第 38 卷 第 4 期
Vol.38 No.4

计 算 机 工 程
Computer Engineering

2012 年 2 月
February 2012

• 博士论文 •

文章编号：1000—3428(2012)04—0001—03 文献标识码：A 中图分类号：TP301.6

基于机载 LiDAR 数据的三维树木建模方法

陈 卓，马洪超，邬建伟

(武汉大学遥感信息工程学院，武汉 430079)

摘 要：提出一种基于机载激光雷达系统 LiDAR 数据树木可视化建模的方法。利用机载 LiDAR 数据的特点，结合 L-系统分形的思想，对传统的 L-系统方法进行随机化、参数化的扩展和改进，由此对数据进行建模。针对 LiDAR 数据分布空间由内到外的层次特点，采取分步的建模策略，在外层建立从 LiDAR 数据中提取 L-系统参数的方法。实验结果表明，该方法具有较好的建模效果，适用于三维数字城市、虚拟现实以及林业领域。

关键词：LiDAR 系统；点云数据；参数化 L-系统；三维树木模型

3D Tree-modeling Approach Based on Airborne LiDAR Data

CHEN Zhuo, MA Hong-chao, WU Jian-wei

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

【Abstract】This paper presents a new tree-modeling approach based on Light Detection and Ranging(LiDAR) data with improved L-system algorithm. Some extend of the parameters are made and randomization is compared with the traditional functions. The laser points are used to extract the algorithm parameters and analyze the tree characteristics. The function's result is a reconstruction of the 3D tree model which has similar features with laser points and values of tree height, crown diameter. Experimental results validate the approach provides ideal results and plays an important role in LiDAR application to the 3D GIS, virtual reality and field of forestry.

【Key words】Light Detection and Ranging(LiDAR) system; point cloud data; parameterize L-system; 3D tree model

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.001

1 概述

在林业应用上，机载激光雷达系统 LiDAR(Light Detection and Ranging)所提供的高密度点云可以直接量测得到林木参量。此外，激光束还可以穿透林木表层以下甚至地面，形成多次回波，体现出林木垂直结构信息。在枝干结构复杂的地方，LiDAR 数据点云密度能很好地反映出植物形态特征。然而，树木形态结构受光合作用、营养循环、能量传输以及林下叶层光照环境等多种因素的影响，不确定度很大，诸多不规则的树木形态又很难建立经验知识[1]。目前用 LiDAR 获得的树木的点云数据多为表面数据，内层空间数据点稀少，不足以确定枝干的拓扑关系，利用内层信息往往得出不正确的结论[2]。所以，LiDAR 数据的三维树木可视化模型问题在学术界尚未提出有效的解决方法。已有的相关研究，如分别利用极坐标下矢量树冠表面模型以及径向基函数所建立的树冠隐式曲面模型成功提取了树高、冠幅等相应参数[3-4]，但仅限于属性参数的提取，未建立可视化的三维模型。文献[5]将多角度的二维树冠轮廓多边形反投影到三维空间下，用“空间射线盒”相交的方法求出了树冠的三维表面模型并以此确立模型的初始结构，利用分形的方法建立了树木模型，但其内层树干结构的确立需要结合影像，算法流程复杂，所建立的模型外层结构单一。本文针对 LiDAR 系统获取的单棵树木数据特点，提出一种新的树木建模方法。

2 基于点云的多层次 L-系统建模算法模型

本文将点云空间进行多层次划分，设计了以分形思想为依据的“产生式规则”，并由此模拟植物的生长规律：首先将数据进行预处理(包括选择模型中心点、定义主干生长方向、量测树高和树冠宽度)；然后利用三维 L-系统方法初始化模型，形成模型主干及主分支；再加入正态分布的随机函数，利用随机化 L-系统方法，填补点云内层区域。当模型迭代达到外层数据点集中区域时，以点云数据为依据提取算法参数，由此参数化 L-系统，使模型“自适应”点云向外生长；若模型达到外围边界时形成树叶，算法结束，否则继续自适应迭代。算法流程如图 1 所示。

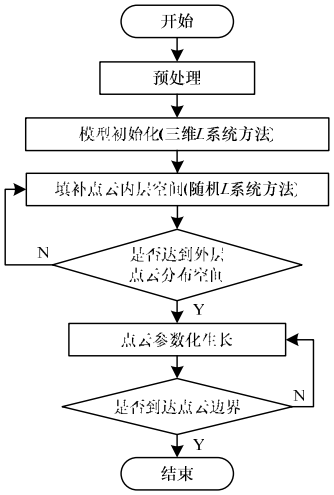


图 1 算法流程

基金项目：国家“973”计划基金资助项目(2009CB72400704)；武汉大学博士生自主科研基金资助项目(20102130201000135)

