

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0130- 05

基于三维 Hough 变换的机载激光雷达平面地标提取*

章大勇, 吴文启, 吴美平, 逯亮清

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对机载激光雷达点云数据中的平面地标检测问题, 分析了以三维 Hough 变换为基础的传统的平面检测算法, 指出其存在空间分割不一致问题, 在检测法线垂向地标时出现“极点”现象。研究了三维 Hough 变换的空间完备分割条件, 利用参数空间的对偶特性, 提出了一种基于对偶空间分割的三维 Hough 变换算法, 避免了空间不一致问题。仿真和实验证明, 改进三维 Hough 变换算法在不增加计算量的同时, 能够有效检测激光雷达点云中的平面地标。

关键词: 机载激光雷达; 三维 Hough 变换; 空间不一致; 对偶空间分割

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A

Plane Landmark Detection from Lidar Data Based on 3D Hough Transform

ZHANG Da-yong, WU Wen-qi, WU Mei-ping, LU Liang-qing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The detection of plane landmarks from airborne Lidar points cloud data is considered the key technology for mapping and guidance. Traditional plane detection algorithm based on 3D Hough transform using polar coordinate suffers inconsistent space segmentation problem which causes apex phenomenon when normal of plane is vertical to ground. The new 3D Hough transform is presented with dual space segmentation, utilizing two orthogonal polar coordinates to segment half unit sphere into Gaussian grid. This algorithm can avoid space inconsistent problem. Simulation and real data processing result indicate that the new algorithm can detect plane landmarks effectively without increasing calculation amount.

Key words: airborne lidar; 3D Hough transform; space inconsistent; dual space segmentation

机载激光雷达作为一种新型的空间数据传感器, 经过近 20 年的发展, 已经成功运用于地形地貌遥感测量、资源测量等诸多领域。机载激光雷达的测量形成海量点云数据, 针对点云数据的各种滤波与处理方法正成为研究者关注的重要领域, 其中, 实现三维点云数据的自动地标检测和提取对激光雷达应用具有重要意义。对地标的特征描述和点云分割构成了自动地标检测和提取的核心内容。

激光雷达应用中对点云数据的处理方法主要有两种思路: 一是以点云数据本身特性为基础的处理方法, 如 Rottensteiner^[1] 提出的融合点云数据与航拍图像的目标分割方法、Forlani^[2] 提出的基于 2.5D 深度信息的点云属性分类方法等。这类方法的优点是具有较好的普适性, 但由于没有针对具体应用优化, 地标提取存在遗漏、虚警以及多重匹配问题。另一类对点云数据处理的算法通过已知模型库对点云进行建模, 模型由特定参数描述, 从而将地标识别和提取转换为点云的参数估计和匹配。这类方法的典型代表有 Voxel 顶点建模法^[2]、基于螺旋扫描旋转图像映射的目标识别方法^[3] 等, 模型法在点云处理精度和速度上都优于基于数据本身的算法, 但前提是确保模型的存在性。此外, 针对特殊应用条件下的点云目标提取方法也受到关注, 如 Wang^[4] 提出的利用地形作为先验条件的特征估计算法等, 均是以模型库算法为基础。从实际应用角度出发, 尽管测量场景类型多样, 但所关注的地标或目标相对固定, 如电力巡线中主要考虑连续空间曲线的检测, 因此, 一旦应用目标确定, 模型法具有一定优势。

模型法的核心是确定点云数据与模型在全局或局部的匹配关系, 本文主要研究点云数据中空间平

* 收稿日期: 2009- 09- 28

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助(20069998009)

作者简介: 章大勇(1980-), 男, 博士生。

面地标的检测和提取。空间平面可由参数方程确定,由此可将点云逐点映射到参数空间中,并通过特定的方式检测最优参数,这与 Hough 变换相类似。经典 Hough 变换主要应用于二维图形的检测,能够精确检测直线、圆形、椭圆等可以用参数方程描述的图形^[5]。Krishnapuram^[6]将其扩展到三维空间,以实现立体图像中的目标检测。Vosselman^[7]将其引入点云数据处理中,主要用于检测点云中蕴含的空间平面和球体, Khoshelham^[8]进行进一步改进之后,将三维 Hough 变换应用于空间柱状体检测中。在目前出现的三维 Hough 变换方法中,大多通过方向矢量的极坐标表述进行参数空间设计,而极坐标系本身的非均匀特性,导致出现了参数空间分布不一致现象。针对此问题,本文提出了一种新型的对偶空间参数 Hough 变换构造方法,消除不一致现象,提高了地标检测精度,并利用实际机载激光雷达数据进行了验证。

