

ID: 180222

基于移动激光扫描的橡胶林风害相关参数精准反演

云挺¹, 张艳侠^{1,†}, 王佳敏^{1,†}, 胡春华¹, 陈邦乾², 薛联凤^{1,*}, 陈凡迪¹

1. 南京林业大学信息科学技术学院, 江苏 南京 210037

2. 中国热带农业科学院橡胶研究所/农业部儋州热带作物野外观测实验站, 海南 儋州 571737

3. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037

摘要 林木参数反演是森林资源管理与培育经营的关键环节, 而迅速发展的激光探测与测量技术突破了传统测量方法, 可以快速获取林木的空间三维信息, 在林业普查中具备高效率、高精度的优势。本文结合计算机图形学与图像学方法, 以中国最大的橡胶生产基地海南省儋州市长期受台风侵害下的两个不同品种橡胶林段(林段1 PR107, 林段2 CATAS7-20-59)为研究对象, 设计了面向离散激光点云的单株林木参数提取方法, 自动获取橡胶林木风害后的生物量指标。首先, 本文通过人背负移动激光雷达获取林段点云数据并使用瑞利商求取台风造成的主枝干倾角, 以找寻每株橡胶树的树冠中心点。其次, 对点云进行垂直投影, 并采用分水岭与 Meanshift 算法实现株株分离。最后, 基于以上操作自动获取与实测值相近的林木参数, 例如冠幅、冠径、冠积、叶面积密度、叶面积分布以及主枝与分枝之间夹角等。计算表明, 林段1与林段2东西冠幅分别为3.95m和3.73m, 与实测相差1.74%~6.27%, 林段1与林段2南北向冠幅分别为6.47m和6.51m, 与实测相差2.54%~4.02%; 林段1与林段2平均胸径分别为5.20cm和4.73cm, 与实测相差0.64%~2.44%; 林段1与林段2平均冠积分别为168.01m³和141.80m³, 与实测相差0.67%~0.85%; 林段1与林段2主枝干倾斜角分别为18.80°和13.11°, 与实测相差5.53%~7.09%, 林段1与林段2二级分支与主枝干的夹角分别为45.21%~69.23%, 林段2为10.63°~32.14°, 相差62.63%; 林段1在不同天顶角下的叶面积指数均大于林段2。通过对一定样本(150棵/每类林段)的分析结果与真实比对表明, 本文方法对林木参数反演结果精度较高, 有效地评估了不同品种橡胶树在台风下的损伤度(如主枝干歪斜率、叶面积密度及衰减分布)。参数反演结果与实测值仅有8%的偏差, 此偏差主要由橡胶林分叶片稠密, 导致林分中叶面与枝干扫描数据获取缺失, 以及外界环境干扰如风力扰动、点云拼接误差、激光束发散率、激光扫描范围等原因造成。同时, 由于林段1(PR107)的橡胶树的主枝与分枝夹角、冠积以及叶面积指数均大于林段2(CATAS7-20-59)的橡胶树, 导致林段1的橡胶树比林段的2橡胶树在台风侵害下更脆弱。因此, 我们的研究可用于研究风力侵害对于不同森林地块的影响, 以及量化风害造成的生态系统紊乱的影响。同时, 我们的方法解决了人背负激光扫描数据进行单株提取与林木参数反演的问题, 为激光测绘在林业中的应用研究提供了新思路。

关键词 激光探测与测量技术; 单株树冠提取; 林木参数反演; 风害

中图分类号: TP79 文献标志码: A DOI:

* 通讯作者: 南京林业大学信息科学技术学院; 210037; xuelianfeng@njfu.edu.cn; Tel.: 13601580372

† 共同一作

引言

森林对二氧化碳下降、动物群落、调节水文流动和巩固土壤起着重要的作用^[1]。若森林遭受破坏,则会产生长期和不可逆的影响。因此,如何对森林进行实时监测,准确而又高效地获取森林相关资源信息对研究森林的生长状况及其动态变化具有非常重要的意义^[2, 3]。

正是由于森林的重要性,近年来,国内外许多的学者做了大量的面向森林监测的相关工作。按研究区域的尺度可分为以下三类:一、在宏观尺度下,运用星载影像数据获取大尺度林地影像并结合图像处理算法实现单株定位与树冠参数提取,如采用 QuickBird^[4]、WorldView-2^[5]、Ikonos 卫星数据、Landsat 8 多波段成像数据^[6]、ALOS PALSAR 微波波段成像数据^[7]、Sentinel-2 多光谱遥感数据^[8]等。虽然宏观尺度下可获取大范围林木的波段影像信息,但大尺度下精度低、高光谱敏感波段难找寻,以及树种、树龄、环境等因素的影响,都会造成该测量方法对不同种类的树冠识别与冠中心定位不准确^[9, 10]。

二、在中观尺度下,如机载 Light Detection And Ranging (LiDAR)^[11]、航空影像^[12]、移动式激

光扫描^[13]、地基激光雷达^[14]、高光谱小型机载光谱成像仪^[15]等,都应用于林业样地调查与参数反演中。然而,树木自身或相互间的遮挡、扫描仪参数设置和林木结构差异性等因素都对单株树木提取及林木监测有着一定的影响。

三、在微观尺度下,主要有:落叶法、角规测树法^[16]、半球摄影法,叶面积测定法和 LAI-2200 植物冠层分析仪^[17]等方法。该类方法较为简单,无需昂贵仪器,但人力成本高、效率低、易受外界因素(如季节、天气、光照和色差等)和采样频率与精度的影响。

基于以上方面考虑,本研究以海南儋州的两个橡胶林段作为研究对象,采用自下而上的人背负激光雷达的扫描方式获取林木点云数据。并结合图形图像学方法,设计了基于人背负激光雷达点云的橡胶林木株株分离与参数反演算法。同时考虑到橡胶林木长期受到台风胁迫出现歪倒现象^[18],本文以歪斜的主枝干作为主要特征进行单株定位,并获取对应的林木参数,以期找寻不同橡胶树品种在台风侵害下林木损伤度评估与成因。整个项目的实验流程如图 1 所示。

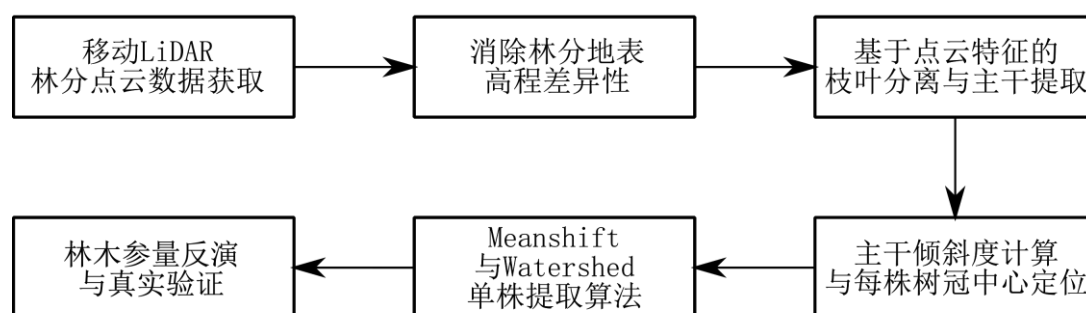


图 1. 实验主要步骤流程图

Fig.1. Flow diagram to illustrate the main steps of our method

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区概况

研究区选在海南儋州的橡胶实验基地,地处海南岛的西部工业走廊北段(19°32'47.89"N, 109°28'29.33"E)。儋州市是海南岛最大的橡胶生产基地,橡胶林众多,橡胶资源极其丰富。儋州市属于热带季风海洋性气候区,夏无酷暑,冬无

严寒。阳光充足,气候温和,年均气温 23.2℃,极端最高气温为 40.0℃。雨量充沛但分布不均,冬春雨量较稀少,夏秋雨水较充足,年均降雨量 1815mm,5 月至 10 月份为雨季,11 月至翌年 4 月份为旱季。强台风平均每 4 年一遇,受热带风暴及台风影响,部分树木已出现弯折,且橡胶树的树冠顶并未出现形态结构明显的冠形特征。因此如何精确有效地实现强风力载荷后橡胶林分精准参数的反演较为困难。研究区概况如图 2 所示。

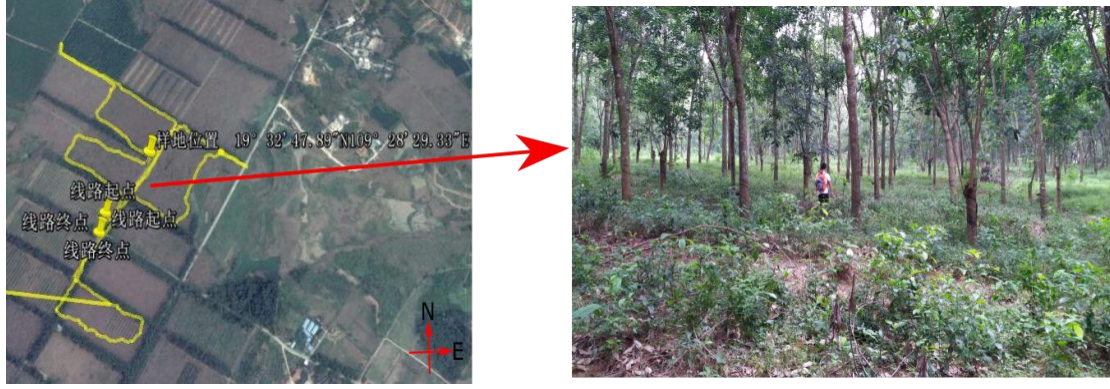


图 2. 研究区域内橡胶树位于中国海南省儋州市实验农场中。

Fig.2. The location of study area-rubber stands within the CATAS experimental farm, Danzhou city, Hainan Island, China.

