



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110221311 B

(45) 授权公告日 2022.01.07

(21) 申请号 201910502793.X

G01C 11/06 (2006.01)

(22) 申请日 2019.06.11

G01C 5/00 (2006.01)

G06T 17/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 110221311 A

(43) 申请公布日 2019.09.10

(73) 专利权人 南京林业大学

地址 210037 江苏省南京市玄武区龙蟠路  
159号

(72) 发明人 田佳榕 徐雁南 代婷婷

(74) 专利代理机构 南京申云知识产权代理事务  
所(普通合伙) 32274

代理人 邱兴天 田沛沛

(56) 对比文件

CN 108594262 A, 2018.09.28

CN 108198190 A, 2018.06.22

CN 109492563 A, 2019.03.19

CN 107832681 A, 2018.03.23

KR 101606516 B1, 2016.03.28

李广伟. 基于船载LiDAR的湖沿岸植被参数  
估测.《中国优秀博硕士学位论文全文数据库(硕  
士)信息科技辑》.2012,第20-42页.

张吴明等. 联合地基激光雷达与无人机摄影  
测量技术提取树高研究.《北京师范大学学报(自  
然科学版)》.2018,第764-771页.

审查员 王超

(51) Int. Cl.

G01S 17/86 (2020.01)

G01S 17/89 (2020.01)

G01S 7/48 (2006.01)

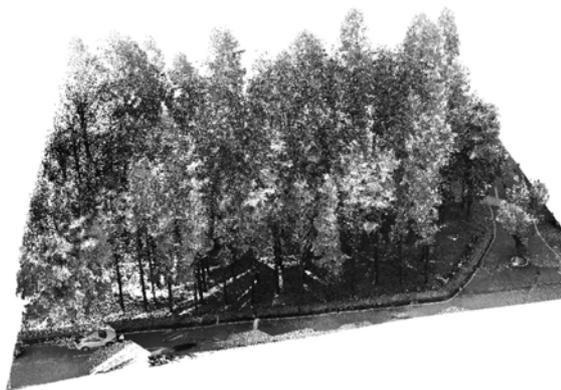
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高  
的方法

(57) 摘要

本发明公开一种基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,利用无人机摄影测量点云数据和地面精准点云数据,提取单木的最高点和最低点,通过单木定位坐标和自动识别最高点信息,将判别最高点和定位点投影于xoy平面,评判识别准确性,快速提取树高值。节省成本,提高效率,而且在提升树高的提取精度基础上取代了部分人工调查,减少了大量人力物力消耗。试验结果表明,通过本发明提出的树高提取方法对水杉人工林树高估计,取得了较高的精度,树高提取值整体更趋近于实测真实值;而本发明方法也为中小型林场的森林资源评估及经营规划作出有效建议。



1. 一种基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:利用无人机摄影测量数据和地面精准点云数据,提取单木的最高点和最低点,通过单木定位坐标和自动识别最高点信息,将判别最高点和定位点投影于xoy平面,评判识别准确性,快速提取树高值;具体包括以下步骤:

(1) 采用地基激光雷达扫描仪获取待检测区域内的LiDAR点云数据,传感器记录完整的激光脉冲返回波形信息、三维点云坐标信息和摄影图片信息;

(2) 采用无人机拍摄获取待检测区域的二维影像数据;

(3) 采用RTK测量系统对地面控制点进行精准测量,获取地面控制点的定位坐标;

(4) 对无人机采集到的二维影像进行处理,得到无人机摄影测量点云数据,通过地面控制点对无人机点云数据进行配准,得到绝对坐标;对二维影像进行处理的步骤包括:

(41) 对齐照片,通过相邻影像之间的特征点进行匹配,并经过图像的不断重复迭代;

(42) 相机优化校准,选择特定优化参数,对图像因相机定点拍摄时坐标偏差等因素造成的误差进行校正;

(43) 生成密集点云,通过运动恢复结构算法和多视立体视觉算法,依据不同研究需要生成具有相对参考坐标和相应密度要求的三维重建点云;

(5) 利用地面控制点,将LiDAR点云数据和无人机摄影测量点云数据进行拼接,得到混合点云数据;

(6) 对混合点云数据进行预处理,得到单木定点坐标和冠层高度模型;

(7) 通过冠层高度模型结合单木定点坐标得到单木树高值H1,通过对冠层高度模型进行局部最大值滤波得到种子点信息,需要确定搜索窗口大小和高度阈值,根据定位点和种子点投影距离D,通过确定距离阈值判断准确性,只有在阈值内的种子点提取的树高才具有准确性,进而提取树高值H2。

