

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209536

基于红外半球摄影的无线叶面积指数传感器设计^{*}

王瀚聪 吴寅

(南京林业大学信息科学技术学院 南京 210037)

摘要: 叶面积指数(LAI)是研究林地生态系统和植被冠层结构的重要参量,高效、准确地测量 LAI 是森林资源清查工程中的一项重要工作。传统的 LAI 测量方式需要人工手持仪器至现场测量,费时费力,近年来随着物联网技术的发展,利用无线传感节点测量 LAI 的技术逐渐走向成熟,但仍有部分问题亟需解决。本文提出了一种基于红外半球摄影(DIHP)的 LAI 测量方法,设计了针对红外摄影颜色空间的自适应分割算法,并部署在边缘计算平台“树莓派”上,解决了传统半球摄影法(DHP)容易受环境干扰的问题。所设计的传感节点测量值与手持式植被冠层分析仪 HM-G20 比较相关性显著,R 值达到了 0.996 91,平均测量准确度可达 93.57%,比 DHP 方式提高了 13.85%。

关键词: 叶面积指数;红外半球摄影;无线传感器

中图分类号: TP 39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6

Design of wireless leaf area index sensor based on digital infrared hemispherical photography

Wang Hancong Wu Yin

(College of Information Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important parameter for studying forest ecosystem and vegetation canopy structure. It is an important work in forestry engineering to measure LAI efficiently and accurately. The traditional LAI measurement method requires manual hand-held instruments to make on-site measurement, which is time consuming and laborious. In recent years, with the development of Internet of Things, the technology of using wireless sensors to measure LAI has gradually become mature, but some problems still need to be solved. This paper proposed a LAI measurement method based on digital infrared hemispherical photography (DIHP), and designed an adaptive segmentation algorithm for the color space of infrared photography, which was deployed on the edge computing platform "Raspberry Pi" to solve the problem that traditional digital hemispherical photography (DHP) methods are prone to environmental interference. The measurement results of the sensor designed in this paper are significantly correlated with the hand-held vegetation canopy analyzer HM-G20, with an R value of 0.99691 and an average measurement accuracy of 93.57%, which is 13.85% higher than that of DHP. The DIHP sensor has low operating power consumption, which meets the requirements of long-term field deployment of forestry Internet of Things and has great application prospects.

Keywords: leaf area index; digital infrared hemispherical photography; wireless sensor

0 引 言

叶面积指数(leaf area index, LAI)通常被定义为每单位土地面积上植被叶片组织的单侧总面积^[1],是林地生态系统中反映植被结构状态的重要参数之一,也是作物生长模型、大气模型、生态系统功能模型和水循环模型中的重要陆地特征参量,因此精确且高效地测量叶面积指数对于研

究森林结构、监测森林状态具有重要意义^[2-3]。

工程中直接测量 LAI 需要人工长期收集叶片,对植被具有一定破坏性,因此实际上通常采取间接测量法,通过提取冠层孔隙度等中间参数,再根据植被光学特性反演推测 LAI^[4]。随着现代物联网技术的发展,使用无线传感器替代人工手持式分析仪测量 LAI 的方法日益得到关注^[5]。当前的传感器设计方案以半球摄影法(digital

收稿日期:2022-04-07

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(32171788,31700478)、江苏省大学生创新训练计划(202110298089Y)项目资助

hemispherical photography, DHP)为主^[6-7],由于其成本低廉,仅需要鱼眼相机及数字图像处理平台即可实现,因此具备大量部署的功能价值。

