

文章编号: 1002-1582(2026)04-0459-07

融合深度空间校正与几何锚点的 单目视觉行道树参数测量

唐芳^{1,2}, 陈茂霖^{1,2,3*}, 薛梅³, 田思忆⁴, 姬翠翠¹

(1. 重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 400074)

(2. 自然资源部地理国情监测重点实验室, 重庆 400020)

(3. 重庆市测绘科学技术研究院, 重庆 400020)

(4. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430022)

摘 要: 为实现低成本行道树结构参数自动提取, 提出一种融合深度信息与几何约束的单幅影像测量方法。首先利用实例分割与单目深度估计获取树木区域及相对深度; 随后通过视差倒数变换提升深度的几何可用性, 并结合几何约束与鲁棒统计实现尺度恢复; 最后基于重建的度量深度计算树高、胸径与冠幅。在43株样本上的实验表明, 相较线性归一化基线, 方法有效提升了测量精度: 树高MAE为0.70m (基线3.80m)、胸径MAE为7.19cm (基线21.51cm)、冠幅MAE为0.66m (基线2.35m), 误差整体下降。方法在单幅影像条件下即可获得稳定可靠的结构参数, 为城市林业调查与碳汇评估提供了高效、低成本方案。

关 键 词: 行道树; 单目深度估计; 视差倒数变换; 尺度恢复; 几何约束

中图分类号: P237; TB811

文献标识码: A

Monocular-vision measurement of street-tree parameters by integrating depth-space correction and geometric anchors

TANG Fang^{1,2}, CHEN Maolin^{1,2,3*}, XUE Mei³, TIAN Siyi⁴, JI Cuicui¹

(1. School of Smart City, Chongqing jiaotong university, Chongqing 400074, China)

(2. Key Laboratory of National Geographical Census and Monitoring, Ministry of Natural Resources, Chongqing 400020, China)

(3. Chongqing Academy of Surveying and Mapping Science and Technology, Chongqing 400020, China)

(4. Wuhan Institute of Surveying and Mapping, Wuhan 430022, China)

Abstract: To enable low-cost automatic extraction of street tree structural parameters, A single-image measurement method that integrates depth information with geometric constraints is proposed. First, instance segmentation and monocular depth estimation are employed to obtain tree regions and relative depth. Then, an inverse disparity transformation is applied to enhance the geometric usability of depth, and geometric constraints combined with robust statistics are introduced to achieve scale recovery. Finally, tree height, diameter at breast height (DBH), and crown width are estimated based on the reconstructed metric depth. Experiments on 43 samples demonstrate that, compared with a linear normalization baseline, the proposed method significantly improves measurement accuracy: the MAE of tree height is 0.70 m (baseline: 3.80 m), DBH is 7.19 cm (baseline: 21.51 cm), and crown width is 0.66 m (baseline: 2.35 m), with overall error reduction. The method

收稿日期: 2026-04-01; 收到修改稿日期: 2026-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(42301459); 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0652); 自然资源部地理国情监测重点实验室开放基金(2025NGCM04); 重庆市研究生导师团队项目(JDDSTD2022002)

作者简介: 唐芳(2002—), 女, 硕士研究生, 从事三维激光点云处理研究。tangfang@mails.cqjtu.edu.cn

陈茂霖(1991—), 副教授, 博士, 从事三维激光点云处理、行业应用研究。

* 通讯作者: maolinchen@whu.edu.cn

can obtain stable and reliable structural parameters from a single image, providing an efficient and low-cost solution for urban forestry surveys and carbon stock assessment.

Keywords: street trees; monocular depth estimation; inverse-disparity transform; scale recovery; geometric constraints

0 引 言

行道树是城市绿化基础设施的重要组成部分^[1],在固碳释氧、净化空气、美化景观及降低交通噪声等方面具有显著生态与社会效益^[2];受树体结构复杂及环境扰动影响,行道树生长状态与空间结构变化较快,需要持续、精细获取其结构参数,以支撑行道树清查、城市绿化覆盖调查及管理决策等应用^[3]。传统测量方式效率低、人工工作量大、适用性不强^[4]。因此,发展低成本、自动化且精度可靠的行道树参数提取方法具有重要现实意义。

目前,行道树结构参数测量技术主要包括基于三维点云的主动传感测量、基于多视几何的摄影测量以及基于单目视觉的轻量化测量方法。基于三维点云的测量技术能够直接获取具有真实尺度的三维结构信息。郭泽宇等^[5]利用手持激光雷达获取三维点云数据,通过点云预处理和人机交互实现树木参数提取。崔庆华等^[6]则进一步融合无人机与背包式激光雷达的多源点云数据,结合冠层高度模型与异速生长方程实现胸径及生物量估算。然而,高精度点云普遍存在设备成本高、大面积数据采集与后期点云处理流程极为复杂且耗时等问题。

