

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2015 年 10 月 8 日 (08.10.2015)



(10) 国际公布号
WO 2015/149302 A1

- (51) 国际专利分类号:
G06T 17/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2014/074634
- (22) 国际申请日: 2014 年 4 月 2 日 (02.04.2014)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (71) 申请人: 中国科学院自动化研究所 (INSTITUTE OF AUTOMATION, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES) [CN/CN]; 中国北京市中关村东路 95 号, Beijing 100190 (CN)。
- (72) 发明人: 张晓鹏 (ZHANG, Xiaopeng); 中国北京市海淀区中关村东路 95 号, Beijing 100080 (CN)。李红军 (LI, Hongjun); 中国北京市海淀区中关村东路 95 号, Beijing 100080 (CN)。郭建伟 (GUO, Jianwei); 中国北京市海淀区中关村东路 95 号, Beijing 100080 (CN)。代明睿 (DAI, Mingrui); 中国北京市海淀区中关村东路 95 号, Beijing 100080 (CN)。刘佳 (LIU, Jia); 中国北京市海淀区中关村东路 95 号, Beijing 100080 (CN)。
- (74) 代理人: 中科专利商标代理有限责任公司 (CHINA SCIENCE PATENT & TRADEMARK AGENT LTD.);

中国北京市西三环北路 87 号 4-1105 室, Beijing 100089 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第 21 条(3))。

(54) Title: METHOD FOR REBUILDING TREE MODEL ON THE BASIS OF POINT CLOUD AND DATA DRIVING

(54) 发明名称: 基于点云与数据驱动的树木模型重建方法

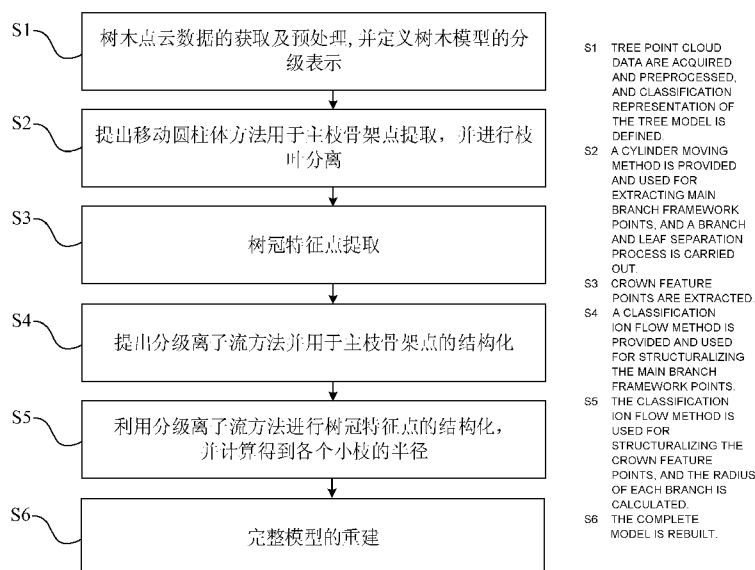


图 1 / FIG.1

(57) Abstract: Disclosed is a method for rebuilding a tree model on the basis of a point cloud and data driving. The method comprises the following steps: tree point cloud data are acquired and preprocessed, and classification representation of the tree model is defined; a cylinder moving method is provided and used for extracting main branch framework points from the tree point cloud data, and a branch and leaf separation process is carried out; crown feature points are extracted from the tree point cloud data; a classification ion flow method is provided and used for structuralizing the main branch framework points and the crown feature points; the complete tree model is obtained by means of rebuilding on the basis of the structuralized framework points and radiuses of all the branches. A solution is provided for rebuilding the complete tree model in the three-dimensional point cloud data, the obtained rebuilt model and an original point cloud have a high degree of fit, and the good rebuilding result can be obtained on models which are severely blocked and are complex in form.

(57) 摘要:

[见续页]

WO 2015/149302 A1



本发明公开了一种基于点云与数据驱动的树木模型重建方法，该方法包括以下步骤：获取树木点云数据，对其进行预处理，并定义树木模型的分级表示；提出移动圆柱体方法并用于从所述树木点云数据中提取得到主枝骨架点，并进行枝叶分离处理；从所述树木点云数据中提取得到树冠特征点；提出分级离子流方法并用于对主枝骨架点和树冠特征点进行结构化；根据已经结构化的所有树枝的骨架点和半径，重建得到完整的树木模型。本发明为从三维点云数据中重建出完整的树木模型提供了解决方案，获取的重建模型与原始点云具有很高的吻合度，而且对遮挡严重、形态复杂的模型都能获得较好的重建结果。

基于点云与数据驱动的树木模型重建方法

技术领域

本发明属于植物建模和计算机图形处理的交叉技术领域，涉及利用三维激光扫描仪进行实物测量得到树木点云数据，特别涉及一种从扫描的三维点云数据中重建出完整的三维树木模型的方法。

背景技术

植物在我们日常生活中起着重要的作用，既可以调节生态平衡，也可以绿化环境，清新空气。植物模型的准确重建可以应用于许多领域，如指导农业林业的生产，保护濒危的古树，或者在数字电影和娱乐游戏中提供虚拟的环境。目前植物建模的技术大体上可以分为四类：基于规则的方法，基于几何解析表达的方法，基于草绘的方法以及基于树木数字化的方法。

近年来由于数字化手段的快速发展，基于树木数字化的重建方法在植物重建中获得越来越多的重视，该方法目前主要以树木数字化手段获得的树木照片、点云等作为输入数据，利用一些先验知识和规则，获得与输入数据相似的植物模型。除了获得较好的视觉效果外，重建模型的准确性也逐渐成为重建的目标之一。其中，基于照片的重建方法具有数据采集方便，重建模型视觉效果好的特点，但是准备工作多，手工交互工作量大，重建模型与真实模型只能保持在某一个或某几个角度相似，并不能反映出植物的真实形态。基于三维扫描点云的方法以树的三维扫描数据作为输入，几何信息丰富，精度高，可以获得较照片精度高得多的模型。Cheng2007（Z. Cheng, X. Zhang and B. Chen, “Simple Reconstruction of Tree Branches From a Single Range Image,” Journal of Computer Science and Technology, vol. 22, no. 6, pp. 846C858, 2007）提出的树木点云数据的重建方法中，通过手工分割的方法将树冠部分与树干部分实现分离，对于树干部分，首先通过扫描图像的深度检测实现枝干

之间的分离，再利用圆柱拟合获得骨架点以及骨架点对应的半径，该方法可以获得相对准确的骨架位置和树枝半径，但是无法对细枝以及树冠进行重建。Neubert2007 (Neubert, T. Franken and O. Deussen, Approximate Image Based Tree-Modeling Using Particle Flows, ACM Transactions on Graphics (TOG). ACM, 26(3): 88, 2007.) 将粒子流的方法用于数据驱动的树木建模中，他们首先从两张正交拍摄的树木图片中提取出方向场，然后沿方向场采用粒子流方法将树冠与主枝进行连接，从而使得重建的模型与输入的照片相吻合。但是该方法使用的是单层粒子流的运动，因此只适用于二级结构。本发明将该方法进行了扩展，使用分级的粒子流方法来提取树木的多级结构，而且本发明是从点云数据中重建模型。Livny2010 (Y. Livny, F. Yan, M. Olson, B. Chen, H. Zhang and J. El-Sana, “Automatic Reconstruction of Tree Skeletal Structures from Point Clouds,” ACM Trans. Graph. vol.29, no.151, pp. 1C8, 2010.) 提出了一种基于全局拟合优化的方法提取点云数据的骨架结构，该方法更加鲁棒，但在遮挡严重的情况下仍然无法准确地重构出主枝和树冠的骨架。Livny2011 (Y. Livny, S. Pirk, Z. Cheng, F. Yan, O. Deussen, D. Cohen-Or and B. Chen. Texture-lobes for Tree Modelling, ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2011), vol.30, no.4, 2011.) 提出了一种基于裂片的树木表示方法，该方法可以用于树木的重建，也可以对现有的树木模型进行重新表示，本发明对该方法进行了扩展，同时考虑了树冠和可见主枝的信息，并采用分级粒子流的方法对树冠和主枝进行填充。

