

CSF

团 体 标 准

T/CSF XXXX—XXXX

无人机多模态数据单木因子提取技术规范

Technical specifications for extraction of individual tree
parameters from UAV multimodal data

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中 国 林 学 会 发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 技术流程 2

5 数据采集 3

6 数据处理 6

7 单木因子大面积提取 8

8 数据安全与成果交付 9

附录 A（地面调查制表要求） 11

附录 B（精度评价指标及报告） 12

附录 C（多模态例分割模型架构及参数指南） 14

附录 D（单木（林分）因子提取及精度说明） 16

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由广西壮族自治区林业科学研究院与中国林业科学研究院资源信息研究所提出。

本文件由中国林学会归口。

本文件起草单位：广西壮族自治区林业科学研究院、中国林业科学研究院资源信息所、广西壮族自治区国有雅长林场、广西壮族自治区国有高峰林场、中南林业科技大学、广西壮族自治区国有大桂山林场、广西壮族自治区国有六万林场、广西壮族自治区国有七坡林场、广西翼界科技有限公司。

本文件主要起草人：蒙鑫、刘宪钊、雷相东、余春和、欧汉彪、王智慧、岑祚舟、韩俊学、郑党斌、尹国平、马金满、韦铄星、李娟、黄莉雅、李艳丽、梁惠子、陆秋洁、王家妍、申礼凤、王光军、罗华龙、何江、覃文浪、孔乐、余平福、黄康庭、宋晴川、马天天、吴庆鑫、赵思懿。

无人机多模态数据单木因子提取技术规范

1 范围

本文件规定了应用无人机多模态数据开展单木因子提取的技术流程、数据采集、数据处理、单木因子大面积提取、数据安全与成果交付等技术规范，适用于小班及以上尺度的单木因子提取，其他尺度的单木因子提取可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 7247.1 激光产品的安全 第1部分：设备分类和要求
GB/T 26424 森林资源规划设计调查技术规程
GB/T 39610 倾斜数字航空摄影技术规程
GB/T 39612 低空数字航摄与数据处理规范
GB/T 38590 森林资源连续清查技术规程
GB/T 43648 主要树种立木生物量模型与碳计量参数
GB/T 43697 数据安全技术 数据分类分级规则
CH/T3014 数字表面模型机载激光雷达测量技术规程
CH/Z 3001 无人机航摄安全作业基本要求
CH/T 3004 低空数字航空摄影测量外业规范
CH/Z 3005 低空数字航空摄影规范
DB45/T 2751 立木生物量模型及碳计量参数 桉树
T/CSF 008 无人机倾斜摄影测量人工林单木参数提取技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

无人机多模态数据 UAV multimodal data

利用无人机搭载多光谱相机、彩色影像相机与激光雷达传感器，对同一区域同步或准同步采集的、能够通过空间位置配准的多源数据集合。

3.2

单木因子 Individual tree parameters

描述单株树木个体形态与位置特征的量化指标集合，包括位置坐标、树种、树高、胸径、冠幅等。

3.3

多模态单木实例分割 **Multimodal instance segmentation**

基于多模态数据，应用深度学习技术对单木进行像素级识别与分割。

3.4

地面采样距离（GSD） **Ground sampling distance**

在数字影像中，一个像素所对应的地面实际覆盖尺寸，单位为米或厘米每像素（m/pixel, cm/pixel）。

3.5

冠层高度模型（CHM） **Canopy height model**

一种以栅格形式表达的连续数字表面模型，其中每个像元的值代表该位置植被顶部与地面之间的垂直距离。

3.6

碳转换系数 **Carbon conversion coefficient**

将林木生物量（干物质质量）转换为碳储量的换算系数，即单位生物量中所含碳元素的质量分数。通常以小数或百分比表示，取值范围一般为0.45 ~ 0.55，常用取值为0.50。

