

基于机载激光雷达技术的茂密林地单株木识别*

刘 峰¹ 龚健雅²

(1. 中南林业科技大学理学院, 长沙 410004; 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

【摘要】 提出一种利用 LiDAR 数据进行单株木识别的方法, 首先利用广义高斯模型分解全波形 LiDAR 数据, 得到高密度的点云和相应的波形参数, 通过建立数字高层模型得到非地面点云, 然后计算点云的空间特征得到林木点云, 最后在 3D 空间中利用马尔可夫随机场重新标记得到单株木点云。实验表明, 与传统方法相比, 本文方法能有效提高单株木识别的准确性, 特别是对茂密林地中低矮、细小林木识别效果明显, 平均识别精度达到 75%。

关键词: 单株木 模式识别 机载激光雷达 马尔可夫随机场

中图分类号: TN959.3; S758 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0200-04

Individual Trees Recognition in Dense Forest Based on Airborne LiDAR

Liu Feng¹ Gong Jianya²

(1. School of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract

By analyzing the shortage of traditional approach, a new individual trees recognition method was proposed. Firstly, the generalized Gaussian function was used to analyze the fitting pulse shape LiDAR data, and the high density point cloud and the waveform parameters were obtained, then the non-ground points were gained by establishing DEM; secondly, the spatial characteristics of point cloud was computed to receive forest points; lastly, Markov random fields were exploited to label individual trees in 3D. The experimental results show that this method can effectively improve the recognition accuracy, especially in the low dense, small trees identification effect, and the average recognition accuracy is 75%.

Key words Individual trees, Pattern recognition, Airborne LiDAR, Markov random fields

引言

激光雷达 (light detection and ranging, 简称 LiDAR) 技术是一种主动遥感技术。而机载激光雷达技术是由机载激光雷达传感器向地面发射激光脉冲, 通过计算脉冲射出和脉冲回复之间的时间间隔生成地物表面的测距数据, 当飞行器在林地树冠上空作激光扫描时, 传感器接收由林地树冠层、树干部分和地表部分反射的激光能量。由于 LiDAR 对森林冠层具有穿透性, 能通过发射并接收激光脉冲来

精确测定地物的空间位置, 不但能提供水平结构上的林地模式信息, 而且能生成垂直结构上的森林冠层空间参考信息, 能满足精准林业中对单株木信息提取的要求。

早期的激光雷达技术在林业中的应用主要集中在林地特征的建立^[1], 现阶段研究重点包括获取树冠高度, 对生物量、郁闭度等森林参数估算以及林木识别等方面^[2~3], 国内在这方面起步较晚^[4~5], 相关报道不多, 主要是将激光点云内插成树冠高程模型, 然后在其基础上利用图像处理技术进行分类或识

收稿日期: 2010-12-31 修回日期: 2011-02-09

* 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2007AA120501) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2006CB701300)

作者简介: 刘峰, 博士生, 主要从事遥感图像处理和地理信息系统研究, E-mail: liufeng0808@126.com

通讯作者: 龚健雅, 教授, 主要从事地理信息系统和摄影测量研究, E-mail: gongjy@whu.edu.cn

别^[6]。这些研究存在几点不足：基础数据大多采用的是二次回波脉冲信号点云(3~4个/m²)，空间分辨率不够高，而且只有点云的3D坐标信息，没有其他辅助信息；其次是大多方法都将3D点云数据内插成2D数据进行处理，致使信息不可逆丢失；最后是这些方法只适用于大面积林分范围内的信息提取，而对茂密林地中的单株木识别效果并不好。

全波形机载激光扫描技术的发展为林木识别提供了新的途径^[7]。本文在全波形LiDAR数据处理的基础上，结合模式识别技术提出一种单株木识别方法，目的是在高空间分辨率点云基础上利用统计决策理论，在3D空间中实现茂密林地中单株木的自动检测，完成森林参数的反演。

1 研究方法

数据处理框架如图1所示。

1.1 全波形LiDAR数据波形分解

全波形LiDAR数据分解的优点有两个：一是波形分解能还原所有单回波信息，点云密度将大大增强(特别是在林地范围内)；二是对波形进行建模和处理，能提取不同地物反射波的振幅、脉冲宽度以及背向散射属性。两方面优点的结合，不但增强了点云密度，提高了点云的层次感^[8]，同时能提取出不同地物表面的波谱特性，为下一步进行点云数据植被分类奠定基础。设第*i*个脉冲满足^[9]

$$\hat{P}_i = \frac{D_r^2}{4\pi R_i^4 \beta_i^2} \hat{S} \sigma_i \frac{s_s}{s_{p,i}}$$

