

# 基于鱼目摄像和地面激光雷达的真实叶面积指数计算

高纪青, 云 挺, 薛联凤

(南京林业大学信息科学与技术学院, 南京 210037)

[摘要] 为了准确获得冠层的真实叶面积指数(LAIa), 本文提出了一种基于鱼目摄像和地面激光雷达获取半球图像的计算方法. 对鱼目摄像机拍摄的图片借助地理学上纬度线的概念来表征不同高度叶子的天顶角, 通过统计学方法获取叶倾角, 分析半球图像获取孔隙率. 根据 Beer-Lambert 定律即可计算有效叶面积指数(LAIe); 真实叶面积指数的获取则通过冠层的丛生系数来解决. 激光扫描仪获取的冠层点云数据则经一定比例缩放在一个球的上表面, 再通过球极平面投影和 Lambert 方位角等面积投影将上球面图像投射到平面上, 以获取类似半球图像.

[关键词] 真实叶面积指数, 鱼目摄像, 球极平面投影, Lambert 投影

[中图分类号] TP301.6 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2014)04-0137-08

## The Calculation of Actual LAI Based on Terrestrial Laser Scanning Data and Fish Eye Camera

Gao Jiqing, Yun Ting, Xue Lianfeng

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

**Abstract:** In order to obtain accurate actual Leaf Area Index (LAIa), this paper presents a calculation method based on Fish Eye Camera and Terrestrial Laser Scanning Data to obtain images of the hemisphere, with the geography latitude line concept to characterize zenith angle of leaves of different heights, and to get leaf angle through statistical methods. Calculating effective Leaf Area Index according to Beer-Lambert Law and actual Leaf Area Index is got through effectively slicing which solves the problem of overlapping leaves. The point cloud data of the tree acquired by Laser Scanning is zoomed on the surface of a sphere by certain scaling. Then, through Stereographic Projection and Lambert Azimuthally Equal-Area Projection, the spherical image is projected onto the plane to get similar hemisphere images.

**Key words:** actual Leaf Area Index, Fish Eye Camera, Stereographic projection, Lambert azimuthally equal-area projection

叶面积指数是林学测量上一个重要参数, 包括有效叶面积指数和真实叶面积指数<sup>[1]</sup>. 传统意义上的叶面积指数是指有效叶面积指数 (Effective Leaf Area Index), 即太阳光能够照射到的叶面部分的叶面积指数, 目前业内通过 LAI-2000 (冠层分析仪) 等相关仪器可以获取. 实际测量中还有一个重要参数也引起研究者的注意——真实叶面积指数, 但这需要有效地解决叶子间互相遮挡的问题, 是现有仪器所无法解决的<sup>[2]</sup>.

为此本文基于鱼目摄像和地面激光雷达<sup>[3]</sup> 获取的半球图像, 提出了一种较为准确的真实叶面积指数计算方法. 依据半球图像中加入的“纬度线”能够较准确地表征冠层各天顶角下的相关信息参数<sup>[4]</sup>, 通过 RGB 值或 SVM 等方法提取叶子像元, 计算出孔隙率等相关参数, 从而极大地减少了传统计算的误差.

## 1 基于 Beer-Lambert 定律的 LAI 计算

鉴于线性最小二乘反演法, 数字化半球摄像技术是实际中最为常用的估算有效叶面积的方法<sup>[5]</sup>. 这

收稿日期: 2014-08-16.

基金项目: 国家自然科学基金 (31300472)、江苏省自然科学基金 (BK2012418).

通讯联系人: 薛联凤, 副教授, 研究方向: 图像处理. E-mail: xuelianfeng@njfu.edu.cn

种方法的主要注意点是:设定合适的曝光率,以便区分开叶面元素(用0表示)和天空部分(用1表示).这一区分的参考标准是一个基于鱼目摄像机拍摄相片上的像素.在传统的实验过程中,已经得到了孔隙率、天顶角、倾斜角以及有效叶面积指数之间的数学关系:

$$-\ln P(\theta) = G(\theta, \alpha) \times L_e / \cos(\theta). \quad (1)$$

其中  $P(\theta)$  表示的是孔隙率,  $\theta$  是入射太阳光线的天顶角,  $\alpha$  是叶倾角,  $L_e$  是有效叶面积指数(具体参数关系如图1).