3.7

正检数 **True positives**

指模型正确检测出的目标数量，即算法（或判读人员）能够精准地识别并定位到真实存在的地物（如林窗、特定树种等），所计数的符合判读/提取规则的正确结果数量。

3.8

漏检数 **False negatives**

指在遥感目标检测、图像分类或智能解译过程中，实际存在于地表或参考数据中，但未被算法（或人工判读）正确检测或识别出的目标数量。

3.9

误检数 **False positives**

指在遥感目标检测、图像分类或智能解译过程中，算法（或人工判读）错误地识别为存在目标，但实际地表或参考数据中并不存在该目标的计数和。

4 技术流程

无人机多模态数据单木因子提取的技术流程包括数据采集、数据处理、单木因子大面积提取、数据安全与成果交付，具体流程见图1。

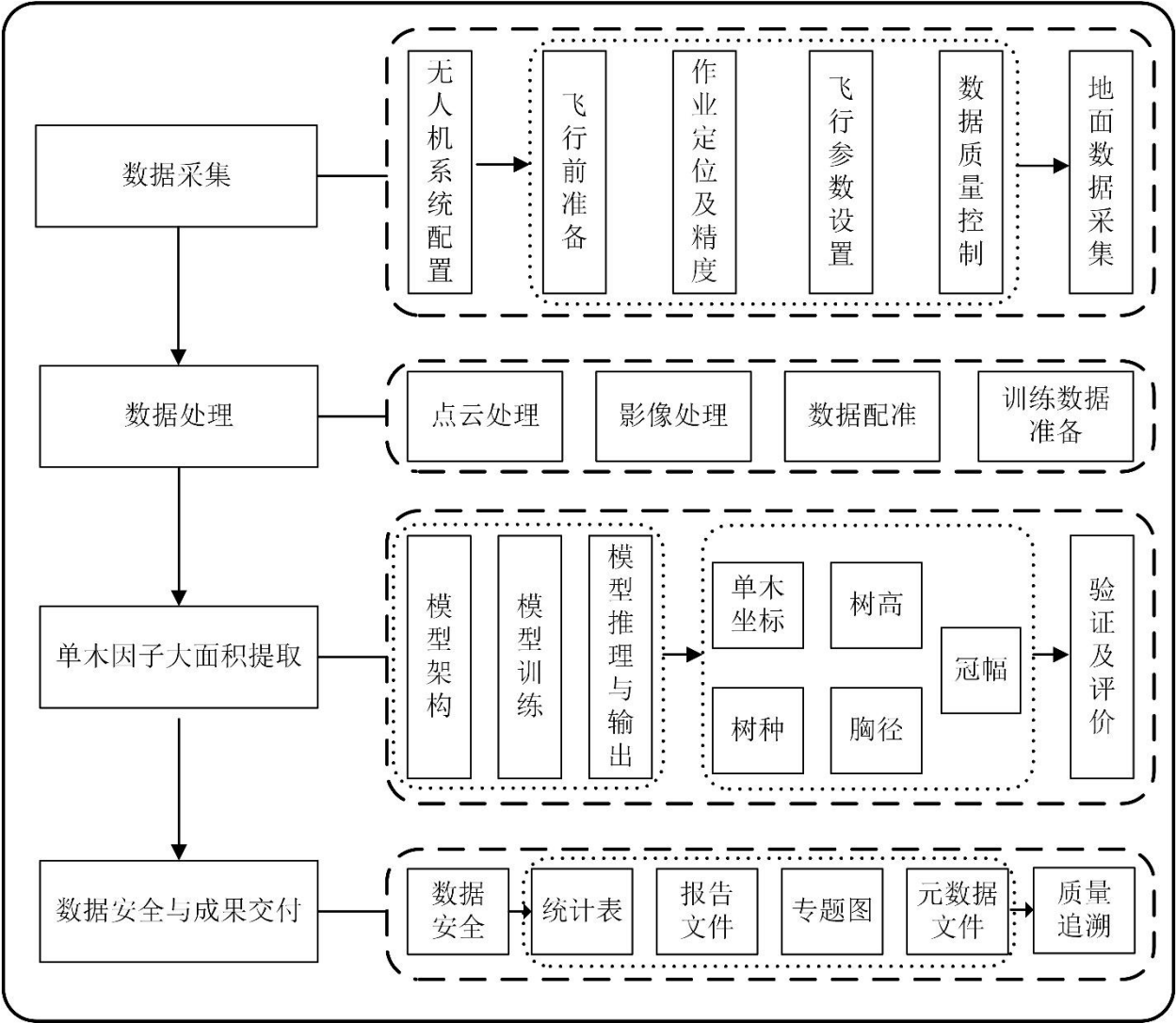


图1 技术流程图

5 数据采集

5.1 无人机系统配置

5.1.1 无人机

无人机配置要求如下：

- a) 使用多旋翼无人机，载荷重量不低于500g，可搭载多光谱相机、彩色相机或激光雷达传感器等。
- b) 宜配备电池热管理系统、数据实时存储模块，支持飞行数据和传感数据的同步记录与备份。
- c) 宜具备RTK/PPK定位功能，平面定位精度 $\leq \pm 5\text{cm}$ ，高程定位精度 $\leq \pm 10\text{cm}$ 。
- d) 宜具备强制避障功能（前后/上下/左右六向避障），并支持低电量自动返航功能,抗风等级不低于6级，工作环境温度适应 $-20^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，具备轻度防雨能力（不低于IPX4防护等级）。
- e) 飞行高度可调节，并可调整拍摄角度，在搭载所需载荷条件下，单架次续航时间不少于25min（或可通过更换电池方式满足作业需求）。

5.1.2 多光谱相机

多光谱相机配置要求如下：

- a) 多光谱相机应根据目标参数提取需求配置相应波段，若进行植被识别和生长状态监测，宜包含红边、近红外等**敏感波段**；若进行植被指数计算或树种分类，建议波段数不少于5个（可包括红、绿、蓝、红边、近红外）。
- b) 多光谱通道单波段分辨率不低于200万像素，量化位数不低于12 bit。各光谱通道采用全局快门，以消除无人机飞行运动导致的影像畸变。
- c) 多光谱相机宜具备辐射定标功能。每次飞行作业前，应使用标准反射板进行现场辐射定标，并记录定标参数，以确保采集数据的准确性和可比性。
- d) 多光谱相机宜具备GNSS/IMU记录功能，支持与无人机POS系统时间同步，确保每帧影像均记录准确的位置与姿态信息。
- e) 多光谱相机的地面采样距离（GSD）可调节，在航高100m~150m时，GSD不大于0.2m