基于多视几何与摄影测量的方法能有效恢复三维结构,并借助基线或控制点获取尺度信息,具备远距离、高精度的测量优势。王怡等^[7]从不同角度采集树木图像,构建林下三维点云模型,并通过最优圆算法识别单木位置和估测胸径;尹萍等^[8]使用双目摄像机捕获树木图像,获得三维点云,并采用枚举最值遍历法测量结构参数。然而,此类方法需要多角度影像采集或双目相机配置,现场操作较为繁琐,且易受光照、遮挡条件及相机间最优距离与特征匹配问题的影响,对精度要求高,实现难度较大。

单目视觉测量系统硬件依赖低,易集成至智能手机等轻量终端设备,为非接触式测量提供了新的实现路径^[9]。侯鑫新等^[10]结合单台 CCD 相机与经纬仪,通过图像处理与坐标变换实现胸高直径测量,平均相对误差为 2.46%;高莉平等^[11]基于单目视觉与智能终端,通过图像边缘提取与相机标定实现立木高度测量,误差低于 6.5%;Coelho 等^[12]在树旁放置专用标定目标,使用单目相机拍摄两张照片,根据几何关系估算树高与胸径,平均相对误差为 10.9%。Wu 等^[13]基于智能手机,采用改进的频率调

谐显著性算法实现了树木图像的分割。然而,此类方法普遍缺乏直接的深度信息,须依赖外部校准或辅助设备,且传统的图像边缘提取与几何变换算法对自然光照及复杂林区背景的鲁棒性较差,从而限制了其在野外环境下的测量稳定性。

为克服传统单目视觉对外部校准物的依赖,基于深度学习的单目深度估计技术提供了新的解决路径。该技术旨在从单幅图像中直接恢复像素级深度信息,近年来在林业与植物表型领域得到了积极探索。在林业遥感方面,Jia 等^[14]系统评估了多种先进单目深度估计方法在低空森林环境中的性能。Cambrin 等^[15]将 Depth Anything V2 模型微调用于遥感影像树冠高度估计,验证了深度基础模型向林业迁移的可行性。在植物表型方面,Zhao 等^[16]从单幅图像中重建作物 3D 模型,据此估算高度、冠幅与胸径等参数;赵永杰等^[17]基于 Shuffle-ZoeDepth 单目深度估计模型实现了室外苗期玉米植株高度的自动测量。然而,现有研究主要面向遥感冠层高度反演、林分尺度参数提取或农田作物株高测量,尚未针对城市行道树这一特殊场景进行专门设计。在复杂道路环境中,树干等弱纹理区域容易产生深度模糊与局部漂移,同时单目深度结果缺乏稳定的绝对尺度约束,难以直接用于树高、胸径等参数的可靠量测。

针对上述问题,本文结合单目深度估计与实例分割的优势,提出一种融合深度信息与几何约束的行道树参数测量方法。该方法仅输入单幅图像即可在语义引导下完成行道树目标提取,并利用道路场景中的几何锚点实现尺度恢复,从而实现树高、胸径与冠幅等关键结构参数的自动测量。该方法在保证低成本与轻量化的同时,可获得较稳定的参数估计效果,为面向移动终端的城市行道树快速普查与精细化管理提供了一种可行方案。

1 研究方法

如图 1 所示,本文提出的行道树结构参数测量流程由三部分组成:(1) 相对深度估计与实例分割掩膜提取;(2) 深度空间校正与绝对尺度恢复;(3) 行道树结构参数测量。首先利用 Depth Anything V2 (DA2) 生成单目相对深度图,并采用 Segment Anything Model 2 (SAM2) 获取行道树二值掩膜,通过逐像素掩膜操作剔除背景噪声。随后针对深度输出的视差特性进行倒数变换,实现视差