为了进一步变型,进行下面定义:

$$T(\theta) = -\ln P(\theta). \quad (2)$$

$$K(\theta, \alpha) = \frac{G(\theta, \alpha)}{\cos(\theta)}. \quad (3)$$

其中  $G(\theta, \alpha)$  表示叶面区域在入射光线的垂直方向的平均投影,并且有以下定义:

$$G(\theta, \alpha) = \begin{cases} \cos \alpha \cos \theta, & \theta \leq \pi/2 - \alpha, \\ \cos \alpha \cos \theta (1 + \frac{2(\tan x - x)}{\pi}), & \theta > \pi/2 - \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

其中  $x = \cos^{-1}(\cot \alpha \cot \theta)$ , 于是式(1)可改写成:

$$T(\theta) = K(\theta, \alpha) \times L_e. \quad (5)$$

$K(\theta, \alpha)$  是消光系数,若叶面元素的倾斜角  $\alpha$  和孔隙率  $P(\theta)$  已知,具有相同天顶角的一些区域的有效叶面积指数  $L_e$  就可以通过式(5)计算出来.鉴于要求相同天顶角这一理念,在此引入了地理学上“纬度线”的概念,处在同一纬度区域的天顶角近似相等.

式(5)被广泛应用于有效叶面积指数的求取计算中,然而若要获得真实叶面积指数  $L$ ,还要计算出相应冠层的丛生系数  $\Omega_e$ ,其关系如式(6):

$$L_e = \Omega_e L. \quad (6)$$

故式(3)可改写成:

$$L = \frac{T(\theta)}{K(\theta, \alpha) \times \Omega_e}. \quad (7)$$

$T(\theta)$  的求取是获取真实叶面积指数的关键.本文的冠层孔隙率是基于一张半球图像分析计算的.

## 2 半球图像的获取

半球摄影法是一种快速、准确地测量冠层结构参数的方法,它用装备鱼眼镜头的数码相机或者其他光学传感器获取冠层影像来研究植被的结构<sup>[6]</sup>(如图2).半球摄影法具有非破坏性可重复采样、快速准确、获取数据量大、容易操作、方便快捷等优点.

基于半球摄影获取半球图像的主要方法有底视法和顶视法,即分别在冠层下方仰视拍摄和在冠层上方俯视拍摄.考虑到植被的高度和拍摄的方便,本文采用的是俯视法.对于获得的彩色图像,通过设定合适的 RGB 阈值去除明显的枝干部分,再加入地理学上“纬度线”(n 个同心圆)用以表征冠层在不同天顶角下的相关参数信息.考虑到鱼目半球图像的视角是  $180^\circ$ ,以图像中心点为圆心,将图像划分为 9 个同心环,由里到外分别用  $5^\circ, 15^\circ, \dots, 75^\circ, 85^\circ$  表示它的 9 个天顶角(如图6(d)),利用数字图像处理技术分别统计每一个环的叶片和背景像元的数量,冠层孔隙率可以由以下计算公式获得<sup>[7]</sup>:

$$T(\theta) = \frac{N_s(\theta)}{N_s(\theta) + N_i(\theta)}. \quad (8)$$

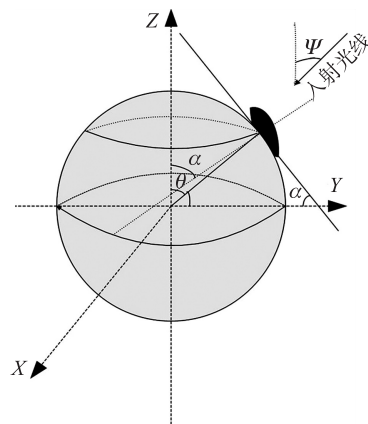


图1 叶倾角和天顶角关系图

Fig.1 Leaf angle and zenith angle diagram

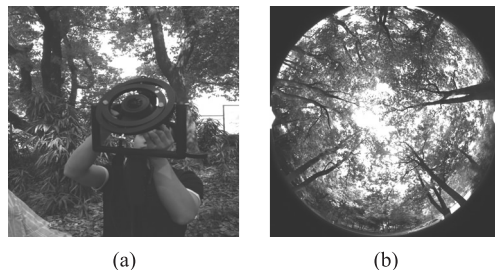


图2 (a)鱼眼摄像机(b)半球图像

Fig.2 (a)Fish-eye camera(b)Hemispherical image

式中  $T(\theta)$  是  $\theta$  视角下的冠层孔隙度,  $N_i(\theta)$  是  $\theta$  视角下的叶片像素数量,  $N_s(\theta)$  是  $\theta$  视角下背景(天空)像素数量.

### 3 点云数据的类似半球图像获取

随着科技的进步,激光雷达的出现使物体的空间信息和色彩信息能够非常容易地获取,地面激光扫描和航空激光扫描也成了林业研究的主流方法<sup>[8]</sup>.

对于地面激光雷达扫描获取七维(三维空间信息,RGB 值和亮度)点云数据,如何获取植被冠层孔隙率,进而计算真实叶面积指数成为当下研究的重点.