2. 根据权利要求1所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:采用AgisoftPhotoScan摄影测量影像处理软件对二维影像进行处理。

3. 根据权利要求1所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:步骤(5)中,将LiDAR点云数据和无人机摄影测量点云数据进行拼接时,选择地基激光雷达TLS数据为标准坐标系,通过旋转和平移无人机摄影测量的整体点云,使明显同名物轮廓相互吻合;采用地面控制点进行高精度配准,提取TLS数据中地面控制点位置的三维坐标,用于对无人机点云进行坐标变换。

4. 根据权利要求1所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:步骤(6)中,对混合点云数据进行预处理包括以下步骤:

(1) 通过统计滤波移除噪点和离群点,统计滤波对所有点进行统计分析,计算每个点和其相邻点之间的平均距离,如果距离不在标准范围内,就会被视为噪点而被移除,假设得到的结果是一个高斯分布,其形状是由均值和标准差决定,那么平均距离在标准范围之外的点,可以被定义为离群点并从数据中去除;

(2) 基于渐进三角网加密的滤波方法对地面点和非地面点进行分离,渐进三角网加密的滤波方法PTD通过形态学开运算得到初始地面种子点,再利用平面拟合移除残差值较大的种子点,通过剩余的地面种子点构建三角网并进行加密得到最终地面点;

(3) 将地面点和去噪后的数据点分别按照TIN插值法得到两种分辨率的数字高程模型

和数字表面模型,两者相减得到相同分辨率的冠层高度模型;

(4) 通过数字高程模型对点云数据进行归一化处理后,按高度提取1.2m到1.4m的范围,使用平均胸径大小的栅格去自动识别树干位置,取栅格中心坐标为树干坐标。

5. 根据权利要求4所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:采用LiDAR 360点云处理软件对混合点云数据进行预处理。

6. 根据权利要求1所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:所述地基激光雷达扫描仪为Riegl VZ-400i LiDAR传感器;所述无人机为大疆多旋翼无人机Phantom4 PRO,所述无人机拍摄的地面分辨率为2.15cm/pix,航向重叠率为90%。

7. 根据权利要求1所述的基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,其特征在于:所述RTK测量系统为中海达iRTK2智能RTK系统。

## 基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于森林资源动态监测技术领域,具体涉及一种基于地基激光雷达和无人机航空摄影自动化提取高郁闭林分树高的方法。

### 背景技术

[0002] 随着市场经济的发展,大多数中小型林场对林木资产价值的精准定量评估存在诸多技术问题,无法以确切的资产价值进行出让或者联营开发,不能产生相应的收益,也达不到资产的保值增值目标。对于森林资源的可持续经营而言,树高是反映材积和立地质量的重要参数,也是定量估算森林蓄积量、地上生物量乃至森林资源资产评估的必要信息。传统的树高测量主要是依赖林业工作者在野外采用测高仪器进行测量,但其工作量大、速度慢、耗费巨大的人力物力。光学遥感因不能直接获取森林的冠层垂直结构信息,在估算森林高度上精度有限,难以满足需求。而且对于高郁闭度的人工林,由于大面积的遮挡问题,上述两种方法对于这类森林的树高测量误差更大。激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)和无人机(unmanned aerial vehicle,UAV)近年来在森林植被结构参数提取方面发展迅速,尤其对植被垂直结构参数的获取具有一定的优势,其精度可达到亚米级。

[0003] 地基激光雷达(TLS)可以获取精细的森林垂直结构,尤其是林冠下层垂直结构,在高精度的数字高程模型的获取有着独特优势。但由于森林地形和设备本身垂直扫描角度的限制,加上激光束方向上的其他物体(如树木、树枝、灌木丛等)的遮挡作用,TLS很难获取到上层树冠和树梢的信息,因此对于树高参数的提取精度不高。Moska在《Remote sensing》2011年第4卷发表了“Retrieving forest inventory variables with terrestrial laser scanning(TLS) in urban heterogeneous forest”,通过城市森林中的单扫描TLS数据测量树高,树高估计的RMSE在树水平上为0.75m,Seidel等在《Agricultural and forest meteorology》2012年第154-155卷中发表了“Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning:A comparison with hemispherical photography”利用TLS数据对种植密度稀疏的林地进行观测,提取的树高值普遍存在低估现象。