发明内容

本发明提供一种基于点云与数据驱动的树木模型重建方法，以解决现有的树木重建方法准确性不高，且只能处理较为简单的模型，对于遮挡严重、形态复杂的模型难以获得较好重建结果的缺点。

为实现上述目的，本发明提供一种基于点云与数据驱动的树木模型重建方法，该方法包括以下步骤：

步骤 S1、获取树木点云数据，对其进行预处理，并定义树木模型的分级表示；

步骤 S2、从所述树木点云数据中提取得到主枝骨架点及其半径，并进行枝叶分离处理；

步骤 S3、从所述树木点云数据中提取得到树冠特征点；

步骤 S4、对于主枝骨架点进行结构化；

步骤 S5、对于树冠特征点进行结构化并计算得到各个小枝的半径；

步骤 S6、根据已经结构化的所有树枝的骨架点和半径，重建得到完整的树木模型。

本发明采用计算机图形处理的技术，从扫描的三维树木点云数据中重建出完整的树木模型，本发明通过对点云局部几何量和空间位置关系的综合分析，既自动准确地在复杂点云数据中计算出主枝的骨架点并获得准确的半径，又完整地恢复了树冠形状，符合生物学特征地模拟出大量细枝，使重建模型在准确的基础上获得了较高的真实感。

附图说明

图 1 是本发明点云与数据驱动的树木模型重建方法的流程图；

图 2 是根据本发明一实施例获取的白皮松树扫描点云数据；

图 3 是根据本发明一实施例的树木分级表示示意图；

图 4 是根据本发明一实施例中圆柱体搜索空间的示意图；

图 5 是根据本发明一实施例圆柱体移动搜索方法流程图；

图 6 是根据本发明一实施例用分级离子流提取的主枝骨架点；

图 7 是根据本发明一实施例得到的枝叶分离结果示意图；

图 8 是根据本发明一实施例提取得到的树冠特征点的结果示意图；

图 9 是根据本发明一实施例结构化的主枝和树冠细枝示意图；

图 10 是根据本发明一实施例重建出的完整白皮松树模型；

图 11 是输入点云数据遮挡严重情况下本发明与现有技术的结果对比图；

图 12 是利用本发明对扫描的树林点云进行重建得到的结果示意图。

具体实施方式

为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚明白，以下结合具体实施例，并参照附图，对本发明进一步详细说明。

图 1 是本发明点云与数据驱动的树木模型重建方法的流程图，如图 1 所示，本发明方法包括以下步骤：S1、树木点云数据的获取及预处理，并定义树木模型的分级表示；S2、主枝骨架点提取及枝叶分离；S3、树冠特征点提取；S4、主枝骨架点的结构化；S5、树冠特征点的结构化；S6、完整模型的重建。

下面对上述每个步骤进行更加详细的说明。

步骤 S1、获取树木点云数据，对其进行预处理，并定义树木模型的分级表示；

要实现真实的植物三维建模首先要获得植物的原始模型，目前获取植物原始模型的方法主要有两种，分别为依靠照相机获取图像模型和依靠激光扫描仪获取三维点云模型。本发明利用三维激光扫描仪（如 Cyrax）、视觉照相等工具获取树木点云数据，基于点云分析技术保留需要重建的单个和多个树木上的点云，去掉其它对象的点，即预处理。图 2 是根据本发明一实施例获取的白皮松树扫描点云数据。

另外，根据植物学的知识，本发明将树木的形状进行分级表示：主枝、细枝和树叶，其中主枝包含 2 到 4 级枝，细枝包含 2-5 级枝，具体的级数与树种、树龄有关，一般来说，树龄大的分级数也多，主枝分级数记为 NL，细枝分级数记为 NS，细枝和树叶合起来构成树冠。图 3 是根据本发明一实施例的树木分级表示示意图，以 5 级为例，其中，图 3A 显示了树木的主要结构，图 3B 显示了 5 级分级的元素，图 3C 显示了 5 级的树木模型。

步骤 S2、从所述树木点云数据中提取得到主枝骨架点及其半径，并进行枝叶分离处理；

该步骤首先从所述树木点云数据中提取出主枝骨架点，并利用提取得到的主枝骨架点实现枝叶分离，然后在后续的步骤中完成主枝和树冠的结构化。

所述步骤 S2 包括以下步骤：

步骤 S2.1、计算点云各个点 p 处的局部几何量；

所述点云各个点 p 处的局部几何量包括法方向 $\vec{n}(p)$ 、主曲率 $k_1(p)$ 和 $k_2(p)$ ($k_1(p) \leq k_2(p)$)，以及主曲率对应的主方向 $\vec{d}_1(p)$ 和 $\vec{d}_2(p)$ 。

所述步骤 S2.1 进一步包括以下步骤：

步骤 S2.1.1、建立整个点云数据的 kd 树；

在计算几何中，kd 树是已经被证明的查找近邻的最快捷的数据结构之一，kd 树的建立方法在此不作赘述。

步骤 S2.1.2、对于点云数据中的每一个点 p ，利用 kd 树查找其多个，比如 15 个或 30 个近邻点，假设这些近邻点来自于同一个平面，利用最小二乘方法拟合出这个平面，以这个平面的法向量作为点 p 的法方向 $\vec{n}(p)$ 。

步骤 S2.1.3、在点 p 处建立局部坐标系，并拟合出一个二次曲面 $h(u, v) = c_0 u^2 + 2c_1 uv + c_2 v^2$ ，其中 $(u, v, h(u, v))$ 是表示空间中的一点， c_0, c_1, c_2 是曲面系数。求得二次曲面的系数后，利用该二次曲面计算出点 p 处的主曲率 $k_1(p)$ 和 $k_2(p)$ 以及主方向 $\vec{d}_1(p)$ 和 $\vec{d}_2(p)$ 。

步骤 S2.1.4、定义 p 点处的曲率圆半径为 $r(p) = 1/k_2(p)$ ，曲率圆心为 $b(p) = p - r(p)\vec{n}(p)$ ，用 $\vec{d}_1(p)$ 近似表示 p 处树枝的轴向， $r(p)$ 近似的表示该点处的树枝半径， $b(p)$ 估计为该点处的树干轴线的位置，也称为树枝骨架点。

步骤 S2.2、基于点云各个点 p 处的局部几何量来定义一个拟合 p 点枝干形状的圆柱，利用圆柱体的移动来搜索潜在的枝干（即移动圆柱体方法），从而提取得到主枝骨架点及其半径；

如图 4 所示，一个点 p 处的圆柱体定义为 $S(q) = S = (b, r, \vec{d}, H)$ ，其中， $b, r, \vec{d}$ 为所述步骤 S2.1 计算得到的局部几何量：曲率圆心、曲率半径和主方向， b 代表 S 的底面圆心， r 为底面圆半径， $\vec{d}$ 为轴向， H 代表高

度并且是一个定值。 S 的扩展圆柱体记为 $T(S) = (b, \lambda_1 r, \vec{d}, 2H)$, 其中, λ_1 设为一定值, 比如1.3, $T(S)$ 定义了寻找潜在主枝骨架点的搜索空间, 将所有位于 $T(S)$ 中的扫描数据点记为集合 $\wp(S)$ 。

图 5 是根据本发明一实施例圆柱体移动搜索方法流程图, 如图 5 所示, 所述圆柱体移动搜索方法包括以下步骤:

