提取；激光雷达；分开－合并框架

中图分类号：TP242　　**文章编号**：1004—132X(2011)19—2303—04

Feature Extraction Based on Split－merge in Range Image of LIDAR

Man Zengguang　Ye Wenhua　Lou Peihuang　Xiao Haining
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: For the environmental perception of mobile robots with light detection and ranging(LIDAR), a method based on split－merge framework was presented herein. In splitting stage, a data set was segmented recursively with the IEPF(iterative end point fit) algorithm. In merging stage, both the EPF(end point fit) method and the total least square method were used to fit a new data set composed of the two adjacent segments. If their fitted errors were less than their thresholds respectively, the two data sets were merged into one. Merging stage was a recursive process for that it didn't terminate until every two adjacent data sets didn't satisfy the merging condition mentioned above. Results of comparative experiment show that the method presented reduces the probability of over－segmentation and under－segmentation resulted of the fixed threshold of the IEPF algorithm greatly and achieves good results of linear feature extraction.

Key words: mobile robot; linear feature extraction; light detection and ranging(LIDAR); split－merge frame

0　引言

环境感知是自主移动机器人应当具备的基本能力。作为感知环境的传感器，激光雷达因其具有测距精度高、实时性能好等特点而广泛应用于移动机器人领域[1]。利用激光雷达对环境进行扫描获取距离数据，根据特定的算法从中提取出所需要的信息是环境感知的关键所在。通常，普遍的做法是从激光雷达距离数据中提取直线特征[2]用于移动机器人的定位和环境地图的构建。

移动机器人领域的众多研究人员对从激光雷达距离数据中提取直线特征做了大量的研究工作，所提出的算法可以大致分为两类：序惯方法和递归方法。序惯方法有 PDBS(point distance based methods)算法、SEF(successive edge following)算法和 LT(line tracking)算法。递归方法有 IEPF(iterative end point fit)算法和 split－merge 算法。除此以外，还有不依赖于局部信息的 HT(hough transform)方法。

PDBS 算法[3]利用激光雷达探测到的两相邻扫描点的距离来提取直线。SEF 算法[4]对 PDBS 算法进行了简化，直接利用激光雷达获得的两相邻扫描点的原始数据的差值提取直线。这两种算法的缺点是对相交直线的分割失效，而且由于在同一直线上的扫描点在空间上分布不均，使得阈值选取困难。LT 算法[4-5]依据一定的准则渐进地判断后续探测到的点与前面探测到的点是否在同一直线上。IEPF 算法[3,5-7]将全部数据拟合为一条直线，然后进行递归分割。split－merge 算法[4,6-8]的计算过程是一种反复分割和合并的过程。这两种递归算法对阈值也比较敏感，容易出现过分割或欠分割现象。HT 方法[6,9-11]源于计算机视觉领域，其原理是将在原空间中探测直线的问题转换到在参数空间中探测相应的点的问题。该方法具有很好的抗噪性能，但是由于其没有利用数据点采集序列的顺序信息，所以导致计算量过大，不适合实时应用，而且由于其采用投票的方式确定直线，因此提取的直线严重依赖于扫描点的空间密集程度。

综上所述，利用目前常用的方法从激光雷达距离数据中稳定地提取直线特征还存在一定的困难。鉴于 IEPF 算法计算效率较高，本文将其纳

收稿日期：2011—06—13
基金项目：江苏省科技支撑计划资助项目(BE2010189)

入到一种分开－合并的直线特征提取框架中，提出了一种新的特征提取方法。

1 特征提取算法

激光雷达以固定的角度分辨率扫描环境一次，就会返回一组有序距离数据 P，其中 $P=\{\rho_i \mid i=1,2,\cdots,N\}$，$\rho_i$ 为在一次完整的扫描中激光雷达到第 i 个扫描点的距离。通过对原始数据的预处理，即将在极坐标系下表示的数据转换到直角坐标系中，激光雷达距离图像表示为数据集合 $P=\{p_i=(x_i,y_i) \mid i=1,2,\cdots,N\}$，其中，$(x_i,y_i)$ 由 ρ_i 转换而来。