[0004] 根据点云数据进行树高测定是使用相关雷达数据产品的研究人员所熟知的手段,结合ALS(机载激光雷达)和TLS(地基激光雷达)观测,使用TLS点云标定树的位置,结合ALS提供的树冠顶层信息,两者配准后进行树高测量的研究方法也有人研究过。但由于其相对高昂的设备和配套搭载设备成本、作业安全问题以及较高的操作人员技术要求,ALS在大多中小型林场都没有推广。

### 发明内容

[0005] 发明目的:针对现有技术存在的不足,解决通过单一的地面或航空遥感测量对高郁闭林分树高提取精度偏低的问题,本发明的目的是提供一种基于地基激光雷达和无人机摄影测量自动化提取高郁闭林分树高的方法,用于在不进行单木分割的情况下,对树高进行高效率高精度提取,减少地面人工测量,降低成本。

[0006] 技术方案:为了实现上述发明目的,本发明采用的技术方案如下:

[0007] 一种基于TLS和UAV自动化提取高郁闭林分树高的方法,利用无人机摄影测量数据和地面精准点云数据,将提取树高的问题简单化,提取单木的最高点和最低点,通过单木定位坐标和自动识别最高点信息,将判别最高点和定位点投影于xoy平面,评判识别准确性,快速提取树高值。具体包括以下步骤:

[0008] (1) 采用地基激光雷达扫描仪获取待检测区域内的LiDAR点云数据,传感器记录完整的激光脉冲返回波形信息、三维点云坐标信息和摄影图片信息;

[0009] (2) 采用无人机拍摄获取待检测区域的二维影像数据;

[0010] (3) 采用RTK测量系统对地面控制点进行精准测量,获取地面控制点的定位坐标;

[0011] (4) 对无人机采集到的二维影像进行处理,得到无人机摄影测量点云数据,通过地面控制点对无人机点云数据进行配准,得到绝对坐标;

[0012] (5) 利用地面控制点,将LiDAR点云数据和无人机摄影测量点云数据进行拼接,得到混合点云数据;

[0013] (6) 对混合点云数据进行预处理,得到单木定点坐标和冠层高度模型(CHM);

[0014] (7) 通过冠层高度模型(CHM)结合单木定点坐标得到单木树高值H1,通过对冠层高度模型(CHM)进行局部最大值滤波得到种子点信息,根据定位点和种子点投影距离D,判断准确性,进而提取树高值H2。

[0015] 进一步地,步骤(4)中,对二维影像进行处理的步骤包括:

[0016] (1) 对齐照片,通过相邻影像之间的特征点进行匹配,并经过图像的不断重复迭代;

[0017] (2) 相机优化校准,选择特定优化参数,对图像因相机定点拍摄时坐标偏差等因素造成的误差进行校正;

[0018] (3) 生成密集点云,通过运动恢复结构算法和多视立体视觉算法,依据不同研究需要生成具有相对参考坐标和相应密度要求的三维重建点云。

[0019] 进一步地,采用AgisoftPhotoScan摄影测量影像处理软件对二维影像进行处理。

[0020] 进一步地,步骤(5)中,将LiDAR点云数据和无人机摄影测量点云数据进行拼接时,选择TLS数据为标准坐标系,通过旋转和平移无人机摄影测量的整体点云,使明显同名物轮廓相互吻合;采用地面控制点进行高精度配准,提取TLS数据中地面控制点位置的三维坐标,用于对无人机点云进行坐标变换得到拼接后的精准点云。

[0021] 进一步地,步骤(6)中,对混合点云数据进行预处理包括以下步骤:

[0022] (1) 通过统计滤波(SOR)移除噪点和离群点,统计滤波对所有点进行统计分析,计算每个点和其相邻点之间的平均距离,如果距离不在标准范围内,就会被视为噪点而被移除,假设得到的结果是一个高斯分布,其形状是由均值和标准差决定,那么平均距离在标准范围之外的点,可以被定义为离群点并从数据中去除;

[0023] (2) 基于渐进三角网加密的滤波方法(PTD)对地面点和非地面点进行分离,渐进三角网加密的滤波方法(PTD)通过形态学开运算得到初始地面种子点,再利用平面拟合移除残差值较大的种子点,通过剩余的地面种子点构建三角网并进行加密得到最终地面点;

[0024] (3) 将地面点和去噪后的数据点分别按照TIN插值法得到两种分辨率的数字高程模型(DEM)和数字表面模型(DSM),两者相减得到相同分辨率的冠层高度模型CHM;