#### 3.1 树木点云的上半球压缩

通过地面激光雷达,可以准确获取树木的空间和色彩信息.对于获取的三维空间点云数据,首先对其进行笛卡尔坐标和球面坐标的转化,如式(9):

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \\ \theta = \arccos[z / \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)}], \\ \varphi = \arctan(y/x). \end{cases} \quad (9)$$

通过设定合适统一的  $r$ ,即可将散乱的点云压缩到一个半径为  $r$  的球面上(本文采用上半球),再经过球面坐标和笛卡尔坐标转换即完成了点云的球面压缩过程,如式(10):

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi, \\ y = r \sin \theta \sin \varphi, \\ z = r \cos \theta. \end{cases} \quad (10)$$

#### 3.2 球极平面投影

球极平面投影也一直被广泛地应用在三维球面到二维平面投影的过程中,相比较 Lambert 方位角等面积投影,它能很好地保留角度信息,但是相关面积的信息传递不是很理想.投影过程如图 3 所示.

若  $P$  是球面任意一点,坐标为  $P(x, y, z)$ ,  $O$  是一个极点,连  $OP$  交上切平面于  $P'(x', y')$ .  $P'$  即点  $P$  的投影,于是有以下关系:

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{1+z}, \\ y' = \frac{y}{1+z}. \end{cases} \quad (11)$$

$$(x, y, z) = \left( \frac{2x'}{1+(x')^2+(y')^2}, \frac{2y'}{1+(x')^2+(y')^2}, \frac{-1+(x')^2+(y')^2}{1+(x')^2+(y')^2} \right). \quad (12)$$

#### 3.3 Lambert 方位角等面积投影

Lambert 方位角等面积投影一直被广泛地应用在球面到平面的投影过程中,它能准确地呈现出球面的所有区域,然而角度信息却不能有效地传递.投影过程的切面图如图 4 所示.  $N$  表示一个极点,  $P$  是球面上一个点,以  $NP$  三维空间的欧氏距离为半径画圆,交上切平面于  $P'$ ,  $P'$  即  $P$  的投影点.设  $P$  点坐标为  $(x, y, z)$ ,  $P'$  的坐标为  $(x', y')$ ,  $N(0, 0, 1)$ , 于是有如下关系:

$$\begin{cases} x' = x \sqrt{\frac{2}{1-z}}, \\ y' = y \sqrt{\frac{2}{1-z}}. \end{cases} \quad (13)$$

$$(x, y, z) = \left( x' \sqrt{1 - \frac{(x')^2 + (y')^2}{4}}, y' \sqrt{1 - \frac{(x')^2 + (y')^2}{4}}, -1 + \frac{(x')^2 + (y')^2}{2} \right). \quad (14)$$

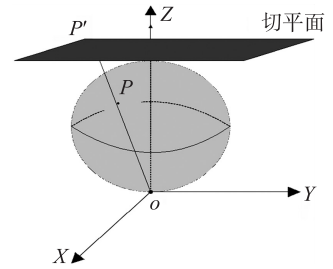


图 3 球极平面投影过程  
Fig. 3 Stereographic projection process

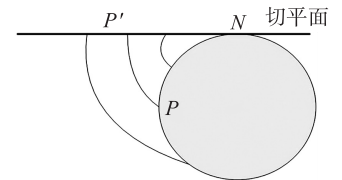


图 4 Lambert 方位角等面积投影过程的切面图  
Fig. 4 Tangent plane of Lambert Azimuthally equal-area projection process

## 4 随机冠层理论

地面的太阳光斑源于太阳照射到植被冠层时穿过孔隙的结果,通过对这些光斑的分析和半阴影效应理论的结合,可以得到一个表征植被冠层孔隙分布的相关函数.假设冠层在很大一个范围内是均匀分布的,由泊松概率统计可知在任何方向的一个切平面测量的太阳光斑值大概是整体的平均光斑值的 10 倍多,这一估算的准确率高达 95%<sup>[9]</sup>.通常情况下,在某一个切平面的孔隙大小(面积)是不规则改变的.经过数据的分析,测量的孔隙大小被重新依据面积大小升序或者降序排列,可以得到一个关于冠层的间隙尺寸累计函数  $F(\lambda)$ ,其中  $F(\lambda)$  表示孔隙尺寸大于  $\lambda$  部分所占总切面的比例.在图 6 中, $F(\lambda)=0$ ,表示  $\lambda$  大于  $\lambda_1$  部分的比例为 0,即  $\lambda_1$  为冠层中最大的孔隙尺寸.如果  $\lambda_1$  是切平面上长度为  $L_t$  唯一的孔隙尺寸,则  $F(\lambda)$  的函数图就是从 0 ~  $\lambda_1$  的水平线,且  $F(\lambda) \equiv \lambda_1/L_t$ .当  $\lambda=0$  时,表示冠层中所有孔隙所占切面的比例,此时对应的  $F(\lambda)$  是最大值.  $F(\lambda)$  是理论情况下(即目标冠层平铺无覆盖)的间隙尺寸累计函数,实际测量中常用  $F_m(\theta)$  表示有效孔隙率累加函数,有  $F_m(0)=P(\theta)$ .