5.1.3 高分辨率彩色相机

高分辨率彩色相机配置要求如下：

- a) 高分辨率彩色相机（RGB通道）分辨率不低于2000万像素，传感器尺寸不小于1英寸，以保障影像细节清晰度与低光照条件下的信噪比。
- b) 彩色相机宜采用机械快门，最高快门速度宜不低于1/2000s，以有效避免无人机飞行过程中的像移模糊。
- c) 宜根据作业航高与覆盖需求选配定焦镜头，焦距宜与多光谱相机视场角匹配，便于后续多源数据配准。
- d) 在同一架次飞行中，彩色相机宜与多光谱相机同步触发成像，确保同一时刻获取的光谱数据与真彩色影像空间位置一致，支撑多模态数据配准。

5.1.4 激光雷达传感器

激光雷达传感器配置要求如下：

- a) 激光雷达传感器应符合GB/T 7247.1规定的1级或1M级人眼安全激光产品要求。
- b) 激光脉冲发射频率宜不低于240 kHz，点云密度宜不低于100 p/m²，测距精度宜不低于3 cm。
- c) 激光雷达传感器宜支持不少于3次回波（含首次、中间及末次回波），以穿透林冠层获取林下地形及植被垂直结构信息。
- d) 测距范围应满足林分作业航高下的地表及冠层回波接收需求；在10%低反射率目标条件下，传感器最大有效测距宜不低于400 m。

5.1.5 控制站

5.1.5.1 一般控制站

地面控制站（GCS）宜具备飞行状态监控、航线规划与上传、数据链路监测等基本功能。可采用专用地面站软件配合便携终端（如平板电脑或笔记本电脑）实现，不强制要求专用硬件设备。

5.1.5.2 基准站

当无人机采用RTK/PPK高精度定位模式时，应通过基准站获取差分改正数据以实现厘米级定位。基准站应符合以下要求：

- a) 宜具备GNSS信号接收与差分数据播发功能，通过数传电台或4G/5G网络将差分改正数据实时传输至无人机飞控系统。

b) 可采用物理基站（如D-RTK 2移动站）或网络RTK服务（如千寻位置、CORS服务器）。网络RTK模式下，基准站宜具备通过标准网络协议接入CORS网络获取差分改正数据的能力。

c) 物理基站宜架设在作业区域内视野开阔、无信号遮挡的位置，远离微波塔、无线电塔等电磁干扰源。

d) 物理基准站与无人机的有效作业距离宜控制在20 km以内；超过该距离或受地形遮挡时，宜切换至网络RTK模式。

5.2 飞行作业

5.2.1 飞行前准备

飞行前准备要求如下：

a) 宜参照CH/Z 3001规定，飞行前可对作业区域进行地形踏勘，标注禁飞区、危险区，据此制定飞行方案并至少提前3个工作日向相关部门申请飞行空域。作业时应严格遵守规定，禁止在自然保护区核心区、军事管理区、居民稠密区等敏感区域上空飞行。

b) 针对可能出现的失联、坠机或数据丢失等异常情况，应制定应急处置流程，包括但不限于备用通信链路、远程紧急迫降引导、飞行日志及传感数据异地备份等措施。

c) 宜选择晴朗、大气透明度高天气执行飞行，遇雾、霾、沙尘、大风等不利天气禁止起飞。

d) 宜在10:00 ~ 14:00进行航测，太阳高度角不低于30°，地面风速宜不大于10 m/s，云量宜不超过30%。

e) 多光谱相机、彩色相机与激光雷达传感器应分别通过云台与无人机相连接，飞行中宜保持传感器镜头主光轴垂直向下，与地表法线夹角小于5°。

5.2.2 作业定位及精度

作业定位及精度要求如下：

a) 当无人机系统具备RTK/PPK功能时，宜优先采用，差分改正数据应按4.1.4 b)的规定获取。作业时应确保差分链路通畅，RTK模式下应获取固定解后方可起飞。

b) 采用RTK/PPK定位时，平面精度宜优于5 cm，高程精度宜优于10 cm，并宜均匀布设不少于3个检查点用于精度验证。

c) 当无法使用RTK/PPK或定位精度要求较高时，可参照GB/T 39612和CH/T 3004 的规定布设地面控制点和检查点。林区布点应避免植被遮挡，选择相对开阔位置，控制点数量不宜少于5个，检查点数量不宜少于3个，且两者均应在测区内均匀分布。

c) 地面控制点（检查点）的测量可参照CH/T 3004—2021规定，宜使用CNSS-RTK测量，测量时应先获取固定解，每点观测次数不宜少于2次，取平均值作为最终成果。平面和高程精度应符合CH/T 3004规定，平面精度宜优于5 cm，高程精度宜优于10 cm。

5.2.3 飞行参数设置

飞行参数设置要求如下：

a) 多光谱和彩色影像采集可参照CH/Z 3005和T/CSF 008，机载激光雷达的测量可参照 CH/T3014的规定执行。

b) 作业航高（相对高度）宜为100 m ~ 150 m，飞行速度不宜超过30 m/s，航向重叠率不宜低于70%，旁向重叠率不宜低于60%（重叠率按影像覆盖计算，即在航向上相邻影像的覆盖重叠比例。激光雷达点云数据采集时的扫描重叠率应满足点云密度要求，不单独规定）。