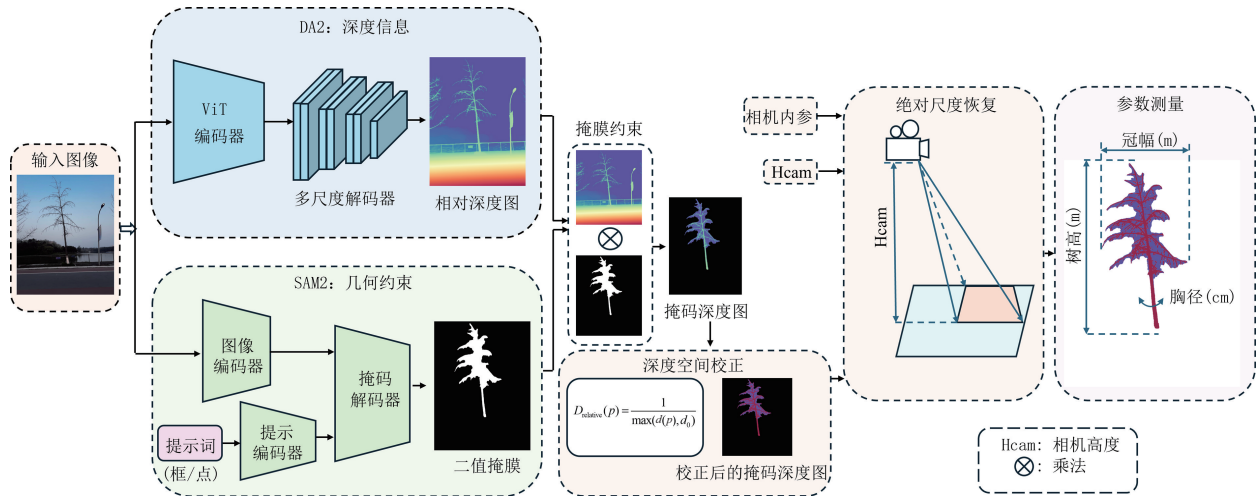


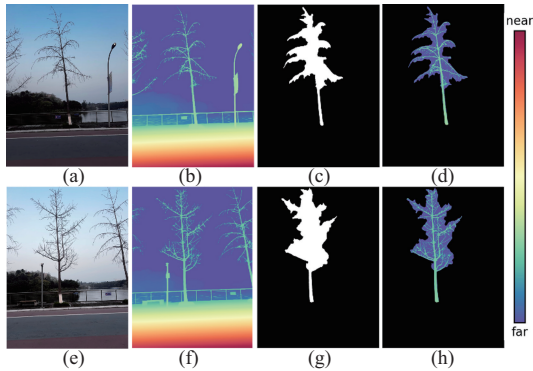
图1 基于单目视觉的行道树结构参数测量流程(输入:单幅图像;输出:树高、胸径与冠幅)

空间到度量空间的映射校正;结合相机高度构建地面几何锚点,并采用四分位距法鲁棒估计全局尺度因子,恢复绝对深度。最后基于绝对度量深度与针孔成像模型,自动计算树高、胸径与冠幅。

1.1 相对深度估计与实例分割掩膜提取

为获取行道树的场景深度信息,本文采用近期提出的单目深度估计模型DA2^[18]。同时,为将深度信息限定在目标区域并抑制背景干扰,本文进一步引入SAM2^[19]对行道树区域进行实例分割,生成二值掩膜图像 $M(u,v)$ 。随后,将实例分割掩膜 $M(u,v)$ 与DA2输出的相对深度图 $D_{\text{relative}}(u,v)$ 进行逐像素融合,生成仅保留目标区域的掩膜深度图,如图2所示。

$$D_{\text{masked}}(u,v) = M(u,v) \cdot D_{\text{relative}}(u,v) \quad (1)$$



(a)、(e)道路场景RGB原始图像;(b)、(f)DA2估计的相对深度图;
(c)、(g)SAM2生成的行道树实例二值掩膜;(d)、(h)掩膜深度图

图2 掩膜深度图生成示例

1.2 深度空间校正与绝对尺度恢复

1.2.1 基于视差倒数的相对深度映射

传统视觉任务通常采用Min-Max线性归一化将深度映射至 $[0,1]$ 区间以增强可视化效果。设DA2在像素 p' 处的原始输出为 $d(p')$,计算公式表示为

$$d_{\text{base}}(u,v) = \frac{d(p') - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (2)$$

式中, $d_{\min}$ 与 $d_{\max}$ 分别为当前图像中的最小和最大深度值。该归一化虽可增强可视化,但易受天空、远距离区域主导,压缩近景深度分布,降低局部几何对比度。