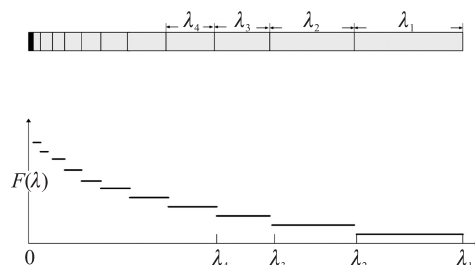


图 5 冠层的间隙尺寸累计函数

Fig. 5 The cumulative gap size canopy function

由 Beer-Lambert 定律的演变公式(7)进一步变形可得:

$$P(\theta) = \exp[-G(\theta)\Omega_e L_e / \cos\theta]. \quad (15)$$

将  $F_m(0)=P(\theta)$  带入上式得:

$$\Omega_e L_e = \frac{\cos\theta}{G(\theta)} \ln[F_m(0)]. \quad (16)$$

当  $F_m(0)$  用理想情况下的  $F(0)$  代替,则实测的冠层丛生指数  $\Omega_e$  和理论冠层指数  $\Omega$  相等,且  $\Omega_e = \Omega = 1$ . 式(16)改写成:

$$L_e = \frac{\cos\theta}{G(\theta)} \ln[F(0)]. \quad (17)$$

式(16)和式(17)左右分别相除可得

$$\Omega_e = \frac{\ln[F_m(0)]}{\ln[F(0)]}. \quad (18)$$

参考 Lang(1986)的方法,通过对孔隙度的对数平均数得到丛生指数,具体公式如下:

$$\Omega(\theta) = \frac{\ln(\overline{T(\theta, \varphi)})}{\ln T(\theta, \varphi)}. \quad (19)$$

$\Omega(\theta)$  是与视角相关的丛生指数,但是 Leblanc(2002)的研究发现在  $20^\circ \sim 70^\circ$  视角范围内其值变化不大,并且  $30^\circ \sim 60^\circ$  视角范围的丛生指数的平均值接近冠层的丛生指数平均值.

## 5 实验过程和结果

本文实验的目标是学校北大山一片林分样方,分别用鱼目摄像机(Cannon EOS 60D 相机和 Sigma EX-DC 4.5 mm 鱼镜头)获得半球图像和地面激光雷达(Scan station C10)获取树木点云数据,再通过采集的两种数据求取目标区域的真实叶面积指数.

### 5.1 鱼目摄像部分

通过鱼目摄像机 6 次拍摄林分样方获取半球图像照片,把像素中偏黑(接近 0)的点的 RGB 值设为白色(255),即可去除枝干部分.再加  $n$  个同心圆用以表征在不同“视分”下的冠层孔隙分布.

半球冠层图像上包含了  $0^\circ \sim 90^\circ$  视角的孔隙度信息, $n$  取值的变化会影响孔隙率信息提取的多少,孔隙度随视角变化的曲线光滑度也会随之改变.在此研究了 6 种划分方法,即将图像划分为  $n$  个同心圆环( $n=\{5, 9, 18, 36, 72, 90\}$ ),对应 6 种视角的分辨率( $\Delta\theta=90^\circ/n$ ).



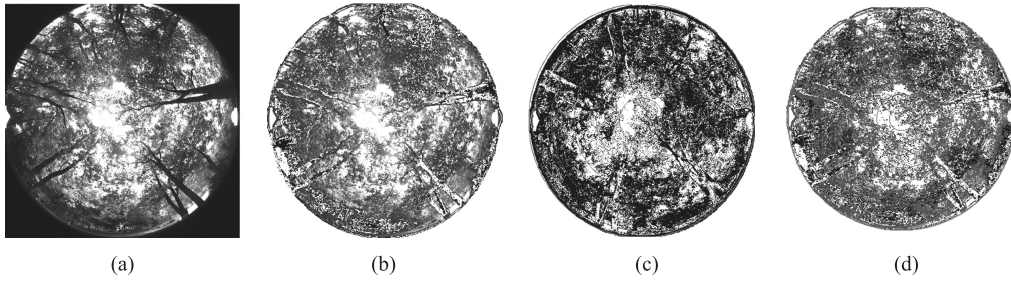


图6 半球图像处理过程:(a)鱼目摄影获取的半球图像;(b)去除枝干后的半球图像;  
(c)灰度化后5“视分”下的半球图像;(d)灰度化后9“视分”下的半球图像