但利用 DHP 测量 LAI 仍存在部分问题需要解决^[8-9],比如在白天采集植被冠层图像时容易受到太阳曝光的影响,导致在同一天同一地点不同时间段内测量出来的数值偏差较大;且由于叶片和天空的 RGB 图像中蓝色通道占比较高,传统的阈值分割方法在蓝色背景时的分割结果极不理想,导致植被冠层孔隙度提取不准确,从而严重影响 LAI 的反演。Song 等^[10]通过量化分析不同因素对 DHP 分割准确度的影响,得出测量误差主要是由曝光和阈值参数不匹配引起的。陈云坪等^[11]通过构建 HSV-Otsu 算法判断拍摄环境为晴天或者阴天,从而采取 HSV 算法或 Otsu 算法进行分割,其与 LAI-2200 植物冠层分析仪在玉米样本中的相关性达到了 0.928 7。目前也有相关研究指出可以利用深度学习算法进行 DHP 图像分割, Li 等^[12]即设计了一个 U-Net 模型应用于图像分割,鉴别准确率可达 98.7%; Ma 等^[13]则改进了 pix2pix 模型,使得分割准确度提升到 0.983 4; Diaz 等^[14]利用 SE-ResNet 模型提升了 DHP 全天候工作的能力。深度学习算法在一定程度上强化了 DHP 的鲁棒性,但由于计算量过大^[15]并不适合完整部署于低算力的无线传感设备上。

为了解决上述问题,本文设计了一个基于红外半球摄影(digital infrared hemispherical photography, DIHP)方案的无线叶面积指数传感节点。通过红外摄影使得传感节点的工作环境由白天转为黑夜,从而极大缓解了背景环境及曝光问题;同时针对红外成像的特点改进了相应阈值分割算法,有效提升了孔隙度提取及 LAI 测量的准确度;另外,通过使用 LoRa 无线通信技术将测量结果远程传输至上位机中,研究人员可定期查看 DIHP 传感节点所采集到的数据。根据实地场景试验的结果,本文所设计传感器的测量值与手持式测量仪数值高度相关基本吻合,完全具备实际应用的能力。

1 系统硬件组成

1.1 红外半球摄影结构

DIHP 即是在 DHP 的基础上增加近红外光源,使得传感器在夜间也能捕获近红外图像。本文使用的红外半球摄影模块结构如图 1 所示。

由图可见,该机构主要由三部分组成:中间是鱼眼镜头,用于采集半球图片;左、右两侧的是近红外光源,用于发射波段为 850 nm 的近红外光;依靠于红外光源旁边的则是环境光传感器,用于检测环境中的光照强度。鱼眼镜头的视场角约为 160°,红外光源的视场角约为 140°,将两个红外光源左右布置组合后即可在 1~5 m 的视距内实现红外夜视效果。

1.2 传感器节点架构

本文设计的传感器节点硬件主要由微处理器、DIHP

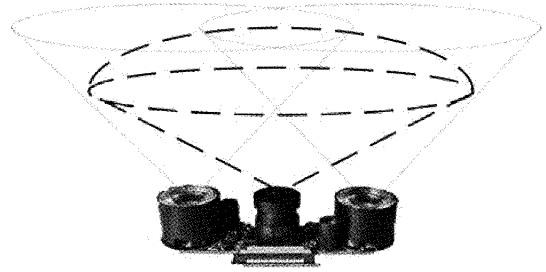


图 1 红外半球摄影模块结构

摄影模块、LoRa 通信模块和供电模块组成,其组成及结构如图 2 所示。

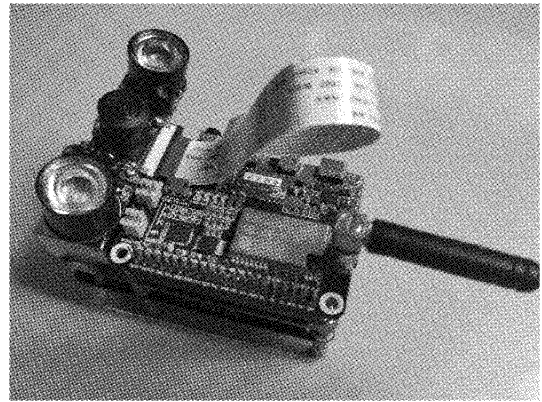


图 2 传感节点硬件结构

DIHP 节点采用了树莓派 4B 开发平台,其搭载了 ARM Cortex-A72 架构的 CPU,内存为 4 GB,便于执行边缘计算任务。DIHP 摄像模块的感光元件型号为 OV5647,CMOS 尺寸为 1/4 英寸,可以拍摄分辨率最大为 2 592×1 944 的图像。通信模块采用了集成 SX1278 芯片的 LoRa 模块,工作频段为 470 MHz,最远信号传输距离可达 2 km。供电模块搭载了规格为 2 600 mAh 的锂电池模组,支持 5 V 电压输出,可以满足微控制器的能耗需求。