针对上述几何局限性,本文提出一种基于视差倒数变换的相对深度映射方法,将原始的逆深度视差图转换为正相关的相对深度,为后续绝对尺度恢复提供线性基础,计算公式表示为

$$D_{\text{relative}}(u,v) = \frac{1}{\max(d(p'), d_0)} \quad (3)$$

式中, d_0 为数值稳定项,取一个较小正数 $\delta = 1 \times 10^{-4}$,用于避免 $d(p')$ 接近0时的数值发散。

1.2.2 基于地面几何锚点的绝对尺度恢复

为解决单目视觉相对深度缺乏绝对尺度的问题,本文利用行道树场景中地面区域稳定、连续的几何特性,以地面像素为几何锚点,结合相机高度与成像几何约束,恢复绝对尺度。

建立相机成像几何模型如图3所示。设相机光心为 O ,像平面为 $ABCD$,像平面中心坐标为 $O'(u_0, v_0)$,光轴垂直于像平面。相机与地面的垂直高度为 h ,地面在世界坐标系中可近似表示为平面 $Z=0$ 。考虑相机在垂直方向存在俯仰角 γ ,地面上一点 P 在像平面上的投影为像素点 $p'(u,v)$ 。根据成像几何关系,可得到地面区域内的任一像素点对应的真实物理距离,计算公式表示为

$$d(u,v) = \frac{h}{\tan\left(\gamma + \arctan\left(\frac{-(v-v_0)}{f_y}\right)\right)} \quad (4)$$

式中, h 为相机与地面的垂直高度; γ 为相机内部的垂直俯视角; v 为像素点在图像中的纵向坐标; f_y 与 v_0 为相机内参,可通过相机标定方法求得。

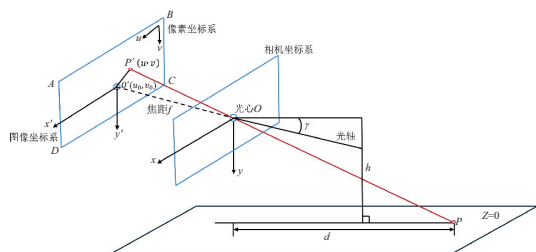


图3 相机—地面成像几何模型示意图

在此基础上，利用SAM2提取地面像素集合 Ω_g 。对任一地面像素 $p'(u,v) \in \Omega_g$ ，由式(4)得到真实距离 $d(u,v)$ ，由式(3)得到相对深度 $D_{\text{relative}}(u,v)$ 。由于单目深度在同一场景与成像条件下可近似满足全局线性比例关系，本文在地面像素上构造尺度样本

$$s(u,v) = \frac{d(u,v)}{D_{\text{relative}}(u,v)} \quad (5)$$

为降低噪声、分割误差及异常像素对尺度估计的影响，本文在单幅图像尺度内对尺度因子样本进行鲁棒统计分析。具体而言，对于每一幅图像，在其地面像素集合 Ω_g 上构造尺度样本集合 $\{s(u,v)\}$ ，并采用四分位距方法剔除异常值：设第一、第三四分位数分别为 Q_1 与 Q_3 ，其中 $\text{IQR} = Q_3 - Q_1$ ，去除不满足区间 $[Q_1 - 1.5 \text{IQR}, Q_3 + 1.5 \text{IQR}]$ 的样本。随后，取剩余尺度样本的中位数作为该图像对应的尺度因子 $Scale$ 。中位数估计对局部异常值不敏感，可有效提升单幅图像尺度恢复的稳定性。最后，将相对深度图线性缩放至绝对深度

$$D_{\text{metric}}(u,v) = \text{Scale} \cdot D_{\text{relative}}(u,v) \quad (6)$$

1.3 行道树结构参数测量

在获得像素级度量深度 $D_{\text{metric}}(u,v)$ 后，本文进一步结合实例分割与针孔成像模型，实现单株行道树结构参数的自动测量。

首先进行树高估计。对每株行道树，选取实例分割掩膜区域内纵向像素坐标最大的点作为树根点 (u_b, v_b) ，纵向像素坐标最小的点作为树梢点 (u_t, v_t) 。从度量深度图中读取两点对应深度 z_b, z_t 。根据针孔模型反投影得到三维点

$$\begin{cases} P_b = \left(\frac{(u_b - u_0)z_b}{f_x}, \frac{(v_b - v_0)z_b}{f_y}, z_b \right) \\ P_t = \left(\frac{(u_t - u_0)z_t}{f_x}, \frac{(v_t - v_0)z_t}{f_y}, z_t \right) \end{cases} \quad (7)$$

式中， (u_0, v_0) 为图像主点坐标； f_x, f_y 分别为相机在水平方向与垂直方向上的焦距。

树高定义为树根点与树梢点在三维空间中的欧氏距离，其计算公式为

$$H = \|P_b - P_t\|_2 \quad (8)$$

由于胸径位于树干胸高处、冠幅位于树冠区域，两者对应的局部深度容易受到遮挡、空洞与噪声影响而产生尺度波动。为保证不同测量位置的尺度一致性，并降低局部深度不稳定导致的尺度漂移，本文统一采用树根点的绝对深度 z_b 作为尺度映射基线。