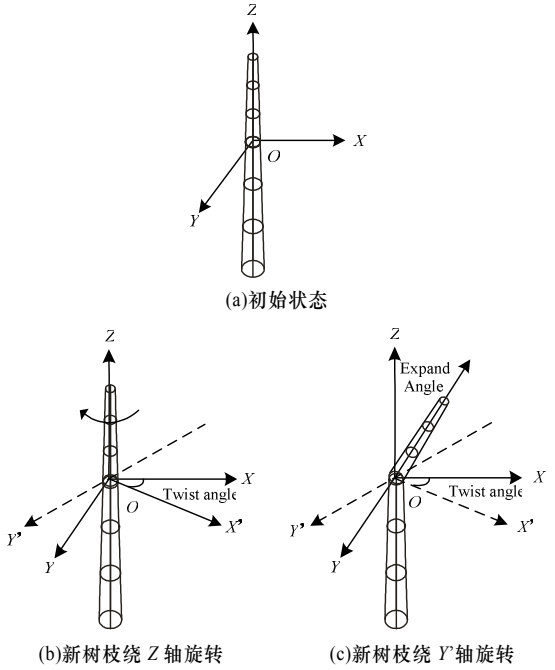
作者简介：陈 卓(1985－)，男，博士研究生，主研方向：数据特征提取，三维可视化建模；马洪超，教授、博士生导师；邬建伟，讲师、博士

收稿日期：2011-08-04 **E-mail：**zchen0916@whu.edu.cn

2.1 三维 L-系统与随机化 L-系统

基于点云数据的三维树木建模，需要可靠的三维建模技术。而传统的 L-系统方法仅限于二维空间下的单一结构模拟。为实现具有真实感的不规则三维树木模型，将二维 L 系统扩展到三维空间，加入了三维参数和命令，其过程如下：

(1)树枝的位置及生长方向确定。设树干方向为 Z 轴方向，当枝干生长点进行生长行为时，要把坐标原点平移到当前生长点并且让 Z 轴与枝干径向重合。分支偏转的 2 个分量 $Twist(T)$ 与 $Expand(E)$ 分别表示当前枝绕父枝径向的旋转角度以及当绕旋转后向量 $(\sin T,\cos T,0.0)$ 的旋转角度，如图 2 所示。



(a)初始状态

(b)新树枝绕 Z 轴旋转 (c)新树枝绕 Y'轴旋转

图 2 转角说明

通过乘以相应角度的旋转矩阵就可以对当前新生成的树枝做旋转变换，控制生长方向。

(2)与二维生长方式不同，本文在三维空间下用不同顶、底半径和一定长度的圆台代替直线绘制枝干。并用长度、半径衰减系数控制树枝生长形态。相关参数与命令定义如下：

L：树枝长度；

T：树枝与父枝径向的旋转角；

E：树枝绕向量 $(\sin T,\cos T,0.0)$ 旋转的俯仰角(以下简称俯仰角)；

Ra：树干宽度；

LS：长度衰减系数(在 0~1 之间)；

RS：半径衰减系数(在 0~1 之间)；

EC：俯仰参量(常数)；

W_n：迭代次数；

F：向前步进一步；

[：将模型当前状态压入栈中；

]：将当前状态从栈中弹出，即恢复系统的原来状态；

+：由当前方向逆时针旋转；

−：由当前方向顺时针旋转；

&：俯仰角向上；

^：俯仰角向下；

•：应用衰减系数。

添加参数和命令后可建立产生式规则如下：

$$P_1 = W_nF[L] \to W_{n+1}[F(L)][+(T)\&(E)\cdot(RS)F(LS\times L)][-(T)\&(EC-E)\cdot(RS)F(LS\times L)] \tag{1}$$

式(1)表示树枝的节点将由分叉后的一对节点所代替。2 个子树枝分别绕父节点所在树枝径向旋转角度 T 以及 $180°-T$，俯仰角度分别为 E 和 $EC-E$，形成向外生长的树枝。依照自然界树木的真实形态，外层的枝干较内层的枝干长度较短，半径较小，在建模算法的下一次迭代中必须乘以相应的衰减系数。