[0025] (4)通过数字高程模型(DEM)对点云数据进行归一化处理,按高度提取1.2m到1.4m的范围,使用平均胸径大小的栅格去自动识别树干位置,取栅格中心坐标为树干坐标。

[0026] 进一步地,采用LiDAR 360点云处理软件对混合点云数据进行预处理。

[0027] 进一步地,步骤(7)中,通过对冠层高度模型(CHM)进行局部最大值滤波得到种子点信息,需要确定搜索窗口大小和高度阈值,根据定位点和种子点投影距离D,通过确定距离阈值判断,只有在阈值内的种子点提取的树高才具有准确性。

[0028] 进一步地,所述地基激光雷达扫描仪为Riegl VZ-400i LiDAR传感器;所述无人机为大疆多旋翼无人机Phantom4PRO,所述无人机拍摄的地面分辨率为2.15cm/pix,航向重叠率为90%。

[0029] 进一步地,所述RTK测量系统为中海达iRTK2智能RTK系统。

[0030] 有益效果:与现有技术相比,本发明具有以下优点:

[0031] 本发明通过地基激光雷达和无人机航空摄影结合(TLS-UAV)提取高郁闭度林分单木树高信息,该数据体现在数据较为新颖,数据获取较为便利。通过单木定位坐标获取树高和冠层高度模型提取种子点信息而获取树高相结合的方法达到高效精确提取树高的目的。

[0032] 本发明用无人机摄影点云的便利性取代机载激光雷达点云数据,节省成本,提高效率,而且在提升树高的提取精度基础上取代了部分人工调查,减少了大量人力物力消耗。试验结果表明,通过本发明提出的树高提取方法对水杉人工林树高估计,取得了较高的精度,树高提取值整体更趋近于实测真实值;而本发明方法也为中小型国有林场的森林资源评估及经营规划作出有效建议。

## 附图说明

[0033] 图1为地基激光雷达扫描点云图;

[0034] 图2为无人机摄影点云图;

[0035] 图3为地基激光雷达-无人机摄影点云配准后图像;

[0036] 图4为无人机轨道飞行示意图;

[0037] 图5为单木定位坐标识别示意图;

[0038] 图6为种子点和定位点投影距离判断示意图;

[0039] 图7是采用单木定位坐标提取树高法;

[0040] 图8是两种方法和实测树高进行精度回归模型图。

## 具体实施方式

[0041] 下面结合具体实施例,进一步阐明本发明,实施例在以本发明技术方案为前提下进行实施,应理解这些实施例仅用于说明本发明而不用于限制本发明的范围。

[0042] 本实施例的样地位于南京市南京林业大学东门区域。南京市地处长江中下游,位于中国江苏省西南部,(31°14'~32°37'N,118°22'~119°14'E)。南京市林木覆盖率达26.4%,属于北亚热带湿润气候,全年平均气温15.4℃,年平均降雨量为1106mm。样地内研究树种为水杉(*Metasequoia glyptostrodoides*),水杉的干形挺直,属于裸子植物柏科。

[0043] 具体步骤如下:

[0044] (1)采用地基激光雷达扫描仪获取待检测区域内的LiDAR点云数据,传感器记录完

整的激光脉冲返回波形信息、三维点云坐标信息和摄影图片信息 (RGB), 为保证站点间的重叠度, 在样地四个角上均设置2-3站, 四边等间距分布站点, 共设置测站数量22个, 地基激光雷达扫描点云图, 如图1, 地基激光雷达扫描仪为Riegl VZ-400i LiDAR传感器。

[0045] (2) 采用大疆多旋翼无人机Phantom4PRO获取待检测区域高分辨率二维影像数据, 采用的是Pix4D capture飞行前端控制软件, 软件具有2D影像拼接所需的正射航线规划以及3D模型所需的倾斜摄影航线规划功能。本实施例采用双轨道飞行模式 (如图4所示) 大幅度提高图像质量和点云密度, 第一轨道设定飞行高度90m, 重叠度90%, 飞行区域为100×100m, 飞行时间为14min26s, 第二轨道保持相同的飞行高度和重叠度, 飞行区域改为50×50m, 飞行时间为4min4s, 样地飞行总时间为18min30s, 获取无人机影像125张。

[0046] (3) 采用中海达iRTK2智能RTK测量系统对4个地面控制点进行精准测量, 获取地面控制点的定位坐标;

