doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.05.021

基于移动激光扫描的靶标叶面积计算方法

李秋洁　袁鹏成　邓　贤　茹　煜
（南京林业大学机械电子工程学院，南京 210037）

摘要：针对疏枝果园的变量对靶施药问题，提出基于移动激光扫描（Mobile laser scanning，MLS）技术的靶标叶面积计算方法，为变量施药实时提供基础数据。为消除激光雷达（Light detection and ranging，LiDAR）探测距离和施药车辆行驶速度对点云密度的影响，在车辆行驶方向和激光雷达扫描方向上计算每个测量点的分辨率，为 MLS 点云数据建立变尺度格网，以格网面积作为被激光束覆盖的叶面积，建立靶标总体格网面积（Total grid area，TGA）与真实总体叶面积（Total leaf area，TLA）的线性回归模型。采用仿真树模拟疏枝果树靶标，搭建移动激光扫描测量系统，采集靶标点云数据，改变探测距离及移动速度，获取了 4 种不同疏枝程度靶标的 108 个样本数据。试验结果表明，随着探测距离的增加和移动速度的降低，靶标点云数显著减少，变异系数最小为 0.920 9，靶标格网面积能稳定提取，变异系数最大为 0.053 7，TGA 与 TLA 的拟合优度为 0.909 0，叶面积测量相对误差均值为 9.16%。

关键词：变量对靶施药；冠层总体叶面积；二维激光雷达；移动激光扫描；变尺度格网
中图分类号：S776.28　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2020)05-0192-07　　**OSID**：

Calculation Method of Target Leaf Area Based on Mobile Laser Scanning

LI Qiujie　YUAN Pengcheng　DENG Xian　RU Yu
(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: Aiming to solve the problem of variable-rate pesticide spraying in sparse branch orchard, a method of target leaf area calculation based on mobile laser scanning (MLS) technology was proposed to provide basic data for real-time variable-rate pesticide spraying. To eliminate the influence of LiDAR detection distance and vehicle speed on the density of point cloud, the resolution of each measurement point in vehicle moving direction and LiDAR scanning direction was calculated, and the variable-scale grid was established for MLS point cloud data. The grid area was taken as the leaf area covered by laser beam, and the regression model of real total leaf area (TLA) and total grid area (TGA) was established. In the experiment, simulation tree was used to simulate the target of thinning fruit trees, and an MLS measurement system was built to collect the cloud data of the target points. Through changing the detection distance and moving speed, totally 108 sample data for four targets with different thinning degrees were obtained. The experimental results showed that the number of target cloud was decreased significantly with the increase of detection distance and the decrease of moving speed with variation coefficient over 0.920 9, while the area of target grid can be extracted stably with variation coefficient less than 0.053 7. The r-squared of linear fitting of TLA and TGA was 0.909 0, and the mean value of relative error of TLA measurement was 9.16%.

Key words: variable-rate pesticide spraying; total leaf area; 2D LiDAR; mobile laser scanning; variable-scale grid

0　引言

变量对靶施药技术已在果园、苗圃病虫害防治中成功应用[1]，其基础是对靶标的精准探测与信息提取[2-3]。激光雷达（Light detection and ranging，LiDAR）技术能快速获取树木完整形貌，提高测量效

收稿日期：2020-01-17　修回日期：2020-02-27
基金项目：江苏省基础研究计划（青年基金）项目（BK20170930）、国家自然科学基金项目（31901239）和江苏省农业科技自主创新资金项目（CX(18)1007）
作者简介：李秋洁（1983—），女，副教授，主要从事林木信息技术研究，E-mail：liqiujie_1@163.com

率，已广泛应用于树木信息提取[4-6]和三维重建[7]。将靶标冠层离散化为规则几何体，通过 LiDAR 实时测量树冠外缘距离，结合预设的树行距离及其他系统参数，可估算出冠层体积，据此调节施药剂量，使药液在冠层内部均匀沉积[8-9]。上述方法适用于冠层结构紧密、叶片交错重叠程度大的靶标。对于疏枝果园，为增加果树产量、提高果实品质，果树冠层被修剪得较为稀疏，枝条的分支角度较大，叶片重叠程度低，此时难以准确计算冠层体积，更适合用冠层叶面积作为喷雾依据。