5.2.4 数据质量控制

数据质量控制宜参照GB/T 39610和T/CSF 008的相关规定执行，并宜符合以下要求：

a) 飞行过程中应实时监控无人机位置与姿态数据质量，检查GNSS/IMU数据记录是否完整、无中断，确保POS数据与影像/点云数据一一对应。

b) 每架次结束后，应及时检查原始影像数据、点云数据的齐全性与完整性，核对摄区覆盖是否满足设计要求。发现数据缺失或覆盖不足时，应立即安排补飞，补飞区域应与邻接航线有不低于20%的重叠。

c) 影像应清晰、色调均匀、层次丰富，无明显云影、反光、噪点及运动模糊；多光谱影像各波段间配准误差不宜超过0.5个像素；影像地面分辨率应符合4.2.3的要求；单张影像出现云雾覆盖超过10%、影像倾角或旋偏角超限时应判定为不合格并补拍。

d) 点云数据应无明显的条带噪声、分层或空洞，点云密度应符合5.1.4 b)的要求，点云分类精度应符合6.1.1c)的要求。

e) 数据缺失或噪声占比超过20%时应判定为不合格并返工重飞。

5.3 地面数据采集

5.3.1 样地布设

样地布设要求如下：

a) 样地布设宜按照GB/T 26424的规定，按林分类型、坡度、坡向等因素进行分层，各层内采用系统抽样方式均匀布设样地，确保样地覆盖不同立地条件且分布均匀。

b) 样地数量应综合考虑林分异质性和调查区域面积确定，一般不少于3个，复杂林分宜不少于5个。

c) 样地形状与面积的选择宜参照GB/T 38590—2020的规定执行，同一调查区域宜采用相同形状和面积的样地，样地规格宜选择25.82m×25.82m的方形样地或同面积的圆形样地。

5.3.2 样地调查

5.3.2.1 常规调查

样地常规调查要求如下：

a) 对样地内所有胸径 ≥ 5 cm的树木进行每木检尺，使用附录A表A.1规定的标准化调查表格，记录包括单木坐标、树种、胸径、树高、冠幅、健康状况（是否断头木、枯立木）等信息。

b) 常规调查方法按GB/T 26424和GB/T 38590的规定执行。

5.3.2.2 LiDAR调查

采用手持式、背包式LiDAR或架站式地基LiDAR（以下简称“地基LiDAR”）获取，其数据采集与处理应遵循以下要求：

a) 手持式或背包式LiDAR扫描应在林分内按“之”字形路线行进，保证每株目标木至少被扫描到3个不同方向；架站式地基LiDAR应在样地内布设不少于3个扫描站，确保样地内目标木无遮挡盲区，各测站间点云配准误差不超过0.05 m。

b) 点云配准后应进行去噪、地面滤波和单木分割，在此基础上提取各单木因子。单木坐标宜采用冠层点云质心或树冠最高点投影位置确定；树高宜采用点云归一化后的最大高程值；冠幅宜采用树冠点云的水平投影外接圆或椭圆长轴计算；胸径提取宜在1.3 m处截取点云切片，通过圆拟合计算直径，拟合残差不超过0.02 m。

c) 提取的单木因子应与传统实测值进行交叉验证，相对误差应满足附录D表D.1的精度要求，地基LiDAR可作为机载LiDAR的补充和验证手段。

6 数据处理

6.1 点云处理

对原始激光雷达点云依次进行去噪滤波、坐标转换和点云分类等预处理流程，具体如下：

a) 剔除原始点云中的孤立噪点、低空异常点和飞行轨迹边缘噪声点，确保点云数据质量满足后续处理要求。当点云数据缺失或噪声占比超过20%时，应判定为数据不合格并返工重飞。

b) 将点云数据由传感器原始坐标系转换至目标投影坐标系（如CGCS2000国家大地坐标系），确保与地面调查数据及影像数据空间基准一致，转换精度应满足定位精度要求。

c) 合格数据可采用布料模拟滤波（CSF）或不规则三角网（TIN）迭代加密算法进行点云分类，将点云划分为地面点与非地面点（含植被点、建筑物点等）。

d) 常规地形的点云分类精度不应低于95%，陡峭山地或密林区域可适当放宽至90%，采用交叉验证方法以地面点和非地面点的分类准确率为评价指标。若分类精度不满足要求，应判定为不合格并返工重飞。

e) 分类完成后，分别生成数字表面模型（DSM）、数字高程模型（DEM）、冠层高度模型（CHM）和强度图像，栅格空间分辨率应与点云密度匹配，一般不宜低于点云平均间距的2倍。