1.2 激光雷达数据的获取

本文研究使用的原始点云数据获取装置为 Velodyne HDL-32E 激光雷达传感器，其创新的激光阵列可使系统观测到比其他激光雷达传感器更多的信息，相关参数：重量小于 2kg，操作温度： $-10^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ ，输入电压为 9V~32V，垂直视野为 $+10.67^{\circ}\sim+30.67^{\circ}$ ，水平视野可达 360° ，其发出的激光束波段为红外波段 (896nm~910nm)，为排除环境噪声干扰，扫描器使用波长 905nm，脉冲宽度为 5ns 的激光进行扫描，扫描时人背负仪器，按照“之”字型在林段内来回走动进行测量，雷达以每秒 10Hz 的频率进行水平旋转并发射波长 905nm 的激光，经物体散射返回，被接收器探测到之后，每秒可产生约 70 万个点，可获得探测距离为 80m/100m 的实时数据。对于整个系统数据的拼接采用的是 Simultaneous Localization and Mapping(SLAM)算法^[19]。此外该系统还具有重量轻，体积小，结构坚固，便于携带，高分辨率、高精确，且选用的工作波长不受阳光的影响，有良好的穿透烟、雾的特性的优势。数据获取时间为 2017 年 7 月 30 日。实时作业的温度为 $+26^{\circ}\text{C}\sim+34^{\circ}\text{C}$ ，获取到两个林段点云数据，其中林段 1 橡胶树种 (PR107，台风侵害下易伏倒)，林段 2 橡胶树种 (CATAS7-20-59，台风侵害下不易伏倒)。本文选取部分林段点云数据，分别共有

1,759,870 (林段 1) 和 1,326,925 (林段 2) 个扫描点。

2 研究方法

2.1 消除地面高程不一致

获取到的激光雷达数据，由于林地起伏，其地面高程不一致，会对树干检测造成误差，因此，本文设置了平滑窗口，对从林段 1 中选取的 N_1 ($N_1 \approx 150$) 棵树、林段 2 中选取的 N_2 ($N_2 \approx 150$) 棵树的原始点云数据进行平滑滤波处理，以消除实验数据中的地面高程差异性。设一窗口下的点云数据为： $p_i(x_i, y_i, z_i)$ 。令另一窗口下点云数据中的任意一点集为 $p_j(x_j, y_j, z_j)$ ，要想这两个窗口中的点云数据处于同一地面水平上，令 $diff = \min(z_j) - \min(z_i)$ ，则 $z_j = z_j - diff$ 。随着滑动窗口连续平移，不断消除地形高度差异性，进而使得整片林分处于相同的地形高度上。如图 3 (a)、(b) 所示。

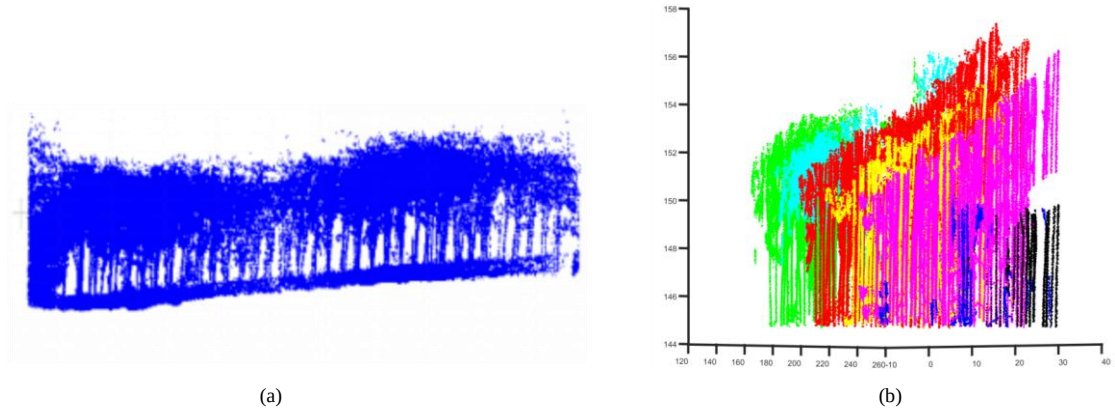


图 3. (a) 林段 1 (CATAS 7-20-59) 未消除地面高度差的原始扫描点云扫描图。 (b) 消除地面高度差后的扫描点云图。

Fig. 3. (a) The initial scanned points of rubber stands (forest plot1, clone PR107). (b) The processed scanned data after elimination of the altitude difference.

2.2 林分枝叶分离及主枝干提取

激光扫描后，获取到的仅是稠密的林木点云数据，并非是橡胶林木的具体器官信息，如单株枝干的空间信息、树冠的叶子点云等。因此，本文采用文献^[14]的方法对林木点云进行计算，实现枝叶分离。

通过该算法，获取每个激光点 p_i 的特征，记

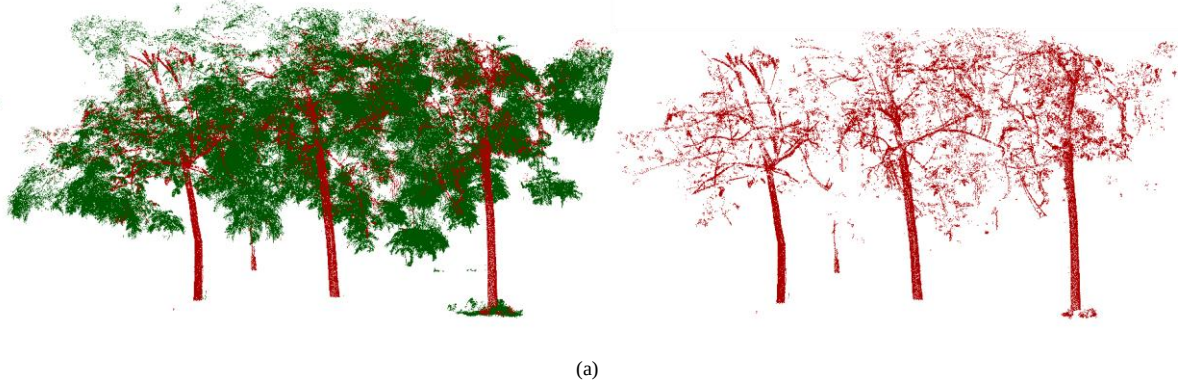
为： $f_{p_i} = \{e_{ix}, e_{iy}, e_{iz}, c_{0,i}, c_{1,i}, c_{2,i}, l_{0,i}, l_{1,i}, l_{2,i}\}$ ，其中：

$\{e_{ix}, e_{iy}, e_{iz}\}$ 为点 p_i 的法向量， $\{c_{0,i}, c_{1,i}, c_{2,i}\}$ 为点 p_i 的结

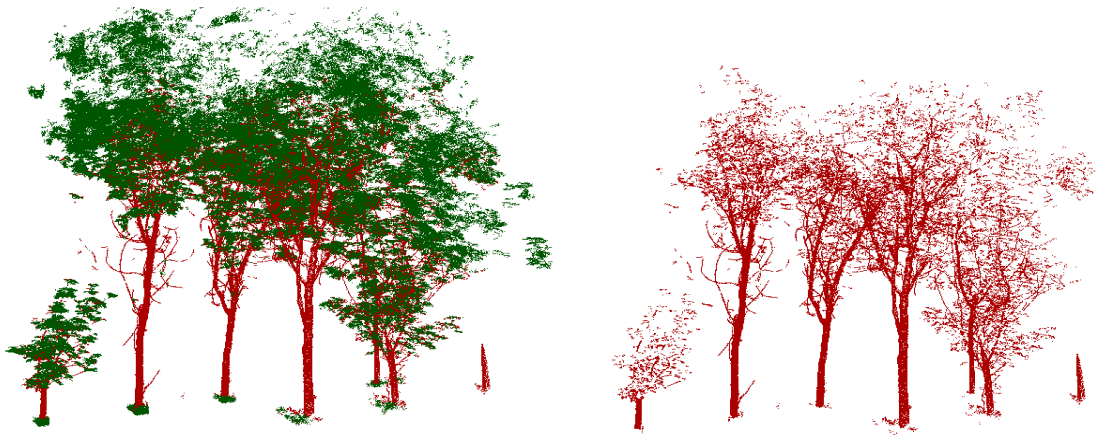
构张量特征，而 $\{l_{0,i}, l_{1,i}, l_{2,i}\}$ 为点 p_i 的形状特征值。