胸径对应树干距地面1.3m的高度位置。在像素行 $v_{1.3}$ 附近，从树干掩膜中提取横向像素坐标集合，并进行连通性分析以抑制噪声与孤立像素影响，选取最长连续像素段作为胸高处的有效截面，其像素宽度记为 w_{dbh} 。其计算公式为

$$\text{DBH} = \frac{w_{\text{dbh}} \cdot z_b}{f_x} \quad (9)$$

冠幅以树冠区域的最大水平像素跨度 w_{pix} 估计，其计算公式为

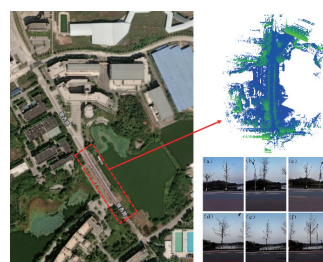
$$C = \frac{w_{\text{pix}} \cdot z_b}{f_x} \quad (10)$$

式中， f_x 为相机在水平方向的焦距； z_b 为树根点的深度。

2 实验结果与分析

2.1 试验场景与数据采集

本实验选取重庆交通大学校园内的银杏行道树作为研究对象，如图4所示。共拍摄43张实景图像，对应43株树木，样本图像采集设备为iPhone15，原始分辨率为 4284×5712 像素。实验采用张正友相机标定法获得主摄像头的内参矩阵参数： $f_x = 4247.99$ 、 $f_y = 4251.10$ 、 $c_x = 2141.38$ 、 $c_y = 2862.69$ 。所有图像在自然光照条件良好时手持采集，以保证树木主体结构清晰完整。采集过程中，使用卷尺同步测量并记录相机镜头至地面的垂直高度 $H = 1.55\text{m}$ ，并记录每张图像对应的相机俯仰角信息，以支持后续几何投影与尺度推断。与此同时，采用手持式激光雷达对同一区域进行扫描，获取LiDAR点云作为真值参考，用于定量误差评估与结果分析。



(a)-(f) 样区内采集的单幅RGB图像样例
图4 研究区域与数据示意

本实验基于 Python 实现树木参数测量与误差分析流程。深度估计模型采用官方发布的 DA2 预训练权重，编码器配置为 vitl；实例分割模型采用 SAM2.1large 版本。两类模型推理均基于 PyTorch 框架实现。相机标定采用 OpenCV 的 `calibrateCamera` 函数，通过棋盘格图像求解相机内参及畸变参数。图像读取、掩膜处理、像素坐标提取和几何计算主要依赖 OpenCV 与 NumPy 实现；相对深度构建、尺度恢复、参数测量以及误差统计则结合 NumPy、Pandas、SciPy 与 Matplotlib 完成。

2.2 对比分析与结果讨论

基于 2.1 节数据，本文对 43 株样本的树高、胸径与冠幅进行了估计并与真值对比。为验证所提方法的有效性，设置基线方法（Baseline）与本文方法（Ours）进行对照实验：Baseline 采用式（2）的 0-1 线性归一化深度作为相对深度 $d_{\text{base}}(u,v)$ 输入；本文方法采用式（3）的视差倒数映射获取相对深度 $D_{\text{relative}}(u,v)$ ，其余绝对尺度恢复与行道树结构参数测量保持一致，以保证对比公平性。评价指标选取平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）、均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）以及相对误差（Relative Error, RE），其中 MAE、RMSE 越小越好，RE 反映相对尺度偏差，总体对比结果如表 1 所示。

表 1 不同方法在三类林业参数上的误差对比(N=43)

参数	方法	MAE	RMSE	RE/%
树高/m	Baseline	3.80	4.13	42.92
	本文方法	0.70	0.87	7.88
胸径/cm	Baseline	21.51	29.52	79.46
	本文方法	7.19	8.25	24.48
冠幅/m	Baseline	2.35	2.44	55.18
	本文方法	0.66	0.82	14.90

由表 1 可见，本文方法在树高、胸径与冠幅三项任务上整体优于 Baseline。以树高估计为例，本文方法的 MAE 由 3.80m 降至 0.70m，RMSE 由 4.13m 降至 0.87m，RE 由 42.92% 降至 7.88%，表明该方法在尺度一致性与估计稳定性方面具有优势。对于胸径与冠幅估计，本文方法同样取得更低误差：胸径 MAE 由 21.51cm 降至 7.19cm，冠幅 MAE 由 2.35m 降至 0.66m，说明所提映射方法对三类结构参数均具有较好的适用性。

除表 1 给出的总体误差指标外，表 3~5 的逐样本对比进一步揭示了两类相对深度映射方法的误差形态差异。对于树高与冠幅估计，Baseline 的预测均值明显小于真值均值，表现为整体低估；相比之下，本文方法的预测均值与真值更为一致，

