

基于地基激光雷达的玉米真实叶面积提取方法研究

苏伟¹ 郭皓¹ 赵冬玲¹ 张明政^{1,2} 张蕊¹ 吴代英¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018)

摘要: 叶面积指数(LAI)是定量描述植物叶片生长状态的重要参数,相较于受叶片聚集情况影响较大的有效 LAI, 真实 LAI 更能准确反映作物真实的生长状态。地基激光雷达(TLS)可以快速获取高精度植物的高度、密度、叶倾角、叶面积等作物结构信息,但在叶面积信息获取上主要得到的是有效 LAI。借鉴体素化的思想,提出了基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法。该方法充分利用 TLS 在获取垂直结构信息上的优势,将表征玉米真实生长状态的点云数据作为数据源,利用体素将玉米叶片回波点云分割成一系列叶片单元,基于体素内叶片及其投影数学关系求取叶片单元面积,进而实现玉米真实叶面积的获取。通过利用不同激光雷达扫描仪分别于北京和河北两地获取的不同品种、不同尺度的 4 个样本点的玉米 TLS 点云数据进行验证:样本点 1、2、3 的试验数据为单木尺度,采用不同体素大小计算叶面积。结果表明,该方法计算所得叶面积与实测叶面积具有较高的相关性,决定系数均在 0.8 以上,方法可信度较高;最优体素大小分别为 0.17、0.15、0.15 cm,在相应最优体素大小下,RMSE 分别为 61.898、44.058、42.844 cm²,植株总叶面积之间的相对误差分别为 -2.678%、0.619%、-0.474%,误差较小,精度较高。样本点 4 的玉米点云数据属于群体尺度,叶面积计算结果与实测叶面积之间的绝对误差为 -14.663%,计算结果偏小。由此可知,基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法切实可行,且精度较高。

关键词: 玉米; 地基激光雷达; 真实叶面积; 体素化

中图分类号: P237; Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0345-09

Estimation of Actual Leaf Area of Maize Based on Terrestrial Laser Scanning

Su Wei¹ Guo Hao¹ Zhao Dongling¹ Zhang Mingzheng^{1,2} Zhang Rui¹ Wu Daiying¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is one of important parameters of quantitative description of leaf growth situation. Compared with effective LAI which is influenced by gathering condition among leaves greatly, actual LAI can reflect the real crop growth status more accurately. Terrestrial laser scanning (TLS) can obtain high precision crop structure information quickly such as height and biomass. But in terms of leaf area information, the major part is effective LAI. Reference to the idea of voxelization, the method was put forward for estimating actual leaf area of maize according to the leaf and its projective plane's mathematical relationship in voxel, which makes full use of TLS's advantage of gathering vertical information. The point data which can perform maize actual growth state as the data source directly. And the maize point cloud was divided into a series of leaf unit by voxel. The leaf unit area based on the leaf and its projective plane's mathematical relationship in voxel were calculated. Then the maize actual leaf area was calculated. The different TLS was used to obtain four sample's maize point clouds which were different in varieties and scales in both Beijing City and Hebei Province, respectively. The point obtained

收稿日期: 2016-01-20 修回日期: 2016-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371327)

作者简介: 苏伟(1979—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: suwei@cau.edu.cn

通信作者: 赵冬玲(1961—),女,副教授,主要从事工程测量研究,E-mail: zhaodongling@cau.edu.cn

from sample points (No. 1, 2, 3) is individual maize point, and the actual LAI was calculated in different voxel sizes. The main conclusions are as follow: calculated LAI has a good correlation with measured LAI as all of decision coefficients are greater than 0.8, it proved that this method is credibly. The optimal voxel size is 0.17 cm, 0.15 cm and 0.15 cm, respectively. Relevant with the optimal voxel size, RMSE is 61.898 cm², 44.058 cm² and 42.844 cm² respectively, the relative error between the plant total leaf area is -2.678%, 0.619% and -0.474% accordingly. The result means that this method has a high accuracy. In the sample point No.4, the relative error between calculated LAI and measured LAI is -14.663%, the calculated LAI is smaller than measured LAI. All in all, the method about estimating actual leaf area of maize according to the leaf and its projective plane's mathematical relationship in voxel is feasible with high precision.

Key words: maize; terrestrial laser scanning; actual leaf area; voxelization

引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)是描述作物冠层结构的重要参数,它与作物的许多生物、物理过程密切相关,如光合、呼吸、蒸腾、碳和养分的循环等^[1],对作物长势监测及产量估算具有重要意义。常用测量 LAI 的方法分为地面测量(实地测量、仪器测量)和遥感测量^[2]。传统的地面测量方法需要耗费大量人力、物力,且具有一定的破坏性,无法获取大面积 LAI 信息;遥感技术虽然为快速获取大范围、高时间分辨率的作物冠层信息提供了一种可行的方式,但其在获取冠层内部结构参数上的局限性导致 LAI 反演精度受到影响。

激光雷达(Light detection and ranging, LiDAR)技术是一种主动获取扫描对象三维信息的遥感技术,具有发射角小、方向性好、分辨率高、抗干扰能力强等优点,能够获取高精度的作物物理结构信息。近年来,机载激光雷达(Airborne lidar scanning, ALS)和地基激光雷达(Terrestrial laser scanning, TLS)在获取林木样地水平和单木水平上的树高、胸径、郁闭度、冠层垂直结构和生物量等参数^[3-7]中得到了广泛的应用。尤其是 TLS 能够非破坏性地获取高分辨率冠层三维信息,实现作物几何结构参数的自动获取,弥补了现有测量手段的不足^[8]。目前,国内外学者在利用 TLS 获取叶面积指数方面进行了一定的研究,ROBERTS 等^[9]利用 TLS 提取的树高、冠幅信息与实测 LAI 建立的非线性回归关系获取了单株火炬松的 LAI;STRAHLER 等^[10]利用激光脉冲在冠层中的穿透距离计算孔隙率,然后根据孔隙率与 LAI 的关系进行了松树 LAI 的计算;HOSOI 等^[11-12]以激光截获概率的思想为依据提出了基于体素的冠层分析方法(Voxel-based canopy profiling, VCP),并成功获取了日本山茶树、桦树的垂直叶面积密度分布曲线;DANSON 等^[13]、ZHENG