1 三维 Hough 变换及其空间不一致问题

Hough 变换的核心思想是通过参数空间描述可能存在的参数方程,并构造计数数组,通过参数方程遍历计算进行累加,根据累加结果进行筛选,从而提取相应的几何图形。三维 Hough 变换参数空间设定在单位球上展开。对空间中任意点 $p_m = x_m i + y_m j + z_m k$, 与单位向量 u_n 的距离映射可定义为内积运算

$$r = \langle p_m, u_n \rangle \quad (1)$$

$\{r, u_n\}$ 构成了表述点的参数空间, r 为距离参数, u_n 为方向参数。假如空间中的形状可以由参数方程 $f(p_m, r, u_n) = 0$ 表示, 则可利用 Hough 变换检测。空间中的任意平面可表示为

$$Z = aX + bY + c \quad (2)$$

利用平面法向量与原点 O 到平面距离, 建立极坐标参数化平面方程

$$\begin{pmatrix} \cos\theta\cos\varphi \\ \sin\theta\cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} X + \begin{pmatrix} \sin\theta\cos\varphi \\ \sin\varphi \end{pmatrix} Y + \begin{pmatrix} \sin\varphi \end{pmatrix} Z = r \quad (3)$$

从而, θ 、 φ 和 r 构成了描述空间平面的参数空间。根据 Hough 变换思想, 对空间中的所有点, 可以计算以 θ 和 φ 在原点构成全部平面的对应 r 值, 构成关于 $\{\theta, \varphi, r\}$ 的三维累加数组。通过分析累加数组, 就可以提取出相应参数表示的平面以及对应点集。三维 Hough 变换可由图 1 表示。

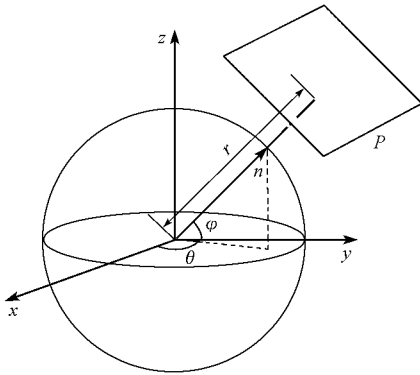


图 1 三维 Hough 变换检测平面

Fig. 1 Plane detected using 3D Hough transform

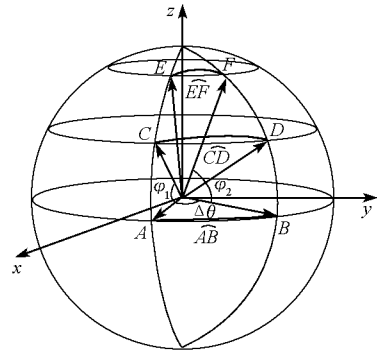


图 2 空间不一致的测地线表现

Fig. 2 Geodesic of inconsistency segmentation

以 $\{\theta, \varphi, r\}$ 为基础的参数空间是线性化的等距空间, $\{\theta, \varphi\}$ 作为空间法线矢量参数, r 作为距离参数, 在思想上很直观。但这种线性化表示方式隐含了二维参数空间向三维空间向量的映射, 造成了法线矢量在空间上分布的非线性和不一致问题。从微分几何曲面分析理论出发, 可以说明由参数非线性映射造成的法线矢量分布不一致问题。

设单位球面上两点 p_A 与 p_B 分别与球心连线形成矢量 A 和 B , 由球面几何可知, p_A 与 p_B 的大圆弧长等价于 A 和 B 的空间角。在单位球面上, 大圆等价于测地线, 因此, 测地线描述了空间角的大小并对其进行定向。进一步, 可以用测地线描述点法线之间的分布关系, 对球面上任意区域 Ω 进行离散分割时, 形成的点法线集合空间一致定义如下:

定义 1 利用球心到球面的矢量对球面上区域 Ω 进行分割 Γ , 形成一束点法线集合 $M: p_1, p_2, \dots, p_M$, 任意相邻两点 p_a 和 $p_b (a, b \in M)$, 二者测地线 S_{ab} 模相等, 则称分割 Γ 为空间一致分割。

根据定义 1, 可以分析三维 Hough 变换存在的法线矢量分布一致性问题。 (θ, φ) 构成了对球面的完备分割, 即传统经纬网形式。实现经纬网形式的前提是确定 θ 的主轴, φ 是由主轴和 θ 确定的大圆上的分割, 经纬网只沿经线和赤道实现了测地线分割, 任意非共经线两点的测地线距离不同, 因此 (θ, φ) 是完备但非空间一致的分割。由图 2 可知, 绕 z 轴方向 $\theta_{AB} = \theta_{CD} = \theta_{EF}$, 对应子午面方向 $\varphi_{AC} = \varphi_{BD}$ 、 $\varphi_{CE} = \varphi_{DF}$, (θ, φ) 分割是完全线性的, 但通过测地线分析可知, 在等角条件下, 靠近极点的圆弧长度小于赤道附近的圆弧, 从而反映为空间矢量方向上分布不一致。在实际计算中, 由于靠近 z 轴的法线非常密集, 在执行距离计算和累加时出现多值现象, 最终导致平面检测出现误差。就机载激光平面目标识别而言, 由于屋顶、桥梁等待检测平面的法线大多是垂直方向, 传统三维 Hough 变换空间不一致带来的问题更为突出。

2 基于对偶空间分割的三维 Hough 变换

传统三维 Hough 变换出现空间不一致问题的主要原因是 (θ, φ) 线性分割导致法线聚集, 从而出现多值现象。 (θ, φ) 线性分割在球面上是非线性高斯网格, 仅 φ 值较小 ($\leq 45^\circ$) 时线性度较好。假设能避免高 φ 值分割出现, 就能解决空间不一致问题。由于激光脚点高程为正, 因此只需对上半球面合理分割。在不改变 (θ, φ) 线性分割计算简洁前提下, 本文提出对偶空间分割方法, 实现上半球面的近空间一致分割。

以 $(\theta = 90^\circ, \varphi = 45^\circ)$ 和 $(\theta = 270^\circ, \varphi = 45^\circ)$ 的两个球面半圆圆弧为分界线, 将半球面分为上部 (I 部) 和下部 (II 部)。定义两个单位离散极坐标系如下:

$O_{\theta, \varphi}^1$: θ_1 的主轴为 z 轴, $\{\theta_1(0), \varphi_1(0)\}$ 为 x 轴, θ_1 以 $\Delta\theta$ 为增量, 沿右手坐标系增长, $0^\circ \leq \theta_1 < 360^\circ$, φ 以 $\Delta\varphi$ 为增量, 沿 θ_1 确定的子午面由 0° 增大至分界线。

$O_{\theta, \varphi}^2$: θ_2 的主轴为 y 轴, $\{\theta_2(0), \varphi_2(0)\}$ 为 $-x$ 轴, θ_2 以 $\Delta\theta$ 为增量, 沿右手坐标系增大, $0^\circ \leq \theta_2 < 180^\circ$, φ 以 $\Delta\varphi$ 为增量, 沿 θ_2 确定的子午面方向分割两条分界线之间的圆弧线。