[0047] (4) 对无人机采集到的二维影像进行处理, 得到无人机摄影测量点云数据; 使用Agisoft PhotoScan摄影测量影像处理软件进行二维影像的处理, 处理过程包括: 对齐照片, 通过相邻影像之间的特征点进行匹配, 并经过图像的不断重复迭代, 得到64209个连测点和地面分辨率为2.2cm/pix的拼接图像; 相机优化校准, 选择特定优化参数, 对图像因相机定点拍摄时坐标偏差等因素造成的误差进行校正; 生成密集点云, 通过运动恢复结构算法和多视立体视觉算法, 依据不同研究需要生成具有相对参考坐标和相应密度要求的三维重建点云, 无人机点云数据如图2所示;

[0048] (5) 将LiDAR点云数据和无人机摄影测量点云数据进行拼接, 得到的混合点云数据; 两种数据的拼接处理遵循先粗后精的原则, 选择地基激光雷达 (TLS) 数据为标准坐标系, 通过旋转和平移无人机 (UAV) 摄影测量的整体点云, 达到明显同名物 (建筑, 马路标志牌等) 轮廓相互吻合的效果。高精度配准需要提取TLS数据中地面控制点位置的三维坐标, 用于对无人机点云进行坐标变换。拼接得到混合点云如图3所示;

[0049] (6) 对混合点云数据在LiDAR 360中进行预处理, 得到单木定点坐标和冠层高度模型 (CHM)。预处理的具体过程包括: 通过统计滤波 (SOR) 移除噪点和离群点, 统计滤波对所有点进行统计分析, 计算每个点和其相邻点之间的平均距离, 如果距离不在标准范围 (根据均值和标准差来衡量该标准范围) 内, 就会被视为噪点而被移除; 假设得到的结果是一个高斯分布, 其形状是由均值和标准差决定, 那么平均距离在标准范围之外的点, 可以被定义为离群点并从数据中去除;

[0050] 接着, 基于渐进三角网加密的滤波方法 (PTD) 对地面点和非地面点进行分离。渐进三角网加密的滤波方法 (PTD) 通过形态学开运算得到初始地面种子点, 再利用平面拟合移除残差值较大的种子点, 通过剩余的地面种子点构建三角网并进行加密得到最终地面点;

[0051] 然后, 将地面点和去噪后的数据点分别按照TIN插值法得到两种分辨率的数字高程模型 (DEM) 和数字表面模型 (DSM), 两者相减得到相同分辨率的冠层高度模型 (CHM), 其分辨率设置为0.2m。通过数字高程模型 (DEM) 对点云数据进行归一化处理后, 按高度提取1.2m到1.4m的范围, 使用平均胸径大小的栅格去自动识别树干位置, 取栅格中心坐标为树干坐标, 如图5所示。

[0052] (7) 通过单木定点坐标在冠层高度模型 (CHM) 中提取树高的方法在软件ArcGIS中实现, 方法如图7所示, 通过对冠层高度模型 (CHM) 进行局部最大值滤波得到种子点信息, 需

要确定搜索窗口大小和高度阈值,根据定位点和种子点投影距离 $D$ ,通过确定距离阈值判断,只有在阈值内的种子点提取的树高才具有准确性,方法如图6所示。

[0053] 对0.2m和0.1m分辨率的冠层高度模型(CHM)栅格数据进行树高定位坐标法的树高提取,结合样地实际测量树高拟合散点图并进行回归模型的精度精度分析如图8。通过0.2m和0.1m分辨率的冠层高度模型(CHM)提取的树高的 $R^2$ 值分别为0.849和0.895,说明冠层高度模型(CHM)分辨率的提高对于树高提取的精度有一定的增加。根据冠层高度模型(CHM)识别的种子点通过距离匹配后,共得到79个与ITL(单木定位坐标)匹配的种子点,对CSP(冠层高度模型种子点)得到的树高值和实测值进行精度分析(图8), $R^2$ 高达0.981,说明通过该方法提取树高值的精度极高。