Fig. 6 The process of hemispherical image; where (a) is hemispherical images captured by fish heads photography, (b) is hemisphere image removed branches, (c) is hemisphere gray image after five ‘round’ under, and (d) is hemisphere gray image after nine ‘round’ under

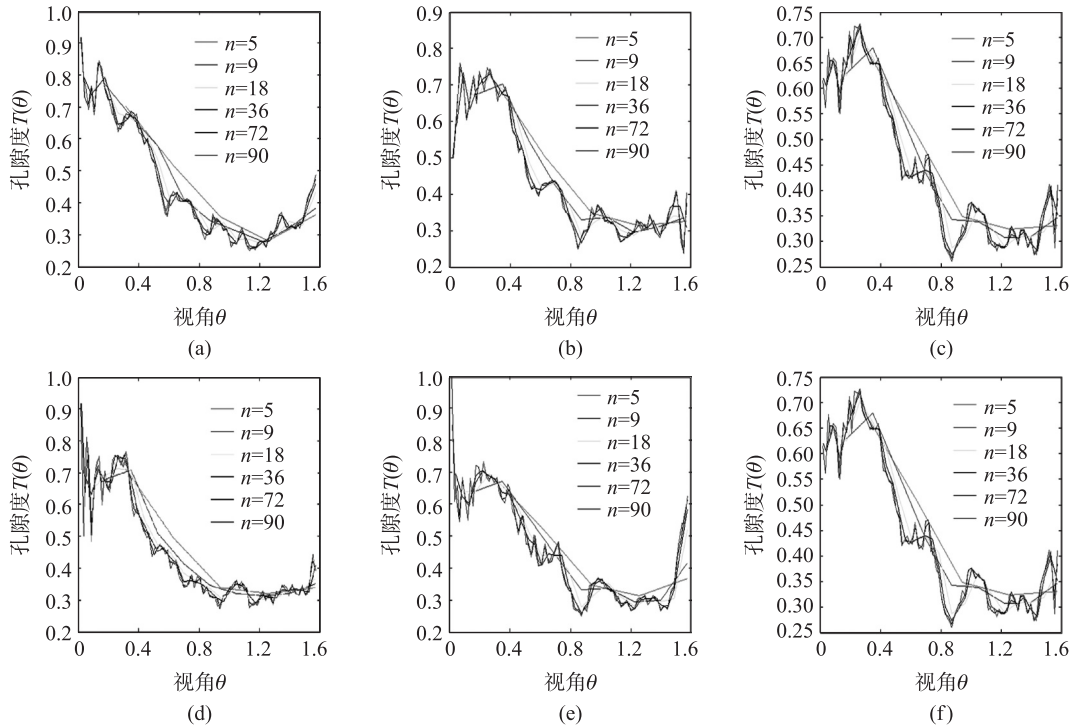


图7 6次拍摄的半球图像的孔隙度随视角(单位弧度)的变化图

Fig. 7 The gap-fraction of the six hemisphere image’s changing with the angle of view

理论上  $n$  的取值越大,冠层的孔隙分布结构变化越接近真实情况,但考虑到计算效率和相对准确率,本文取  $n=18$  这一“视分”精度. 对  $\bar{\alpha}$  (平均叶倾角) 取不同的值,由式(4)可得到一个  $G(\theta)$  (投影函数)关于  $\theta$  的变化图(如图8).

经比较发现,  $G(\theta)$  集中在 0.5 左右而对应的天顶角  $\theta$  在区域  $[0.8, 1.2]$  内,此处不妨取  $\theta=1.0$ . 在天顶角  $\theta=1.0$  (角度  $58^\circ$ ) 时,投影函数  $G(\theta)$  与平均叶倾角  $\bar{\alpha}$  无关,总等于 0.5. 由式(1)可得:

$$L_e = \frac{-\ln T(58^\circ) \cos(58^\circ)}{0.5}. \quad (20)$$

其中  $T(58^\circ)$  取  $55^\circ \sim 60^\circ$  的圆环(即 18“视分”精度下第 12 个圆环的孔隙率),又由式(6)和式(19)可得:

$$L = \frac{L_e}{\Omega} = \frac{L_e}{\ln(T(\theta, \varphi)) / \ln T(\theta, \varphi)}. \quad (21)$$

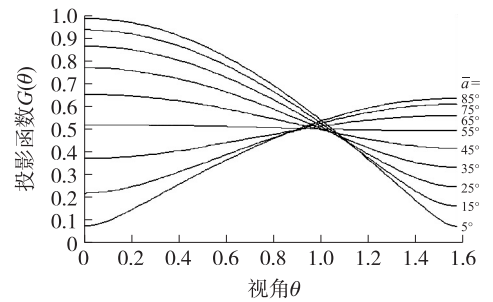


图8 投影函数  $G(\theta)$  关于  $\theta$  的变化图

Fig. 8 Projection function’s change with the  $\theta$

其中 $\overline{T(\theta,\varphi)}$ 是 18 个圆环孔隙的均值, $\overline{\ln T(\theta,\varphi)}$ 也是对应的 18 个圆环孔隙取对数的平均值. 于是直接法获取真实叶面积指数如表 1.