表明视差倒数映射有助于保持深度的相对尺度关系并提升跨样本一致性。进一步观察逐样本误差分布可见，Baseline 在树高与冠幅任务中更易出现多数样本同时偏小的现象，导致误差在样本层面普遍偏大；本文方法则表现为误差更集中、极端偏差更少。对于胸径估计，Baseline 更易出现个别样本的异常偏差，导致整体稳定性下降；本文方法能够在整体上降低误差并明显缓解离群影响，但仍存在少量样本出现偏差增大的情况。该现象主要与遮挡干扰、胸高截面提取对实例掩膜边界偏移的敏感性以及局部深度噪声有关，即截面宽度的微小偏差在投影测量过程中会被放大，从而影响胸径估计的稳定性与精度。

表 2 不同行道树参数测量方法的定性特点比较

方法类别	数据形式	是否需要额外设备	是否依赖多视角	是否需要场景尺度参考	特点
激光点云测量	点云	是	否	否	精度较高,但设备与处理成本较高
多视摄影测量	多图像	部分需要	是	部分需要	可恢复三维结构,但采集与重建流程复杂
单目几何测量	单图像	否	否	是	实现简单,但依赖参考物与人工交互
本文方法	单图像	否	否	否	支持低成本自动化结构参数测量

表 3 树高测量数据表

树木编号	真值/m	Baseline		本文方法	
		测量值/m	相对误差/%	测量值/m	相对误差/%
1	8.6	7.29	15.23	8.47	1.51
2	8.2	6.27	23.54	8.94	9.02
3	5.8	6.01	3.62	5.86	1.03
4	9.1	6.75	25.82	8.78	3.52
5	9.5	5.09	46.42	9.16	3.58
6	11.5	3.81	66.87	10.53	8.43
7	9.5	5.24	44.84	8.87	6.63
8	11.1	4.19	62.25	8.49	23.51
9	9.2	4.55	50.54	7.83	14.89
10	6.7	4.08	39.1	5.89	12.09
...	...	...	...	...	...
40	8.8	3.17	63.98	8.03	8.75
41	8.5	4.74	44.24	8.76	3.06
42	9.5	4.75	50	9.23	2.84
43	9.6	4.74	50.62	9.76	1.67
平均值	8.55	4.76	42.92	8.03	7.88

除与 Baseline 进行定量误差对比外，本文进一步从数据形式、设备依赖及尺度恢复方式等角度，对现有行道树参数测量方法进行定性特点比较，如表 2 所示。由表 2 可见，基于 LiDAR 或多视摄影测量的方法

通常能够获取较完整的三维结构信息，但往往依赖专用设备、多视采集或复杂重建流程，部署与处理成本相对较高；传统单目几何测量方法虽然具有轻量化优势，但通常需要场景参考物或人工交互。相比之下，本文方法基于单幅RGB图像与场景几何约束实现树高、胸径与冠幅的自动测量，在保证较低硬件成本的同时，实现了较稳定的结构参数估计。

表 4 冠幅测量数据表

树木编号	真值/m	Baseline		本文方法	
		测量值/m	相对误差/%	测量值/m	相对误差/%
1	3.5	2.36	32.57	3.88	10.86
2	3.55	2.08	41.41	3.64	2.54
3	4.55	2.52	44.62	4.48	1.54
4	3.35	2.16	35.52	3.67	9.55
5	4.75	1.34	71.79	2.24	52.84
6	4.3	1.59	63.02	3.45	19.77
7	5.3	2.35	55.66	4.26	19.62
8	5.95	2.42	59.33	4.21	29.24
9	3.6	1.93	46.39	3.24	10
10	3.65	1.68	53.97	2.7	26.03
...	...	...	...	...	...
40	5.45	2.11	61.28	5.04	7.52
41	4.7	1.5	68.09	3.75	20.21
42	3.25	1.32	59.38	3.17	2.46
43	3.65	1.33	63.56	3.53	3.29
平均值	4.23	1.89	55.18	3.66	14.9

表 5 胸径测量数据表

树木编号	真值/m	Baseline		本文方法	
		测量值/m	相对误差/%	测量值/m	相对误差/%
1	27	14.16	47.56	21.84	19.11
2	25	14	44	24.2	3.2
3	24	76.03	216.79	20.63	14.04
4	29	14.43	50.24	24.81	14.45
5	32	22.14	30.81	24.68	22.88
6	29	64.01	120.72	20.41	29.62
7	32	12.35	61.41	23.75	25.78
8	24	9.73	59.46	17.54	26.92
9	35	35.02	0.06	18.38	47.49
10	30	24.49	18.37	17.11	42.97
...	...	...	...	...	...
40	28	53.53	91.18	26.61	4.96
41	40	60.71	51.78	17.54	56.15
42	31	13.23	57.32	23.09	25.52
43	29	39.67	36.79	38.29	32.03
平均值	28.47	35.19	79.46	21.71	24.48