[0054] 本发明将无人机摄影点云与地基激光雷达获取的点云结合,一方面节省了获取森林表层结构的费用,另一方面能够获取精细的森林垂直结构,二者结合,提高了郁闭度较高的高大乔木林的森林结构参数信息提取精度,这对于林业调查和森林资源动态监测有重要的意义。而对于中小型人工林林场,结合UAV和TLS设备对林场资源调查具有极大的便利性。除了大规模工业作业和自然灾害,林场地形在长时间不会发生变化,因此,可以采用地基对林场地形进行全覆盖扫描,得到林场整体的高精度数字高程模型DEM和单木定位坐标,按照区域-小班-ID号的顺序建立资源信息库,然后每年进行无人机的拍摄,树高提取优先采用种子点信息提取匹配正确的单木树高,再采取单木定位法提取剩余树木的树高值。这样就可以对林场资源进行连年动态监测。

[0055] 本发明用无人机进行森林完整冠层信息的获取,无人机凭借其飞行成本低,分辨率高和获取影像机动性高等优势,成为地面测量在航空摄影测量的有效补充。无人机摄影测量一般是通过高重叠率图像的自动匹配处理算法,自动结算图像各方位元素和计算机视觉等图像三维重建技术,形成的三维点云,其一般无法与TLS点云在几何质量上竞争,但是通过地面控制点、参考影像和地形特征的几何校正,能够达到亚米级的精度,通过对地面控制点和航迹曲线匹配对图像重建点云进行几何校正,定位的精度达到0.4~1.4m。