6.2 影像处理

对多光谱影像及彩色影像进行几何校正、正射校正和影像拼接：

a) 几何校正：利用无人机POS系统记录的相机位置与姿态参数进行系统级几何校正，消除镜头畸变及相机倾斜引起的几何形变。必要时采用地面控制点进行精校正，控制点均方根误差（RMSE）不超过1个像素。

b) 正射校正：利用数字高程模型（DEM）或激光雷达点云生成的数字表面模型（DSM），逐像素消除地形起伏引起的像点位移，生成垂直投影的正射影像。多光谱影像与彩色影像应采用相同的DEM/DSM数据进行正射校正，确保空间基准一致。

c) 影像拼接：校正完成后进行影像拼接，生成合并多波段数字正射影像，拼接误差不得超过1个像素，地面分辨率（GSD）不宜低于0.2m。影像存在明显条带、云雾覆盖超过10%、或拼接出现重影及错位时，判定为数据不合格并返工重飞。

6.3 数据配准

数据配准要求如下：

a) 配准前应确保多光谱影像、彩色影像与基于激光雷达点云生成的冠层高度模型（CHM）、数字表面模型（DSM）、强度图像等产品处于同一空间坐标系（宜采用CGCS2000国家大地坐标系），并具有一致的空间分辨率。

b) 各数据源的空间分辨率宜与影像地面采样距离（GSD）保持一致，或通过重采样统一至相同分辨率，以保障配准精度。

c) 将上述多源数据进行空间配准，确保其在同一地理坐标系下精确对齐。配准误差应控制在影像地面采样距离（GSD）的1倍以内，且影像与CHM/DSM等栅格产品同名特征点的平面偏差不宜超过点云平均间距的2倍。

d) 若配准失败（如特征点匹配不足或误差超限），应调整配准参数或重新选取配准点，直至满足精度要求；否则需重新采集数据。

e) 配准完成后，构建同时包含光谱信息与结构信息的多源数据集，支撑后续多模态单木实例分割与因子提取。

6.4 训练数据准备

训练数据准备要求如下：

a) 基于5.3.2中的样地中心坐标或四角坐标，从配准后的多源数据集中裁剪出局部切片，切片范围应与地面样地边界一致。

b) 在裁剪所得的切片上，结合样地调查记录（单木坐标、树种等），采用人工解译方式标注单木冠层边界和树种标签，形成标注样本。

c) 采用交并比（IoU）或Kappa系数对标注样本进行评价，标注一致性（不同标注人员对同一单木标注结果的重合度）不低于95%。

d) 训练集标注完成后进行质量抽检，抽检比例不低于标注样本总量的10%，抽检不合格的标注样本应退回修正，直至抽检合格率不低于95%。

e) 分类任务中每类别标注样本不宜少于特征维度的5倍，且少数树种的标注样本不应低于总标注样本的5%，并宜采用类别平衡策略进行处理；回归任务中标注样本不宜少于特征维度的10倍，且最低不宜少于100个有效标注样本。

f) 宜采用旋转、翻转、裁剪、亮度调整等方式对已有标注样本进行数据增强，以扩充标注样本规模。

g) 当样地切片提供的标注样本量不足时，应从配准后的多源数据集其他位置补充采样，宜涵盖不同林分类型、不同生长阶段。补充切片的选取应与样地保持一致的切片尺寸和数据类型，并记录其空间位置坐标，确保可追溯。

h) 按模型输入要求对标注完成的切片进行裁剪切块，单块尺寸宜符合附录C.2中表C.2的模型输入尺寸要求，生成标准化的模型输入样本。

i) 将模型输入样本按比例划分为训练集和验证集，验证集比例不宜低于20%。

7 单木因子大面积提取

7.1 多模态单木实例分割

7.1.1 模型架构

模型构架要求如下：

a) 应根据林分类型、数据特点和计算资源，选用经过验证的单木分割与识别模型。常见模型包括但不限于：基于卷积神经网络的两阶段实例分割模型（如Mask R-CNN）、单阶段目标检测模型（如YOLO系列）、基于Transformer的分割模型（如Mask2Former）以及U-Net及其变体，具体架构见附录C。

b) 纯林场景宜优先选用YOLO系列或U-Net变体，混交林场景宜优先选用Mask R-CNN或Mask2Former等实例分割能力更强的模型。具体模型的选取应说明理由，并在成果报告中注明模型来源与版本。

7.1.2 模型训练

使用6.4中的训练集数据进行模型训练，训练过程应符合以下要求：

a) 宜使用高性能图形处理器（GPU）进行模型训练，GPU显存容量应与模型参数量和训练批次大小相匹配。

b) 关键超参数（如学习率、批次大小、迭代轮数等）应根据所选模型架构和数据集规模进行优化设置，具体参数范围详见附录C表C.2。

c) 宜采用迁移学习策略，在公开遥感图像数据集（如COCO、ImageNet等）上预训练的权重基础上进行微调，以提升模型收敛速度和泛化性能。

d) 训练过程中应实时监控训练集与验证集的损失函数曲线变化。当验证集损失函数值连续多个轮次（如10~20轮）不再下降或出现上升趋势时，宜提前终止训练，防止模型过拟合。

e) 当训练集和验证集损失函数值均趋于平稳且验证集评价指标（如 F_1 -score）达到预期阈值时，可判定模型充分收敛。

f) 训练完成后应保存最优模型权重及训练日志。

7.1.3 模型推理与输出

采用训练完成的最优模型对配准后的多源数据集进行推理分割，具体如下：

a) 将配准后的多源数据集按模型输入尺寸进行滑动窗口裁剪切块，滑动步长宜为窗口尺寸的50%~75%，单块尺寸宜符合附录C表C.2中模型输入尺寸要求。

b) 将裁切后的图像块依次输入训练完成的最优模型进行前向推理，输出各图像块的单木冠层像素级掩膜、树种分类标签及置信度分数。推理过程中应保持模型处于评估模式（不启用Dropout等训练专用操作）。

c) 将各图像块的推理结果按滑动窗口重叠区域进行拼接，重叠区域结果宜采用非极大值抑制（NMS）或加权平均策略进行融合，消除边界效应，生成覆盖整个测区的完整预测结果。