步骤 S2.2.1、构造初始圆柱体: 从点云数据中任选一点 p_0 , 构造初始圆柱体 $S(p_0) = S^{(1)} = (b^{(1)}, r^{(1)}, \vec{d}^{(1)}, H^{(1)})$, 其中, $b^{(1)}$ 表示初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的底面圆心, $r^{(1)}$ 为初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的底面圆半径, $\vec{d}^{(1)}$ 代表初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的轴向, $H^{(1)}$ 代表初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的高度, 初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的扩展圆柱体为 $T(S^{(1)})$, $T(S^{(1)}) = (b^{(1)}, \lambda_1 r^{(1)}, \vec{d}^{(1)}, 2H^{(1)})$, $\wp(S^{(1)})$ 代表 $T(S^{(1)})$ 中的所有点;

步骤 S2.2.2、首先判断集合 $\wp(S^{(1)})$ 中的任意一点 q 是否是有效的, 即如果圆柱体 $S(p_0)$ 和 $S(q)$ 满足: 1) $b(q) \in S(p_0)$; 2) $r(q)/r(p_0) \cong 1.0$; 3) $\vec{d}_1(q)$ 和 $\vec{d}_1(p_0)$ 之间的夹角较小, 其中, $b(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的曲率圆心, $r(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的曲率半径, $r(p_0)$ 表示圆柱体 $S(p_0)$ 的曲率半径, $\vec{d}_1(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的轴向, $\vec{d}_1(p_0)$ 表示圆柱体 $S(p_0)$ 的轴向, 则点 q 称为一个有效的点; 如果集合 $\wp(S^{(1)})$ 中有效点的数目大于第一阈值 N_1 (在本发明一实施例中设为 6), 则初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的后继圆柱体 $S^{(2)}$ 存在, 且其参数 $b^{(2)}, r^{(2)}, \vec{d}^{(2)}$ 分别是集合 $\wp(S^{(1)})$ 中所有点的曲率圆心、曲率半径和主方向的平均值, 然后将 $S^{(1)}$ 中的所有点都标记为已处理, 且在后续步骤中不再被访问;

步骤 S2.2.3、注意初始圆柱体 $S^{(1)}$ 有一个轴向相反的伴生圆柱体 $S^{(-1)} = (b^{(1)}, r^{(1)}, -\vec{d}^{(1)}, H^{(1)})$, $S^{(1)}$ 与 $S^{(-1)}$ 的轴向相反, 因此从 $S^{(-1)}$ 出发按照步骤 S2.2.2 的方法寻找后继圆柱体 $S^{(-2)}$;

步骤 S2.2.4、在 $S^{(2)}$ 或 $S^{(-2)}$ 的基础上继续执行搜索直到没有找到任何后继圆柱体, 如果找到的圆柱体的数目大于第二阈值 N_2 (在本发明一实施例中设为 6), 则这些圆柱体构成一个主枝片段, 并记录其圆心作为主枝骨架点;

步骤 S2.2.5、在点云数据中重新选择一个未被处理的点并重复执行上述四个步骤，直到所有点都被标记为已处理，此时得到一个有序的圆柱序列，这就是移动圆柱的序列，同时也得到一个有序骨架点序列 $T_j = \{C_h^j, h = 1, \dots, n_j\}$ ，其中每个 C_h^j 代表一段主枝， j 表示第 j 段主枝， n_j 表示第 j 段主枝包含骨架点的数目。

图 6 是根据本发明一实施例提取的主枝骨架点示意图，图 6 中，这些骨架点并不是完全连在一起的，每个骨架点用其对应的圆柱（包括中心和半径）表示。

步骤 S2.3、利用提取得到的主枝骨架点，将所述点云数据分为主枝上的点云和树冠上的点云两部分，实现枝叶分离；

该步骤中，将点云数据分为主枝上的点云 p_b 和树冠上的点云 p_l ，位于圆柱搜索区域内的点云认为是位于主枝上的点云，其它点云被认为是位于树冠上的点云。由于圆柱搜索区域的搜索半径为 $\lambda_1 r(p)$ ，其中 $r(p)$ 为圆柱体的半径，被认为是该位置主枝的半径，在本发明一实施例中， λ_1 取 1.3，所以圆柱搜索区域比真实的树枝范围大，在保证主枝上的点云全部位于搜索区域中的同时，也会有一部分树冠上的点云被包络进去。但是这不会对最终结果的准确性造成不良影响，因为主枝与树冠点云分离的结果使我们更关注位于树冠上的那部分点云，少量的缺失不会对树冠点云的形状和外围轮廓造成影响。图 7 展示了根据本发明一实施例的白皮松枝叶分离之后的结果，图 7 中，将主枝上的点云（灰度深的部分）记为 p_b ，树冠上的点云（灰度亮的部分）记为 p_l 。

步骤 S3、从所述树木点云数据中提取得到树冠特征点；

在本发明一实施例中，构建多尺度的方法提取所述树木模型中的树冠特征点，该方法中，每一尺度对应树木的一级表示，即划分 NS 个尺度 Ω_1 、 Ω_2 、 $\dots$ 、 Ω_{NS} 分别对应树木的 NS 级的细枝表示，并且 $\Omega_1 > \Omega_2 > \dots > \Omega_{NS}$ 。对于每一尺度 Ω_j ，将树冠点云 p_l 的包围盒划分为若干均匀且等尺寸（大小为 Ω_j ）的立方体 $\{V_i\}$ ，当一个立方体 V_i 满足下列两个条件的时候，称 V_i 是有效的，即 V_i 的重心 b_i 为树冠在尺度 Ω_j 上的一个特征点：1) V_i 中属于 p_l 的点的数量不能小于第三阈值 N_3 ，在本发明

一实施例中, N_3 设为 5; 2) V_i 中没有属于 p_b 的点。对应于尺度 Ω_j 的有效立方体的列表为 $V(\Omega_j) = \{V_1, V_2, \dots\}$ 。计算每一个尺度 Ω_j 下中所有 V_i 的重心 b_i 被计算出来, 则所有的重心 b_i 被认为是树冠在尺度 Ω_j 上的所有特征点。图 8 是根据发明一实施例提取得到的树冠特征点的结果示意图, 图中, 灰度较亮的点 (用小球显示) 为特征点, 这些特征点在空间中均匀分布, 且能较好地表示出树冠的形状。

步骤 S4、对于主枝骨架点进行结构化;

由前述步骤得到的主枝骨架点并没有完整的连接关系, 即获取的每段主枝内部的骨架点具有连接关系, 但是主枝与主枝之间没有任何连接信息, 同时树冠的三个尺度的特征点也完全是离散的, 因此, 在本发明一实施例中, 采用三维分级粒子流运动的方法将这些骨架点进行有效而准确地结构化, 构建分级枝干。

对于主枝部分, 首先设置一个根节点 G (可以选择树木模型靠近地面的位置) 来引导粒子流运动, 然后对已经得到的有序骨架点列表 $T_j = \{C_h^j, h = 1, \dots, n_j\}$ 中的每一个枝干 C_h^j , 以其下端点 q^j 作为粒子的初始位置放置粒子 p^j , 最后用剩余的主枝骨架点作为吸引, 引导粒子在空间中运行, 寻找合适的可连接点, 用粒子的轨迹作为主枝的补充连接各个分散的枝干, 实现所有主枝骨架点的结构化。其中, 每一个粒子在寻找可连接点的运行过程中, 在没有找到属于自己的可连接点之前, 都不断进行锥状分级搜索, 锥状分级搜索的目的在于寻找可以连接的枝干, 具体过程如下: 设 v_i^j 代表粒子 p_i^j 在 i 步骤的速度方向, p_i^j 记录 p^j 在 i 步骤的位置, 也就是粒子运行的轨迹点, 对于位于 p_i^j 位置的粒子 p^j , 以 p_i^j 为顶点, 以 v_i^j 为轴, 以 h_0 为高, 以 θ_0 为母线与轴线的夹角, 建立一个圆锥 F_0 , 如果在这个圆锥内存在除了 C_h^j 以外的其他枝干骨架点, 则选择在这个区域内这些骨架点中与 v_i^j 夹角最小的点作为 p^j 的“可连接点”, 如果在圆锥内没有搜索到可连接点, 再同样以 p_i^j 为顶点, 以 v_i^j 为轴, 以 $h_l = h_{up} + h_0$ 为高, 以 $\theta_l = \theta_{up} + \theta_0$ 为母线与轴线的夹角, 其中 h_{up} 为高度的增加量, θ_0 为夹角的增加量, 之后建立一个新圆锥 F_l , 在其中重新寻找可连接点, 如果仍然没有找到并且 $h_l < h_{max}, \theta_l < \theta_{max}$, 就进一步