等^[14]、苏伟等^[15]也进行了基于 TLS 提取叶面积指数的研究。上述研究提取的 LAI 信息多为有效叶面积指数,利用 TLS 获取真实 LAI 的研究较少。高纪青等^[16-17]基于地理投影算法,分别利用有效分层处理与冠层丛生系数获取含笑树和林地的真实 LAI,但基于地理投影方法导致获取的叶子孔隙率存在误差。由于有效 LAI 受叶片之间的聚集情况影响较大,相较而言,真实 LAI 更能准确反映作物的生长情况,具有更重要的意义。

虽然激光雷达技术在林业方面的应用较为成熟,但由于农作物植株比较矮小、具有明显的垄行结构特点、叶片之间遮挡严重、叶片具有明显动态变化等原因,其在农作物方面的应用仍十分有限^[18]。本文以玉米作为研究对象,提出一种以较高精度获取作物真实叶面积的方法——基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法。该方法充分利用 TLS 在获取三维信息方面的优势,通过体素化将 TLS 获取的玉米叶片点云分割成叶片单元,利用叶片单元面积与体素底面积之间的数学关系求算,进而获得玉米植株的真实叶面积。该方法可避免基于地理投影算法获取孔隙率及丛生系数进而得到真实 LAI 过程中,因坐标系转换和多次投影造成的误差,从而为获取作物真实叶面积数据提供一种新思路。

1 数据源获取

1.1 TLS 玉米点云数据

本研究中使用的地基激光雷达回波点云数据主要分为两部分:一是使用 Trimble TX8 三维激光扫描仪于 2014 年 4 月 22 日对中国农业大学西校区玉米温室中的玉米(样本点 1)进行地基激光雷达扫描试验获取的点云数据,设置精度为 1 mm,仪器架设高度约为 1.5 m,扫描视野范围为水平方向 360°、垂直方向 317°,依地形于玉米样地两侧共架设两站进行不同角度扫描,以尽量减少相邻植株之间的遮挡造

成的点云缺失,保证目标玉米植株点云的完整性;二是 2015 年 8 月 27 日使用 FARO Fouse 3D X330 三维激光扫描仪分别于河北省涿州市边各庄村(样本点 2)和史家庄村(样本点 3、4)选取大田玉米进行地基激光雷达扫描试验,其中样本点 3、4 选自同一块地,选取的 2 个玉米样本地块中玉米长势良好且均一,种植密度比温室中的玉米大,在试验中于玉米样地前方依地形架设两站,设置精度为 1 mm,架设高度约为 1.5 m,扫描视野范围为水平方向 360°、垂直方向 300°。当日天气晴朗、微风。

使用激光扫描仪配套点云处理软件(Trimble Realworks Survey 和 FARO Scene)对获取的点云数据进行配准、拼接。玉米叶片点云的提取采用自动与手动结合的方式,使用 CloudCampare 软件分离地面点,获取玉米冠层点云,并从各样点获取的玉米冠层点云中选取植株形态完整、点云缺失较少的玉米植株点云作为试验数据。将截取的玉米植株点云数据输入去噪点程序实现自动去噪。由于叶面积的计算和叶倾角的提取均基于叶片进行,所以在试验之前需要对玉米的叶片和茎秆进行分离,使用腐蚀算法,根据玉米叶片与茎秆的形态差异实现茎秆分离,提取玉米叶片回波点云。为保证点云质量,采用手动的方式对所提取的玉米叶片点云中效果不佳的点云做进一步处理。

1.2 野外实测数据

采用的叶面积实测方法有 2 种:纸描法和长宽系数法。纸描法是最传统、最精确的叶面积获取方式,即将叶片覆于硫酸纸下方,在纸上描出叶片轮廓进而求取叶面积的方法。长宽系数法是利用软尺分别测量出玉米植株所有叶片(图 1)的叶长 a (从叶基到叶尖)和叶宽 b (叶片上与主脉垂直方向上最宽处)^[19]。单个叶片的叶面积计算公式为

$$L_A = abk \tag{1}$$

式中 L_A ——叶面积 a ——叶长
 b ——叶宽 k ——长宽校正系数

长宽校正系数根据各样点玉米品种叶片生长形态取值。由于玉米上部、中部与底部生长情况差异比较大,将玉米叶片按生长顺序均分为上、中、下 3 部分对长宽系数分别取值,其中,根据实测数据,样本点 2 上、中、下段分别取 0.83、0.78 和 0.76,样本点 3、4 上、中、下段分别取 0.81、0.76 和 0.76;由于样本点 1 缺少长宽系数的实测数据,此处采用经验值 0.75。