根据获得的每个激光扫描点 p_i 的特征 f_{p_i} ，结

合高斯分类器实现对橡胶林段的枝叶分离操作。按照橡胶树自然生长规律，以树木总高度的 1/2 以下区域作为主枝干数据（其余部分为分支干数据），从而获取到两个林段每棵树的主枝干信息。如图 4(a)、(b) 所示。



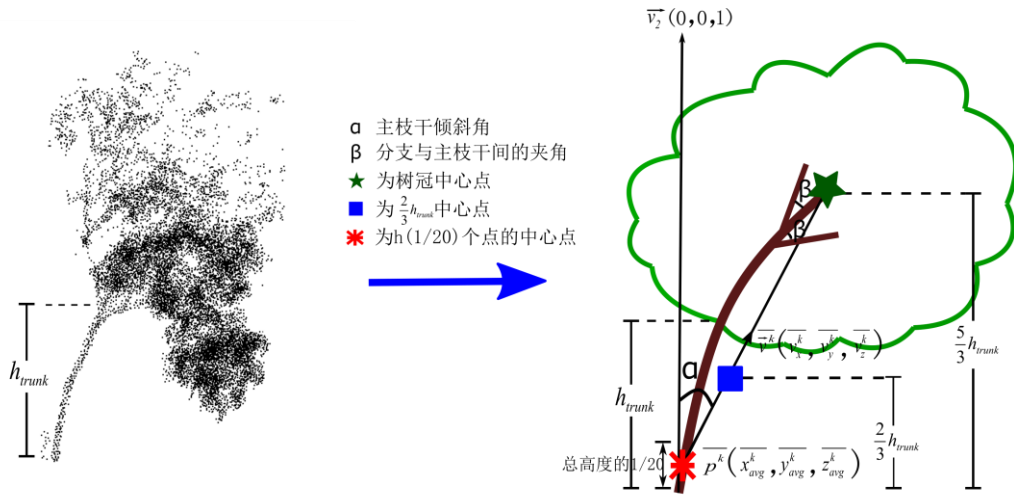
(a)



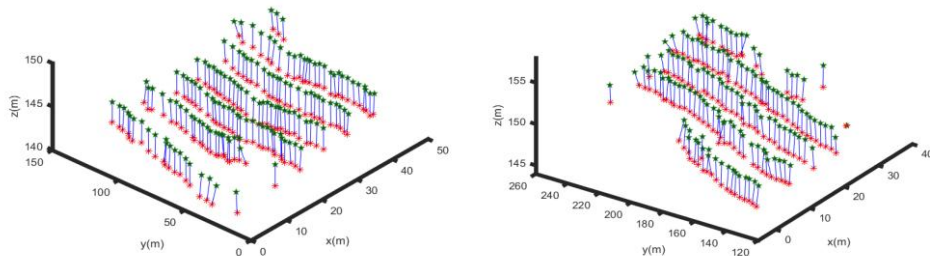
(b)

图 4. 枝叶分离结果。(a) 利用本文方法对林段 1 (PR107) 中典型橡胶树的扫描点自动分类为叶子(绿色)和枝干(红色)。(b) 林段 2 (CATAS 7-20-59)中典型橡胶树的枝叶分离结果图。

Fig.4. Results of tree organ classification. (a) The scanned points of three typical rubber trees in forest plot 1 (clone PR107) using our method to automatically classify into leaves (green) and branches (red). (b) Equivalent figures for the three typical rubbers trees in forest plot 2 (clone CATAS 7-20-59).



(a)



(b)

(c)

图 5. 枝干倾斜度与冠中心点计算示意图。(a) 树冠中心点获取以及结果示意图(左图为单株点云侧视图, 右图为冠中点计算示意图)。(b) 立体图显示林段 1 (PR107) 计算的树冠中心点及主枝干信息。(c) 立体图显示林段 2 (CATAS 7-20-59) 计算的树冠中心点及主枝干信息。

Fig.5. Schematic diagrams show the calculation of the oblique angle of the trunk and the canopy centre. (a) A rubber tree (represented by point cloud) grows with trunk bending in response to typhoon excitation. The oblique angle of the trunk and the canopy centre are calculated respectively using our method. (b) The perspective view of the extracted canopy centre points and spatial information of the trunks for the forest plot1 (clone PR107). (c) Equivalent figure for the forest plot 2 (clone CATAS 7-20-59).

2.3 冠中心定位与主干倾斜度分析

根据 2.2 节已获取到每株橡胶树的主枝干信息，发现大部分的橡胶树的树干倾斜，由此造成冠中心位置与主枝干天顶方向有偏差，导致无法直接获取树冠的中心点。

因此本文对每棵树树冠中心进行计算，如下：选取林段中第 k 棵树，以根部往上取相对于整棵树高度 h^k 的下部 1/20 区域的点云数据 $(p_1^k, \dots, p_m^k)$

为基点，拟合出 m 条沿树干方向的最佳拟合直线，其中 m 为整棵树高度 h^k 的下部 1/20 区域的所有点云数据的个数，拟合直线的点向式表现为：

$L_i^k(\vec{V}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k), P_i^k(p_{i,x}^k, p_{i,y}^k, p_{i,z}^k))$ ，其中 $\vec{V}_i^k$ 为直线的方向向量(未知)， p_i^k 为点云 $(p_1^k, \dots, p_m^k)$ 中的一点，

$i=1, L, m$ 。为求最佳拟合直线，即求解 $\vec{V}_i^k$ ，本文采用瑞利商的方法。由于最佳拟合直线即为树干的所有点云数据到直线 L_i^k 的正交距离的平方和最小：

$$\arg \min(\vec{V}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k)) = \sum_{j=1}^s \frac{|p_i^k - p_j^k|^2 |\vec{V}_i^k|^2 - ((p_i^k - p_j^k) \cdot \vec{V}_i^k)^2}{|\vec{V}_i^k|^2} \quad (1)$$

其中 s 为整个主枝干 $o: h_{trunk}$ 高度的点云个数 (h_{trunk} 为树干基底到树冠下部的高度(如图 4(a)所示))， p_j^k 为橡胶树整个主枝干部分 s 个点云数据中的任意一点。令 $w_{ij} = p_i^k - p_j^k$ ， $c_{ij}^2 = |w_{ij}|^2$ ，其中

$w_{ij}(w_{ij,x}, w_{ij,y}, w_{ij,z}) = p_i^k(p_{i,x}^k, p_{i,y}^k, p_{i,z}^k) - p_j^k(p_{j,x}^k, p_{j,y}^k, p_{j,z}^k)$ ，

所以式 (1) 可改写为：

$$\arg \min(\vec{V}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k)) = \frac{\sum_{j=1}^s c_{ij}^2 (\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k - (\sum_{j=1}^s w_{ij,x}^k v_{i,x}^k + w_{ij,y}^k v_{i,y}^k + w_{ij,z}^k v_{i,z}^k)^2}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k} = \frac{\alpha(\vec{V}_i^k) - \beta(\vec{V}_i^k)}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k} \quad (2)$$

其中： $\alpha(\vec{V}_i^k) = (\vec{V}_i^k)^T \sum_{j=1}^s c_{ij}^2 \vec{V}_i^k$ ，

$$\begin{aligned} \beta(\vec{V}_i^k) &= (v_{i,x}^k)^2 \sum_{j=1}^s w_{ij,x}^2 + (v_{i,y}^k)^2 \sum_{j=1}^s w_{ij,y}^2 + (v_{i,z}^k)^2 \sum_{j=1}^s w_{ij,z}^2 \\ &+ 2v_{i,x}^k v_{i,y}^k \sum_{j=1}^s w_{ij,x} w_{ij,y} + 2v_{i,x}^k v_{i,z}^k \sum_{j=1}^s w_{ij,x} w_{ij,z} \\ &+ 2v_{i,y}^k v_{i,z}^k \sum_{j=1}^s w_{ij,y} w_{ij,z} \end{aligned}$$

设矩阵 B 为点集 $(p_1^k, \dots, p_m^k)$ 的协方差矩阵乘 s

(s 为整个主枝干 $o: h_{trunk}$ 高度的点云个数)：

$$B = U^T U, \quad \text{其中 } U = \begin{pmatrix} w_{i1}^T \\ \vdots \\ w_{is}^T \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 U 是 $s \times 3$ 的矩阵， B 是 3×3 的矩阵， w_{i1} 是 3×1 的矩阵。则 α 和 β 可以表示为：

$$\beta(\vec{V}_i^k) = (\vec{V}_i^k)^T B \vec{V}_i^k, \quad \alpha(\vec{V}_i^k) = (\vec{V}_i^k)^T (el) \vec{V}_i^k$$