传感系统的工作流程如图 3 所示,首先将传感器部署于待测位置,然后利用 DIHP 拍摄植被冠层图像,微处理器则会对所拍摄的图像进行即时处理,提取相关参数并根据算法反演 LAI,最后将得到的数值通过 LoRa 远程传输至后台上位机中。

2 算法设计

2.1 叶面积指数反演算法

利用半球摄影法反演 LAI 的理论方法是基于 Beer-Lambert 定律的单角度法和多角度法^[16]。单角度法受取样单一问题的影响,存在较大的偶然误差,因此本文使用多角度法测量 LAI。

在自然环境中,植被的叶片是呈无规则随机分布的,并且单一叶片的表面积远远小于植被冠层的总面积,同时所

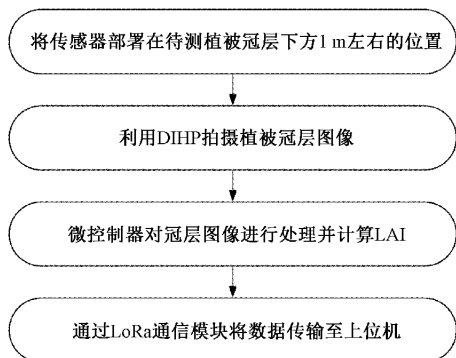


图 3 传感器工作流程

有叶片的叶倾角度数可视为固定不变的,因此植被冠层可以近似为透光溶质。基于此,米勒(Miller)提出了多角度计算 LAI 的公式^[17]:

$$LAI = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} [-\ln T(\theta)] \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中: θ 为天顶角, $T(\theta)$ 为范围内的植被孔隙度,其值可通过计算植被面积与总面积的比值求得,在计算机图像处理中可认为是表示背景的像素数量与区域内总像素数量的比值。假设区域内植被像素数量为 $N_v(\theta)$, 背景像素数量为 $N_b(\theta)$, 则:

$$T(\theta) = \frac{N_b(\theta)}{N_v(\theta) + N_b(\theta)} \quad (2)$$

为方便设计程序算法,式(1)用差分形式可表示为:

$$LAI = 2 \sum_i^n [-\ln T(\theta_i)] \cos\theta_i \sin\theta_i \Delta\theta \quad (3)$$

式中: n 为取样角度的数量,反映在半球图片中即为同心圆环的数量,如图 4 中的 n 为 4。可以看出如果 n 的取值过少的话无法还原整张图片的植被冠层特征,测出来的值必然存在一定误差,但如果 n 的取值过高则会增大传感节点的计算量,因此需要在精准度与计算量之间寻求一个平衡。考虑到本文使用的鱼镜头视场角为 160° ,故将 n 的值设为 20,即 $\Delta\theta = 4^\circ$ 。