扩大高度和夹角，反复上面的搜索过程，其中 h_{max} 和 θ_{max} 为高度和夹角的最大值。当 p^j 搜索到可连接点 Q_{attach} 之后，在后面的运动过程中将不再进行锥状区域搜索，把 Q_{attach} 记录作为 p^j 的吸引点。

步骤 S5、对于树冠特征点进行结构化并计算得到各个小枝的半径；

在将主枝骨架点全面连接起来之后，该步骤中，将对应的树木第一级树冠特征点作为粒子流的起点运动到主枝骨架点上，粒子运行的轨迹作为该级细枝的骨架点；将树木其它级别对应的树冠特征点作为粒子流的起点运动到上一级主枝骨架点上，粒子运行的轨迹仍然作为该级的骨架点，从而实现所有特征点的结构化；最后根据主枝的半径估计得到各个小枝的半径。

树冠特征点的结构化与主枝骨架点的结构化有很大的相似之处，首先设置树冠吸引点 X(例如可以选择根节点 G 正上方三分之一树高处)，然后分别以 NS 个尺度的树冠特征点为粒子流的起点撒下粒子，NS 个尺度的粒子分为 NS 批先后在主枝骨架点和吸引点 X 的引导作用下向主枝骨架点方向运动，寻找合适的可连接点，最后全部运行到主枝骨架点上，粒子运行的轨迹作为细枝的骨架点。 Ω_1 尺度下的粒子全部运行到主枝骨架点之后形成第(NL+1)级分枝， Ω_2 尺度下的粒子全部运行到第(NL+1)级分枝骨架点之后形成(NL+2)级分枝，依次类推，最后 Ω_{NS} 尺度下的粒子全部运行形成细枝。这个过程完成了树冠特征点与主枝骨架点的完整结构化。图 9 是根据本发明一实施例的主枝和树冠各级细枝结构化的结果示意图。

由于树木重建效果的主要因素在于主枝可见部分的树干的半径，细枝的半径对模型的应用没有大的影响，因此本发明将细枝根部的半径设定为其父枝干半径的固定倍数，比如 0.7 倍，并且设定细枝的末端半径为固定的 σ ，在本发明一实施例中， σ 被设为 0.2cm。细枝中间骨架点的半径通过线性拟合获得。

步骤 S6、根据已经结构化的所有树枝的骨架点和半径，重建得到完整的树木模型。

该步骤中，首先利用已经结构化的所有树枝的骨架结构和半径，使用不同半径的圆柱体（三角网格模型）对树枝进行拟合，重建得到树木的三维网格模型；然后采用纹理合成的方法在网格模型上添加合适的纹理（纹理添加方法属于现有技术中常用的纹理处理方法，在此不作赘述），然后根据输入点云数据的规模和树叶的种类（阔叶或者针叶），利用统计估计的方法决定所需树叶的数量、树叶的长度和宽度等树叶信息，并将不同的树叶添加到所述三维网格模型细枝的末端，从而实现树木三维模型的完整重建。

图 10 是采用本发明的方法从扫描的白皮树点云数据中重建出的完整三维树木模型，其包含了主枝、树冠以及树叶。从图 10 中可以看到，重建的树木模型与输入的点云形状非常一致，这体现在两方面：1）主枝上的点云与重建的模型实现了很好的吻合，这说明了本发明的主枝重建无论是骨架点位置还是半径都是准确的；2）树冠部分完整的填充了整个树冠空间，准确的还原了树冠的凹凸特征。另外，对于图 11A 显示的被遮挡的点云数据，Livny2010 的方法（如图 11B 所示）提取的树枝受到输入点云密度的影响，对于树叶较密的区域，枝的生长方向容易沿着树冠表面爬行，而采用本发明方法（如图 11C 所示）能够准确地计算出主枝和树冠特征点的位置，且计算树枝半径的准确性更高，最后的结果也具有很好的美观性。

此外，本发明的方法也可以很容易地应用到树林的模型重建方面。树林点云数据的模型重建方法与单棵树木的重建方法区别之处在于要首先设置根节点 G 和树冠吸引点 X，其余步骤相似。本发明在空间中距离地平面 $1/4$ 和 $1/3$ 树林高位置平行于地平面建立两个截平面，处在截平面间的骨架点被称为备选点吸引点。在进行特征点结构化的粒子流运动时，每个点在运动过程中自动的从备选吸引点中寻找与自己欧氏距离最近的点作为自己的吸引点，以自己吸引点在地平面的上投影点作为自己的根节点。当根节点和吸引点的搜索方法确定后，通过粒子流运动实现特征点的结构化。图 12A 是输入的树林点云数据，图 12B 是利用本发明方法重建后得到的树林模型。

本发明方法通过对点云局部几何量和空间位置关系的综合分析，自动准确地在复杂树木点云模型中计算出树枝的骨架点并获得准确的半径，改变了以往树干提取算法中手工交互过多，工作量大，结果不够准确的状况；同时，采用分级粒子流运动的方法自动实现了主枝骨架点的连接和树冠特征点与树枝骨架点的全面特征化，既完整的恢复了树冠形状，又符合生物学特征的模拟出大量细枝，使重建模型在准确的基础上获得了较高的真实感。

上述实验结果和基于点云与数据驱动的树木模型重建的方法，可以用于农林业测量、树木保护、数字娱乐及虚拟场景模拟等应用领域，具有较高的实际应用价值。

以上所述的具体实施例，对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明，所应理解的是，以上所述仅为本发明的具体实施例而已，并不用于限制本发明，凡在本发明的精神和原则之内，所做的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

权 利 要 求

1、一种点云与数据驱动的树木模型重建方法，其特征在于，该方法包括以下步骤：

步骤 S1、获取树木点云数据，对其进行预处理，并定义树木模型的分级表示；

步骤 S2 从所述树木点云数据中提取得到主枝骨架点及其半径，并进行枝叶分离处理；

步骤 S3、从所述树木点云数据中提取得到树冠特征点；

步骤 S4、对主枝骨架点进行结构化；

步骤 S5、对树冠特征点进行结构化并计算得到各个小枝的半径；

步骤 S6、根据已经结构化的所有树枝的骨架点和半径，重建得到完整的树木模型。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S1 中，利用三维激光扫描仪、视觉照相工具获取所述树木点云数据，基于点云分析技术保留需要重建的单个和多个树木上的点云，去掉其它对象的点。

3、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S1 中，树木的形状分为主枝、细枝和树叶，其中，主枝的分级数记为 NL，细枝的分级数记为 NS，细枝和树叶构成树冠。

4、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S2 中利用移动圆柱体方法从所述树木点云数据中提取得到主枝骨架点及其半径，所述步骤 S2 进一步包括以下步骤：

步骤 S2.1、计算点云各个点 p 处的局部几何量：法方向 $\vec{n}(p)$ 、主曲率 $k_1(p)$ 和 $k_2(p)$ ，其中 $k_1(p) \leq k_2(p)$ ，以及主曲率对应的主方向 $\vec{d}_1(p)$ 和 $\vec{d}_2(p)$ ；