1.1 IEPF 算法

IEPF 算法是一种用于直线特征提取的递归算法。该方法依据一定的递归准则将一个有序数据集合分割为多个子集合，通过拟合每一个子集合来提取直线特征，其原理如图 1 所示。该算法将经过预处理的激光雷达数据集合 P 作为算法的输入。首先，在坐标系中，由被分割数据集合的第一个数据点 p_1 和最后一个数据点 p_N 确定一条直线 l；然后，寻找该集合中到 l 的距离最大的点 p_k，如果该点所对应的距离 d_k 大于阈值 d_{thd}，则将 p_k 作为断点，在断点处将该集合分割为两个子集合 $P'=\{p_i \mid i=1,2,\cdots,k\}$ 和 $P''=\{p_i \mid i=k,k+1,\cdots,N\}$。IEPF 是一个递归算法，因为对于每一个通过分割得到的子集合 P' 和 P'' 而言，需要重复执行上面的过程，直到所有的子集合都不满足上述的分割条件为止。

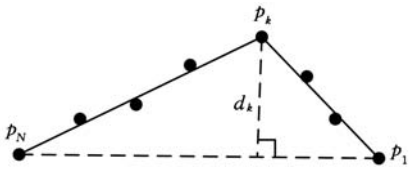


图 1 IEPF 算法原理

IEPF 算法作为一种直线特征提取方法具有很好的性能，并且具有很高的计算效率，因此，该方法普遍应用于距离图像中直线特征的提取。但是，在应用 IEPF 算法从激光雷达距离数据中提取直线时，阈值的选择并不是一件容易的事。原因在于，在通过激光雷达获取环境信息时存在各种各样的噪声，而这些噪声一旦导致算法错误地将在同一直线上的数据集合分割（过分割问题），将使得直线特征提取的结果十分不准确，从而给建立在准确特征提取基础上的后续任务（如移动机器人定位、同时定位与地图构建等）带来很多困难。增大阈值固然可以减少噪声的干扰，但同时也加大了欠分割的风险。为了充分利用 IEPF 算法的直线分割性能和计算效率，本文将其作为核心算法纳入到一种分开－合并的直线特征提取框架中，提出一种新的特征提取方法。

1.2 本文算法描述

分开－合并框架是先对数据集合以某种准则递归地分割，分割后再把这些集合以某种准则递归地合并的一种特征提取框架。分开阶段采用的准则和合并阶段采用的准则根据具体的分割算法和合并算法而定，可以相同也可以不同。split－merge 算法[7]已经证明该方法是有效的。本文所提出的算法如下：在分开阶段，应用 IEPF 算法对数据集合递归分割；在合并阶段，同时采用 EPF（end point fit）算法和总体最小二乘法两种直线拟合误差作为合并条件的参考量对数据集合递归合并。

合并准则为：对于两个数据集合 $P'=\{p_i \mid i=m,m+1,\cdots,k\}$ 和 $P''=\{p_i \mid i=k,k+1,\cdots,n\}$，如果同时满足条件 1（$d_k<d'_{\text{thd}}$）和条件 2（$E_2<E_{\text{thd}}$），则将其合并。其中，$d_k$ 表示点 p_k 到由点 p_m 和 p_n 所确定的直线的距离；d'_{thd} 为一阈值，其值比通过 IEPF 算法分割时设置的阈值 d_{thd} 大；E_2 为通过总体最小二乘法对由集合 P' 和 P'' 组成的新集合 $P=\{p_i \mid i=m,m+1,\cdots,n\}$ 进行拟合得到的误差平方和；E_{thd} 也为一阈值，其值为常数，通过实验确定。条件 1 用于保证应用 IEPF 算法对数据集合分割的有效性。同时，从几何上分析，对于在极坐标系下的两条直线 l_{a} 和 l_{b}，坐标分别为 $(\rho_{\text{a}},\theta_{\text{a}})$ 和 $(\rho_{\text{b}},\theta_{\text{b}})$（$\rho$ 和 θ 分别为极径和极角），条件 1 用于确保 $|\theta_{\text{a}}-\theta_{\text{b}}|$ 太大时不至于将其合并为一条直线，而条件 2 用于确保 $|\rho_{\text{a}}-\rho_{\text{b}}|$ 太大时不至于将其合并为一条直线。