表 1 林分相关参数值

Table 1 Stand relevant parameter values

	$T(58^\circ)$	$\overline{T(\theta,\varphi)}$	$\overline{\ln T(\theta,\varphi)}$	$L$
图 a	0.29	0.45	-0.91	1.51
图 b	0.35	0.44	-0.87	1.20
图 c	0.37	0.44	-0.86	1.13
图 d	0.34	0.44	-0.85	1.20
图 f	0.35	0.44	-0.87	1.20
图 g	0.36	0.43	-0.86	1.12

5.2 地面激光雷达部分

对样方区域用地面激光雷达进行扫描,获取的树木点云数据(150 多万个点)通过 SVM 进行特征识别<sup>[10]</sup>,分离出枝干和叶子(如图 9 所示).

将去掉枝干的叶子部分点云进行上球面压缩,球极平面投影和 Lambert 方位角等面积投影得到图像如图 10 所示.

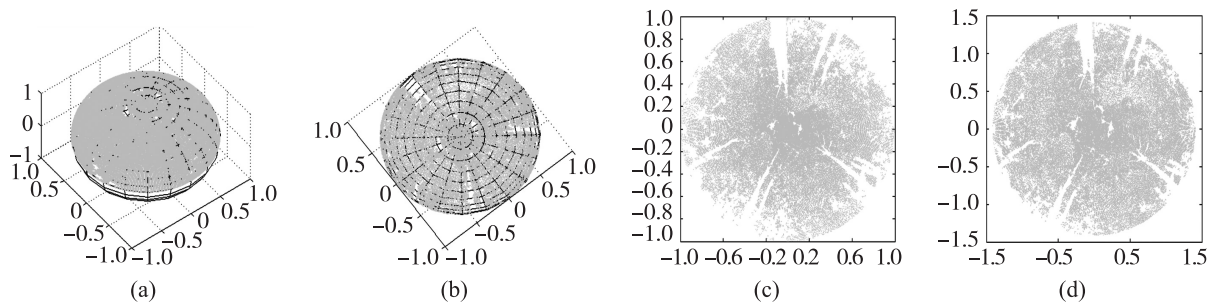


图 9 (a)地面激光雷达获取树木点云数据的色彩图像演示;  
(b)样方林分枝叶分离后的点云正视图

图 10 点云数据的半球图像获取  
(a)点云数据的半球压缩;(b)三维点云半球图像的俯视图;(c)球极平面投影图;(d)Beer-Lambert 方位角等面积投影图

Fig. 9 (a) A color of the trees image presentation of the point cloud data obtained by terrestrial lidar, (b) A front view of the separated leaves of the plot's point cloud

Fig. 10 The acquisition of hemisphere image about point cloud data  
(a) the hemisphere compression of point cloud data, (b) the top view image of hemisphere image about Three-dimensional point cloud, (c) the picture of stereographic projection, and (d) the picture of Lambert Azimuthally Equal-Area projection

对样方林分的点云进行 6 种不同程度的抽稀(去除  $1-1/2^n$  数据量),抽稀后点云的两种投影对应的孔隙度分布如图 11 所示.

对抽稀还剩  $1/2^n$  ( $n=1,2,\cdots,6$ ) 数量点云的法向量计算和分类,得到叶倾角概率密度函数(如图 12). 考虑到孔隙率计算时半球图像边缘的失真和上一节得到的  $\theta=1.0$  (角度  $58^\circ$ ) 这一特殊角度,在此也取  $\theta=1$  (弧度);去 18“视分”下第 12 个圆环的孔隙率  $T(58^\circ)$  带入计算. 由叶倾角概率密度分布图可得叶倾角  $\bar{\alpha}\approx 1.5$  出现频率高,不妨取  $\bar{\alpha}\approx 1.5$  带入式(4)计算出投影函数  $G(1,1.5)$ ,再由式(15)和(19)计算得到真实叶面积指数. 对应的真实叶面积指数如表 2 所示.

结合表 1 和表 2,分别将两种计算结果升序排列,得到两种真实叶面积指数的计算结果(如图 13).