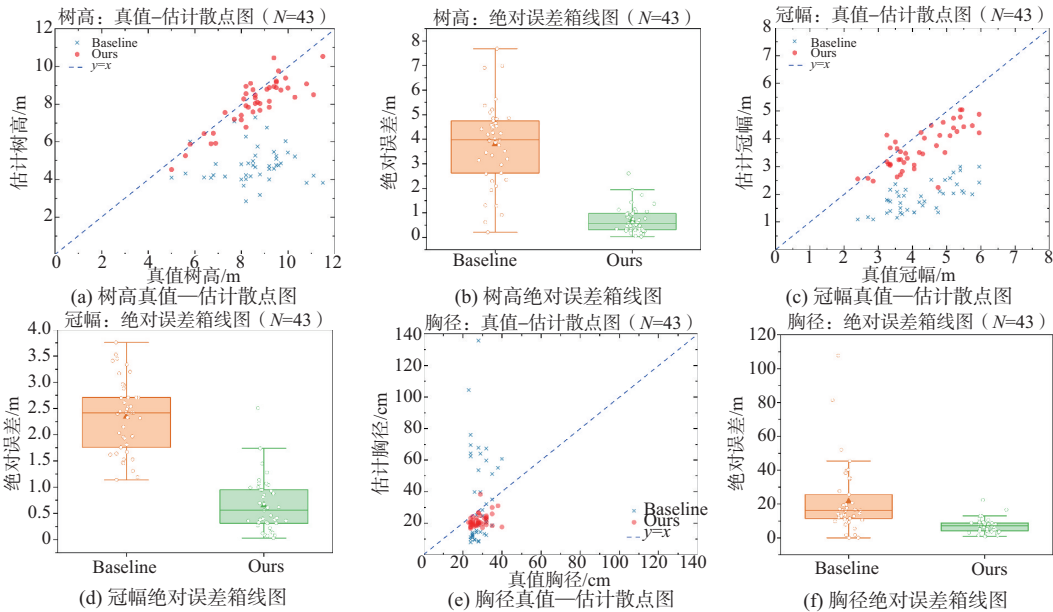


图 5 不同方法在三项林业参数估计任务上的可视化对比(N=43)

尽管本文方法整体性能优于Baseline，但少量样本仍出现偏差。综合分析，误差主要来自三方面：（1）成像几何与标定不确定性：镜头畸变残余、对焦变化以及相机高度与俯仰角的微小波动，

会引入尺度因子漂移与投影系统误差，进而影响树高、胸径与冠幅估计；（2）实例掩膜与关键截面提取误差：树体掩膜存在孔洞、断裂或边界偏移时，会干扰树根、树梢定位及1.3m截面宽度的

提取, 导致参数偏差被放大; (3) 深度估计噪声与投影测量敏感性: 遮挡、强反射等场景干扰可能造成局部深度异常, 而胸径与冠幅对边界极值、截面宽度更敏感, 因此更易出现离群误差。

3 结 语

本文提出了一套面向行道树结构参数估计的单目视觉测量方法, 通过对树体区域的精准定位、深度结果的几何可用性增强与尺度一致性恢复, 实现树高、胸径与冠幅等关键指标的自动化估计。实验结果表明, 树高测量精度可达 $MAE=0.70m$, 较基线方法误差降低 81.6%; 胸径测量精度可达 $MAE=7.19cm$, 较基线方法误差降低 66.6%; 冠幅测量精度可达 $MAE=0.66m$, 较基线方法误差降低 71.9%。上述结果验证了该方法在单张影像条件下开展定量测量的可行性与有效性。本文方法适用于以较低成本、较高频率获取行道树结构参数的应用需求。后续工作将进一步提升轻量化方案在不同树种与多样拍摄条件下的适应性, 并从边界细化、鲁棒统计量测与异常样本抑制等方向增强复杂场景下的可靠性, 推动该方法在城市林业普查与精细化管理中的应用。

参考文献:

- [1] 梁陈涛, 杨艳波, 田盼立, 等. 基于街景测量的南昌市行道树结构特征与健康状况研究[J]. 生态学报, 2022, 42(02): 549—560.
Liang Chentao, Yang Yanbo, Tian Panli, et al. Structural characteristics and health status of street trees in Nanchang based on street view measurement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 549—560.
- [2] 曹明兰, 张力小, 王强. 无人机遥感影像中行道树信息快速提取[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10): 89—93.
Cao Minglan, Zhang Lixiao, Wang Qiang. Rapid extraction of street tree information from UAV remote sensing images[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(10): 89—93.
- [3] Anderson K, Hancock S, Casalegno S, et al. Visualizing the urban green volume: Exploring LiDAR voxels with tangible technologies and virtual models[J]. Landscape and Urban Planning, 2018, 178: 248-260.
- [4] 刘也, 梁文彪. 车载激光点云在城市行道树普查几何属性提取中的应用[J]. 北京测绘, 2024, 38(11): 1599—1603.
Liu Ye, Liang Wenbiao. Application of vehicle-borne laser point cloud in geometric attribute extraction for urban street tree census[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2024, 38(11): 1599—1603.
- [5] 郭泽宇, 唐丽玉, 陈季委. 基于手持激光点云数据的园林树木参数关系模型[J]. 应用激光, 2025, 45(5): 138—147.
Guo Zeyu, Tang Liyu, Chen Jiwei. Parameter relationship model of garden trees based on handheld LiDAR point cloud data[J]. Applied Laser, 2025, 45(5): 138—147.
- [6] 崔庆华, 梁照东, 张兴安, 等. 融合无人机和背包激光雷达数据的森林地上生物量快速估算研究[J]. 山东林业科技, 2025, 55(2): 9—17.
Cui Qinghua, Liang Zhaodong, Zhang Xing'An, et al. Rapid estimation of forest aboveground biomass by integrating UAV and backpack LiDAR data[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2025, 55(2): 9-17.
- [7] 王怡, 胡文杰, 孙拥康, 等. 基于近景摄影测量技术的混交林空间结构分析[J]. 森林与环境学报, 2025, 45(06): 629—640.
Wang Yi, Hu Wenjie, Sun Yongkang, et al. Spatial structure analysis of mixed forests based on close-range photogrammetry[J]. Journal of Forest and Environment, 2025, 45(6): 629-640.
- [8] 尹萍, 徐爱俊, 叶俊华, 等. 基于消费级双目相机的立木因子测量方法[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(02): 436—445.
Yin Ping, Xu Aijun, Ye Junhua, et al. Measuring method of standing tree factors based on consumer-grade binocular camera[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(2): 436—445.
- [9] Khan D, Zheng Z, Uchiyama H, et al. Recent advances in vision-based indoor navigation: A systematic literature review[J]. Computers & Graphics, 2022, 104: 24—45. DOI: 10.1016/j.cag.2022.03.005.
- [10] 侯鑫新, 谭月胜, 钱桦, 等. 一种基于单CCD与经纬仪的树木胸径测量方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(4): 1225—1228.
Hou Xinxin, Tan Yuesheng, Qian Hua, et al. A method for measuring tree diameter at breast height based on a single CCD and theodolite[J]. Computer Application Research, 2014, 31(4): 1225—1228.
- [11] 高莉平, 徐爱俊. 应用智能终端的立木高度测量方法[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 28—34.
Gao Liping, Xu Aijun. Tree height measurement method using intelligent terminals[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11): 28—34.
- [12] Coelho J, Fidalgo B, Crisóstomo M M, et al. Non-destructive fast estimation of tree stem height and volume using image processing[J]. Symmetry, 2021, 13(3): 374.
- [13] Wu X, Zhou S, Xu A, et al. Passive measurement method of tree diameter at breast height using a smartphone[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 163: 104875.
- [14] Jia J, Kang J, Chen L, et al. A comprehensive evaluation of monocular depth estimation methods in low-altitude forest environment[J]. Remote Sensing, 2025, 17(4): 717.
- [15] Rege Cambrin D, Corley I, Garza P. Depth any canopy: Leveraging depth foundation models for canopy height estimation[C]//European Conference on Computer Vision. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 71—86.
- [16] Zhao G, Cai W, Wang Z, et al. Phenotypic parameters estimation of plants using deep learning-based 3-D reconstruction from single RGB image[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1—5.
- [17] 赵永杰, 蒲六如, 宋磊, 等. 基于 Shuffle-ZoeDepth 单目深度估计的苗期玉米株高测量方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 222—230.
Zhao Yongjie, Pu Liuru, Song Lei, et al. Measurement method of seedling stage maize height based on Shuffle-ZoeDepth monocular depth estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 222—230.
- [18] Yang L, Kang B, Huang Z, et al. Depth anything v2[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2024, 37: 21875—21911.
- [19] Ravi N, Gabeur V, Hu Y T, et al. Sam 2: Segment anything in images and videos[C]//International Conference on Learning Representations. Vienna, Austria: ICLR, 2025: 28085—28128.