其中 $e = \sum_{j=1}^s c_{ij}^2$ ， el 是 3×3 的单位矩阵。则式 (2) 则可以写为：

$$\begin{aligned} \arg \min(\vec{V}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k)) &= \frac{(\vec{V}_i^k)^T (el) \vec{V}_i^k - (\vec{V}_i^k)^T B \vec{V}_i^k}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k} = \frac{(\vec{V}_i^k)^T (el - B) \vec{V}_i^k}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k} \\ &= \frac{(\vec{V}_i^k)^T M \vec{V}_i^k}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k} \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $M = el - B$ 。瑞利商 $\frac{(\vec{V}_i^k)^T M \vec{V}_i^k}{(\vec{V}_i^k)^T \vec{V}_i^k}$ 中，当 $\vec{V}_i^k$ 等于矩阵 M 的最小特征值对应的特征向量时，其表达式的值达到最小值。根据特征值分解得到：

$$M\xi = (el - B)\xi = el\xi - B\xi = e\xi - \lambda\xi = (e - \lambda)\xi \quad (5)$$

λ 为矩阵 B 的任意特征值， ξ 为对应的特征向量。

由式(5)可得，矩阵 B 的特征值都与矩阵 M 的特征值相关联，当取到矩阵 M 的最小特征值对应的特征向量时，即为矩阵 B 的最大特征值对应的特征向量。因此，矩阵 B 的最大特征值相对应的特征向量 $\vec{V}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k)$ ，作为整个主枝干 $o: h_{trunk}$

高度部分 s 个点拟合直线正交距离最小所对应的拟合直线的方向向量。则第 i 个橡胶树主枝干点所对应的最佳拟合直线为：

$$\frac{x - p_{i,x}^k}{v_{i,x}^k} = \frac{y - p_{i,y}^k}{v_{i,y}^k} = \frac{z - p_{i,z}^k}{v_{i,z}^k} \quad (6)$$

反复选取不同的 p_i^k ，迭代求解多个 $\bar{v}_i^k(v_{i,x}^k, v_{i,y}^k, v_{i,z}^k)$ ，

并获取平均值 $\bar{v}^k(\bar{v}_x^k, \bar{v}_y^k, \bar{v}_z^k)$ ，同时求解所选取所有的

的 p_i^k 的平均点 $\bar{p}^k(\bar{x}_{avg}^k, \bar{y}_{avg}^k, \bar{z}_{avg}^k)$ ：

由此得到每株树干的最佳拟合点向式直线方程

$\bar{L}^k$ ，如下式：

$$\frac{x - \bar{x}_{avg}^k}{\bar{v}_x^k} = \frac{y - \bar{y}_{avg}^k}{\bar{v}_y^k} = \frac{z - \bar{z}_{avg}^k}{\bar{v}_z^k} \quad (7)$$

同时根据经验推断，得平均直线 $\bar{L}^k$ 在高度 $\frac{5}{3}h_{trunk}$

下的交点即为冠中心点，其中 h_{trunk} 为树干基底到树冠下部的高度(如图 5(a) 所示)，带入直线方程，

由此可求第 k 棵数的冠中心点坐标为

$$P_{cc}^k(x_{cc}^k, y_{cc}^k, z_{cc}^k) :$$

$$\left(\frac{(\frac{5}{3}h_{trunk} - \bar{z}_{avg}^k)\bar{v}_x^k}{\bar{v}_z^k} + \bar{x}_{avg}^k, \frac{(\frac{5}{3}h_{trunk} - \bar{z}_{avg}^k)\bar{v}_y^k}{\bar{v}_z^k} + \bar{y}_{avg}^k, \frac{5}{3}h_{trunk} \right)$$

图 5(b) 即为冠中心点的获取过程示意图。

联合拟合直线的平均法向量 $\bar{v}^k$ 与天顶方向向量 $\bar{u}(0,0,1)$ (z 轴方向)，得到每树的主枝干倾斜度，其中 k 代表第几棵树。

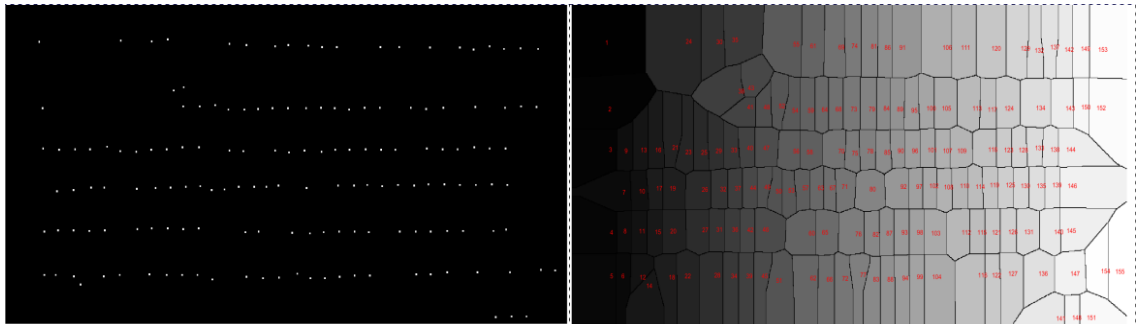
$$\alpha^k = \arccos \frac{\bar{v}^k \cdot \bar{u}}{\|\bar{v}^k\| \|\bar{u}\|} = \arccos \frac{\bar{v}_z^k}{\sqrt{\bar{v}_x^k{}^2 + \bar{v}_y^k{}^2 + \bar{v}_z^k{}^2}} \quad (13)$$

图 5(b)、(c) 为针对不同林段数据样本处理得到的主干信息与倾斜度显示。

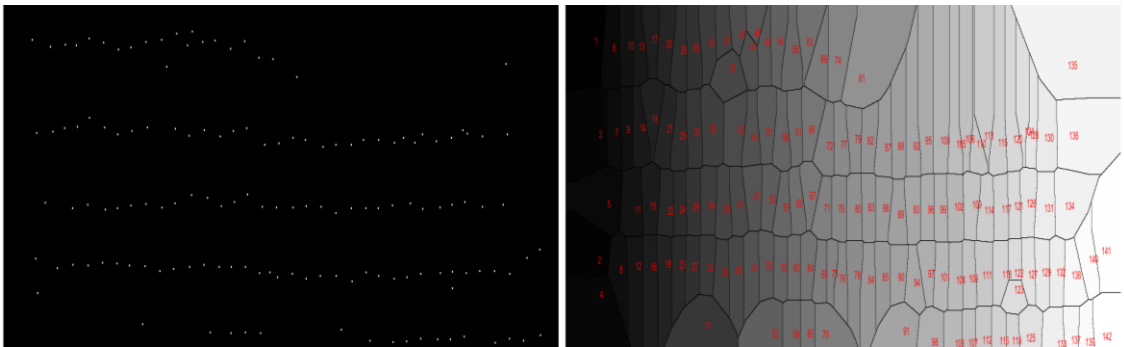
2.4 基于 Mean shift 和分水岭的株株分离

根据上节计算得到的单株橡胶树主干信息和树冠的中心点信息，本文结合分水岭与 Mean shift 算法^[20, 21]，对橡胶林段进行单株提取，实现橡胶林的株株分离。

根据冠中心点坐标，结合分水岭算法，将该三维坐标投影到二维灰度图上，得到点云数据的聚类图。如图 6(a) (b) 中左图所示，其中白色标记为每棵树的树冠中心。再结合分水岭与 Meanshift 算法，实现单株树的空间分离。分类结果如图 6(a) (b) 中右图所示，其中林段 1(PR107) 共 155 棵橡胶树，林段 2(CATAS 7-20-59) 共 142 棵橡胶树。各林段对应俯视图、侧视图如 6(c) (d) 所示。



(a)



(b)