合并过程也是一个递归过程，如果存在一对相邻的集合满足上述合并条件，则将其合并，直到所有相邻集合都不满足合并条件，算法才终止。该算法仅比 IEPF 算法多了一个递归合并的过程。算法的实现步骤如下：

（1）初始化。初始化直线集合数组 L，L 由数据集合 P 的所有元素拟合而成的直线 l 构成；设置迭代次数 $m=1$；尺寸列表 $N_L^0=1$；

（2）更新列表尺寸 $N_L^{(m)}=N_L^{(m-1)}$；设置分割循环变量 $k_1=1$；

（3）当 $k_1<N_L^{(m-1)}+1$ 时，如果 $d_k<d_{\text{thd}}$ 则创建两条新的直线 l'_k 和 l''_k；$N_L^{(m)}\leftarrow N_L^{(m)}+1$；将 l'_k 和 l''_k 取代 L 中的 l_k，更新 L；$k_1\leftarrow k_1+2$；否则 $k_1\leftarrow k_1+1$；

（4）如果至少存在一条直线不满足 $d_k<d_{\text{thd}}$，转到步骤（2）；

(5) 设置合并循环变量 $k_2=1$；

(6) 当 $k_2 < N_L^{(m)}$ 时，如果 $d_k > d'_{\text{thd}}$ 且 $E_2 < E_{\text{thd}}$，$N_L^{(m)} = N_L^{(m)} - 1$，则创建直线 l'_{k-1} 并取代直线 l_{k-1} 和 l_k，更新 L；否则 $k_2 \leftarrow k_2 + 1$；

(7) 如果至少存在两条相邻直线满足 $d_k > d'_{\text{thd}}$ 并且 $E_2 < E_{\text{thd}}$，转到步骤(5)；

(8)结束。

上述算法的实现包含了分开和合并两个阶段，步骤(1)～步骤(4)为分开阶段，步骤(5)～步骤(8)为合并阶段。

2　实验结果与分析

为了验证本文算法的性能，在 MATLAB 仿真环境下将本文算法与 IEPF 算法进行对比实验。实验所用到的数据来自于 Regis Vincent[12] 提供的 kwing_wld 数据集。该数据集由配有 SICK LMS200 的移动机器人在室内环境下采集，LMS200 视场和角度分辨率配置分别为 180°和 1°，数据集共包含812幅距离图像数据。为了获得较好的特征提取结果，选择其中 36 幅图像并在图像中共挑选了 183 条直线进行考察。实验分为四组，各组参数设置如表 1 所示。如图 2 所示，第一组和第二组实验中，IEPF 算法中 d_{thd} 取值与本文算法中 d_{thd} 取值相同；第三组和第四组实验中 IEPF 算法的 d_{thd} 取值与本文算法的 d'_{thd} 取值相同。

表 1　各组实验参数设置

算法	参数 (mm)	第一组	第二组	第三组	第四组
IEPF 算法	d_{thd}	10	20	60	80
本文算法	d_{thd}	10	20	20	20
	d'_{thd}	60	60	60	80
	E_{thd}	100	100	100	100