为增加算法模型的多样性和真实感，本文在已有的初始模型基础上对算法添加随机扰动，并丰富产生式规则。

添加随机扰动后的树枝长度衰减系数 RLS 定义为：

$$RLS = LS + Random(-1,1)/10 \tag{2}$$

其扰动范围为(−0.1, 0.1)。

添加随机扰动后的树枝半径衰减系数 RRS 定义为：

$$RRS = RS + Random(-1,1)/20 \tag{3}$$

其扰动范围为(−0.05, 0.05))。

添加随机扰动后的树枝旋转角 RT 定义为：

$$RT = T + Random(-1,1)\times 15 \tag{4}$$

其扰动范围为(−15 °, 15 °)。

添加随机扰动后的树枝俯仰角 RE 定义为：

$$RE = E + Random(-1,1)\times 7.5 \tag{5}$$

其扰动范围为(−7.5°, 7.5 °)。

下面给出 3 条产生式规则，供生长过程中随机选择：

$$P'_1 = W_nF[L] \xrightarrow{Random>0.6} W_{n+1}[F(L)][+(RT)\&(RE)\cdot(RRS)F(RLS\times L)][-(RT)\&(EC-RE)\cdot(RRS)F(RLS\times L)] \tag{6}$$

$$P'_2 = W_nF[L] \xrightarrow{0.2<Random<0.6} W_{n+1}[F(L)][+(RT)\&(RE)\cdot(RRS)F(RLS\times L)] \tag{7}$$

$$P'_3 = W_nF[L] \xrightarrow{Random<0.2} W_{n+1}[F(L)][-(RT)\&(RE)\cdot(RRS)F(RLS\times L)] \tag{8}$$

式(7)、式(8)分别表示当前节点被一定旋转角度的单一枝干节点代替，未进行分叉。当产生的随机数大于 0.6 时选择式(6)，小于 0.2 选择式(8)，在 0.2~0.6 之间选择式(7)。

2.2 基于点云数据的 L-系统参数确定方法

为确保 L-系统参数更贴近目标，本文提出了一种在点云数据中提取 L-系统参数的方法。其基本思想是在数据点密集的地方，增大长度和半径衰减系数，使得衰减量减小，同时通过增加分叉行为来增加树枝的繁密程度，对于不分叉的树枝，利用周围点云的三维坐标确定树枝生长方向。具体方法如下：

构造以枝干顶点径线方向延伸 $Length/2$ 枝干长度的位置为球心，以本枝干长度的 1/2 为半径的球体，作为搜索区域。确定落入搜索区域的点集 Vt，若点数 $pnts$ 大于阈值(依数据而定，本算法定为 1 m^3 数据内平均点数的 2/3)，则枝干分叉加密。若点数大于 0 小于阈值，则按随机数确定是否分叉；若选择不分叉，则计算以树干结点 t 为起点，以点集 Vt 中各元素为终点的向量和 $\boldsymbol{S}(Vt,t)$，即 $\boldsymbol{S}(Vt,t)=\sum_{vt_i\in Vt}\overrightarrow{(vt_i-t)}$。按照 $\boldsymbol{S}(Vt,t)$ 向量所确定的 $Expand$ 和 $Twist$ 分量设置枝干生长角度。

由点云数据确定的 L 系统参数以及对应的产生式规则如下：

$$PLS = LS + pnts/50 \tag{9}$$

$$PRS = RS + pnts/60 \tag{10}$$

$$PT = Twist(\boldsymbol{S}(Vt,t))(\text{向量}\boldsymbol{S}(Vt,t)\text{中绕树干径向的旋转角度分量}) \tag{11}$$

$$PE = Expand(\boldsymbol{S}(Vt,t)))(\text{向量}\boldsymbol{S}(Vt,t)\text{中绕树干径向的俯仰角度分量}) \tag{12}$$

$$P''_1 = W_n F[L] \xrightarrow{pnts>\text{阈值}} W_{n+1}[F(L)][+(RT)\&(RE)\cdot (PRS)F(PLS\times L)][-(RT)\&(EC-RE)\cdot(PRS)F(PLS\times L)] \quad (13)$$

$$P''_2 = W_n F[L] \xrightarrow{0<pnts<\text{阈值}\&\&Random>0.6} W_{n+1}[F(L)][+(RT)\&(RE)\cdot (RRS)F(RLS\times L)][-(RT)\&(EC-RE)\cdot(RRS)F(RLS\times L)] \quad (14)$$

$$P''_3 = W_n F[L] \xrightarrow{0<pnts<\text{阈值}\&\&0.2<Random<0.6} W_{n+1}[F(L)][+(PT_1)\&(PE_1)\cdot(RS)F(LS\times L)] \quad (15)$$

$$P''_4 = W_n F[L] \xrightarrow{0<pnts<\text{阈值}\&\&Random<0.2} W_{n+1}[F(L)][-(PT_2)\&(PE_2)\cdot(RS)F(LS\times L)] \quad (16)$$

$$P''_5 = W_n F[L] \xrightarrow{\text{模型达到边界}} leaves \quad (17)$$

当模型枝干顶点的搜索区域内不再含有数据点时，模型生长已达树冠外层表面，或者当枝干点已经超过树高、树干宽度范围，迭代终止，枝干顶点被树叶取代。

3　算法结果及分析

3.1　算法结果

用自主研发的软件 ALD3DTree，以湖北沙市地区 2008 年 3 月采集的点云作为实验数据，利用分割算法分离出单棵树木点云后，实验性地拓展基于点云数据的树木三维可视化建模方法。