此外,因为样本点 1 的玉米为试验品种不可破坏,该玉米品种株高比较高,在自然生长状态下进行纸描法有一定的误差,为保证测量数据的准确性,样

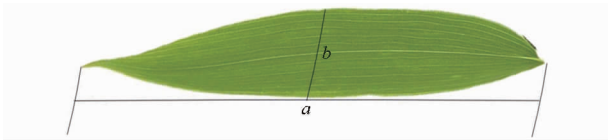


图 1 叶片长宽测量示意图

Fig. 1 Diagram of measurement of leaf length and width

本点 1 取纸描法和长宽系数法所得结果的均值作为实测数据,样本点 2、3、4 取长宽系数法所得结果作为实测叶面积数据。

2 叶面积获取原理与方法

通过数据预处理、点云体素化、基于拟合叶片单元提取叶倾角、体素属性赋值与统计等过程实现玉米真实叶面积的获取,具体流程图如图 2 所示。

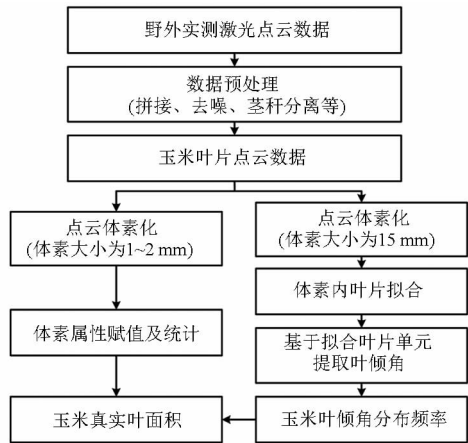


图 2 玉米真实叶面积获取流程图

Fig. 2 Flow chart of maize's actual leaf area extraction

2.1 真实 LAI 与有效 LAI 的关系

LAI 是反映植被结构特征的重要参数之一,目前常用的 LAI 定义为“单位面积上叶片面积的一半”^[20]。LAI-2000 等光学仪器是假设叶片在空间中是随机分布的前提下,根据孔隙率采用米勒理论^[21]计算得到 LAI,即

$$L_e = 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \ln \frac{1}{p(\theta)} \cos\theta \sin\theta d\theta \tag{2}$$

式中 θ ——可视天顶角 $p(\theta)$ ——孔隙率

随着研究的深入,CHEN 等^[22]提出,由于植被冠层的叶子通常不遵循随机分布,式(2)所得的 LAI 应为有效叶面积指数。NILSON^[23]在比尔定律的基础上引入聚集指数 Ω 计算离散植被的孔隙率。 Ω 为聚集指数,表示叶片的集聚效应。当叶片规则分布时 $\Omega > 1$,聚集分布时 $\Omega < 1$,随机分布时 $\Omega = 1$ ^[24],当 Ω 未知时,得到的是有效叶面积指数 L_e ^[25]。因此,引入聚集指数的真实叶面积指数 L_a 公式^[26]为

$$L_a = L_e(1 - \alpha)/\Omega \tag{3}$$

式中 α ——木质成分与总叶面积的比率

有效叶面积指数一般较真实叶面积指数偏小,实际上,真实叶面积指数能够更加准确地定量描述叶片,因此获取真实叶面积指数具有重要的意义。据叶面积指数定义可知,作物真实叶面积结合相应面积信息即可得到其真实叶面积指数,其中,获取准确的作物真实叶面积是关键。本文旨在基于 TLS 玉米点云数据实现高精度玉米叶片真实叶面积的获取。

2.2 基于 TLS 点云数据的叶倾角提取

叶倾角(Leaf angle distribution, LAD)是叶片表面法线方向与天顶角方向的夹角^[27],其取值范围为 $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$ 。利用地基激光雷达点云数据获取叶倾角时,通常以点为单位,叶片上每个点的倾角可以通过构建单点在领域内的法向量求算,具体做法是搜索每个点的临近点,根据最小二乘法构建平面估算法向量^[28]。但对于玉米这种叶片较长且易下垂弯曲的作物而言,以点为单位,可能导致本处于相同叶片走向的叶片点云由于其邻域的差异造成叶倾角计算结果存在偏差;且实际获取的点云不能保证密度处处相等,对基于点求取的叶倾角进行分布频率统计时,其准确性受点云质量影响较大。因此,采用基于叶片单元的方法求取叶倾角^[29],能够很好地避免上述问题,更加准确地反映玉米植株叶倾角的真实分布情况。

基于叶片单元求取叶倾角的方法首先对点云数据体素化,根据最小二乘法原理,对每个体素内点云进行叶片拟合,通过求取拟合叶片法向量进而获取玉米植株的叶倾角分布情况,具体包括:

(1)点云体素化:体素是三维数组中最基本的单元,对预处理后的地基激光雷达点云进行体素化^[12]。点云坐标转换为体素坐标的计算式^[30]为

$$\begin{cases} i = \text{Int}\left(\frac{X - X_{\min}}{\Delta i}\right) + 1 \\ j = \text{Int}\left(\frac{Y - Y_{\min}}{\Delta j}\right) + 1 \\ k = \text{Int}\left(\frac{Z - Z_{\min}}{\Delta k}\right) + 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 i, j, k ——体素坐标
 X, Y, Z ——配准后的点云坐标
 $X_{\min}, Y_{\min}, Z_{\min}$ —— X, Y, Z 坐标的最小值
 $\Delta i, \Delta j, \Delta k$ ——体素尺寸

体素化效果如图 3 所示。体素大小的设定依据精度^[12]和具体应用^[31-33]而定,如 HOSOI 等^[33]根据枝干粗细设置体素大小以区分树木的主干和枝干, BELAND 等^[32]据叶片尺寸寻求最优体素大小以满足叶片随机分布特征并最小化叶片之间的遮挡作

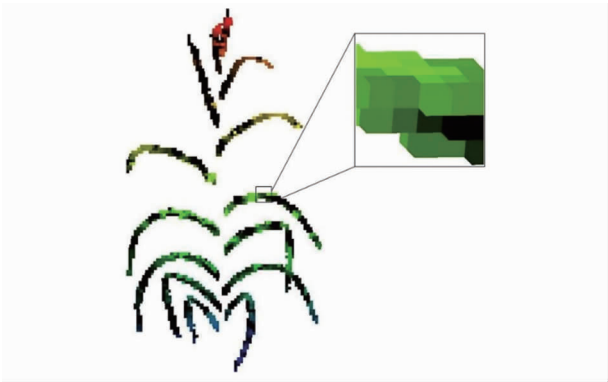


图 3 体素化效果图
Fig.3 Picture of voxelization

用。在求取叶倾角及获取叶片真实叶面积的过程中均需对离散 TLS 点云构建体素,但 2 次对点云体素化的目的不同,故体素大小设定也存在差异。求取叶倾角时既需保证体素内点云足够拟合成面,又要使分割的叶片单元足够小,以确保所求叶倾角的精度^[31];而在获取叶片真实面积的过程中,设置不同体素大小会得到不同的叶面积结果,需寻求最优体素大小^[32],以确保所求真实叶面积的准确性,本文通过设置一定的体素尺寸范围,求取最优体素大小,为保证叶片经过的体素内均有点云,体素大小需大于点云精度,同时避免体素过大导致的叶片边缘处面积的过分高估。