[0056] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

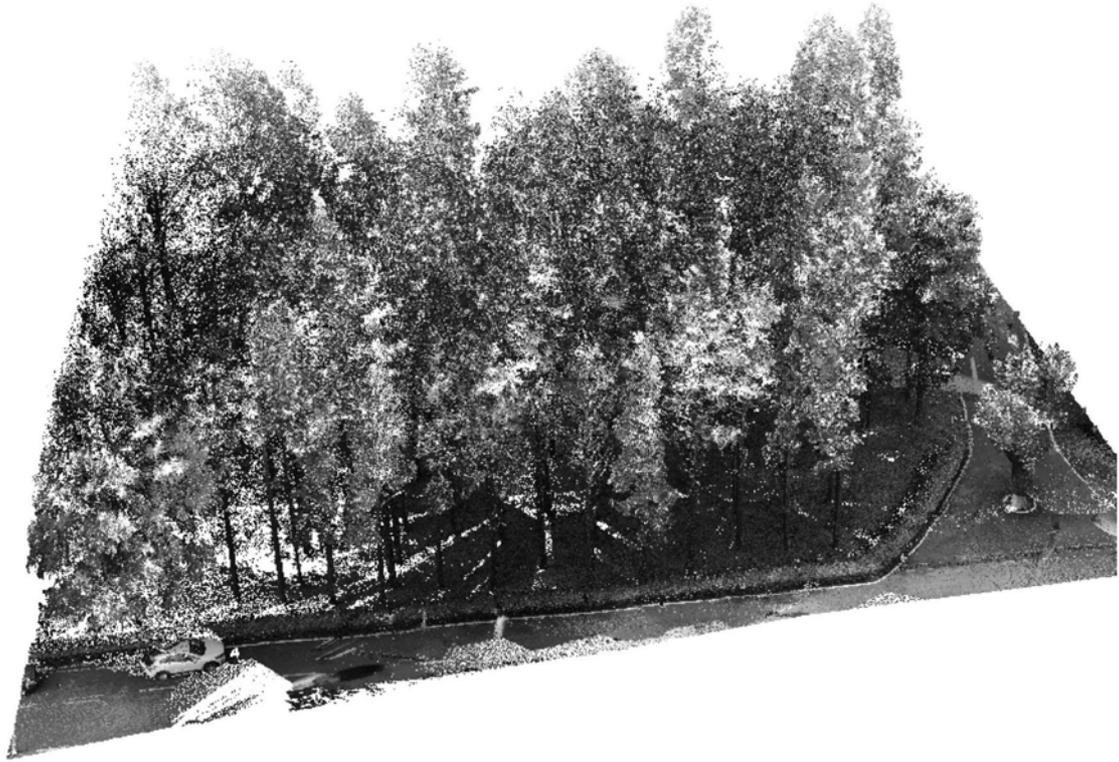


图1



图2



图3



图4

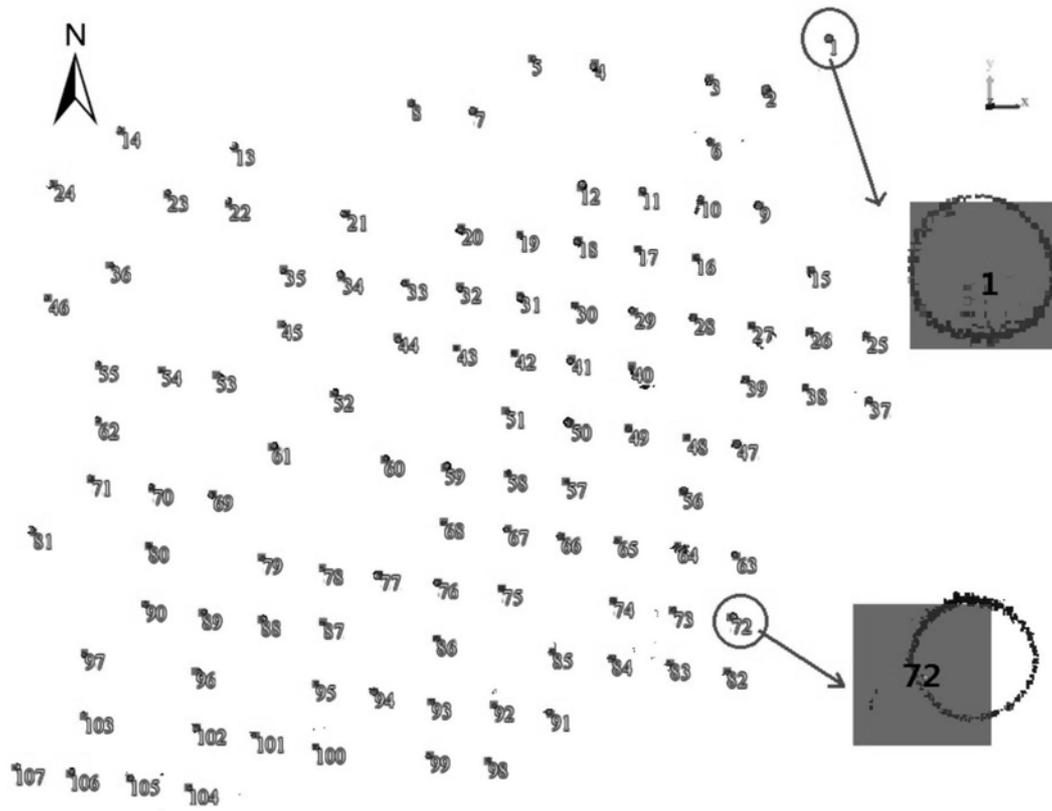