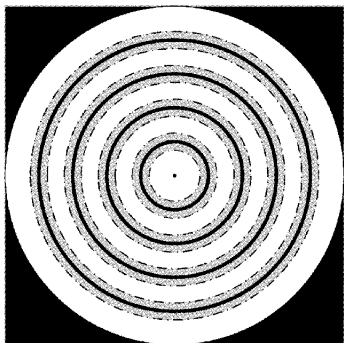


图 4 半球摄影图片分割模型

2.2 联合优化阈值分割算法

根据 2.1 中的算法,测量 LAI 的关键在于提取植被孔隙度,因此需要对半球图像进行阈值分割,提取图片中的植

被和背景区域并分别计算它们的像素数量。本节根据红外成像的特点提出了联合优化阈值分割算法,使其阈值分割的效果更为理想。

图 5 是 DIHP 节点仰视角度观测的成像图,矩形区域为裁剪后的图片,其中的圆形区域为半球摄影的实际成像区域,两边灰色的圆形区域是红外光源直接照射的区域。可以看出成像区域中红外光源的强弱是有区别的,越靠近中心的位置光照越强,越往四周光照越弱。基于 HSV^[18] 和大津法(Otsu)^[19] 的阈值分割算法是提取植被孔隙度的常用方法,HSV 对于图像的颜色通道敏感,适合处理光照环境复杂的场景,Otsu 在光照均衡的条件下分割效果最为理想。直接采用传统的 HSV 或者 Otsu 算法进行阈值分割将会受到光照条件不均匀因素的影响,从而导致阈值选取不准确。因此本算法将红外半球图片划分为 A~E 五个区域分别进行阈值分割,其中 A、B、D 和 E 区域光照受中心影响较小,采用 Otsu 算法进行阈值分割,C 区域光照环境复杂,采用 HSV 算法进行阈值分割。联合优化阈值分割算法的流程如图 6 所示,其中确定 A~E 区域位置的步骤不需要在实际测量过程中执行。

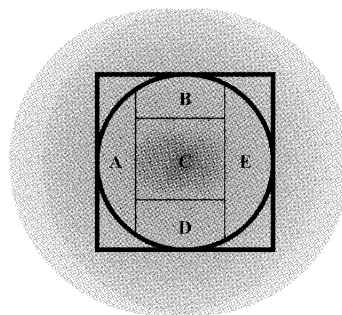


图 5 红外光源照射模型

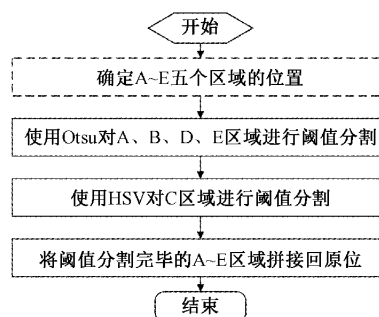


图 6 联合优化阈值分割算法运行流程

确定 A~E 五个区域具体位置的方法如图 7 所示。图 7(a) 首先使用传感器在暗室中拍摄样张照片;图 7(b) 将采集到的图片转化为灰度图,遍历图片检索每个像素的灰度值,绘制图片的灰度图;图 7(c) 根据灰度图的结果找到第一个波谷的灰度值(如图 7(b) 中的虚线处),并以其为阈值进行分割;图 7(d) 可根据分割结果得到 C 区域的大致位置,并可根据实际情况划分其与 A、B、D 和 E 区域的界限。