模型输出应包括以下内容：

a) 单木冠层的像素级掩膜：以栅格图像形式输出每一棵单木的冠层边界，掩膜像素值为单木唯一标识码，不同单木间互不重叠。

b) 树种分类标签及相应的置信度分数：输出每一棵单木的树种类别及模型对其分类的置信度分数（0~1）。

7.2 单木因子提取

基于单木冠层分割结果，提取以下因子。各单木因子的提取目的及所用技术方法的成熟度见附录D表D.1。

a) 单木坐标：由单木冠层掩膜的中心点位置确定，以矢量点形式输出平面坐标（X，Y），坐标系与输入数据一致（宜为CGCS2000）。

b) 树种：由单木冠层分割掩膜的类别标签确定，不同标签对应不同树种。

c) 树高：采用局部最大值法提取单木树高，即在单木冠层分割掩膜范围内搜索局部高程最大值作为单木冠层顶部高程值，减去对应位置的地面高程模型值，得到单木高度。

d) 冠幅：计算单木冠层掩膜在南北方向和东西方向的最大跨度，取平均值作为冠幅值。

e) 胸径：胸径获取可采用以下两种方式：① 基于样地调查数据，构建包含树高及树冠信息（如冠幅、冠长等）的树高-胸径异速生长方程，并利用该方程换算分割所得单木的胸径；② 根据单木分割结果，可于树干胸高位置截取点云切片，采用圆拟合算法反演其直径。该方法仅适用于点云密度较高、林冠层遮挡较少、树冠间隙明显的林分（如落叶期或人工中幼龄纯林），在结构复杂或郁闭度过高的林分中不推荐使用。

7.3 验证及评价

验证及评价宜符合T/CSF 008-2021的规定，评价指标和标准如下：

a) 单木分割与识别精度：采用6.4中的验证集数据对单木分割与识别结果进行验证，以 F_1 -score作为评价指标，详见附录B中公式（B.1）、公式（B.2）和公式（B.3）。对于人工针叶纯林或结构简单的林分， F_1 -score应 ≥ 0.85 ；对于天然林或结构复杂的林分， F_1 -score应 ≥ 0.70 。

b) 单木因子提取精度：采用5.3.2中的样地调查数据对单木因子提取结果进行验证，以相对误差、决定系数 R^2 作为评价指标，详见附录B中公式（B.4）和公式（B.5），各因子精度要求详见附录D表D.1。

8 数据安全与成果交付

8.1 数据安全

数据安全要求如下：

a) 参照GB/T 43697-2024的要求，项目数据应进行分类分级管理。根据数据的敏感性、重要性和潜在风险，将数据划分为一般数据、重要数据、核心数据三个等级，并依据不同等级采取相应的安全保护措施

b) 涉及敏感区域（如自然保护区核心区、军事管理区周边、居民区等）的点云与影像数据应进行脱敏处理，隐去或模糊化处理敏感地物信息。

c) 原始数据及成果数据应采用通用格式存储，点云数据宜采用LAS或LAZ格式，影像数据宜采用GeoTIFF格式，矢量数据宜采用SHP或GeoJSON格式。所有数据应附带元数据文件，注明数据来源、采集时间、坐标系、处理软件及版本等关键信息。

d) 所有数据应进行完整备份，备份介质宜与原始存储介质物理隔离。归档保存期限自项目验收之日起不少于5年。

8.2 成果交付

项目成果交付清单应包括但不限于以下内容：

a) 统计表：单木因子提取结果表（含位置坐标、树种、树高、胸径、冠幅等）。

b) 专题图：包括数字正射影像（DOM）、含多波段合成影像、数字表面模型（DSM）、数字高程模型（DEM）、冠层高度模型（CHM）。

c) 报告文件：包括点云分类及精度评价报告、模型训练与验证报告（含标注抽检记录、模型架构说明、精度指标）。

d) 元数据文件：成果应附元数据文件，注明数据来源、采集时间、处理软件及版本、坐标系统、精度指标等信息。

8.3 质量追溯

项目实施全过程应建立质量追溯机制，并应符合以下要求：

a) 每个环节（包括数据采集、预处理、点云分类、模型训练、参数提取、精度验证等）应指定责任人，并记录操作时间戳。

b) 关键操作步骤（如样地布设、飞行参数设置、分类算法选择、标注抽检等）应留有操作日志。

c) 出现数据异常或精度不满足要求时，应根据时间戳和责任分工追溯原因并完成整改，整改记录应归档备查。

附录 A
(规范性)
地面调查制表要求

样地调查记录表见表 A.1。

表 A.1 样地调查记录表

样地编号：				调查日期：			调查人：	
树木编号	树种	E (°)	N (°)	胸径 (cm)	树高 (m)	东西冠幅 (m)	南北冠幅 (m)	健康状况
1								
2								
.....								