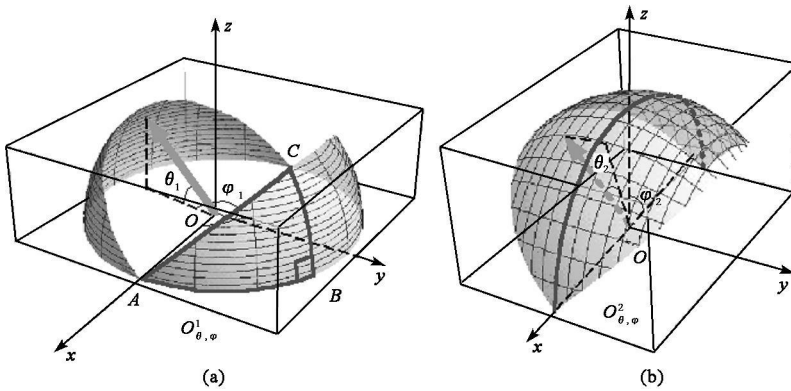


图 3 对偶三维空间分割

Fig. 3 Dual segmentation of polar coordinate

这两个极坐标系的定义方式是完全一致的, 仅仅是在空间上右旋了一个 $\pi/2$, 在计算中完全可以归于同一体系, 并且是对半球面的完备分割, 因此称这种分割方法为对偶极坐标分割方法, 建立在这种方法基础上的三维 Hough 变换成为三维对偶空间 Hough 变换。图 3 详细描述了对偶极坐标分割方法, (a) 为 $O_{\theta, \varphi}^1$ 的空间分割, (b) 为 $O_{\theta, \varphi}^2$ 的空间分割。

在执行对偶极坐标离散化计算时, 需要根据 θ 对应子午面上分界线位置计算 $\varphi_{\max}(\theta)$, 如图 3 左部球面三角形 $\triangle ABC$ 所示。根据球面三角形原理且已知 $\angle ABC = 90^\circ$, 单位球面上弧 BC 长为

$$\varphi_{\max}(\theta) = BC = \arctan(\sin A \tan A) \tag{4}$$

其中, $AB = \theta, A = 45^\circ$ 。利用 Hough 变换思路, 在对偶空间分割下的三维 Hough 变换的算法如表 1 所示。

表1 基于对偶三维空间分割的Hough变换算法

Tab. 1 Algorithm of Hough transform based on dual segmentation

输入:待地标提取的激光雷达点云 $P_i (i=1, \dots, L)$,

步骤 1: 计算激光雷达点云在对偶极坐标空间分割上的空间法线—距离矩阵

- 1 for $0^\circ \leq \theta < 180^\circ$, $\text{Size}(\theta) = M$
- 2 $\varphi_{\max} = f_{\max}(\theta)$;
- 3 for $0^\circ \leq \varphi < \varphi_{\max}$, $\text{Size}(\varphi) = N$
- 4 对区域 I, 在 (θ, φ) , $(\theta + 180^\circ, \varphi)$ 计算 $O_{\theta, \varphi}^I$ 坐标系下矢量 n_1^I, n_2^I ;
- 5 对区域 II, 在 $(\theta, -\varphi)$, (θ, φ) 计算 $O_{\theta, \varphi}^{II}$ 坐标系下矢量 n_1^{II}, n_2^{II} ;
- 6 根据 $O_{\theta, \varphi}^I$ 与 $O_{\theta, \varphi}^{II}$ 关系, 计算 n_1^{II} 和 n_2^{II} 在 $O_{\theta, \varphi}^I$ 下表现形式, 将全部矢量转换到 O_{xyz} 坐标系;
- 7 确定 n_1^I, n_2^I, n_1^{II} 和 n_2^{II} 为法线的过原点平面 p_1^I, p_2^I, p_1^{II} 和 p_2^{II} ;
- 8 计算所有 L 个点与平面的距离, 并存储, 得到四个 $M \times N \times L$ 的三维矩阵 R_1^I, R_2^I, R_1^{II} 和 R_2^{II} ;
- 9 end for
- 10 end for

步骤 2: 对已有三维矩阵进行累加计算, 得到累加数组, 分析累加数组提取平面

- 1 确定已获得距离的最大最小值 r_{\max}, r_{\min} , 根据预设步长 Δr 确定累加器大小: $S = (r_{\max} - r_{\min}) / \Delta r$;
- 2 建立累加器数组 Q_1^I, Q_2^I, Q_1^{II} 和 Q_2^{II} , $\text{Size}(Q^*) = M \times N \times S$
- 3 for $i \in L$
- 4 对所有平面对应距离进行栅格化计算, 确定其在累加数组中的位置 (m, n, i) , 并压入累加数组。
- 5 end for
- 6 在空间方向上拼合四个累加器数组, 得到三维联合数组;
- 7 对三维联合数组进行三维峰值分析, 进行平面检测, 得到平面所对应 (m, n, i) , 以及相应点云序列;
- 8 对点云序列进行闭合检测, 以区别同一法线平面上的不同面块;