图 3 展示了算法模型迭代过程中的效果图。图 3(a)为三维 L 系统算法得到的模型初始状态，含有树木模型主干及其主要分支。图 3(b)为随机化 L-系统算法迭代后的模型显示，其中点云数据“空洞”得到了充分填补并且保证了模型结构的多样性和真实感。图 3(c)和图 3(d)(未显示地面点)显示了外层采用点云参数化 L 系统算法后得到的整体模型。构建的树木模型结构符合点云表征的分布规律，在数据点密集的地方分支结构较多，枝叶繁茂，在数据点稀少的地方枝叶结构简单，分支较少，与点云基本套合。加入光照和纹理之后的完整树木模型如图 4 所示。



(a)模型初始　(b)随机化填补空间　(c)侧视图　(d)俯视图

图 3　模型效果



图 4　完整模型

3.2　算法分析

为了验证算法的效果与合理性，将点云文件中的数据点与模型末节点集放在同一空间坐标下显示，结果如图 5 所示。

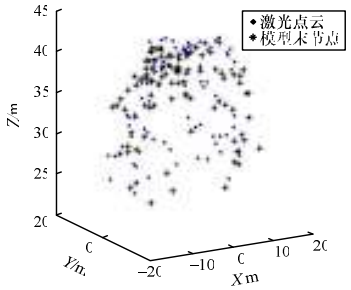


图 5　激光点云与模型叶节点套合显示

可见，模型末节点与点云数据空间位置相同，分布状态基本一致，模型末节点与点云曲面拟合结果形状接近。以模型枝干为中心轴，建立半径为树干宽度 1.5 倍的三维立体缓冲区，计算落入缓冲区的数据点数，以该点数占整体植被点数量的百分比作为对方法合理性以及有效性的评价。

对 2 个不同单木数据进行多次执行算法后的实验结果如表 1 所示。

表 1　缓冲区检验实验结果

编号	点数	缓冲区点数	落入缓冲区比率/(%)
1	113	91	80.53
2	113	98	86.73
3	113	97	85.84

结果显示落入缓冲区内的点云数量占整体数据的较大部分。实验表明：本建模方法适用于点云数据的三维可视化建模并且具有以下优点：

(1)通过对树木模型的可视化三维表达，代替对单木点云数据的属性分析，提升了空间分析层次；建立了符合点云分布特点的三维精细模型，相较于已有的特征提取方法在数据信息表达上更富有直观性。

(2)通过设置命令与参数，定义产生式规则，实现了树木生长过程的语义描述。通过随机化、点云参数化的方法改进，增加了建模的灵活性和多样性。

完整的树木模型冠层结构丰富完整，模型整体美观，且在三维特征以及树木参数属性上与点云保持一致。

4　结束语

本文针对基于点云的树木三维可视化建模问题，提出了多层次空间划分下的点云参数化三维 L-系统建模方法，建立了结构完整精细三维树木模型。实验表明，该模型与点云特征保持一致，可以作为点云数据植被覆盖区域的树木特征提取及属性参数分析的重要参考，也可以在大范围内批量建模，应用于三维 GIS 系统、数字城市建设、虚拟场景建设，辅助应用于植被覆盖地区、森林地区的参数估计及森林火灾的灾害指数估计。

参考文献

[1] Lindenmayer A, Prusinkiewicz P. The Algorithmic Beauty of Plants[M]. New York, USA: Springer-Verlag, 1990.

[2] Lim K, Treitz P, Wulder M, et al. LiDAR Remote Sensing of Forest Structure[J]. Progress in Physical Geography, 2003, 27(1): 88-106.

[3] Pyysalo U, Hyyppa H. Reconstructing Tree Crowns from Laser Scanner Data for Feature Extraction[J]. The Photogrammetric Journal of Finland, 2002, 16(2): 27-42.

[4] Kato A, Moskal L M, Schiess P, et al. Capturing Tree Crown Formation Through Implicit Surface Reconstruction Using Airborne Lidar Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(30): 1148-1162.

[5] Phattaralerphong J. A Method for 3D Reconstruction of Tree Crown Volume from Photographs: Assessment with 3D-digitized Plants[J]. Tree Physiology, 2005, 25(10): 1229-1242.

[6] 汪承义, 赵忠明. 基于 LiDAR 数据的城市数字表面模型生成技术[J]. 计算机工程, 2008, 34(1): 59-60, 63.

编辑　顾逸斐