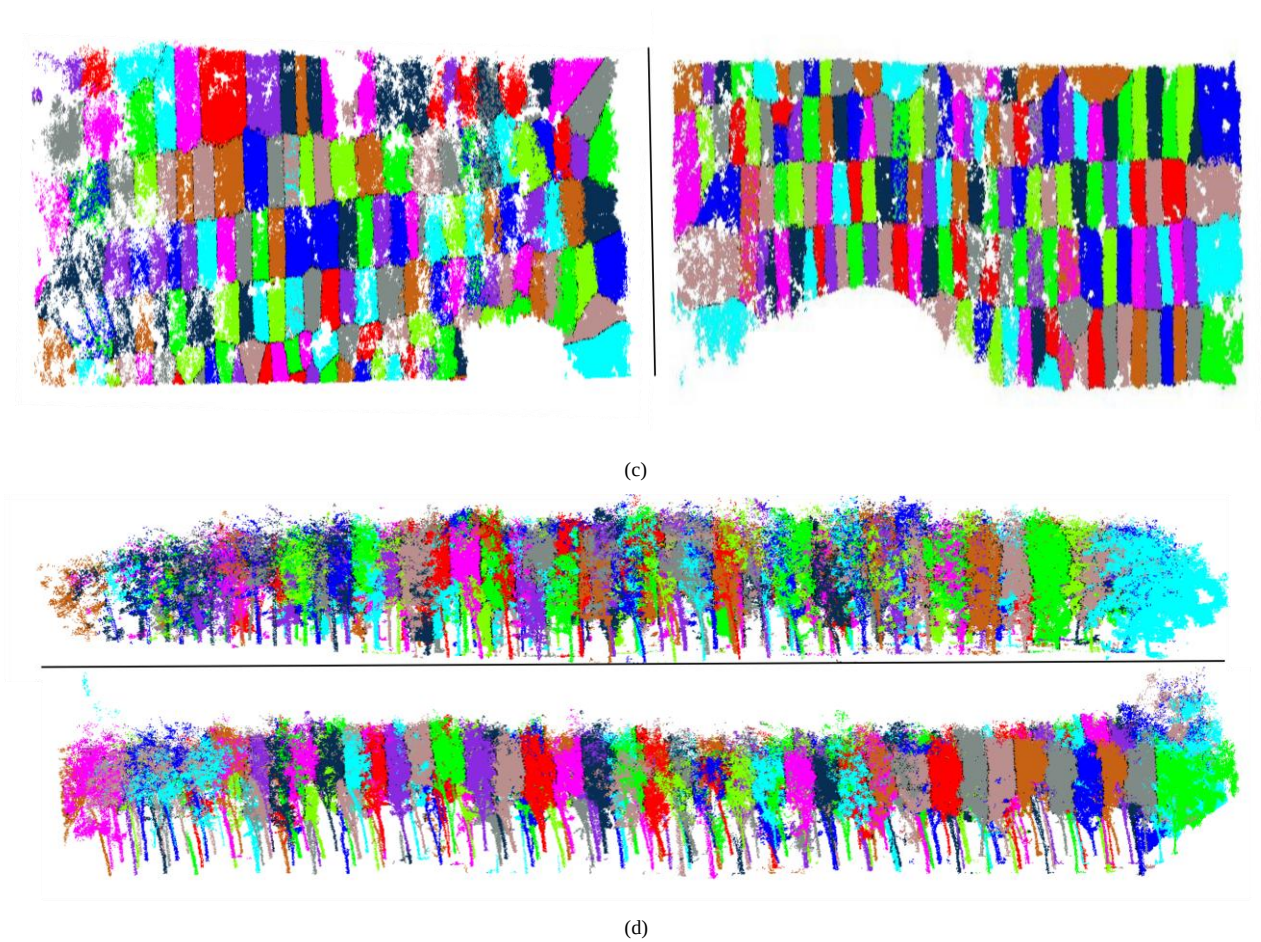


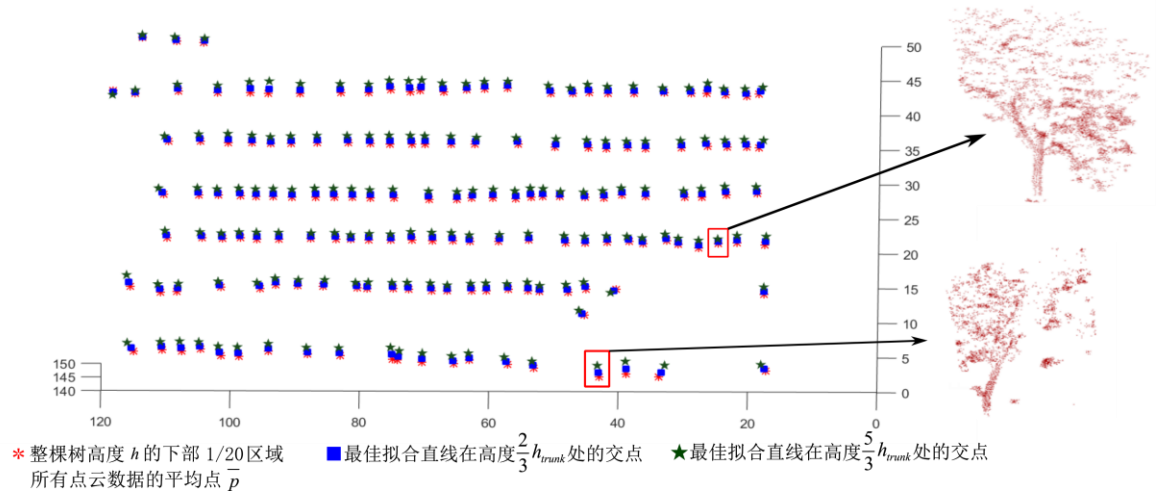
图 6. 单株树冠提取结果图。(a) 树冠中心点俯视图(林段 1 PR107)并结合分水岭与 MeanShift 算法实现株株分离。(b) 林段 2 (CATAS 7-20-59)的等价图。(c) 林段 1(左图)、2(右图)单株提取俯视图。(d) 林段 1(上图)、2(下图)单株提取侧视图。

Fig.6. Our results of individual tree canopy delineation. (a) Top view of every canopy centers (forest plot1, clone PR107) obtained by applying our Watershed and Mean Shift Clustering algorithms for individual tree segment. (b) Equivalent figures for forest plot 2 (clone CATAS 7-20-59). (c) Top view of results of individual tree canopy delineation for forest plot 1 (left) and forest plot 2 (right). (d) Lateral view of segment results for forest plot 1 (top) and forest plot 2 (down).

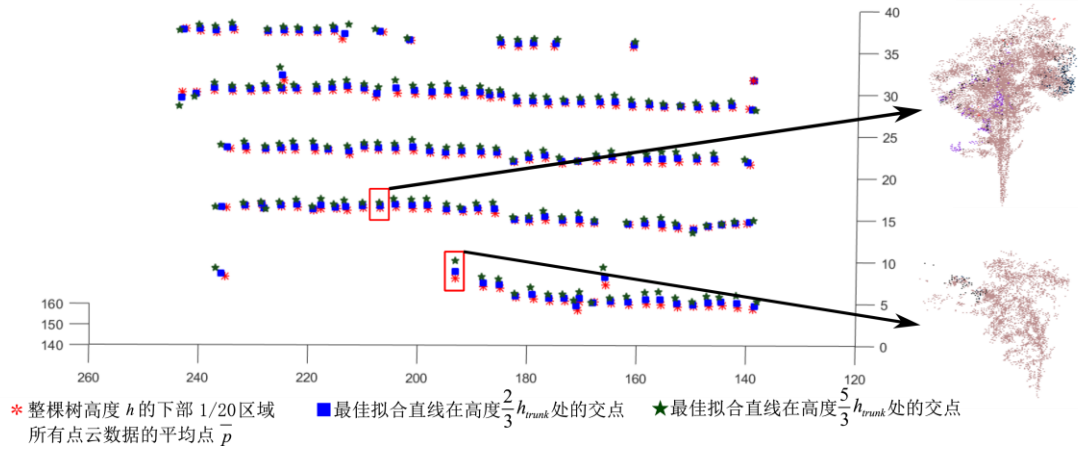
3 结果与分析

上节中, 本文已实现对单株橡胶树的分离和提取, 同时也计算得到了主枝干最佳拟合直线, 对林段中每棵橡胶树分别取整棵树高度 h 的下部 $1/20$ 区域点云的平均点 $\bar{p}$ (*表示) 以及最佳拟合

直线在高度 $(2/3)h_{trunk}$ (■表示)、 $(5/3)h_{trunk}$ (★表示) 处交点(该参数的侧视图参见图 5(b)), 整片林分的俯视图如图 7 所示, 其中三个标记点的重合度越高, 表示该橡胶树的倾斜程度越低。由此可以明确两个林段中每株橡胶树在台风侵害下的倾斜程度。



(a)



(b)

图 7. 不同种类橡胶树主枝干倾斜程度计算示意图。(a) 林段 1 (clone PR107) 中每棵树高度 h 的下部 $1/20$ 区域的点云平均值 $\bar{p}$ 以及最佳拟合直线在高度 $(2/3)h_{trunk}$ 、 $(5/3)h_{trunk}$ 处交点绘制结果图。(b) 林段 2 (clone CATAS 7-20-59) 中每棵树高度 h 的下部 $1/20$ 区域的点云平均值 $\bar{p}$ 以及最佳拟合直线在高度 $(2/3)h_{trunk}$ 、 $(5/3)h_{trunk}$ 处交点绘制结果图。

Fig.7. Calculated results showing the inclination level of rubber stands in different forest plots. (a) Best fitting straight lines for every rubber tree trunk in forest plot 1 (clone PR107) passing through several points which include $\bar{p}$ (the average point in the lower twentieth of each tree height) and the fitting points at $(2/3)h_{trunk}$ and $(5/3)h_{trunk}$ heights. (b) Equivalent figure for the forest plot 2 (clone CATAS 7-20-59).