输出: 检测出平面的点云序列以及对应法线。

在步骤 2 的平面提取中, 得到累加器数组的联合后, 需要检测三维数组中存在的峰值, 即检测 (m, n, i) 处达到局部最大值的单元。由于每个平面对应点云数量不同, 不能直接采取排序法进行筛选, 需要考虑一种整体—局部联合筛选方法。利用三维 Gaussian 算子和三维 Blob 对比度方法联合进行局部峰值检测, 确定平面及点云序列。执行三维 Hough 变换的计算量比较大, 为 $O(N \ln N)$ 。比较传统三维 Hough 变换与新算法可知, 对偶空间分割未引入新的球面计算点, 仅增加了矢量空间转换步骤, 因此在点云数据一致的前提下, 计算量是相当的。

3 基于三维对偶空间 Hough 变换的激光雷达平面地标检测实验及分析

针对平面地标检测典型场景进行了仿真实验和实际数据验证。首先采用专业仿真软件 Lidar Simulator 生成的数据进行仿真验证, 生成一个对多面体屋顶的扫描数据, 扫描频率为 80Hz, 模式为交叉扫描, 扫描角误差为 $N(0, 0.01^\circ)$ 。进行对偶空间三维 Hough 变换平面检测的结果见图 4。

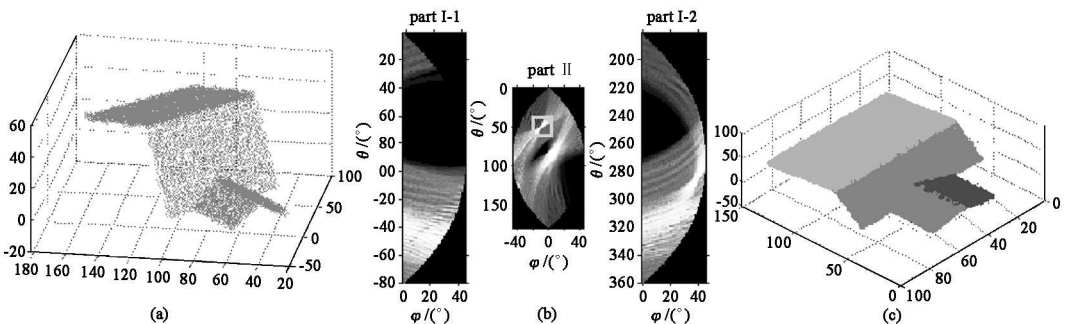


图4 对偶空间分割 Hough 变换检测结果

Fig. 4 Result of dual segmentation Hough transform

图4中, (a) 描述了屋顶激光脚点的点云图; (c) 为算法检测到的平面; (b) 为 $\rho=13$ 时的三维 Hough

变换图,分别表示对偶空间实现三维分割的几个部分的 (θ, φ) 图,在 Part II 中方框标示出了一个 Hough 局部极值的位置,这个极值所代表的法线为 $n = [-0.8503 \ 0.1135 \ 0.5140]^T$,所代表平面为法线靠近垂直方向的大屋顶平面。

针对 ALIM50 型机载激光雷达对一个村落的采样数据进行验证。分别采用传统三维 Hough 变换和本文算法进行屋顶提取。在这组实际测量数据中,屋顶由几块相邻的平面组成,法线方向均接近地面垂直方向,在没有任何先验信息的情况下,两种算法获取的屋顶区域如图 5 所示,(a) 为原始点云图,(b) 为传统三维 Hough 变换结果,(c) 为三维对偶空间 Hough 变换结果。