(2)体素内叶片单元拟合:图 4 为叶片单元拟合及法向量求取的侧面及体素内细节示意图。如图 4a 所示,叶片的 TLS 点云将被分割在不同的体素内,在每个有点云的体素内,利用最小二乘法,进行叶片单元的面的拟合,平面 S (图 4b)为根据叶片点云拟合所得的平面 $Ax + By + Cz + D = 0$,其中法向量 $L = (A, B, C)$ 。

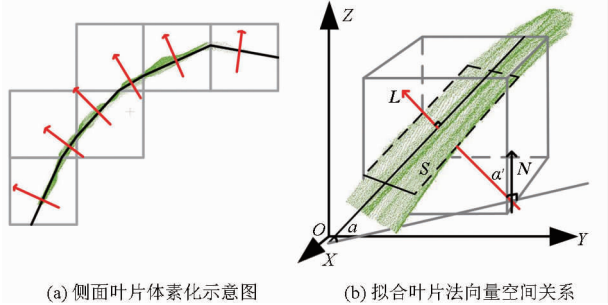


图 4 叶倾角提取示意图
Fig.4 Diagram of leaf angle extraction

(3)叶倾角提取:求取水平地面的法向量 N 和叶片法向量 L 夹角 α' ,有

$$\cos \alpha = \cos \alpha' = \frac{|L \cdot N|}{|L| \cdot |N|} \quad (5)$$

根据角度关系可得,叶倾角 α 与 α' 相等,进而获得叶片单元的叶倾角,对一系列叶倾角集合 A 进

行统计,记为 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 。

2.3 基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法

借鉴 HOSOI 等^[12]的体素化的思想,根据叶片及其投影之间的数学关系,提出了基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法。

通过体素化将预处理后的 TLS 玉米点云分割在一系列体素内,各体素内叶片及其投影的数学关系如图 5a 所示,其中, S_L 为叶片平面, S_V 为体素底面, α 为叶倾角。当 $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ 时,叶片平面与体素底面呈余弦关系(图 5b);当 $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时,叶片平面与体素侧面呈正弦关系(图 5c)。由于体素为正方体,其 6 个面的面积相等,故 S_L 和 S_V 的面积关系为

$$S_L = \begin{cases} \frac{S_V}{\cos \alpha} & (0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ) \\ \frac{S_V}{\sin \alpha} & (45^\circ < \alpha \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

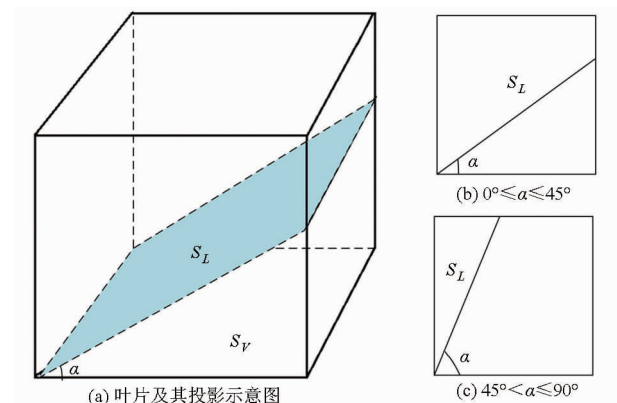


图 5 叶片及其投影的数学关系

Fig. 5 Mathematical relationship of leaf and its projective plane

在求取叶倾角及获取叶片真实叶面积过程中两次对点云体素化时,体素大小设定存在差异,故获得的叶片单元个数不一致。为解决叶倾角个数与求取真实叶片面积时体素分割所得叶片单元个数不匹配的问题,采用对叶倾角等角度分组统计频率的方式,具体做法如下:

(1) 叶倾角分布频率获取:对预处理后的玉米植株叶片 TLS 点云数据按一定的体素大小体素化(本文中设置体素大小为 $15 \text{ mm}^{[31]}$),并求取各体素内叶片单元叶倾角,记为集合 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 。以 5° 为单位将叶倾角范围 $[0^\circ, 90^\circ]$ 分为 18 组,统计各叶倾角分布在各组范围内的频率,记为 $P_{18} = \{P_1, P_2, \dots, P_{18}\}$ 。

(2) 点云体素化及属性赋值:根据 TLS 点云的精度对预处理后玉米植株点云构建相应体素大小的

体素,并对所有含有回波点云的体素赋值属性为 1,不包含任何回波点云的体素赋值为 0,统计所有属性为 1 的体素个数 N 。由于试验获取的点云数据精度为 1 mm ,为避免因个别点云缺失可能导致的叶片穿过区域体素属性的误判,同时尽量减小体素过大造成的叶片边缘面积过分高估,以点云数据精度为基础,初步设定获取叶片真实叶面积的体素尺寸范围为 $1 \sim 2 \text{ mm}$,以获取最优体素大小,并在试验过程中根据获取结果情况对范围进行调整。

(3) 获取玉米植株真实叶面积:根据叶片平面及其投影(即体素底面积)的关系求取每个体素内叶片单元的真实叶面积,累加所有叶片单元面积即可获取玉米植株叶片的真实叶面积。其中叶倾角取各组中值(如 $0^\circ \sim 5^\circ$ 区间内的叶倾角均取值 2.5° ,以此类推),记为 $A_{18} = \{2.5^\circ, 7.5^\circ, \dots, 87.5^\circ\}$,计算公式为

$$S = \sum \frac{S_V NP_r}{\cos A_r} + \sum \frac{S_V NP_m}{\sin A_m} \quad (7)$$