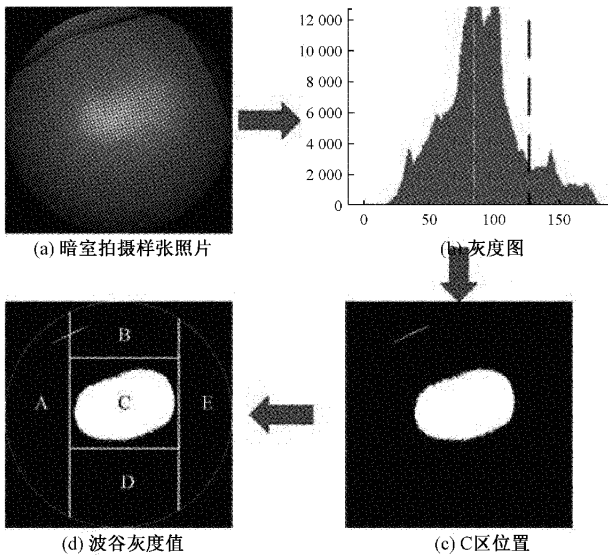


图 7 确定算法分割区域的步骤

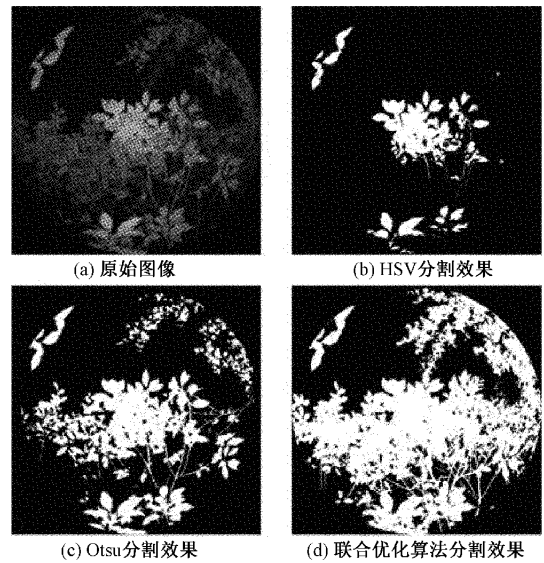


图 8 红外图像分割效果比较

3 实验与结果

本文设计的无线 DIHP 节点完成开发后于 2022 年 2~3 月间在南京林业大学的校内实验林场进行了一系列实验,测试内容包括图像分割效果、LAI 测量结果、LoRa 数据通信效果以及传感节点的能耗持久效果。

3.1 红外图像分割效果

为了验证本文提出的红外图像阈值分割算法的效果,在本实验中使用传感器拍摄了 10 张图片,首先人工标记植被和背景像素作为参考标准,再利用 HSV 算法、Otsu 和本文提出的联合优化阈值分割算法分别进行分割。3 种方法的分割效果如图 8 所示,与参考标准相比较的平均准确率及方差如表 1 所示。

表 1 红外图像分割算法准确度

算法	HSV	Otsu	联合优化算法
平均准确率/%	45.03	83.11	97.59
方差	0.005 239	0.000 439	0.000 038

由图 8 中可以看出 HSV 算法直接进行分割的效果并不理想,仅对光照较强的区域进行了有效分割;Otsu 的效果相对较好,但是选取的阈值仍然偏高,在光照较弱、灰度值较低的区域仍然丢失了不少细节;本文提出的联合优化算法分割效果是最优的。表 1 中的数据验证了联合优化算法的鲁棒性优于 HSV 及 Otsu 算法。

3.2 LAI 测量结果

图像分割的效果总体上会影响 LAI 的测量结果,但是由于半球摄影法本身存在一定误差,所以图像分割的准确度并不能代表 LAI 的测量准确度。本节使用了植物冠层分析仪 HM-G20(如图 9 所示,与目前常用的 LAI-2200C 型

植物冠层分析仪功能类似)作为标准以衡量 DIHP 节点 LAI 测量数值的精度,同时对比了本文提出的红外半球摄影法与传统的半球摄影法的优劣。



图 9 HM-G20 植物冠层分析仪

图 10 反映了本文提出的 DIHP 方法、传统 DHP 方法测量结果与手持式测量仪的相关性,其中传统 DHP 方法使用常规鱼镜头(非红外)和自适应大津法计算 LAI。结果表明两种方法的相关性均较高,传统 DHP 的相关性为 0.972 05,DIHP 的相关性为 0.996 91,但是从图中可以看出传统 DHP 测量结果的误差比 DIHP 大,因此本文再次选取了 20 个场景计算两种方法的测量准确度,结果如图 10 所示。

由图 11 可以看出 DIHP 方法的测量准确度更有优势。传统 DHP 方法的准确度均值为 79.72%,DIHP 方法的准确度均值为 93.57%,提升了 13.85%,这是由于传统 DHP 方法受拍摄环境影响较大导致的,在阳光直射或者天空晴朗时的测量结果准确度偏低,DIHP 方法利用夜间拍摄有效规避了此问题。