4 讨论

4.1 林木参量计算值与实测值对比

本文从林段 1 和林段 2 中分别随机均匀选取十五棵树, 基于 Convex Hull^[22] 算法求得最小树冠凸包体积, 将凸包体积的平均值, 作为两个林段

每株树的平均冠体积。另外, 本文对橡胶树的冠幅、倾斜度、平均胸径和平均冠体积等进行了参数分析, 两个林段的各参数准确度的定量评估如表 1 所示。并与人工实测数据相比较, 其相关度也罗列在表 1 中, 其中 α 和 β 所表示的含义见图 5(b) 所示。

表 1. 两个林分的算法参数估测值与人工测量值比对

Table 1. Accuracy of the retrieved parameters for two forest plots using our method compared with in-situ measurements

	林段 1	林段 2
点云数量 (15 棵)	1, 759, 870	1, 326, 925
	(本文方法/实测值),	(本文方法/实测值),
	相关度	相关度
平均树高 (cm)	(160. 67/159. 70), 100. 61%	(172. 57/171. 13), 100. 84%
平均胸径 (cm)	(5. 20/5. 33), 97. 56%	(4. 73/4. 70), 100. 64%
平均冠体积 (m ³)	(168. 01/166. 90), 100. 67%	(141. 80/143. 02), 99. 15%
冠幅 (m)	东西 (3. 95/4. 02), 98. 26%	东西 (3. 73/3. 51), 106. 27%
	南北 (6. 47/6. 22), 104. 02%	南北 (6. 51/6. 68), 97. 46%
平均主枝干倾斜度 α (°)	(18. 80°/19. 90°), 94. 47%	(13. 11°/14. 11°), 92. 91%
分支与主枝干的夹角 β (°) 范围	(45. 21°~69. 23°/43. 32°~70. 41°), 98. 11%	(10. 63°~32. 14°/10. 81°~34. 42°), 105. 32%

4. 2 不同林段抗风性能分析

由于树木的冠幅、骨架拓扑结构、叶面空间分布情况的差异性都会对树木的抗风性能产生较大的影响, 因此本节将分析林段 1 (PR107) 与林段 2 (CATAS 7-20-59) 在这些参量上的差异性对其抗风性能的影响。

首先分析树木冠幅以及骨架拓扑结构差异性对于树木抗风性能的影响。本文选取两林段在东

西和南北方向上的冠幅、主枝干倾斜度 α 以及分支与主枝干间的夹角 β (图 5(a)) 进行对比分析, 其对比箱体图如图 8 所示。表 1 表明, 林段 1 与林段 2 的冠幅相差不大, 林段 1 的树高明显低于林段 2 而平均冠积却大于林段 2。同时, 林段 1 分支与主枝干间的夹角 β 远大于林段 2, 这些都会造成林段 1 的迎风面积大于林段 2, 且林段 1 的冠内风力扰动高于林段 2。

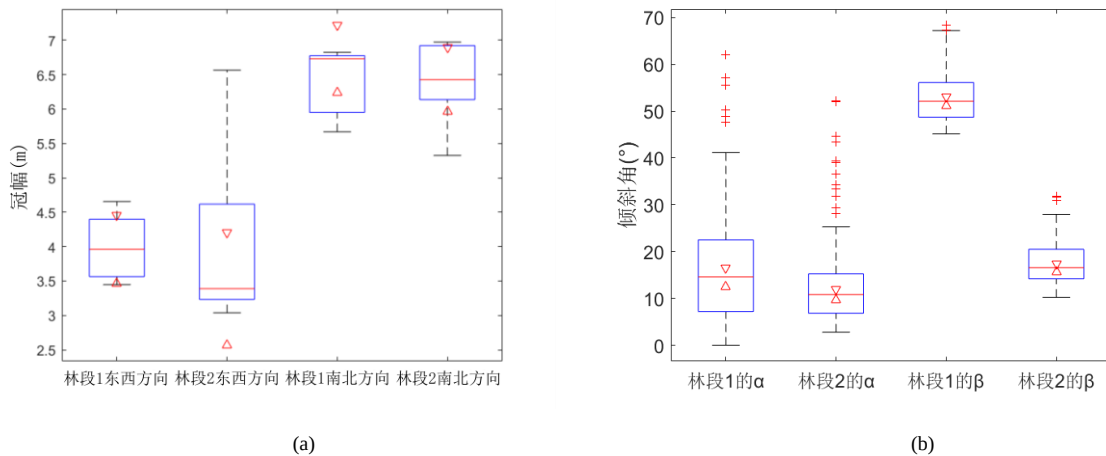


图 8. 不同种类橡胶树冠幅以及分枝与主枝夹角对比箱线图。(a) 两类橡胶树在不同方向上的冠幅对比箱线图。(b) 两类橡胶树(PR107 和 CATAS 7-20-59)的主枝干倾斜角 α 和分支与主枝干间的夹角 β 分布箱线图。

Fig.8. Box plots showing the comparison of canopy breaths and included angles between trunks and branches of two rubber tree clones in two forest plots. (a) Box plots illustrating the comparison between canopy breaths of two rubber tree clones in different directions. (b) Box plots illustrating the distributions of the tilt degree α of each trunk and the included angle β between each trunk and corresponding branch of two rubber tree clones (PR107 and CATAS 7-20-59), respectively.

其次分析树木叶密度对其抗风性能的影响, 本文从林段 1 和林段 2 中各选取 30 棵橡胶树, 分别求得其叶子点云数据分布的雷达图, 结果如图 9

所示, 其中每一个虚线标记的闭合区域代表对应单株树木的扫描点云在空间方向上的分布。由图发现, 两林段叶面点主要分布在东西方向上。当

风力方向如图所示时，由于林段 1 的平均冠积大于林段 2，且叶片点云数量高于林段 2，使得林段 1 的受风面积增加。由此可知相同台风侵害下，林

段 1 受风力侵害程度较林段 2 严重，即林段 1（PR107）中橡胶树比林段 2（CATAS 7-20-59）中橡胶树更易倒伏。

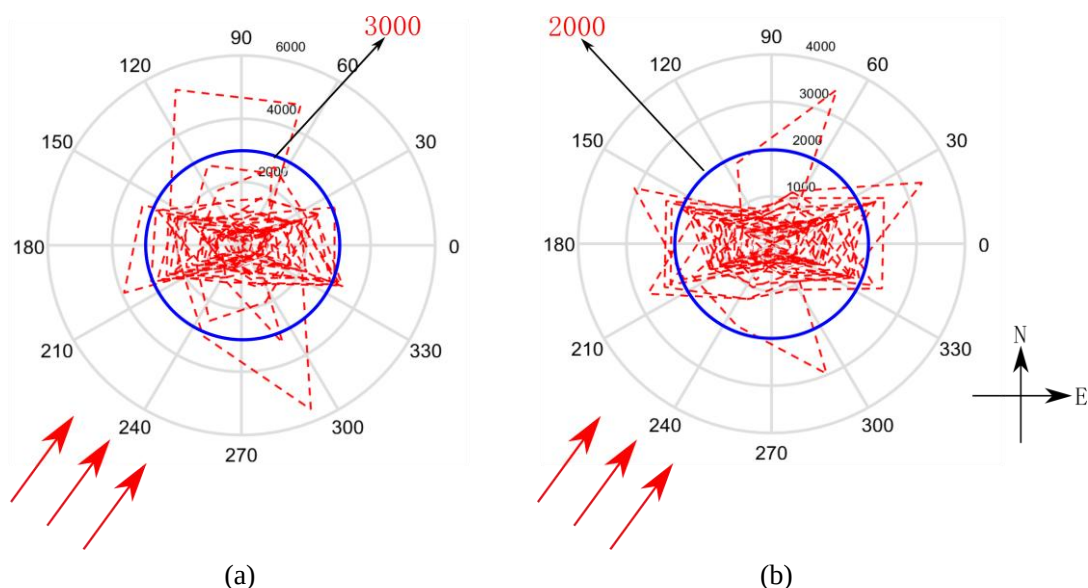
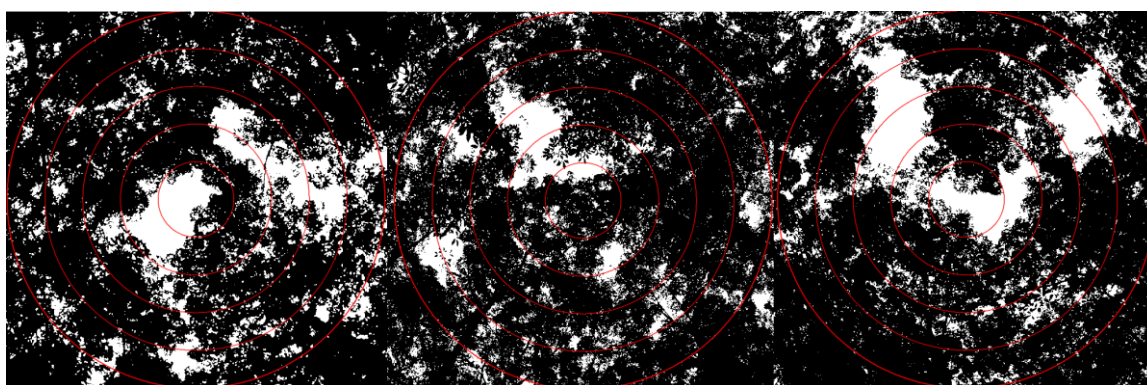


图 9 两林段中叶子点云数据空间分布雷达图。(a) 林段 1 (PR107)。(b) 林段 2 (CATAS 7-20-59)。

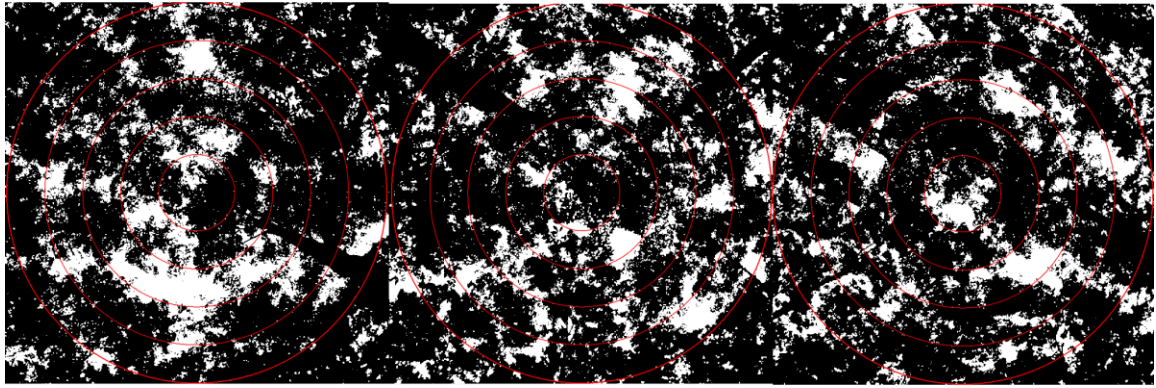
Fig.9. Radar charts showing the spatial distribution of leaf points of each rubber tree in two forest plots. (a) Rubber tree clone PR107 in forest plot 1. (b) Rubber tree clone CATAS 7-20-59 in forest plot 2.