($r = 1, 2, \dots, 9; m = 10, 11, \dots, 18$)

式中 S ——玉米植株真实叶面积

P_r, P_m ——第 r, m 组叶倾角比例

A_r, A_m ——第 r, m 组叶倾角设定值

基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法,以表征作物真实生长状态的点云数据为直接数据源,避免了基于地理投影算法获取孔隙率及丛生系数进而得到真实叶面积指数的方法中,因坐标系转换和多次投影造成的误差。原理简单,易于理解,依据基本的数学关系便可达到获取作物较高精度真实叶面积的目的。

3 结果分析与精度验证

对 4 处样本点的玉米 TLS 点云进行裁剪、去噪、茎秆分离等预处理后提取的玉米植株叶片的 TLS 点云如图 6 所示。利用样本点 1 的 TLS 数据进行可行性验证,样本点 2、3、4 的 TLS 数据则用于普适性验证。

3.1 可行性验证

将玉米植株叶片从下往上编号(下同),分叶片利用基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法提取各叶片的真实叶面积。实测叶面积指数与不同体素大小设置下的部分结果见表 1。

图 7 为样本点 1 不同体素大小(Voxel)下各玉米叶片真实叶面积计算结果折线图,由图可得:叶面积计算结果随体素大小的增大而增大,这是由于将分割在每个体素内的叶片视为一个叶片单元,把有叶片点云的体素视为有完整的叶片单元穿过,当

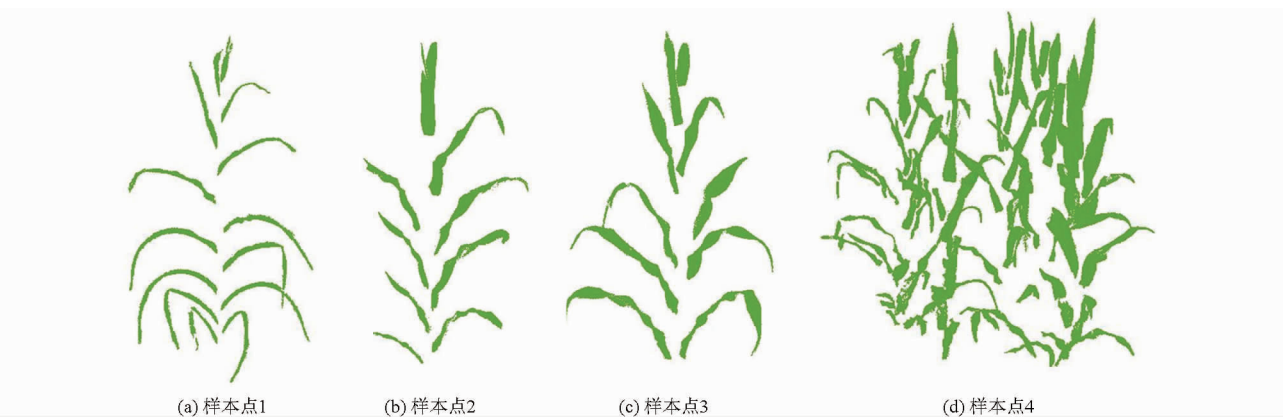


图 6 玉米植株叶片点云
Fig. 6 Point cloud of maize's leaf

表 1 样本点 1 玉米各叶片真实叶面积计算结果

Tab. 1 Calculated value of maize's actual leaf area of sample point No. 1 cm²

叶片编号	体素大小/cm						实测数据
	0. 20	0. 19	0. 18	0. 17	0. 16	0. 15	
1	156. 244	146. 315	132. 823	119. 905	107. 006	95. 6143	177. 625
2	378. 656	370. 843	339. 401	312. 645	282. 323	256. 686	285. 959
3	460. 548	434. 551	393. 806	354. 832	317. 217	281. 451	358. 355
4	521. 139	489. 735	446. 952	406. 621	365. 472	327. 978	391. 000
5	683. 773	464. 458	589. 985	534. 468	481. 471	431. 055	484. 550
6	546. 003	508. 213	460. 882	420. 942	378. 771	340. 548	523. 113
7	749. 442	711. 990	646. 947	585. 226	522. 540	465. 485	509. 524
8	564. 332	538. 748	494. 383	447. 942	407. 813	366. 103	476. 000
9	444. 348	418. 467	381. 226	343. 546	307. 230	272. 985	410. 175
10	438. 300	405. 777	368. 329	332. 150	299. 627	265. 896	365. 688
11	553. 036	533. 906	486. 107	439. 281	396. 046	353. 621	310. 075
12	232. 465	219. 619	198. 694	177. 363	158. 871	140. 733	261. 875
13	202. 104	188. 748	176. 563	136. 890	138. 121	122. 410	177. 665
14	130. 460	120. 731	109. 450	98. 957	87. 078	78. 078	109. 085

穿过叶片边缘的体素中实际叶片面积远小于叶片单元时,会造成对真实叶面积的高估,叶片单元越大,计算结果越偏大,而叶片单元大小由体素大小直接决定,故计算结果随体素大小的增大而增大。

为了验证该方法的精度、寻求最优体素大小,选取决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、绝对误差以及相对误差作为指标对所获取的真实叶面积结果进行评