式中 D_r ——信号接收器(天线)直径
 β_i ——激光束宽度
 R_i ——回波响应的距离
 $\hat{P}_i$ ——第*i*个脉冲回波的振幅
 $s_{p,i}$ ——第*i*个脉冲回波宽度的标准方差
 $\hat{S}$ ——系统波形的振幅

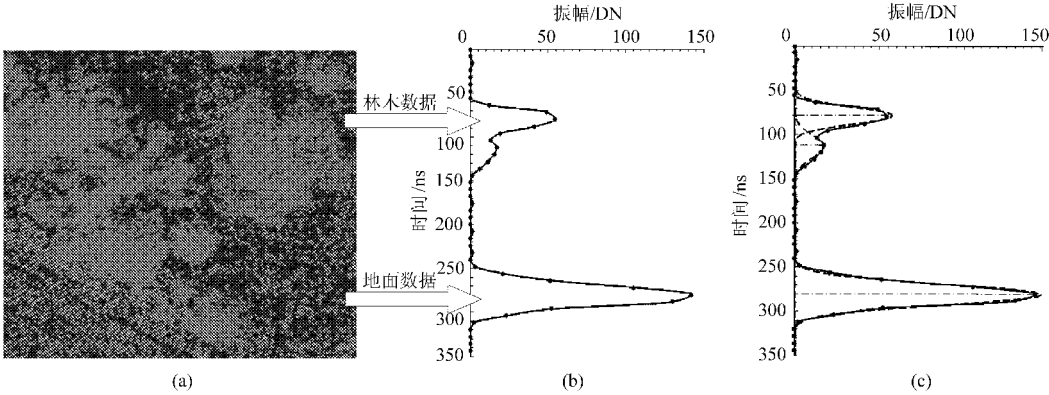


图2 全波形LiDAR数据分解示意图

Fig. 2 Chart of decomposition of full waveform LiDAR
(a) 垂直角度点云分布 (b) 原始波形 (c) 波形分解

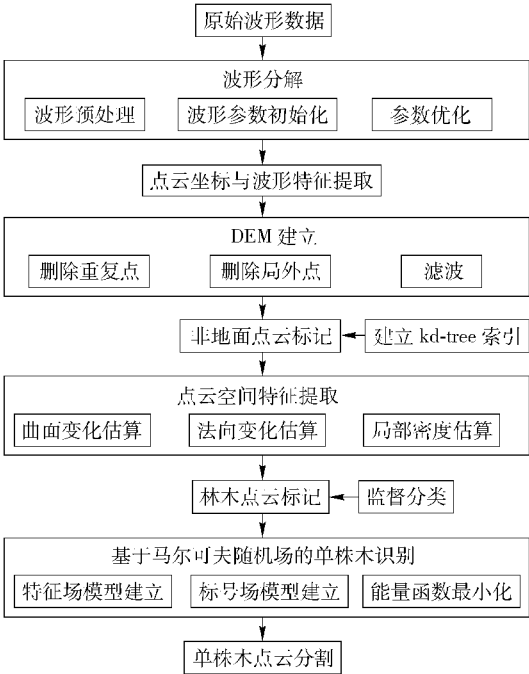


图1 单株木识别数据流程图

Fig. 1 Data flow of individual tree recognition

s_s ——系统波形宽度的标准方差
 σ_i ——背向散射截面参数

整个波形可以看成多个高斯函数的集合，本文利用广义高斯函数分解波形，然后利用Levenberg-Marquardt (LMA)方法进行参数优化(图2)，得到脉冲回波的距离(distance)、振幅(pulse amplitude)、宽度(pulse width)以及背向散射截面(backscatter cross sections)等信息。

1.2 林木点云提取

建立数字高程模型(digital elevation model，简称DEM)的主要目的是分离出非地面点云与地面点云^[10]。非地面点云中包括建筑物、植被或其他低矮地物如汽车等，一般情况下植被特别是高大林木都是垂直突出在裸露的地面上的，并占据一