经比较发现,通过点云求取的真实叶面积指数普遍比鱼目摄像获取的半球图像结果大.

表 2 真实叶面积指数

Table 2 Accurate actual Leaf Area Index

抽稀 (剩余)	$\frac{1}{64}$	$\frac{1}{32}$	$\frac{1}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$
$L$	1.48	1.55	1.72	1.88	1.85	1.69

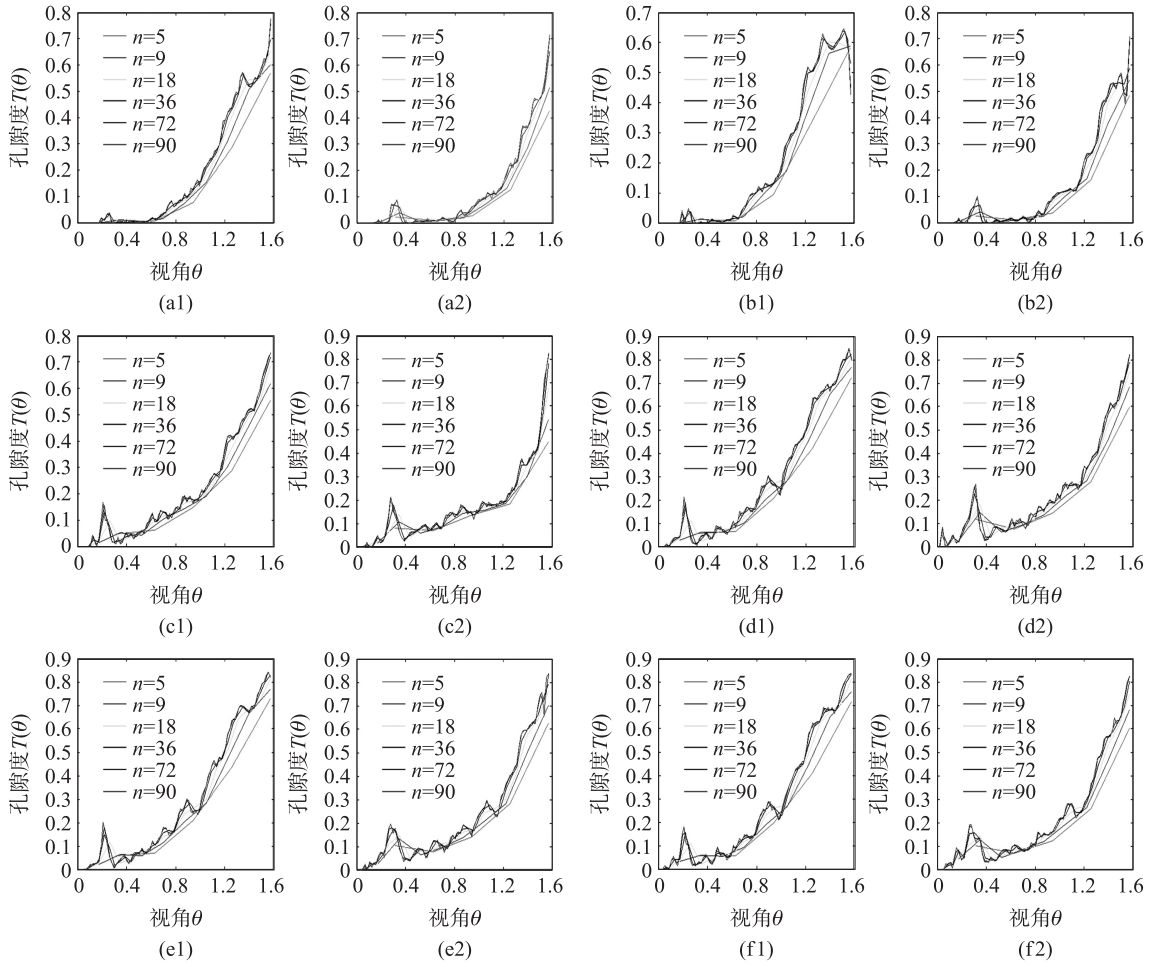


图 11 抽稀后点云的两种投影对应的孔隙度分布

(a) 抽稀还剩 1/64 投影的孔隙率分布; (b) 抽稀还剩 1/32 投影的孔隙率分布; (c) 抽稀还剩 1/16 投影的孔隙率分布;  
(d) 抽稀还剩 1/8 投影的孔隙率分布; (e) 抽稀还剩 1/4 投影的孔隙率分布; (f) 抽稀还剩 1/2 投影的孔隙率分布

Fig. 11 The gap-fraction of the two projection after thinning the point cloud distribution