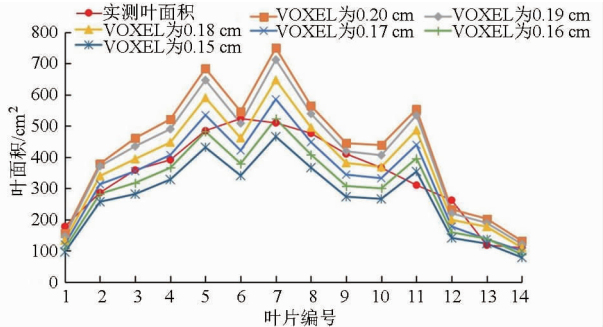


图 7 样本点 1 计算结果折线图

Fig. 7 Line chart of calculated leaf area value of sample point No. 1

价。

图 8 为叶片实测叶面积与计算叶面积的相关关系(以体素大小 0. 17 cm 为例)。由图可得,在不同体素大小下实测叶面积与计算叶面积均表现出很好的正相关性, R^2 均大于 0. 8。体素大小为 0. 20 cm 时相关性最高,回归方程为 $y = 1. 266x - 0. 534$, $R^2 = 0. 831$,表现为强正相关。

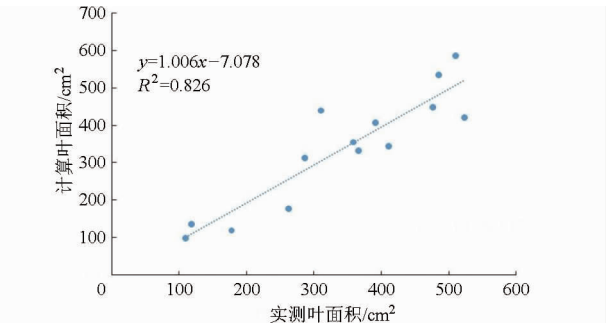


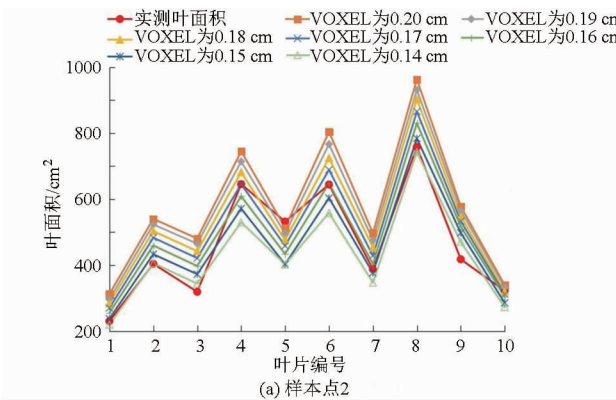
图 8 计算叶面积与实测叶面积相关关系

Fig. 8 Relationship between calculated leaf area and measured leaf area

表 2 为玉米叶片真实叶面积计算结果精度评价。由表 2 可得:该计算方法所得玉米叶面积与实测玉米叶面积的误差随体素大小的减小先减小后增大,当体素大小为 0.17 cm 时,计算误差最小(均方根误差为 61.898 cm²;玉米植株总叶面积的绝对误差为 -129.62 cm²,相对误差为 -2.678%,比实测叶面积偏小),计算精度较高; $R^2=0.826$,表现为强正相关。

表 2 样本点 1 计算叶面积精度评价结果
Tab.2 Precision evaluation of calculated leaf area of sample point No. 1

体素大小/ cm	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE/cm ²	绝对误差/ cm ²	相对误差/ %
0.20	0.831	124.191	1 220.163	25.206
0.19	0.818	104.832	893.414	18.456
0.18	0.815	76.888	384.805	7.949
0.17	0.826	61.898	-129.620	-2.678
0.16	0.819	69.092	-590.133	-12.192
0.15	0.819	90.243	-1 042.040	-21.527



3.2 普适性验证

为了排除上述结果出现的偶然性,选择位于河北省的样本点 2、3 处获得的玉米点云数据进行单木尺度的进一步验证,并从样本点 3 的样地处提取 6 株玉米(图 6d)作为样本点 4,进行该方法在群体尺度玉米上的应用验证。与样本点 1 相比,该组数据涵盖了获取仪器不同、区域不同、玉米品种不同和尺度不同 4 种情况。

图 9 为玉米植株在不同体素大小下各叶片真实叶面积结果,其中,图 9a 为样本点 2 结果,图 9b 为样本点 3 结果。由图 9 可得:样本点 2 的玉米叶面积整体趋势呈锯齿状,是由于玉米植株左右两侧叶片长势存在差异(图 6b);3 号叶片计算结果偏大,考虑扫描获取两站点云数据时由于存在时间差,在自然条件下微风可能导致叶片发生轻微位移,致使点云拼接时不能一致吻合,产生难以去除的噪点,致使结果偏大;5 号叶片和样本点 3 的 6 号叶片计算结果明显偏小,是由于叶片之间遮挡造成的部分点云缺失所致。

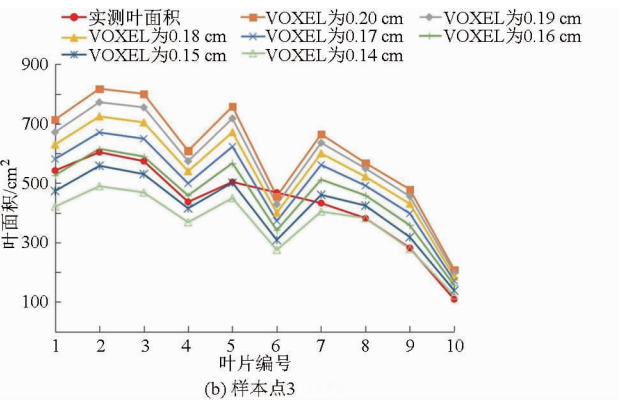


图 9 样本点 2、3 计算结果折线图
Fig.9 Line charts of calculated leaf area of sample points No.2 and No.3

表 3、4 分别为样本点 2、3 的玉米叶片真实叶面积计算结果精度评价。由表可得:样本点 3、4 的计算玉米叶面积与实测玉米叶面积的误差均随体素大小的减小先减小后增大,与样本点 1 处所得结论一致。当体素大小为 0.15 cm 时误差最小(均方根误差分别为 44.058 cm²和 42.844 cm²,玉米植株总叶面积绝对误差分别为 30.952 cm²和 -205.58 cm²,相对误差分别为 0.679%和 -0.474%),计算精度较高;样本点 2 的 R^2 均在 0.9 以上,样本点 3 的 R^2 均在 0.8 以上,都表现为强正相关性。