步骤 S2.2、基于点云各个点 p 处的局部几何量来定义一个拟合 p 点枝干形状的圆柱，利用圆柱体的移动来搜索潜在的枝干，从而提取得到主枝骨架点及其半径；

步骤 S2.3、利用提取得到的主枝骨架点，将所述点云数据分为主枝

上的点云 p_b 和树冠上的点云 p_1 ，实现枝叶分离。

5、根据权利要求4所述的方法，其特征在于，所述步骤S2.1进一步包括以下步骤：

步骤S2.1.1、建立整个点云数据的kd树；

步骤S2.1.2、对于点云数据中的每一个点 p ，利用kd树查找其多个近邻点，假设这些近邻点来自于同一个平面，利用最小二乘法拟合得到该平面，以该平面的法向量作为点 p 的法方向 $\vec{n}(p)$ ；

步骤S2.1.3、在点 p 处建立局部坐标系，并拟合得到一个二次曲面，利用该二次曲面计算得到点 p 处的主曲率 $k_1(p)$ 和 $k_2(p)$ 以及主方向 $\vec{d}_1(p)$ 和 $\vec{d}_2(p)$ ；

步骤S2.1.4、定义 p 点处的曲率圆半径为 $r(p) = 1/k_2(p)$ ，曲率圆心为 $b(p) = p - r(p)\vec{n}(p)$ ，用 $\vec{d}_1(p)$ 表示 p 处树枝的轴向， $r(p)$ 表示该点处的树枝半径， $b(p)$ 表示该点处的树干轴线的位置，即树枝骨架点。

6、根据权利要求4所述的方法，其特征在于，所述步骤S2.2进一步包括以下步骤：

步骤S2.2.1、从点云数据中任选一点 p_0 ，构造初始圆柱体 $S(p_0) = S^{(1)} = (b^{(1)}, r^{(1)}, \vec{d}^{(1)}, H^{(1)})$ ，其中， $b^{(1)}$ 表示初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的底面圆心， $r^{(1)}$ 表示初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的底面圆半径， $\vec{d}^{(1)}$ 表示初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的轴向， $H^{(1)}$ 表示初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的高度，将初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的拓展圆柱体记为 $T(S^{(1)})$ ， $T(S^{(1)}) = (b^{(1)}, \lambda_1 r^{(1)}, \vec{d}^{(1)}, 2H^{(1)})$ ，其中， λ_1 为一定值，集合 $\wp(S^{(1)})$ 代表 $T(S^{(1)})$ 中的所有点；

步骤S2.2.2、判断集合 $\wp(S^{(1)})$ 中的任意一点 q 是否是有效的，如果集合 $\wp(S^{(1)})$ 中有效点的数目大于第一阈值 N_1 ，则认为初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的后继圆柱体 $S^{(2)}$ 存在，且其参数 $b^{(2)}, r^{(2)}, \vec{d}^{(2)}$ 分别是集合 $\wp(S^{(1)})$ 中所有点的曲率圆心、曲率半径和主方向的平均值，并将初始圆柱体 $S^{(1)}$ 中的所有点标记为已处理；

步骤S2.2.3、从与初始圆柱体 $S^{(1)}$ 的轴向相反的伴生圆柱体 $S^{(-1)} = (b^{(1)}, r^{(1)}, -\vec{d}^{(1)}, H^{(1)})$ 出发按照步骤S2.2.2寻找后继圆柱体 $S^{(-2)}$ ；

步骤 S2.2.4、在后继圆柱体 $S^{(2)}$ 或其伴生圆柱体 $S^{(-2)}$ 的基础上继续执行搜索直到没有找到任何后继圆柱体，如果找到的圆柱体的数目大于第二阈值 N_2 ，则这些圆柱体构成一个主枝片段，其圆心作为主枝骨架点；

步骤 S2.2.5、在点云数据中重新选择一个未被处理的点并重复执行上面四个步骤，直到所有点都被标记为已处理，此时得到一个有序的圆柱序列以及一个有序骨架点序列 $T_j = \{C_h^j, h = 1, \dots, n_j\}$ ，其中每个 C_h^j 代表一段主枝， j 表示第 j 段主枝， n_j 表示第 j 段主枝包含骨架点的数目。

7、根据权利要求6所述的方法，其特征在于，所述步骤 S2.2.2 中，如果圆柱体 $S(p_0)$ 和 $S(q)$ 满足：1) $b(q) \in S(p_0)$ ；2) $r(q)/r(p_0) \cong 1.0$ ；3) $\vec{d}_1(q)$ 和 $\vec{d}_1(p_0)$ 之间的夹角较小，其中， $S(q)$ 表示点 q 处的圆柱体， $b(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的曲率圆心， $r(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的曲率半径， $r(p_0)$ 表示圆柱体 $S(p_0)$ 的曲率半径， $\vec{d}_1(q)$ 表示圆柱体 $S(q)$ 的轴向， $\vec{d}_1(p_0)$ 表示圆柱体 $S(p_0)$ 的轴向，则点 q 为一个有效的点。

8、根据权利要求4所述的方法，其特征在于，所述步骤 2.3 中，位于圆柱搜索区域内的点云认为是位于主枝上的点云，其它点云认为是位于树冠上的点云。

9、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述步骤 S3 中，利用多尺度方法提取所述树冠特征点，其中，每一尺度对应树木的一级表示， NS 个尺度 Ω_1 、 Ω_2 、...、 Ω_{NS} 分别对应树木的 NS 级细枝表示，并且 $\Omega_1 > \Omega_2 > \dots > \Omega_{NS}$ ；对于每一尺度 Ω_j ，将树冠点云 p_1 的包围盒划分为若干均匀且等尺寸的立方体 $\{V_i\}$ ，有效 V_i 的重心 b_i 认为是树冠在尺度 Ω_j 上的一个特征点；计算每一尺度 Ω_j 下所有有效 V_i 的重心 b_i ，得到树冠在尺度 Ω_j 上的所有特征点。

10、根据权利要求9所述的方法，其特征在于，当一个立方体 voxel V_i 满足下列两个条件的时候，称 V_i 是有效的：

- 1) V_i 中属于 p_1 的点的数量不小于第三阈值 N_3 ；
- 2) V_i 中没有属于 p_b 的点。

11、根据权利要求1所述的方法，其特征在于，所述步骤 S4 和步骤 S5 中，采用三维分级粒子流运动方法对主枝骨架点和树冠特征点进行

行结构化，即：

- 1) 将主枝骨架点全面连接起来；
- 2) 将对应的树木第一级树冠特征点作为粒子流的起点运动到主枝骨架点上，粒子运行的轨迹作为该级细枝的骨架点；
- 3) 将树木其它级别对应的树冠特征点作为粒子流的起点运动到上一级主枝骨架点上，粒子运行的轨迹仍然作为该级的骨架点；
- 4) 最后根据主枝的半径估计得到各个小枝的半径。

12、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述步骤 S6 中，首先利用已经结构化的所有树枝的结构和半径，使用不同半径的三角网格模型的圆柱体对树枝进行拟合，重建得到树木的三维网格模型；然后在网格模型上添加合适的纹理；最后根据输入点云数据的规模和树叶的种类，决定所需树叶的信息，并将不同的树叶添加到所述三维网格模型细枝的末端，最终实现树木三维模型的完整重建。