注：E 代表经度，N 代表纬度，经度和纬度保留4位小数，表中其余各列数据保留两位小数。

附录 B
(资料性)
精度评价指标及报告

B.1 单木位置

$$r = \frac{TP}{TP+FN} \quad (\text{B.1})$$

$$p = \frac{TP}{TP+FP} \quad (\text{B.2})$$

$$F_1 - score = 2 \cdot \frac{r \times p}{r+p} \quad (\text{B.3})$$

式中:

r——召回率;

p——树顶探测正确率;

F₁-score——检出率和准确率的调和平均值;

TP——正检数;

FN——漏检数;

FP——误检数。

B.2 树高、胸径、冠幅、生物量、碳储量

$$RE = \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (\text{B.4})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{B.5})$$

式中:

RE——相对误差;

R²——决定系数;

$\hat{y}_i$ —— 提取值;

y_i —— 实测值;

$\bar{y}$ —— 实测值的平均值

B.3 精度评价报告

表 B.1 精度评价表

报告编号		评价日期	年 月 日
评价对象	☐ 单木分割与识别 ☐ 因子提取 ☐ 模型估算	数据来源	☐ 无人机遥感 ☐ 地面实测 ☐ 模型模拟
验证集样本量	株 (占总样本的20%)		
评价类别	提取因子	评价指标	
单木分割与识别	—	F ₁ -score	
因子提取	树高	相对误差 (RE)	

		决定系数（R ² ）	
	胸径	相对误差（RE）	
		决定系数（R ² ）	
	冠幅	相对误差（RE）	
		决定系数（R ² ）	
	生物量	相对误差（RE）	
		决定系数（R ² ）	
	碳储量	相对误差（RE）	
		决定系数（R ² ）	
综合评价项目	判定结果		备注
单木分割与识别精度	☐ 合格 ☐ 不合格		
因子提取整体精度	☐ 合格 ☐ 不合格		
是否满足应用要求	☐ 是 ☐ 否		
评价结论与建议			
主要存在问题			
改进建议			

附录 C

(资料性)

多模态实例分割模型架构及参数指南

C.1 多模态实例分割模型架构说明

表 C.1 多模态实例分割模型常用架构表

架构名称	关键特征	参考文献
Mask2Former 元架构	基于Transformer解 码器与掩码注意力机 制，支持统一图像分 割	Ruschhaupt, J.P., et al. (2025). Comparison of Mask2Former and Mask R-CNN for individual tree crown delineation. Remote Sensing of Environment, 312, 114321. Elsherif, A., et al. (2025). Efficient large-scale mapping of Acacia tortilis trees using UAV-based images and transformer-based semantic segmentation architectures. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, V-3-2025, 123-130. WANG J, ZHANG H, QIU H, et al. (2026). Species-specific tree structural parameters extraction via UAV RGB-LiDAR data and multimodal instance segmentation. Plant Phenomics, 8(1): 100171-
MTCDNet	Transformer多模态 特征融合树冠检测网 络，融合RGB与CHM	Yang, G., Zhang, X., et al. (2025). MTCDNet: Multimodal feature fusion-based tree crown detection network using UAV-acquired optical imagery and LiDAR data. Remote Sensing, 17(12), 1996. DOI: 10.3390/rs17121996.
半监督学习框架	传统分割算法输出作 为初始训练目标，精 细调整Mask R-CNN	Wu, J., Li, W., et al. (2026). A semi-supervised framework for UAV-based individual tree crown segmentation in structurally heterogeneous planted forests. Forest Ecology and Management, 520, 120416.
自相似聚类分组 方法	基于冠层曲面微分和 多信息自相似聚类的 单木分割	Zhang, L., Wang, X., et al. (2024). A novel self-similarity cluster grouping approach for individual tree crown segmentation using multi-features from UAV-based LiDAR and multi-angle photogrammetry data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 128, 103782.
YOLO系列	单阶段目标检测算 法，适用于快速单木 检测	王凯, 陈优良, 胥寒莉. (2024). 基于改进YOLOv7的杨梅树单木检测. 农业工程学报, 40(11), 159-167. Wu, D., et al. (2024). Individual tree species identification for complex coniferous and broad-leaved mixed forests based on deep learning combined with UAV LiDAR data and RGB images. Forests, 15(2), 345.
Mask R-CNN	两阶段实例分割框 架，同时输出目标边 界框和分割掩膜	He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R. (2017). Mask R-CNN. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2961-2969. 廖福兰, 林文树, 刘浩然. (2024). 基于无人机LiDAR点云栅格化和Mask

		R-CNN算法的单木树冠分割. 农业工程学报, 40(23):258-266.
U-Net及其变体	编码器-解码器结构, 适用于语义分割, 变体包括CIA-UNet等	Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. <i>Proceedings of MICCAI</i>, 234-241. Wang, H., et al. (2024). 3D-CNN with multi-scale fusion for tree crown segmentation and species classification. <i>Remote Sensing</i>, 16(23), 4544.