3.3 LoRa 通信距离

本文采用了基于 SX1278 芯片的 LoRa 模块,通信频段

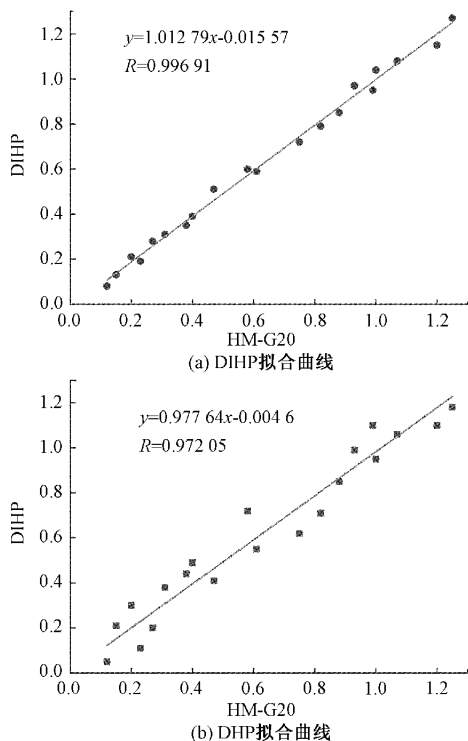


图 10 DIHP 和 DHP 与 HM-G20 的相关性曲线

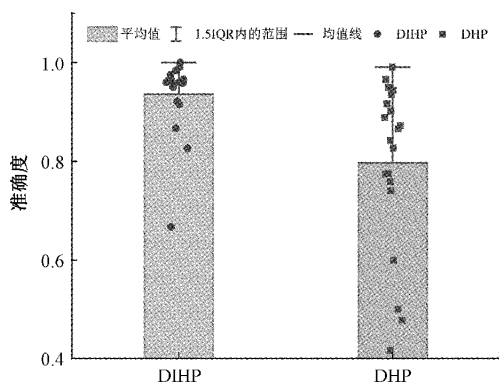


图 11 DIHP 和 DHP 的 LAI 测量准确度

为 470 MHz,将空中速率设置为 19.2 Kbps,发射功率设置为 30 dBm,测试其通信性能。

表 2 反映了通信模块在实验林场不同距离下的丢包率,测试结果表明在 300 m 内的信号传输是相对可靠的,这个距离也能够满足林业物联网的应用需求。

表 2 LoRa 通信距离与丢包率测试结果

通信距离/m	发送包个数	接收包个数	丢包率/%
100	1 000	990	1
200	1 000	962	3.2
300	1 000	901	9.9
500	1 000	673	32.7
1 000	1 000	312	68.8

3.4 传感节点能耗

本文设计的 DIHP 传感节点功耗主要由三部分组成:红外摄像模块拍摄功耗、微控制器运算功耗和 LoRa 无线通信功耗。其中红外摄像模块的额定电压为 3.3 V,电流为 500 mA,整体功耗约为 1.65 W;树莓派额定电压为 5 V,电流为 2 A,峰值功耗为 10 W,经测量实际传感器运行功耗为 3.2 W;LoRa 无线通信模块最大功耗为 100 mW。据此可以计算 DIHP 节点完整进行一次测量过程的功耗:摄像模块工作时间约为 5 s,微控制器运算时间约为 15 s,LoRa 发射信号时间约为 5 s,因此单次测量消耗能量约为 51 J。本文使用的供电模块规格为 5 V/2 600 mAh,则传感节点工作寿命约为 917 次,即假如每月测量 10 次,理论上本节点的有效使用时间可达 7 年半。当然实际部署中必然存在功耗损失问题,若将传感节点部署于野外环境中,每天晚上测量 1 次数据,一个星期后电池容量剩余 98%,因此实际可进行约 350 次测量任务,完全能够满足林业物联网应用需求。