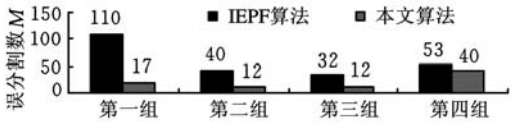
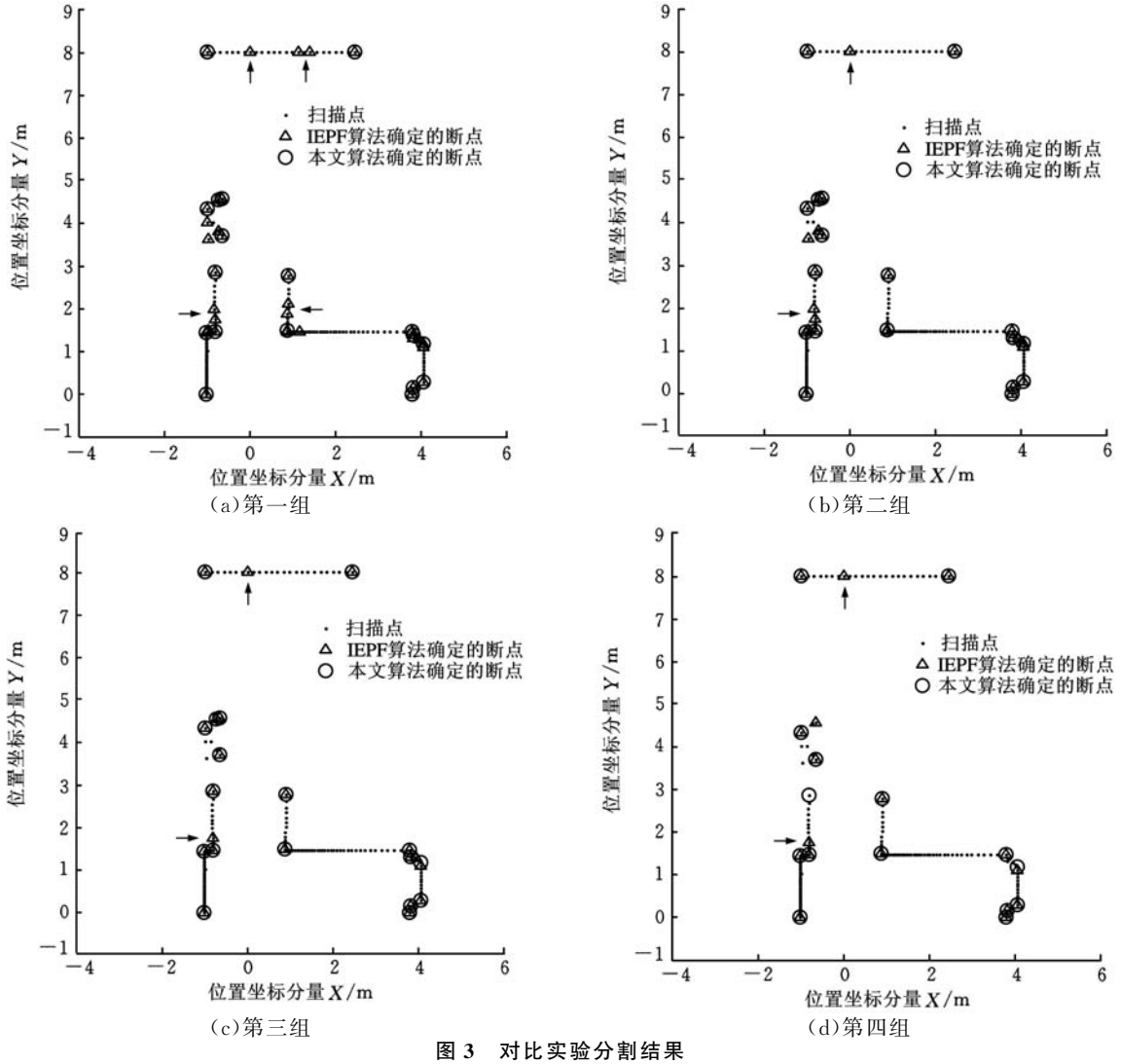


图 2　对比实验结果

为了分析实验结果，定义了误分割的概念，即对于一条所考察的通过手工分割的直线，如果在算法所分割的直线中没有一条能与其匹配则视为一次误分割，实验结果如图 3 所示。从所有四组对比