C.2 多模态实例分割模型架构参数推荐

表 C.2 多模态实例分割模型参数推荐

架构	输入尺寸 (像素)	批大小	初始学 习率	优化器	损失函数	训练轮次 (epoch)	备注
Mask2Former	512×512 或 1024×1024	2 ~ 8	0.0001	AdamW	掩码损失 + 分类损失	100 ~ 300	需预训练骨干网 络 (如 Swin)
MTCDNet	512×512 或 1024×1024	4 ~ 16	0.001	Adam	交叉熵损失 + Dice 损 失	150 ~ 400	多模态输入需分 别归一化
半监督学习框 架 (Mask R- CNN 为主)	512×512 或 1024×1024	4 ~ 16	0.0025	SGD	分类损失 + 回归损失 + 掩码损失	50 ~ 200 (无 监督阶段) + 50 ~ 100 (微 调)	初始训练需传统 分割生成伪标签
自相似聚类分 组	无需固定输 入 (点云/影 像特征)	—	—	—	自相似度量	—	非深度学习参 数, 详见文献
YOLO 系列 (v7/v8)	512×512 或 1024×1024	8 ~ 32	0.01	SGD / AdamW	CloU + 分 类损失	100 ~ 300	适用于快速检 测, 后处理 NMS 阈值 0.5
Mask R-CNN	512×512 或 1024×1024	4 ~ 16	0.0025	SGD	多任务损失	150 ~ 300	骨干网络可使用 ResNet50/101
U-Net 及其变 体	512×512 或 1024×1024	8 ~ 32	0.001	Adam	交叉熵损失 + Dice 损 失	100 ~ 300	变体参数略有差 异

附录 D
(资料性)
单木 (林分) 因子提取及精度说明

D.1 单木 (林分) 因子提取说明

表 D.1 单木 (林分) 因子提取目的及所用技术方法的成熟度

因子名称	提取目的	提取方法成熟度
单木坐标	确定树木空间位置，为空间结构分析（竞争指数、聚集指数等）及采伐/补植布局提供基础	成熟（基于分割掩膜质心或点云局部极值，已广泛应用于机载 LiDAR 数据处理）
树种	识别树木种类，用于树种多样性、混交度计算及补植树种选择	较成熟（多光谱/激光雷达点云结合深度学习分类；纯林及主要针叶树种准确率高，阔叶混交林仍需人工辅助）
株数	获取林分密度，用于采伐强度计算、补植密度控制	成熟（单木分割后直接统计，精度取决于分割算法）
树高	获取单木垂直生长参数，用于树高-胸径模型、生物量估算及垂直分层分析	成熟（局部最大值法结合 CHM，标准流程；密集林分中下层木存在低估）
冠幅	获取树冠投影范围，用于树冠竞争分析、开敞度指数计算及补植间距控制	较成熟（基于分割掩膜长短轴均值；重叠冠幅分割误差较大）
胸径	获取树干直径，用于竞争指数、生物量、碳储量计算	方式①（异速生长模型）：成熟（依赖本地化模型精度）；方式②（点云切片圆拟合）：适用条件有限（点云密度高、冠层间隙大时可行），总体中等成熟
生物量	估算单木干物质质量，用于碳汇计量、林分生产力评价	成熟（基于异速生长方程，国家标准已有完整模型体系）
碳储量	估算单木固碳量，用于碳汇经营目标评价	成熟（由生物量乘以碳转换系数得到，碳系数已有成熟研究成果）

注：技术方法成熟度分为“成熟”（已广泛应用并形成标准操作流程）、“较成熟”（可用但需注意适用条件或人工辅助）、“中等成熟”（特定条件下可用，尚需进一步验证）。用户应根据实际林分类型和数据质量选择合适方法，并参照表F.2的精度要求进行验证。

D.2 单木 (林分) 因子提取精度说明

表 D.2 单木 (林分) 因子提取精度

指标	人工针叶纯林或结构简单林分	天然阔叶混交林或结构复杂林分
树高提取	相对误差≤8%，R²≥0.85	相对误差≤15%，R²≥0.75
胸径估算	相对误差≤15%，R²≥0.80	相对误差≤25%，R²≥0.70

T/CSF XXXX—XXXX

冠幅提取	相对误差 $\leq 12\%$, $R^2 \geq 0.82$	相对误差 $\leq 15\%$, $R^2 \geq 0.70$
生物量估算	相对误差 $\leq 20\%$, $R^2 \geq 0.75$	相对误差 $\leq 25\%$, $R^2 \geq 0.65$
碳储量估算	相对误差 $\leq 20\%$, $R^2 \geq 0.75$	相对误差 $\leq 25\%$, $R^2 \geq 0.65$
郁闭度估算	相对误差 $\leq 10\%$	相对误差 $\leq 15\%$
空间结构参数（混交度、 开敞度、大小分化度、空 间聚集指数）	相对误差 $\leq 15\%$	相对误差 $\leq 20\%$
单木坐标定位误差	$\leq \pm 10\text{ cm}$	$\leq \pm 15\text{ cm}$
株数提取精度	$\geq 95\%$	$\geq 90\%$