4 结 论

本文针对利用 DHP 测量 LAI 的工作中存在受环境因素影响的问题,首次提出了在夜间利用红外 DHP 测量 LAI 的方法,针对红外成像的特点建立了联合阈值分割算法,并实际部署到无线传感器中进行了测试。实验表明本文设计的传感器与传统手持式测量仪具有高度相关性,并且具有稳定性高、鲁棒性强和功耗低的特点,适用于林业物联网的应用环境,满足实际测量需求。

另外,本文的工作也存在可以进一步优化的地方,比如红外摄影的成像质量较低,阈值分割后的图片细节处有明显的锯齿感,未来可以尝试引入深度学习等方法进一步优化。

参考文献

- [1] 谢贤胜,卢峰,杨元征,等. 广西桉树人工林叶面积指数的估测及其校正[J]. 生态学报,2022(11):1-12.
- [2] 方红亮. 森林垂直结构参数实测与遥感研究进展:以叶面积指数和聚集指数为例[J]. 科学通报,2021,66(24):3141-3153.
- [3] LIU Z, JIN G, CHEN J M, et al. Evaluating optical measurements of leaf area index against litter collection in a mixed broadleaved-Korean pine forest in China[J]. Trees, Structure and Function, 2015, 29(1):59-73.
- [4] 尹晓爱,杨秀超,侯瑞,等. 基于智能手机的玉米冠层叶面积指数测定[J]. 中国水土保持科学(中英文),2021,19(6):125-130.
- [5] BAUER J, JARMER T, SCHITTENHELM S, et al. Processing and filtering of leaf area index time series assessed by in-situ wireless sensor networks [J]. Comput. Electron. Agric., 165(2019):104867.

- [6] BROWN L A, OGUTU B O, DASH J. Tracking forest biophysical properties with automated digital repeat photography: A fisheye perspective using digital hemispherical photography from below the canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 287(329):107944.
- [7] 吴伟斌,张震邦,刘佛良,等. 基于半球图像法的叶面积指数反演研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(23):156-162.
- [8] 刘志理,金光泽. 基于光学仪器法测定谷地云冷杉林叶面积指数的季节变化[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12):3420-3428.
- [9] 苑振皓,金光泽,刘志理. 自动曝光对半球摄影法测量叶面积指数及其季节变化的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12):4004-4012.
- [10] SONG G M, CHAO K J, DOLEY D, et al. Sky-canopy border length, exposure and thresholding influence accuracy of hemispherical photography for complex plant canopies[J]. *Botanical Studies*, 2018, 59(1):19.
- [11] 陈云坪,袁子炜,马存诗,等. 基于半球摄影法的便携式叶面积指数测量仪研制[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(10):73-76.
- [12] LI K, HUANG X, ZHANG J, et al. A new method for forest canopy hemispherical photography segmentation based on deep learning [J]. *Forests*, 2020, 11(12):1366.
- [13] MA C S, CHEN Y P, HOU L, et al. Deep learning for vegetation image segmentation in LAI measurement[C]. *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2020.
- [14] DIAZ G M, LENCINAS J D. Enhanced gap fraction extraction from hemispherical photography[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(8): 1785-1789.
- [15] 彭宇,姬森展,于希明,等. 语义分割网络的 FPGA 加速计算方法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(9):1-12.
- [16] 阎广建,胡容海,罗京辉,等. 叶面积指数间接测量方法[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5):958-978.
- [17] 牛小桃,樊军,王胜,等. 利用鱼眼摄像机测量植被叶面积指数动态变化[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3183-3190.
- [18] 龙浩,李庆党,张明月. 基于 HSV 颜色空间和局部纹理的阴影消除算法研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(18):81-87.
- [19] 吴京城,洪欢欢,施露露,等. 反背景差分结合 Otsu 的细胞图像分割方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(4):82-89.

作者简介

王瀚聪,本科,主要研究方向为林业物联网技术,机器视觉。

E-mail: hancong@njfu.edu.cn

吴寅(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为林业物联网技术,林木无损检测技术。

E-mail: wuyin@njfu.edu.cn