(a)第一组　(b)第二组　(c)第三组　(d)第四组

图 3　对比实验分割结果

实验中可以看出，本文算法取得了比 IEPF 算法更小的误分割数，从而降低了误分割的可能性。下面通过其中一幅图像的处理结果进行具体分析。

图 3a～图 3d 分别对应第一组至第四组实验中对同一距离图像数据进行分割得到的实验结果。在前两组实验中，如图 3a 和图 3b 所示，由于 IEPF 算法的阈值 d_{thd} 取值过小，故其将部分直线分割成了两条或更多条直线（见图中箭头所指的位置），即过分割，从而得到了错误的分割结果。显然，算法中阈值 d_{thd} 取值越小，过分割的可能性就越大。本文算法在前两组对比实验中，在分割时分别使用了与 IEPF 算法相同的阈值 d_{thd}，但是由于本文算法具有一个合并过程，从而可以将过分割的直线再重新合并为一条直线。在后两组实验中，如图 3c 和图 3d 所示，IEPF 算法阈值 d_{thd} 取值与本文算法合并时的阈值 d'_{thd} 取值相同，图 3c 中依然出现了过分割的情况，而图 3d 中则同时出现了过分割和欠分割的情况（阈值 d_{thd} 较大时，欠分割的情况更为普遍）。本文算法首先用取较小阈值的 IEPF 算法对直线进行过分割，然后再将满足合并条件的直线合并，从而得到比单纯地用 IEPF 算法进行分割更好的分割结果。

3 结语

本文提出了一种基于分开－合并框架的直线特征提取算法。在分开阶段，用 IEPF 算法对采集的激光雷达数据集合进行分割；在合并阶段，同时用 EPF 算法和总体最小二乘法对两相邻数据集合进行拟合，如果两种拟合误差分别小于各自的阈值，则合并两个集合。分开阶段和合并阶段都是一个递归过程。对比实验结果表明，该算法克服了 IEPF 算法固定阈值所带来的过分割或欠分割的问题，取得了很好的特征提取效果。

参考文献：

[1] Klimentjew D, Arli M, Zhang Jianwei. 3D Scene Reconstruction Based on a Moving 2D Laser Range Finder for Service－robots[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2009: 1129-1134.

[2] Ogaz M, Sandoval R, Chacon M. Data Processing from a Laser Range Finder Sensor for the Construction of Geometric Maps of an Indoor Environment [C]//IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Inc., 2009: 306-313.

[3] Borges G A, Aldon M J. Line Extraction in 2D Range Images for Mobile Robotics[J]. Intelligent & Robotic Systems, 2004, 40(3): 267-297.

[4] Borges G A, Aldon M J. A Split－and－merge Segmentation Algorithm for Line Extraction in 2D Range Images[C]//Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2000: 441-444.

[5] Vandorpe J, Brussel H V, Xu H. Exact Dynamic Map Building for a Mobile Robot Using Geometrical Primitives Produced by a 2D Range Finder [C]//Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. New York, NY, USA: IEEE, 1996: 901-908.

[6] Viet N, Stefan G, Agostino M, et al. A Comparison of Line Extraction Algorithms Using 2D Range Data for Indoor Mobile Robotics[J]. Autonomous Robot, 2007, 23(2): 97-111.

[7] Choi Y, Lee T, Oh S. A Line Feature Based SLAM with Low Grade Range Sensors Using Geometric Constraints and Active Exploration for Mobile Robot[J]. Autonomous Robots, 2008, 24(1): 13-27.

[8] Pavlidis T, Horowitz S L. Segmentation of Plane Curves[J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, 23(8): 860-870.

[9] Fernandes L A F, Oliveira M M. Real－time Line Detection through an Improved Hough Transform Voting Scheme[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 299-314.

[10] Stefan G, Viet N, Roland S. Results on Range Image Segmentation for Service Robots[C]//Proceedings of the Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems. New York, NY: IEEE Computer Society, 2006:53-60.

[11] Chen Hongbo, Wang Qiang, Xu Xiaorong, et al. Line Detection in Traffic Sign Image Based on Improved Hough transform[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1111-1118.

[12] Anon. Complete Repository Listing[EB/OL]. [2011-06-13]. http://cres. usc. edu/radishrepository/view－all. php.

（编辑　王艳丽）

作者简介：满增光，男，1982 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。研究方向为移动机器人导航。叶文华，男，1965 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。楼佩煌，男，1962 年生。南京航空航天大学机电学院教授、博士研究生导师。肖海宁，男，1985 年生。南京航空航天大学机电学院博士研究生。