最后，为验证不同林段叶密度比对结果，本文运用半球摄影获取两林段内的鱼目图像，在不同天顶角下计算并获取叶面积指数，结果如图 10 所示。图 10(c) 表明，林段 1 的叶面积指数都高

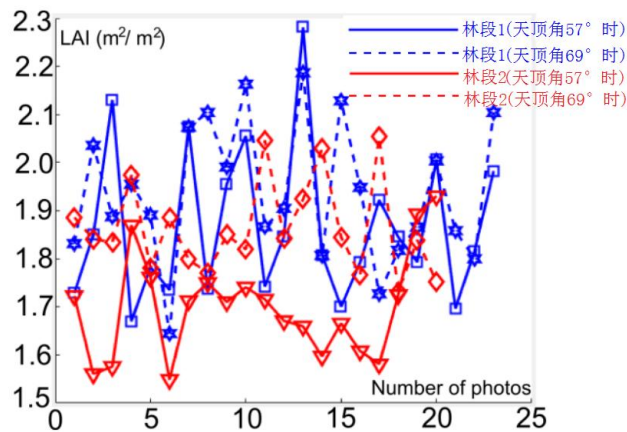
于林段 2 的叶面积指数。再结合其它树木指标，可以验证林段 1 受风力侵害程度比林段 2 要大，即林段 1 的橡胶树比林段 2 的橡胶树易倒伏。



(a)



(b)



(c)

图 10. 利用鱼目图像反演不同林段的叶面积指数。(a) 林段 1 抽取的三幅鱼目图(PR107)。(b) 林段 2 抽取的三幅鱼目图 (CATAS 7-20-59)。(c) 基于鱼目图像中不同环(代表不同天顶角)获取的叶面积指数。

Fig.10. Using the hemispherical photography to retrieve leaf area index of different forest plots. (a) Three hemisphere photos taken in the forest plot 1 (clone PR107). (b) Three hemisphere photos taken in the forest plot 2 (clone CATAS 7-20-59). (c) The retrieval leaf area index from different annulus sectors (representing different zenith angles) in the hemispherical photos.

4.3 林段内风力破坏定位

本文进一步对林段遭受风力破坏的区域进行定位,通过对林段 1 与林段 2 的叶面积密度分析,结合单株分离结果,将叶面积密度相对稀疏的橡胶树体标记为红色(如图 11 所示)。

通过图示发现,南北走向的风力遭受橡胶林阻遏后在红色区域进行突破,穿越橡胶林分并带来区域林分损伤。

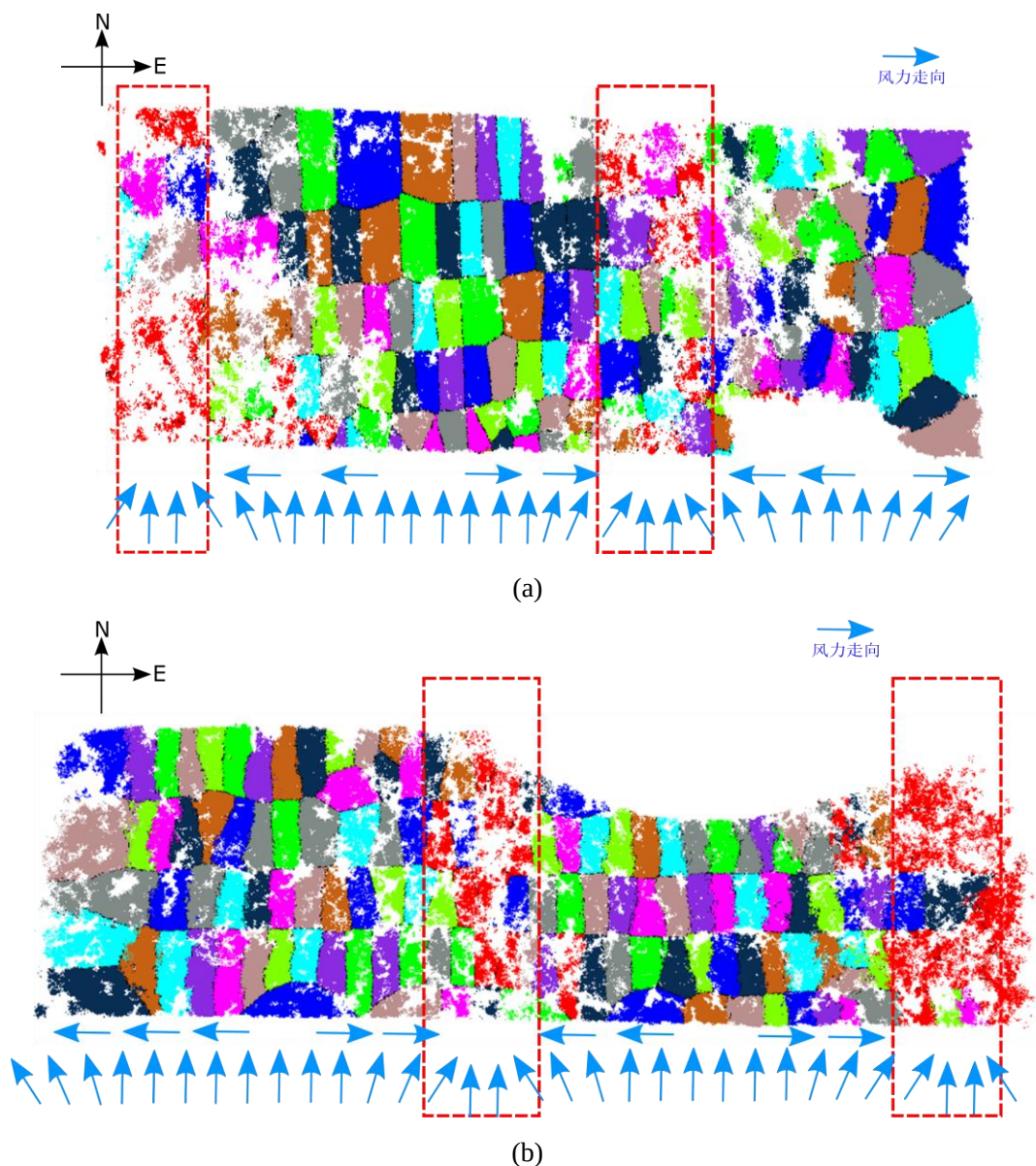


图 11. 基于点云数据计算叶面积密度以确定林段中受风力损伤的区域。(a) 林段 1 的分析结果图, 其中红色代表叶面积密度较低区域(台风导致)。(b) 林段 2 的结果图。

Fig.11. Calculating the leaf area density from the scanned points to locate the sections of partial or total defoliation in forest plots. (a) Top view of the analyzed result of forest plot 1, where red color represents the tree canopies with lower leaf area density (wind-induced). (b) Equivalent figure of forest plot 2.