相较于样本点 1 的精度评价结果,在最优体素大小下,样本点 2、3(相对误差分别为 0.679%和 -0.474%)提取的真实叶面积精度均高于样本点 1(相对误差为 -2.678%)。主要考虑以下原因:一是样本点 2、3 所用 FARO Fouse 3D X330 型激光雷

达仪器性能高于样本点 1 所用 Trimble TX8 型激光雷达仪器,获取的点云更为均匀完整,质量更优;二是样本点 2、3、4 处利用长宽系数法获取实测叶面积时采用的是三段分系数计算,相较于样本点 1 采用

表 3 样本点 2 计算叶面积精度评价结果
Tab.3 Precision evaluation of calculated leaf area of sample point No.2

体素大小/ cm	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE/cm ²	绝对误差/ cm ²	相对误差/ %
0.20	0.953	132.515	1 226.100	26.879
0.19	0.949	111.723	718.288	15.747
0.18	0.947	90.243	792.500	17.374
0.17	0.942	69.592	559.353	12.262
0.16	0.935	52.279	317.630	6.963
0.15	0.926	44.058	30.952	0.679
0.14	0.917	54.466	-271.430	-5.595

表 4 样本点 3 计算叶面积精度评价结果
Tab.4 Precision evaluation of calculated leaf
area of sample point No.3

体素大小/ cm	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE/cm ²	绝对误差/ cm ²	相对误差/ %
0.20	0.844	189.201	1 739.55	4.012
0.19	0.833	158.652	1 423.97	3.284
0.18	0.827	125.745	1 073.35	2.475
0.17	0.823	92.128	683.549	1.576
0.16	0.823	64.440	249.133	0.575
0.15	0.825	42.844	-205.58	-0.474
0.14	0.825	91.185	-676.28	-1.564

的单一系数 0.75,分段系数获取的叶面积信息与玉米植株实际生长状态更为相近,结果更为准确。

由于样本点 4、3 处玉米品种相同、长势一致,故选取样本点 3 处的最优体素大小 0.15 cm 计算样本点 4 处群体玉米真实叶面积。由计算结果可得,该样本点玉米植株的总叶面积为 24 828.016 cm²,计算所得总叶面积为 21 187.600 cm²,两者之间的绝对误差为 -3 640.416 cm²,计算结果偏小,这是因为大田玉米种植密度较大,玉米叶片之间的遮挡问题难以避免,获取的 TLS 数据存在部分点云缺失的现象,导致计算结果偏低。相对误差为 -14.663%,计算精度较好。

4 结论

(1)通对不同激光雷达扫描仪获取的不同地

点、不同品种、不同尺度的玉米点云数据进行试验,并对实测叶面积进行决定系数、均方根误差、绝对误差及相对误差指标的评价,结果表明基于体素内叶片及其投影数学关系的真实叶面积获取方法切实可行,且精度较高。

(2)本方法应用于单木尺度时精度明显高于群体尺度。这是由于大田玉米种植密度较大,叶片之间难以避免遮挡问题,相较而言,单株玉米点云更为完整。

(3)点云质量越高则获得结果精度越高。点云质量高低与所使用激光雷达仪器性能有直接关系,同时也受天气、扫描站数的影响。

(4)本方法计算叶面积的结果与体素大小设置直接相关,需根据点云精度设置体素大小范围,以确定最优体素大小,获得该体素大小对应的最为精确的真实叶面积。

(5)以表征作物真实生长状态的 TLS 点云数据为直接数据源、结合面积信息即可获取作物真实叶面积指数的方式,极大地避免了基于地理投影算法获取孔隙率及丛生系数、进而得到真实叶面积指数过程中,因坐标系转换和多次投影造成的误差,为省时、省力、非破坏性地获取玉米类扁平宽大叶形作物的高精度真实叶面积指数提供了一种新的方法。

参 考 文 献

1 CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2):153-162.

2 刘婷. 基于 PROSAIL 模型和多源数据关键生育期 LAI 反演方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2015.

LIU Ting. Inversion of leaf area index of maize at the key growth stages based on PROSAIL model and multi-source data[D]. Beijing: China Agricultural University,2015. (in Chinese)

3 KOCH B, EYDER U, WEINACKER H. Detection of individual tree crowns in airborne LiDAR data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2006, 72(4):357-363.

4 庞勇,赵峰,李增元,等. 机载激光雷达平均树高提取研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(1):152-158.

PANG Yong, ZHAO Feng, LI Zengyuan, et al. Forest height inversion using airborne LiDAR technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(1):152-158. (in Chinese)

5 李丹,岳彩荣. 激光雷达在森林参数反演中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(6):54-58.

LI Dan, YUE Cairong. The application of LiDAR in inversion of the forest parameters[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2011,34(6):54-58. (in Chinese)

6 俞龙,黄健,赵祚喜,等. 丘陵山地果树冠层体积激光测量方法与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):224-228.

YU Long, HUANG Jian,ZHAO Zuoxi, et al. Laser measurement and experiment of hilly fruit tree canopy volume[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):224-228. (in Chinese)

7 刘峰,谭畅,张贵,等. 长白落叶松单木参数与生物量机载 LiDAR 估测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9):219-242.

LIU Feng, TAN Chang, ZHANG Gui, et al. Estimation of parameter and biomass for individual pine trees using aieborn LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(9):219-242. (in Chinese)

8 倪文俭,过志峰,孙国清,等. 基于地基激光雷达数据的单木结构参数提取研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(2):191-198.