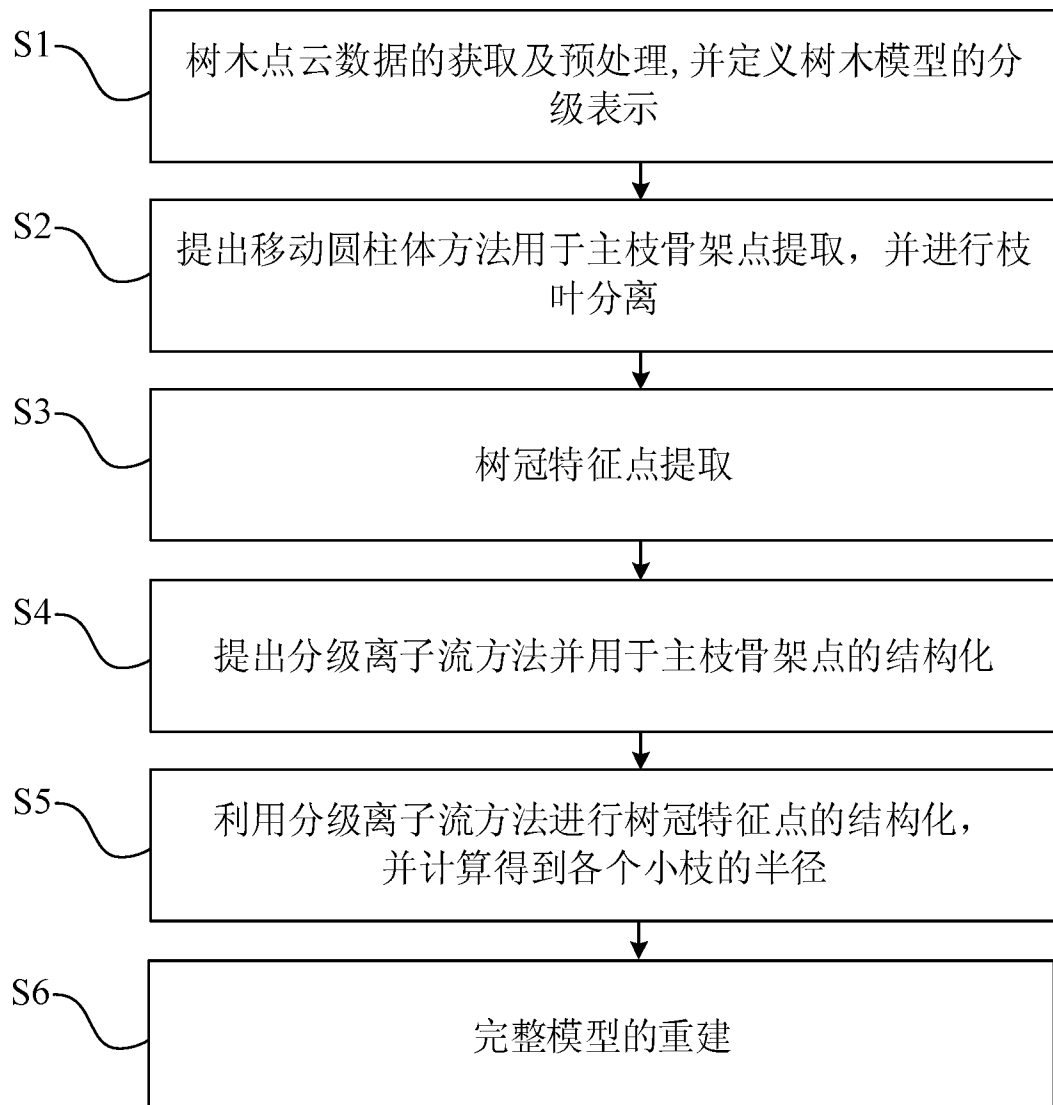


图 1

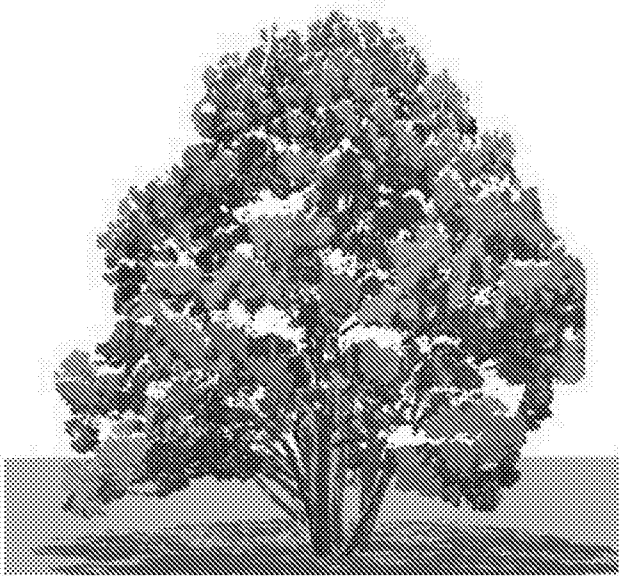


图 2

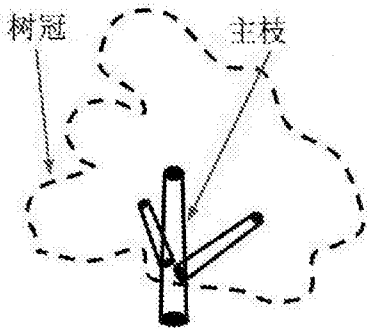


图 3A

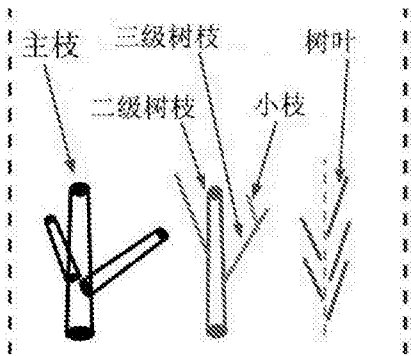


图 3B

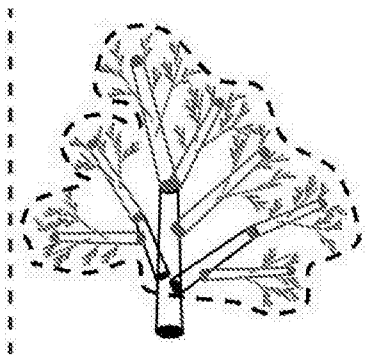


图 3C

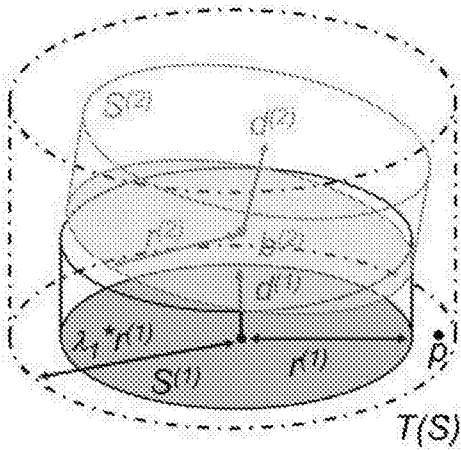


图 4

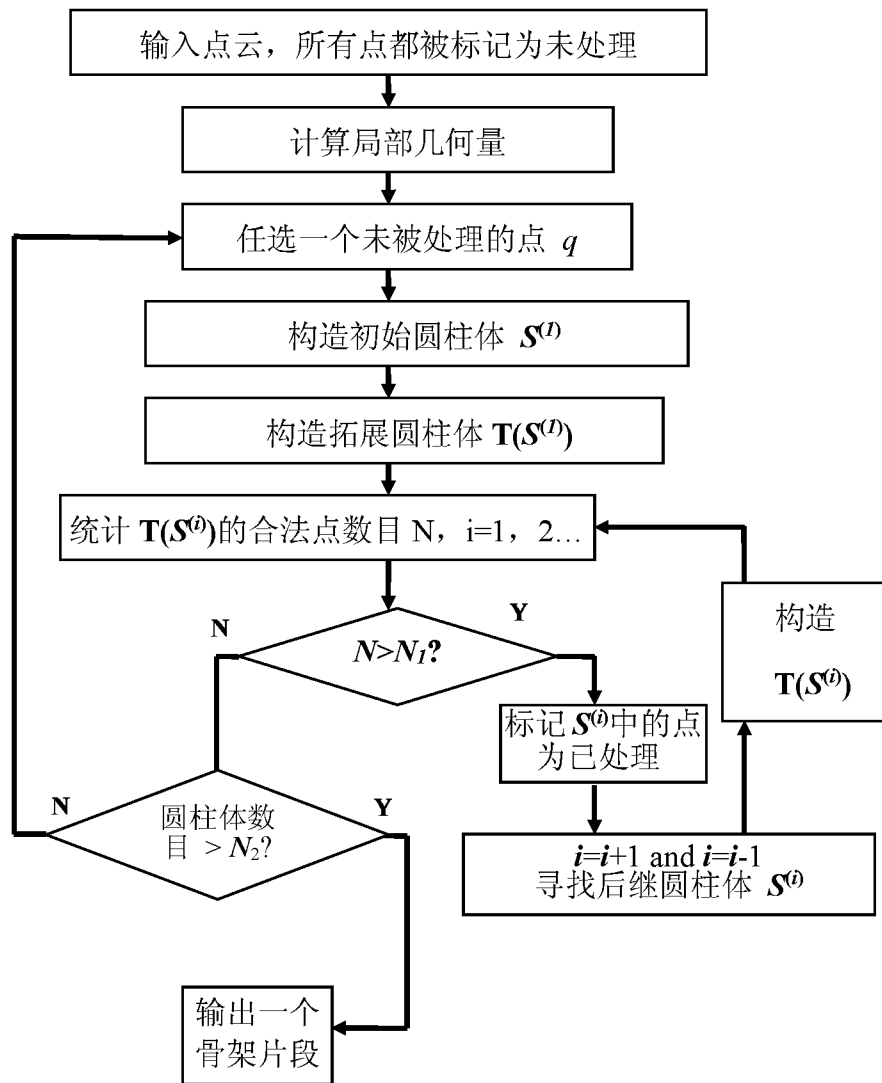


图 5

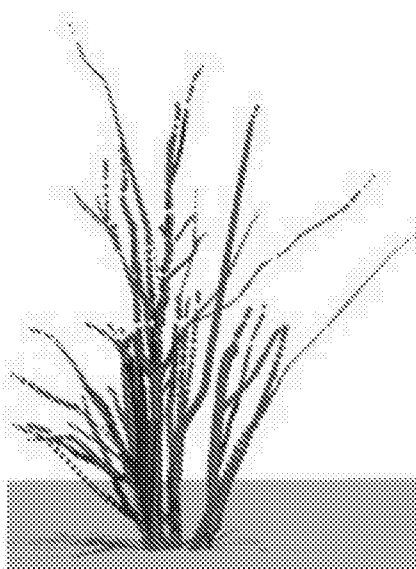


图 6

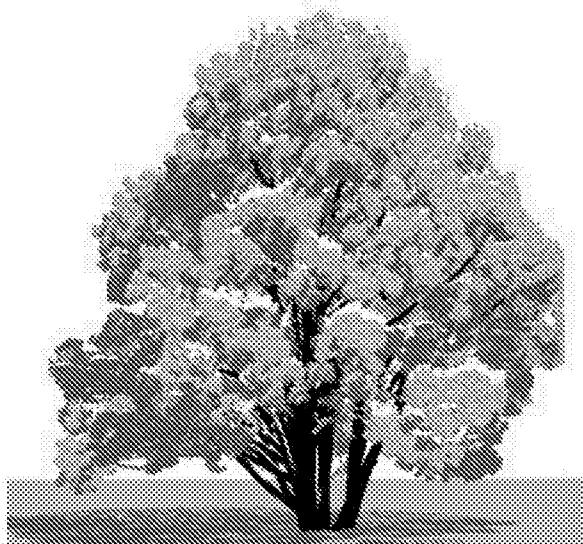


图 7

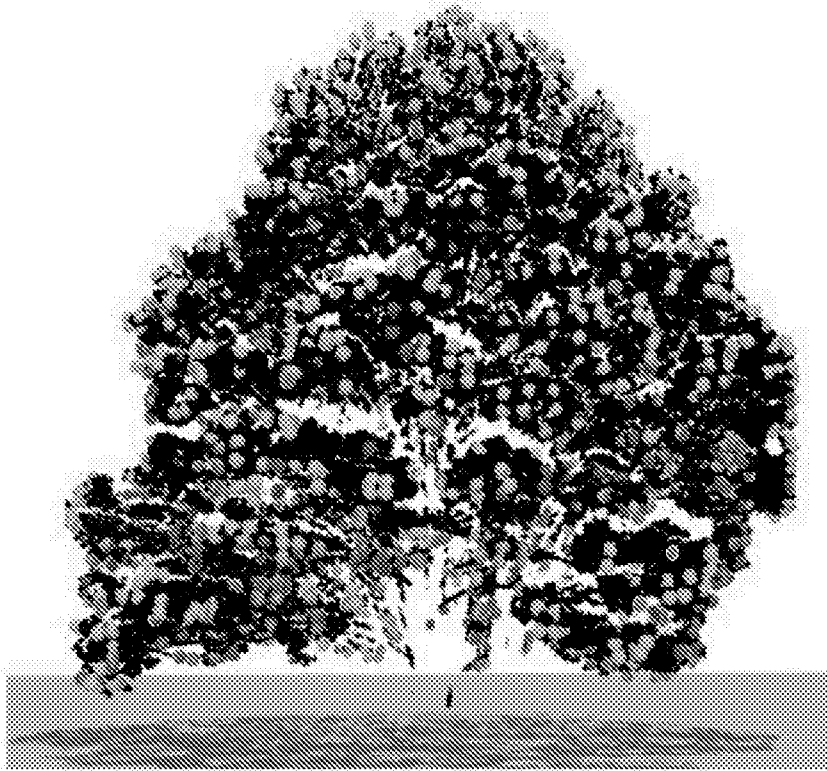


图 8

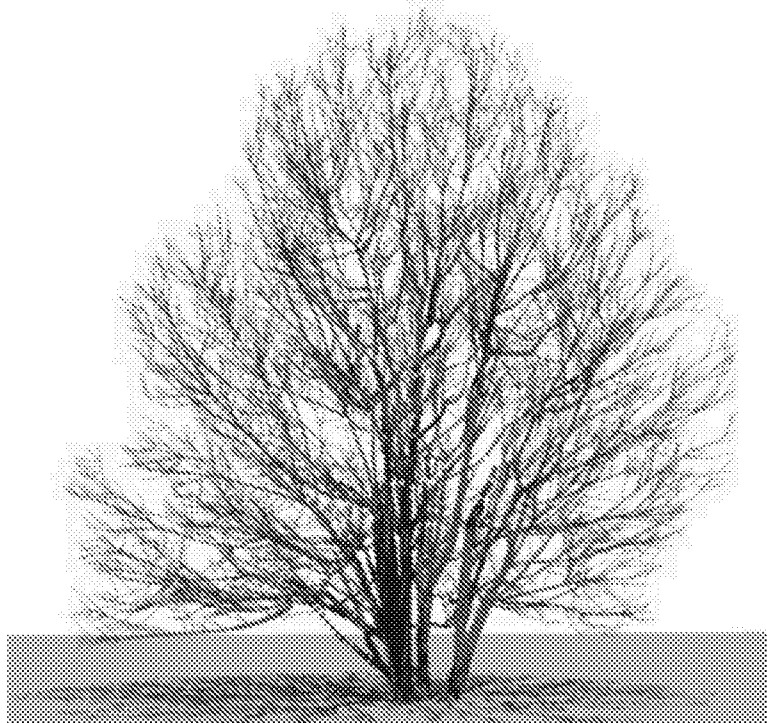


图 9

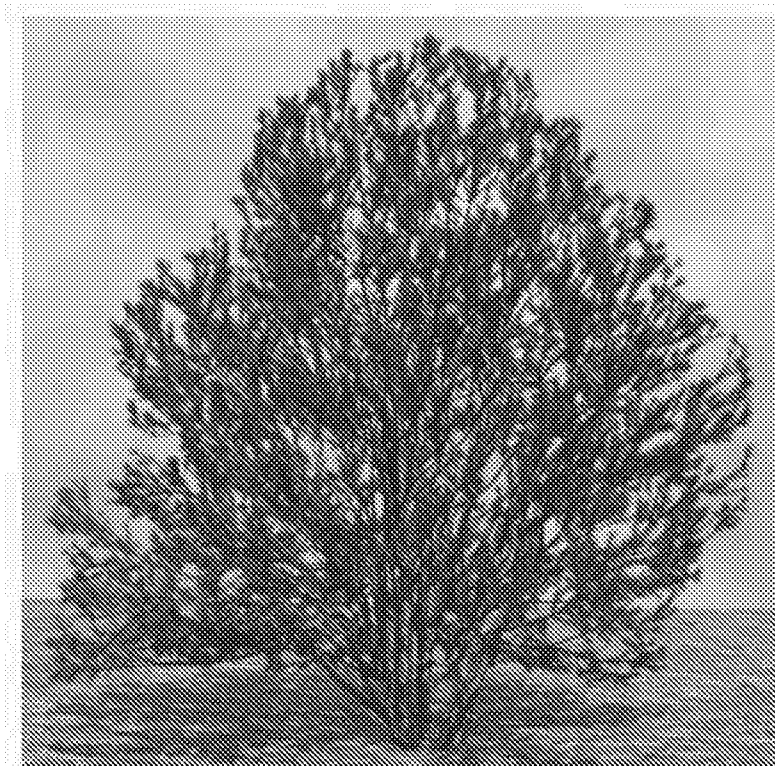


图 10

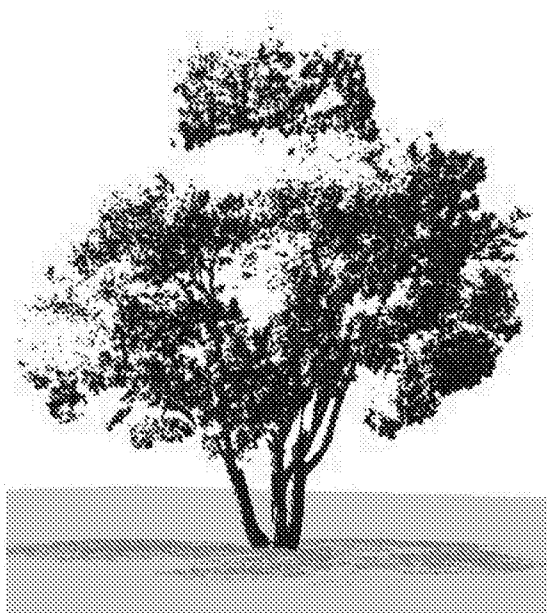


图 11A

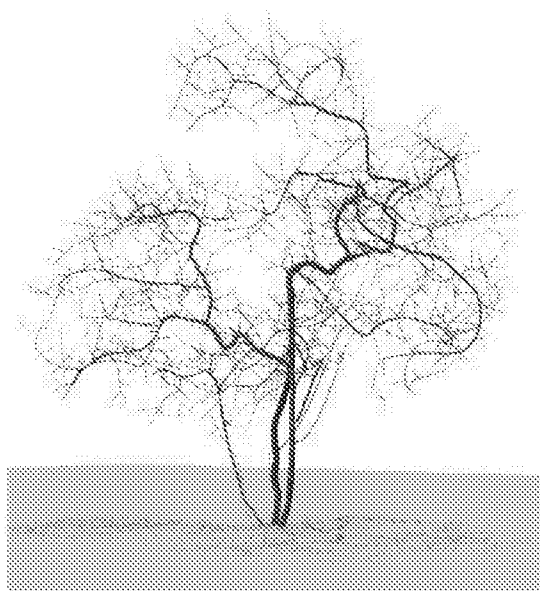


图 11B

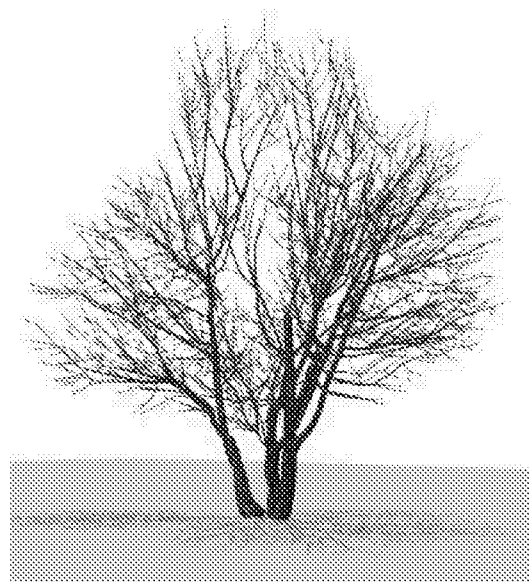


图 11C



图 12A



图 12B

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/074634

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06T 17/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06T 17/-; G06T 11/-; G06F 17/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields search

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

VEN, DWPI, CNKI, SIPOABS: tree, model, modeling, point, cloud, framework, bough, crown, leaves, leaf, radius, coordinate, curve, plane, column