定的连续区域。本文参照文献[11]中的方法,利用3D点云空间关系进行林木点云分类,如图3所示。

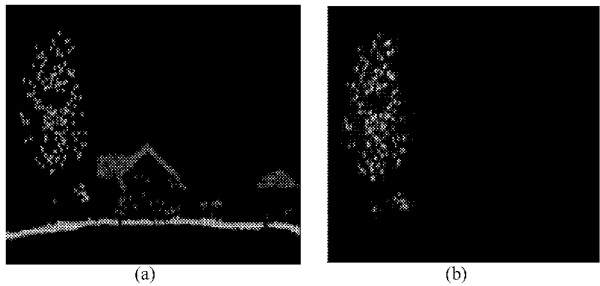


图3 提取林木点云示意图

Fig.3 Chart of extract tree points

(a) 树木、房屋、地面点云 (b) 提取出的林木点云

1.3 基于马尔可夫随机场的单株木识别

根据单株木点云分布先验信息构造的邻域范围

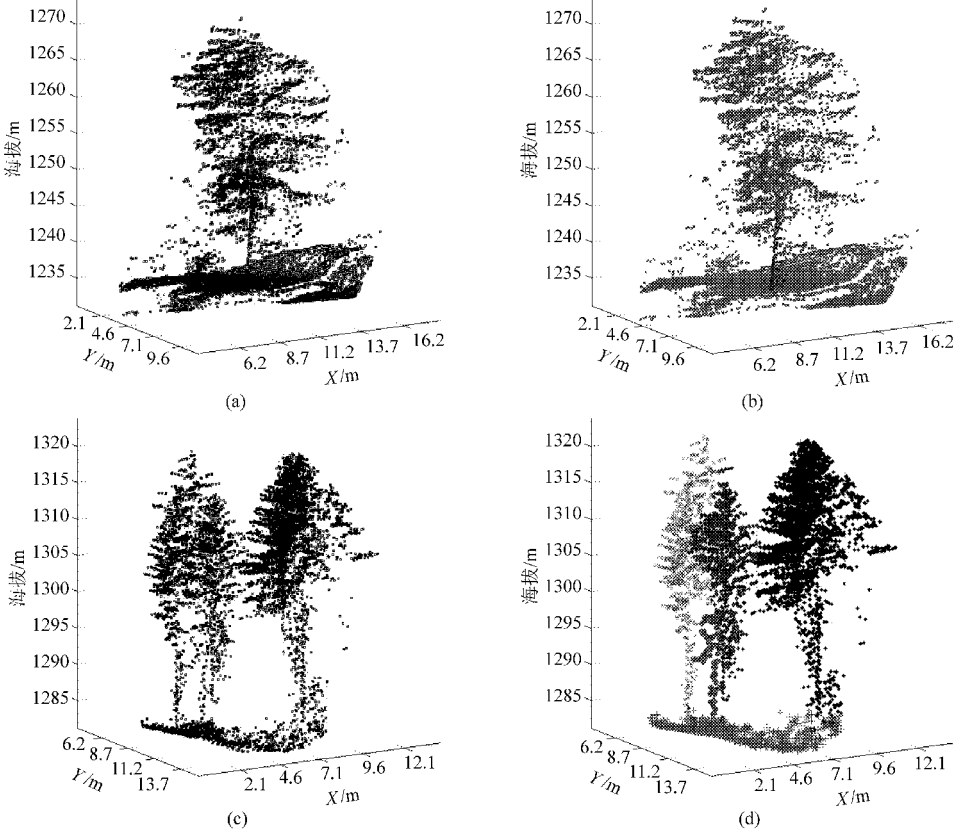


图4 3D空间中单株木识别

Fig.4 Individual trees recognition in 3D

2 实验分析

实验地区是黑龙江省张广才岭中段的双峰林场,森林主要是人工林、天然次生林,树种有两大类:云杉和混合山林,其中混合山林主要包括落叶松、栎类、刺槐以及黑杨等,林分多为幼熟林、近熟林和成熟林,其中云杉多为近熟林,刺槐和松类多为成熟林,山地海拔在900~1500m之间。实验中选择9个不同林分作为采样地(表1),选取胸高半径大