NI Wenjian, GUO Zhifeng, SUN Guoqing, et al. Reserch on extraction of tree structure parameters from terrestrial laser scanner data[J]. High Technology Letters, 2010,20(2):191-198. (in Chinese)

9 ROBERTS S D, DEAN T J, EVANS D L, et al. Estimating individual tree leaf area in loblolly pine plantations using LiDAR-derived measurements of height and crown dimensions[J]. Forest Ecology & Management, 2005, 213(8):54-70.

10 STRAHLER A H, JUPP D L B, WOODCOCK C E, et al. Retrieval of forest structural parameters using a ground-based LiDAR

instrument (Echidna)[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014, 34(Supp.2):S426 – S440.

11 HOSOI F, OMASA K. Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable LiDAR imaging. [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(12):3463 – 3473.

12 HOSOI F, OMASA K. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution portable scanning LiDAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 44(12):3610 – 3618.

13 DANSON F M, HETHERINGTON D, MORSDORF F, et al. Forest canopy gap fraction from terrestrial laser scanning[J]. IEEE Transactions of Geoscience & Remote Sensing Letters, 2007, 4(1):157 – 160.

14 ZHENG G, MOSKAL L M, KIM S H. Retrieval of effective leaf area index in heterogeneous forests with terrestrial laser scanning [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 51(2):777 – 786.

15 苏伟,展郡鸽,张明政,等. 基于机载 LiDAR 数据的农作物叶面积指数估算方法研究[J]. 农业机械学报, 2016,47(3): 234 – 241,271.
SU Wei, ZHAN Junge, ZHANG Mingzheng. et al. Crop leaf area index estimation based on airborne LiDAR data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):234 – 241,271. (in Chinese)

16 高纪青,云挺,薛联凤. 基于投影算法和活动轮廓模型的真实叶面积指数计算[J]. 西北林学院学报, 2014,29(6):149 – 156.
GAO Jiqing, YUN Ting, XUE Lianfeng. Calculation of actual LAI based on projection algorithm and contour model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(6):149 – 156. (in Chinese)

17 高纪青,云挺,薛联凤. 基于鱼目摄像和地面激光雷达的真实叶面积指数计算[J]. 南京师大学报:自然科学版, 2014, 37(4):137 – 144.
GAO Jiqing, YUN Ting, XUE Lianfeng. The calculation of actual LAI based on terrestrial laser scanning data and fish eye camera [J]. Journal of Nanjing Normal University:Natural Science Edition, 2014,37(4):137 – 144. (in Chinese)

18 张明政,苏伟,王瑞燕. 基于地基激光雷达与 Landsat8 影像的玉米 LAI 反演[J]. 中国激光, 2015,42(11): 1114002.
ZHANG Mingzheng, SU Wei, WANG Ruiyan. Inversion of corn leaf area index using terrestrial laser scanning data and Landsat8 image[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1114002. (in Chinese)

19 张鑫,孟繁疆. 植物叶面积测定方法的比较研究[J]. 农业网络信息, 2008(12):14 – 15.
ZHANG Xin, MENG Fanjiang, Comparitive study on the measure methods of the plant leaf area [J]. Agriculture Network Information, 2008(12):14 – 15. (in Chinese)

20 CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant Cell & Environment, 1992, 15(4):421 – 429.

21 MILLER J B. A formula for average foliage density[J]. Australian Journal of Botany, 1967, 15(1):141 – 144.

22 CHEN J M, CIHLAR J. Plant canopy gap size analysis theory for improving optical measurements of leaf-area index[J]. Applied Optics, 1995, 34(27):6211 – 6222.

23 NILSON T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 8:25 – 38.

24 尹高飞,柳钦火,李静,等. 树冠形状对孔隙率及叶面积指数估算的影响分析[J]. 遥感学报, 2014, 18(4):752 – 759.
YIN Gaofei, LIU Qinhua, LI Jing, et al. Effect of crown shape on the estimation of gap probability and leaf area index [J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(4):752 – 759. (in Chinese)

25 杜春雨. 基于 TM 影像的叶面积指数反演[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2010.
DU Chunyu. Study on estimation of LAI models based on TM [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010. (in Chinese)

26 CHEN J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1996, 80(2 – 4):135 – 163.

27 王绪鹏,范文义,温一博. 基于 Campbell 椭球分布函数的大兴安岭地区主要树种叶倾角分布模拟[J]. 应用生态学报, 2013, 24(11):3199 – 3206.
WANG Xupeng, FAN Wenyi, WEN Yibo. Simulation of leaf inclination angle distribution of main tree species in Daxing’ an Mountains of China based on the Campbell ellipsoid distribution function [J]. Chinese Journal of Application Ecology, 2013, 24(11):3199 – 3206. (in Chinese)

28 马利霞,郑光,何维,等. 叶方向 3 维空间分布的地面激光雷达反演与分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(4):609 – 614.
MA Lixia, ZHENG Guang, HE Wei, et al. Retrieving three-dimensional spatial distribution of leaf orientation using terrestrial LiDAR data [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4):609 – 614. (in Chinese)

29 苏伟,郭皓,赵冬玲,等. 基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法[J]. 农业机械学报, 2016,47(3):234 – 241.
SU Wei, GUO Hao, ZHAO Dongling, et al. Leaf area index retrivel for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3):234 – 241. (in Chinese)

30 刘睿. 基于地基激光雷达的个体玉米叶面积垂直分布提取方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
LIU Rui. Estimating the vertical leaf area of single maize using terrestrial LiDAR data [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

31 HOSOI F, NAKAI Y, OMASA K. Estimating the leaf inclination angle distribution of the wheat canopy using a portable scanning LiDAR[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2009, 65(3):297 – 302.

32 BELAND M, BALDOCCHI D D, WIDLOWSKI J L, et al. On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 184:82 – 97.

33 HOSOI F, NAKAI Y, OMASA K. 3-D voxel-based solid modeling of a broad-leaved tree for accurate volume estimation using portable scanning lidar[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2013, 82:41 – 48.