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 101488226 A (CHINESE ACAD INST AUTOMATION) 22 July 2009 (22.07.2009) description, page 8, line 7 to page 13, line 14	1, 2, 12
A	CN 101488226 A (CHINESE ACAD INST AUTOMATION) 22 July 2009 (22.07.2009) description, page 8, line 7 to page 13, line 14	3-11
A	CN 101866495 A (CHINESE ACAD INST AUTOMATION) 20 October 2010 (20.10.2010) the whole document	1-12
A	CN 101847267 A (CHINESE ACAD INST AUTOMATION) 29 September 2010 (29.09.2010) the whole document	1-12

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“&” document member of the same patent family
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 26 December 2014	Date of mailing of the international search report 06 January 2015
Name and mailing address of the ISA State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No. (86-10) 62019451	Authorized officer TIAN, Jing Telephone No. (86-10) 62089417

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/074634

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 101488226 A	22 July 2009	None	
CN 101866495 A	20 October 2010	CN 101866495 B	28 March 2012
CN 101847267 A	29 September 2010	CN 101847267 B	25 April 2012

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2014/074634

A. 主题的分类

G06T 17/00 (2006.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06T 17/-, G06T 11/-, G06F 17/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

VEN, DWPI, CNKI, SIPOABS: 树, 树木, 模型, 建模, 点, 云, 骨架, 主枝, 树冠, 叶, 树叶, 半径, 坐标, 曲面, 平面, 柱体, 圆柱, tree, model, modeling, point, cloud, framework, bough, crown, leaves, leaf, radius, coordinate, curve, plane, column

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
X	CN 101488226 A (中国科学院自动化研究所) 2009年 7月 22日 (2009 - 07 - 22) 说明书第8页第7行-第13页第14行	1-2, 12
A	CN 101488226 A (中国科学院自动化研究所) 2009年 7月 22日 (2009 - 07 - 22) 说明书第8页第7行-第13页第14行	3-11
A	CN 101866495 A (中国科学院自动化研究所) 2010年 10月 20日 (2010 - 10 - 20) 全文	1-12
A	CN 101847267 A (中国科学院自动化研究所) 2010年 9月 29日 (2010 - 09 - 29) 全文	1-12

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2014年 12月 29日

国际检索报告邮寄日期

2015年 1月 06日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
北京市海淀区蓟门桥西土城路6号
100088 中国

传真号 (86-10)62019451

受权官员

田竟

电话号码 (86-10)62089417

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2014/074634

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	101488226	A	2009年 7月 22日	无			
CN	101866495	A	2010年 10月 20日	CN	101866495	B	2012年 3月 28日
CN	101847267	A	2010年 9月 29日	CN	101847267	B	2012年 4月 25日