(δ)内两点之间势函数为

$$w_{(p,q)} = \begin{cases} 0 & (f_{(p \in \delta)} = f_{(q \in \delta)}) \\ e^{-F_{(p,q)}} \times e^{-D_{(p,q)}} \times e^{-G_{(p,q)}} & (f_{(p \in \delta)} \neq f_{(q \in \delta)}) \end{cases}$$

式中 $f_{(p \in \delta)}$ 是点 p 的标记, $D_{(p,q)}$ 是两点之间的欧式距离,距离越远权值越小, $G_{(p,q)}$ 表示的是每棵树主干的先验位置信息, $F_{(p,q)}$ 是根据谱分析方法计算两点之间的点、线、面三类空间几何特征。然后生成带权的连通图,在此基础上采用图割技术(graph cuts)中的 α 扩展空间方法进行能量函数最小化,将能量最小化问题转化为点云的最优标号问题,实现3D空间中单株木点云的标记(图4)。图4a、4c是未进行标记的原始点云,图4b、4d是相应进行单株木识别后重新标记的点云,本文方法既可较准确识别出高大树冠下低矮的林木,也可从紧挨在一起的林木中识别出细小单株木。

于等于10cm的单株木作实地参考值,总共768棵树,将其中100棵最高单株木的树冠高度平均值作为顶层树冠高度 h_{top} ,低于 h_{top} 的50%称为低层树冠高度 h_{low} ,而在 h_{top} 的50%~80%之间的称为中间层树冠高度 h_{int} 。

表2是本文方法与传统方法在不同树冠高度下的单株木识别效果比较,传统方法平均识别率为53%,在 h_{top} 层的识别效果比较好,达到了83%,这是因为近熟林或成熟林树冠形态比较完

整,能在 2D 树冠高程模型(CHM)中较准确识别单株木,而在 h_{low} 层的单株木识别率仅为 28%,因为低矮细小林木一般分布不均匀,有的还生长在高大大木树冠层下面,相应 3D 点云信息在转换成 2D CHM 过程中丢失很多,最后造成识别率很

低。本文方法在 h_{top} 层的识别率能达到 92%,关键是在 h_{low} 层和 h_{int} 层的识别率分别比传统方法提高了 27 和 30 个百分点,平均准确率也提高了 22 个百分点,达到 75% ((55% + 78% + 92%) / 3 = 75%)。

表 1 采样地林木特征
Tab. 1 Characteristics of sampling forest

参数	样地编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
海拔/m	1 060	1 240	910	1 190	1 310	1 004	998	1 401	1 243
株数/株·hm ⁻²	540	340	440	610	260	240	250	240	200
h_{low} 采样株数	19	31	10	29	31	7	15	6	30
h_{int} 采样株数	60	19	4	59	11	2	4	0	3
h_{top} 采样株数	29	27	30	96	54	59	54	53	26
针叶林百分比/%	79	10	14	100	75	66	97	10	86

表 2 采样识别株树精度比较
Tab. 2 Individual trees detected accuracy evaluation from sampling forest

样地编号	实测株数(本文方法识别株数 / 传统方法识别株数)		
	h_{low}	h_{int}	h_{top}
1	19(11 / 2)	60(37 / 31)	29(24 / 17)
2	31(17 / 7)	19(12 / 11)	27(25 / 20)
3	10(6 / 3)	4(3 / 2)	30(27 / 26)
4	29(15 / 6)	59(44 / 39)	96(90 / 87)
5	31(17 / 5)	11(8 / 5)	54(50 / 49)
6	7(4 / 2)	2(2 / 0)	59(55 / 47)
7	15(7 / 5)	4(3 / 2)	54(50 / 49)
8	6(5 / 4)	0(0 / 0)	53(51 / 50)
9	30(17 / 7)	3(3 / 2)	26(25 / 22)
平均准确率/%	55 / 28	78 / 48	92 / 83

表 3 不同胸高半径的单株木识别株数
Tab. 3 Comparison of detected trees and reference trees for different stem diameters

胸高半径/cm	实测值	传统方法	本文方法
12	344	18	43
18	201	31	58
24	135	34	64
30	172	76	114
36	200	119	165
42	198	151	168
48	173	152	160
54	127	115	116
60	61	56	58
66	34	33	33
72	28	27	28
78	24	24	24