图5

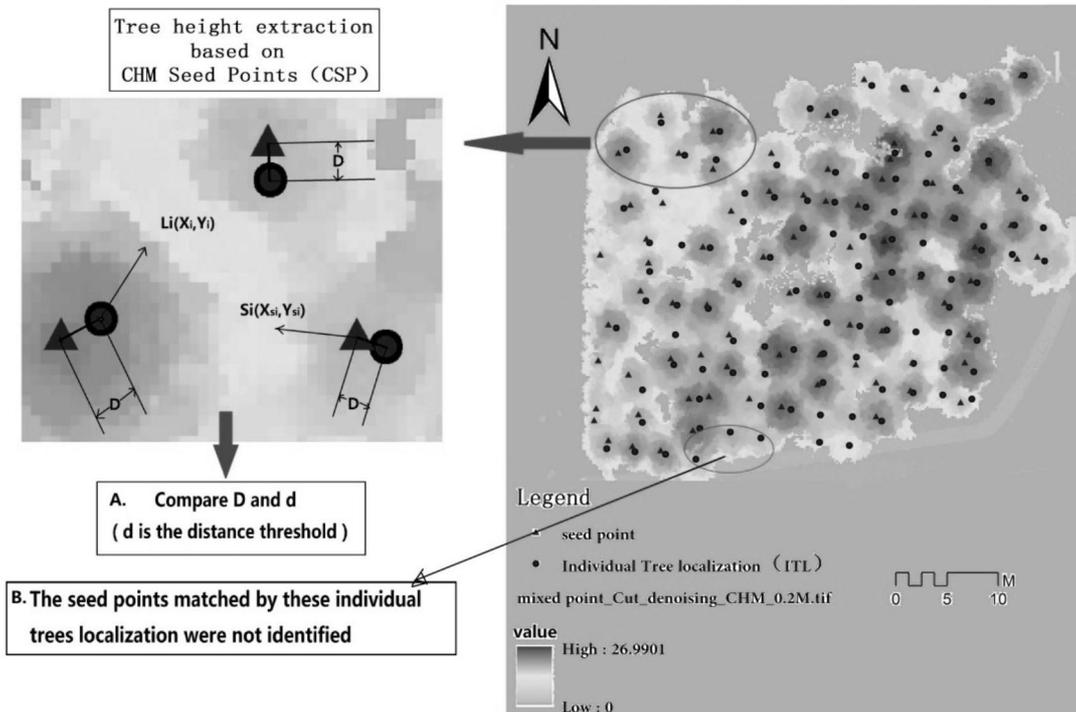


图6

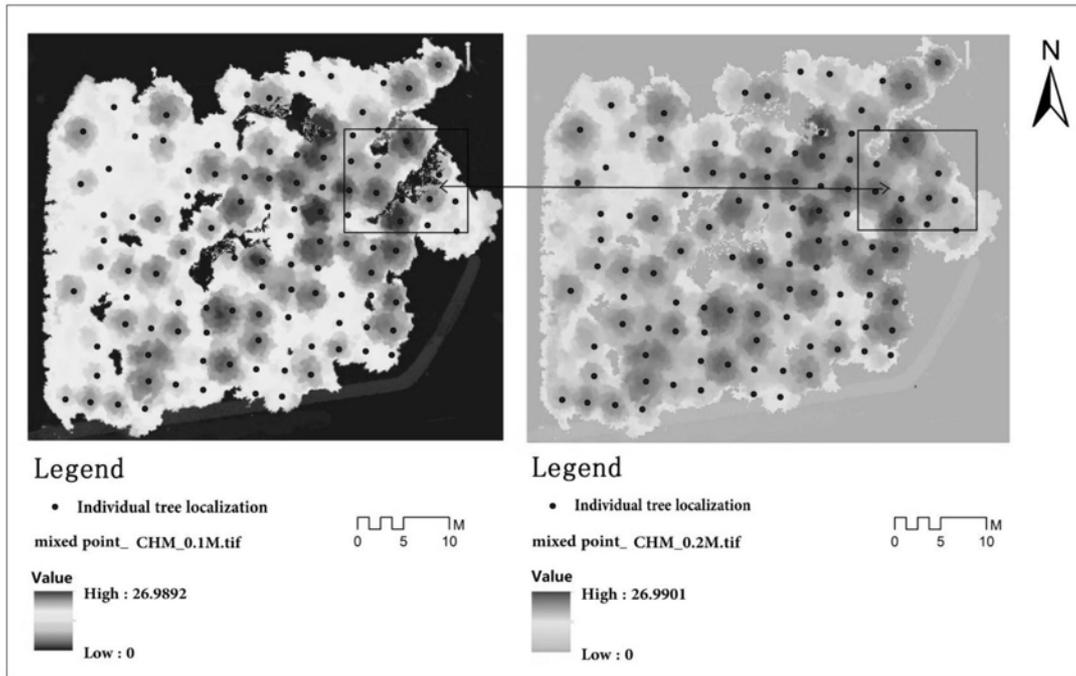


图7

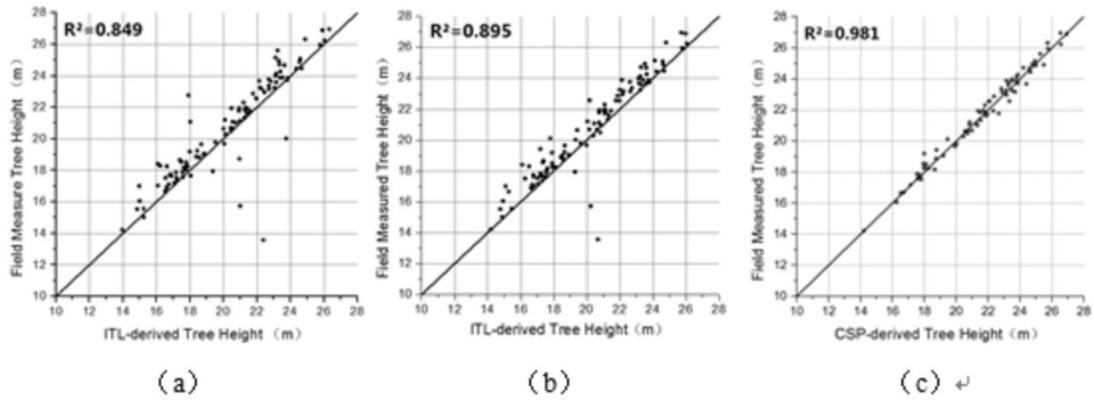


图8