(a) the gap-fraction after thinning 1/64, (b) the gap-fraction after thinning 1/32, (c) the gap-fraction after thinning 1/16,  
(d) the gap-fraction after thinning 1/8, (e) the gap-fraction after thinning 1/4, (f) the gap-fraction after thinning 1/2

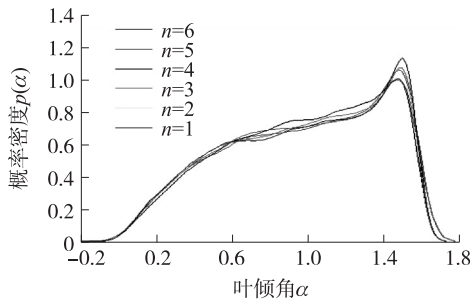


图 12 叶倾角概率密度分布

Fig. 12 Distribution map of leaf angle probability density function

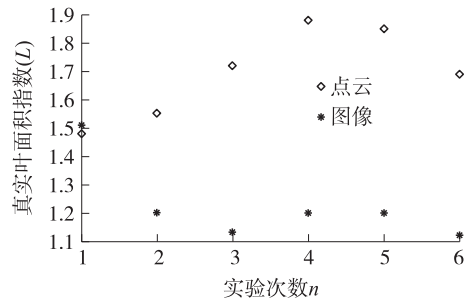


图 13 真实叶面积指数计算结果比较

Fig. 13 The compare of accurate actual Leaf Area Index

## 6 结论和未来工作

本文给出了两种方法计算真实叶面积指数的结果和比较,最终发现基于点云的计算结果普遍较高,原因主要是鱼目照相机在拍摄时由于光照、色差等多方面原因不能把一些叶子像元表现出来,但是地面激光雷达则能准确发现那些被忽视的叶子的存在,这一点从两种半球图像的中心“空洞”处的差别可以看出。

然后还存在很多不足之处. 鱼目半球投影:在叶面积指数计算时可采取 miller 等多种方法求均值,仅采用直接法计算<sup>[11]</sup>结果误差略大. 树木点云方面:两种地理学领域投影在天顶角表征方面还算良好,但是在叶子孔隙率表现方面存在误差. 在叶倾角选取问题方面采用了统计学的估算,有少量的误差. 可加入实测真实叶面积指数和两种方法的比较,计算出两种方法的准确率. 具体方法可以采用建立叶面积与叶长和叶宽的线性回归的方法<sup>[12]</sup>. 由于地面激光雷达在多站扫描目标时还是存在遮挡和噪声点问题,如果能够投影前对那些本身获取不完整的部分进行填补和修复<sup>[13]</sup>,对噪声点进行去除,结果一定会更加理想.

#### [参考文献]

- [1] 谭一波,赵仲辉. 叶面积指数的主要测定方法[J]. 林业调查规划,2008,33(3):45-48.
- [2] 冯冬霞,施生锦. 叶面积测定方法的研究效果初报[J]. 中国农学通报,2005,2(6):150-153.
- [3] 杜春雨,范文义. 有效叶面积指数与真实叶面积指数的模型转换[J]. 东北林业大学学报:自然科学版,2010,38(7):126-128.
- [4] Zheng G, Monika M L, Soo-Hyung K. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning[J]. Transactions on Geo-science and Remote Sensing,2013,51(2):777.
- [5] 李明,张长利,房俊龙. 基于图像处理技术的小麦叶面积指数的提取[J]. 农业工程学报,2010(1):205-209.
- [6] 祁有祥,骆汉,赵廷宁. 基于鱼眼镜头的林冠郁闭度简易测量方法[J]. 北京林业大学学报:自然科学版,2009,37(6):60-66.
- [7] 潘桂颖. 基于半球摄影法的水稻冠层结构参数测量与反演[D]. 杭州:浙江大学计算机科学与技术学院,2011.
- [8] 骆社周. 激光雷达遥感森林叶面积指数提取方法研究与应用[D]. 北京:中国地质大学计算机学院,2012.
- [9] Chen J M,Josef C. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index[J]. Applied Optics,1995. 34(27):6 211-6 222.
- [10] 刘志刚,李德仁,秦前清,等. 支持向量机在多类分类问题中的推广[J]. 计算机工程与应用,2004,40(7):10-13.
- [11] 苏宏新,白帆,李广起. 3类典型温带山地森林的叶面积指数的季节动态:多种监测方法比较[J]. 植物生态学报,2012,36(3):231-242.
- [12] 龚立群. 锐齿栎叶面积求算初探[J]. 西北林学院学报,1991,6(1):91-94.
- [13] 高智,仲思东,宋丽华. 基于激光雷达数据的三维模型重建[J]. 仪器仪表学报,2004,2(4):495-499.

[责任编辑:黄 敏]