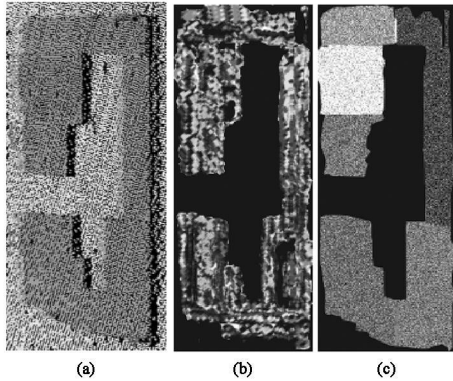


图 5 实际数据的平面提取结果

Fig. 5 Plane detection from real data

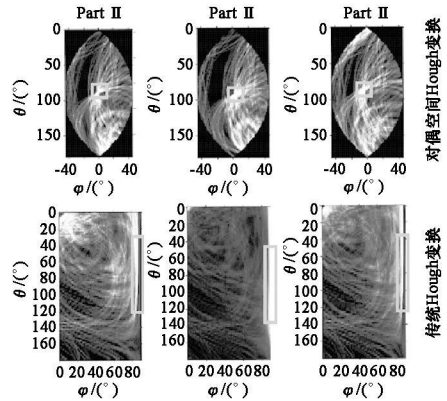


图 6 Hough 变换参数图比较

Fig. 6 Comparison of Hough transform parameters

从图 5 中可以看出,传统三维 Hough 变换算法由于存在空间不一致问题,从而引发“极点现象”,表现为提取的平面激光脚点无法聚合为平面,呈现散乱状态,而采用对偶空间分割的三维 Hough 算法则能准确提取出实际平面。图 6 给出了其中几个平面的 Hough 参数图,并标示出了峰值区域。可以看出,在传统三维 Hough 变换中,峰值出现在接近 $\varphi = 90^\circ$ 的狭长区域内,峰值特性不明显,由此提取的序列峰值对应的平面将出现前述的散乱现象。在对偶空间三维 Hough 变换结果中,则能清晰地得到峰值出现在 $\varphi = 90^\circ$ 附近时的参数,从而避免了垂向法线方向上由空间不一致问题引起的平面地标错误检测。

4 结论

(1) 传统三维 Hough 变换存在参数空间分布不一致现象,严重影响激光雷达数据平面地标提取结果。(2) 空间分布不一致的原因是高斯网格采用主轴等角分割,导致球面的不同区域的测地线长度不同。(3) 对偶空间分割利用基于同结构的两个高斯网格分割,避免非线性部分参与分割,实现半球面上的矢量空间一致分布。(4) 实验证明,对偶空间分割的三维 Hough 变换能够有效避免极点现象,且计算量与传统算法相当。

参考文献:

- [1] Rottensteiner F, Briese C. Automatic Generation of Building Models from Lidar Data and the Integration of Aerial Images Dresden[C]// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003.
- [2] Forlani G, Nardinocchi C, Scaioni M, et al. Complete Classification of Raw LIDAR Data and 3D Reconstruction of Buildings[J]. Pattern Analysis & Applications, 2006, 8(4): 257- 274.
- [3] Yoon J S, MyungSagong J S, Lee K S. Feature Extraction of a Concrete Tunnel Line from 3D Laser Scanning Data[J]. NDT&E International, 2009, 42: 97- 105.
- [4] Wang C, Glenn N F. Integrating LiDAR Intensity and Elevation Data for Terrain Characterization in a Forested Area[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(3): 463- 466.
- [5] 汤亚波,王希强,徐守时.一种基于广义 Hough 变换的遥感图像船舶横波自动检测与速度估计算法[J].国防科技大学学报,2006,28(1):43- 47.
- [6] Krishnapuram R, Casasent D. Determination of Three-dimensional Object Location and Orientation from Range Images[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(11): 1158- 1167.
- [7] Vosselman G, Gorte B G, Sijhole G, et al. Recognising Structure in Laser Scanner Point Cloud, in International Archives of Photogrammetry[C]// Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2004.
- [8] Khoshelham K. Extending Generalized Hough Transform to Detect 3D Objects in LASER Range Data[C]//ISPRS Workshop on Laser Scanning and SilvLaser, 2007.