实验表明,不同树干胸高半径的单株木识别准确率不同(表 3),胸高半径越大的单株木,识别准确率越好,如胸高半径大于 60 cm 时,本文方法和传统方法(如基于数字冠层模型林木识别方法)都比较好,基本接近实地参考值,当胸高半径较小时,传统方法的准确率很低而本文方法则有明显提高。

3 结束语

提出一种基于机载 LiDAR 数据的单株木识别

方法,在全波形 LiDAR 数据处理的基础上,得到高密度点云坐标以及相关波形参数,设置单株木点云分布的先验模型,然后利用马尔可夫随机场在 3D 空间中实现单株木自动识别。实验表明,本文方法在不同冠层高度的单株木识别准确率上都比传统方法有较大提高,特别是在茂密、复杂林地中进行低矮、细小单株木识别的效果比较好,平均识别精度达 75%,比传统方法提高近 22 个百分点。

参 考 文 献

1 Michael A Lefsky, Warren B Cohen, Geoffrey G Parker, et al. LiDAR remote sensing for ecosystem studies [J]. Bioscience, 2002, 52(1): 19 ~ 30.

- Qi Jiangtao, Zhang Shuhui, Yu Yingjie, et al. Development of a ground speed collecting system for the variable rate fertilizer machine based on bluetooth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 200 ~ 204. (in Chinese)
- 6 赵春江. 精准农业研究与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- 7 孟志军, 赵春江, 刘卉, 等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 338 ~ 342.
- Meng Zhijun, Zhao Chunjiang, Liu Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granular application system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 338 ~ 342. (in Chinese)
- 8 陈瑞卿, 周健, 虞烈. 一种判断点与多边形关系的快速算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 59 ~ 63.
- Chen Ruiqing, Zhou Jian, Yu Lie. Fast method to determine spatial relationship between point and polygon[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(1): 59 ~ 63. (in Chinese)
- 9 王润科, 张彦丽. 判断点与多边形位置关系的算法综述[J]. 甘肃联合大学学报: 自然科学版, 2006, 20(5): 32 ~ 36.
- Wang Runke, Zhang Yanli. The summarize of algorithm for judgment of relations between polygons and points[J]. Journal of Gansu Lianhe University: Natural Science Edition, 2006, 20(5): 32 ~ 36. (in Chinese)
- 10 周铁军. 平面多边形内外点判定算法评估[J]. 微计算机信息, 2006, 22(2 ~ 3): 231 ~ 233.
- Zhou Tiejun. The evaluation of point inclusion test for planar polygon[J]. Control and Automation Publication Group, 2006, 22(2 ~ 3): 231 ~ 233. (in Chinese)
- 11 Cerri D G P, Balastreire L A, Amaral J R. Development of a variable rate lime application system[C] // Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2002: 238 ~ 243.
- 12 Anglund E A, Ayers P D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(2): 273 ~ 282.
- 13 Fulton J P, Shearer S A, Higgins S F, et al. Rate response assessment from various granular VRT applicators[J]. Transactions of the ASABE, 2005, 48(6): 2 095 ~ 2 103.

(上接第 203 页)

- 2 Wagner W, Ullrich A, Melzer T, et al. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges [C] // Proceedings of the 20th ISPRS Congress, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, 2004, 35(B3): 201 ~ 205.
- 3 Popescu S C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR [J]. Biomass and Bioenergy, 2007, 31(9): 646 ~ 655.
- 4 庞勇, 赵峰, 李增元, 等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1): 152 ~ 158.
- 5 赵峰, 庞勇, 李增元, 等. 机载激光雷达和航空数码影像单株木树高提取[J]. 林业科学, 2009, 45(10): 81 ~ 87.
- 6 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83 ~ 90.
- 7 Rritberger J, Scnorr Cl, Krzystek P, et al. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 561 ~ 574.
- 8 Chauve A, Mallet C, Bretar F, et al. Processing full waveform LiDAR data: modeling raw signals [C] // Proceedings of the ISPRS Workshop "Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland, 2007, 36(3/W52): 102 ~ 107.
- 9 Wagner W, Ullrich A, Ducic V. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full waveform digitizing airborne laser scanner [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, 60(2): 100 ~ 112.
- 10 Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data [C] // Proceedings of the 19th ISPRS Congress, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, Amsterdam, Netherlands, 2000, 33(B3): 935 ~ 942.
- 11 刘峰, 杨志高. 基于对象的激光点云数据城区树木识别方法[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(7): 73 ~ 77.