5 总结

本文使用人背负移动 LiDAR, 采用自下而上的移动扫描方式获取两个橡胶林段点云数据, 并设计图形图像学算法实现对橡胶林段的单株提取与参数反演。通过对林段 1 (PR107) 和林段 2 (CATAS 7-20-59) 中橡胶树参数的对比分析发现, 其林木中的生理参数的不同导致林段 1 受风力侵害程度要大于林段 2, 也更易倒伏。

由于橡胶树树木高大、树冠郁闭度大、吸水能力强等特性, 使得其种植区域内的灌木与草本层植被生长受限, 林下缺乏中间的灌木层和地面植被。而这一生态特点也使得本文采用的地面移动激光扫描方式能够更加全面并无遮挡的获取到橡胶林木自下而上的点云数据。而对于林内中灌木层植被较为丰富的研究区域, 该扫描方式会受到遮挡影响并致使树木下部枝干区域扫描数据的缺失。同时, 本文后续工作将运用移动地基与机载 LiDAR 相结合的扫描方式, 开展更多品种橡胶

树林分参数的精准反演，为橡胶树的栽培种植与防风营造提供有效的理论依据。

致谢

本文感谢国家重点研发计划(2017YFD0600900),国家自然科学基金(31770591, 41701510),中国博士后面基金(2016M601823),江苏高校优势学科建设工程资助项目对本研究的资助。

References

- [1] 丰明博, 牛铮, and 孙刚, *多波段激光雷达植被光谱分析*. 光谱学与光谱分析, 2017. **37**(6): p. 1809-1813.
- [2] Huang, H., W. Qin, and Q. Liu, *RAPID: A Radiosity Applicable to Porous Individual Objects for directional reflectance over complex vegetated scenes*. Remote Sensing of Environment, 2013. **132**: p. 221-237.
- [3] 徐伟恒, 冯仲科, 苏志芳, et al., *一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法*. 光谱学与光谱分析, 2014(02): p. 465-471.
- [4] Ardila, J.P., W. Bijker, V.A. Tolpekin, et al., *Context-sensitive extraction of tree crown objects in urban areas using VHR satellite images*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012. **15**: p. 57-69.
- [5] Karlson, M., M. Ostwald, H. Reese, et al., *Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery for mapping West African agroforestry tree species*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016. **50**: p. 80-88.
- [6] Halperin, J., V. Lemay, N. Coops, et al., *Canopy cover estimation in miombo woodlands of Zambia: Comparison of Landsat 8 OLI versus RapidEye imagery using parametric, nonparametric, and semiparametric methods*. Remote Sensing of Environment, 2016. **179**: p. 170-182.
- [7] Cartus, O., J. Kelldorfer, M. Rombach, et al., *Mapping Canopy Height and Growing Stock Volume Using Airborne Lidar, ALOS PALSAR and Landsat ETM+*. Remote Sensing, 2012. **4**(12): p. 3320-3345.
- [8] Castillo, J.A.A., A.A. Apan, T.N. Maraseni, et al., *Estimation and mapping of above-ground biomass of mangrove forests and their replacement land uses in the Philippines using Sentinel imagery*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017. **134**: p. 70-85.
- [9] Ploton, P., N. Barbier, P. Couteron, et al., *Toward a general tropical forest biomass prediction model from very high resolution optical satellite images*. Remote Sensing of Environment, 2017. **200**: p. 140-153.
- [10] Kukunda, C.B., J. Duque-Lazo, E. González-Ferreiro, et al., *Ensemble classification of individual Pinus crowns from multispectral satellite imagery and airborne LiDAR*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018. **65**: p. 12-23.
- [11] Wu, B., B. Yu, Q. Wu, et al., *Individual tree crown delineation using localized contour tree method and airborne lidar data in coniferous forests*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016. **52**: p. 82-94.
- [12] Recio, J.A., T. Hermosilla, L.A. Ruiz, et al., *Automated extraction of tree and plot-based parameters in citrus orchards from aerial images*. Computers and Electronics in Agriculture, 2013. **90**: p. 24-34.
- [13] Marselis, S.M., M. Yebra, T. Jovanovic, et al., *Deriving comprehensive forest structure information from mobile laser scanning observations using automated point cloud classification*. Environmental Modelling & Software, 2016. **82**: p. 142-151.
- [14] Yun, T., F. An, W. Li, et al., *A Novel Approach for Retrieving Tree Leaf Area from Ground-Based LiDAR*. Remote Sensing, 2016. **8**(11): p. 942.
- [15] Schäfer, E., J. Heiskanen, V. Heikinheimo, et al., *Mapping tree species diversity of a tropical montane forest by unsupervised clustering of airborne imaging spectroscopy data*. Ecological indicators, 2016. **64**: p. 49-58.

- [16] Shimizu, T., *Angle measuring method and angle measuring system*. 2017, Google Patents.
- [17] Behera, S.K., M.D. Behera, and R. Tuli, *An indirect method of estimating leaf area index in a tropical deciduous forest of India*. *Ecological Indicators*, 2015. **58**: p. 356-364.
- [18] Chen, B., Z. Wu, J. Wang, et al., *Spatio-temporal prediction of leaf area index of rubber plantation using HJ-1A/1B CCD images and recurrent neural network*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015. **102**: p. 148-160.
- [19] Pierzchała, M., P. Giguère, and R. Astrup, *Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018. **145**: p. 217-225.
- [20] Jing, L., B. Hu, T. Noland, et al., *An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012. **70**: p. 88-98.
- [21] Hu, B., J. Li, L. Jing, et al., *Improving the efficiency and accuracy of individual tree crown delineation from high-density LiDAR data*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014. **26**: p. 145-155.
- [22] Cheein, F.A.A. and J. Guivant, *SLAM-based incremental convex hull processing approach for treetop volume estimation*. *Computers and electronics in agriculture*, 2014. **102**: p. 19-30.

Using mobile laser scanning for quantitative assessment of rubber tree parameters in relation to wind damage occurrence

Yun Ting^{1,3}, Zhang Yan-xia^{1,†}, Wang Jia-min^{1,†}, Hu Chun-hua¹, Chen Bang-qian², Xue Lian-feng^{1*}, Chen Fan-di¹

1. College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. Rubber Research Institute / Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops of Ministry of Agriculture, CATAS, Hainan 571737, China

3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

* Correspondence: College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University; 210037;

xuelianfeng@njfu.edu.cn; Tel.: 136-0158-0372

† These authors contributed equally to this work.

Abstract The light detection and ranging (LiDAR) technique, which has the advantages of high efficiency and high accuracy in forest survey and is superior to the traditional information acquisition methods, can be used to quickly obtain high-resolution mapping of morphological structures of forest. In this paper, two rubber forest plots (forest plot 1, clone PR107; forest plot 2, clone CATAS7-20-59) are taken as the study subjects, which are under the long-term impact of wind-induced disturbance severity and located in Danzhou city, the largest rubber production base of Hainan Island, China. First, point cloud of the forest plots through man-loaded mobile LiDAR was collected and Ruili entropy method was designed to process the scanned data for calculating the slope angle of tree trunk (typhoon-induced) in order to find the canopy centre of each tree. Second, after the vertical projection of scanned forest points, Watershed and Mean shift algorithm were adopted to realize individual tree canopy delineation. Finally, many tree parameters, such as crown breadth, Diameter at Breast Height (DBH), crown volume, leaf area density, leaf distribution and included angle between trunk and main branches, were deduced automatically for analyzing the impact of typhoon disturbance on the two forest plots. Overall parameters obtained from our methods were compared with manual field measurements. The calculated average crown diameter in west-east direction of rubber trees in forest plot 1 and plot 2 using our method were 3.95 m and 3.73 m, respectively, with false rate of 1.74 % for forest plot 1 and 6.27 % for plot 2. The calculated average crown diameter in north-south direction of rubber trees in forest plot 1 and plot 2 using our method were

6.47 m and 6.51 m, respectively, with false rate of 4.02 % for forest plot 1 and 2.54 % for plot 2. The calculated average diameter at breast height (DBH) for forest plot 1 and plot 2 using our method were 5.20 cm and 4.73 cm, respectively, with false rate of 2.44 % for forest plot 1 and 0.64 % for plot 2. The calculated average crown volume for forest plot 1 and plot 2 using our method were 168.01 m³ and 141.80 m³, respectively, with false rate of 0.67 % for forest plot 1 and 0.85 % for plot 2. The calculated average inclination angle of rubber trunk for forest plot 1 and plot 2 using our method were 18.80 ° and 13.11 °, respectively, with false rate of 5.53 % for forest plot 1 and 7.09 % for plot 2. The calculated average included angle between trunk and branch for forest plot 1 ranged from 45.21 ° to 69.23 °, and the calculated average included angle between trunk and branch for forest plot 2 ranged from 10.63 ° to 32.14 °. The difference in the included angles of two forest plots is nearly 62.63 %. Meanwhile, the leaf area index (LAI) of forest plot 1 derived from hemispherical photos of various zenith angles is generally higher than forest plot 2. Compared with the in-situ measurements, the forest parameters from the subsample (scanned data of 150 trees per forest plot) are accurately retrieved using our method with a deviation of less than 8 %. A variety of disturbance, such as the perspective occlusion caused by closed forest canopies, the error produced by multi-scan registration, vegetative elements moved by wind during the scanning process, beam divergence and scanning range constraint of the scanner, hampers the accurate scanned data acquisition and generates computer errors in the algorithm. Meanwhile, the included angle between trunks and branches, canopy volume and leaf area index of rubber tree clone PR107 (in forest plot 1) are overall higher than the parameters of rubber tree clone CATAS7-20-59 (in forest plot 2), resulting in the existence of higher vulnerability of clone PR107 than clone CATAS7-20-59 when wind damage propagation occurs in the forest plots. Thus, our research can be used to study the effect of wind disturbance on different forest plots and to quantify ecological instability of the forest in response to wind excitation. Our method makes a contribution to solve the problem of tree canopy delineation and forest parameter retrieval using man-loaded laser scanning technique, showing promise for further exploration of utilizing mobile terrestrial LiDAR as an effective tool for the applications in forest survey.

Keywords: Light detection and ranging (LiDAR); Individual tree canopy delineation; forest parameter retrieval; wind damage.