基于 LiDAR 的叶面积测量主要研究叶面积指数（Leaf area index，LAI）、叶面积密度（Leaf area density，LAD）和总体叶面积（Total leaf area，TLA）等冠层参数。LAI 是单位土地面积的叶片总面积，通常从冠层点云数据中提取透光率、消光系数等参数来计算[10-11]，而变量对靶施药需要测量喷雾方向上的叶片总面积，因此并不适合。LAD 为单位体积内的叶片总面积，先将体素化后的冠层划分为多个横切面或纵切面，然后计算激光束与冠层切面的接触频率，利用激光束方向与叶倾角进行校正，得到冠层切面的 LAD[12-13]。LAD 计算较为复杂，并且需要乘以冠层体积才能得到叶面积，不满足变量对靶施药实时测量的需求。TLA 为冠层的总体叶面积，常采用点云数进行估计。文献[14]证明了冠层点云数与叶面积之间为线性关系；文献[15]采用高斯函数、多项式函数与指数函数拟合了 0.2 m×0.2 m×0.8 m 长方体内的点云数与叶片数关系，拟合优度达0.936 4；文献[16-17]随机选择一部分冠层点云数据，利用三角剖分算法生成的三角形面积估计点云个数与叶面积的比率，同时，考虑到测量距离对点云密度的影响，按距离对冠层分层，分别计算叶面积。

基于 2D LiDAR 的移动激光扫描（Mobile laser scanning，MLS）技术已在靶标冠层体积测量中成功应用[9,18-20]，在靶标叶面积测量上也取得了一些研究成果[14-15]。针对疏枝果园的变量对靶施药问题，研究基于 MLS 技术的靶标叶面积计算方法，进而研究 TLA 的计算方法。已有研究[15-17]表明，LiDAR 探测距离和移动速度对点云密度有较大影响。本文分析上述因素与 MLS 点云分辨率的关系，对点云数进行校正，以提高叶面积测量精度，为变量对靶施药提供基础数据。

1　材料与方法

1.1　移动激光扫描测量

试验采用日本 Hokuyo 公司生产的 UTM-30LX 型 2D 激光雷达（LiDAR），如图 1 所示。最大测量距离 30 m，扫描范围 270°，扫描周期 25 ms，角度分辨率 0.25°，每次扫描返回以毫米为单位的 1 081 个测量点，用 4 个字节的整数表示。

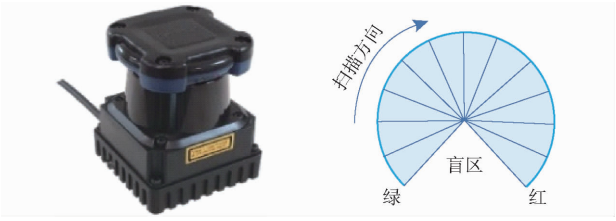

图 1　UTM-30LX 型 2D 激光雷达

Fig. 1　UTM-30LX 2D LiDAR

MLS 测量系统如图 2 所示，将 LiDAR 盲区向下搭载在长度为 1 m 的丝杆滑台上，由 STC89C52 单片机控制 FM576SFD04 型步进电机带动滑台在丝杆上以 9.7 mm/s 的速度匀速移动，计算机通过串口读取 LiDAR 数据，获取垂直于 LiDAR 移动方向的扇形扫描区域内的靶标距离信息。

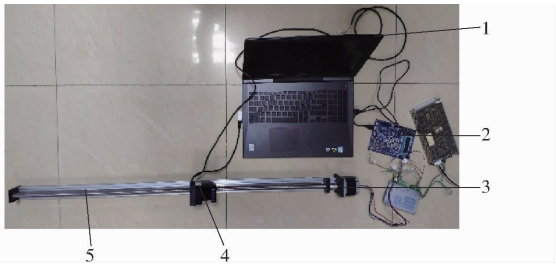

图 2　MLS 测量系统

Fig. 2　MLS measurement system

1. 便携式计算机　2. 单片机　3. 步进电机　4. 2D LiDAR 和滑台　5. 丝杆

1.2　靶标样本

采用树高 1.4 m、冠幅 0.8 m 的仿真树模拟疏枝靶标，仿真树共有 6 根树枝，选择 2、4、5、6 根树枝模拟由疏到密的不同疏枝情况，分别作为靶标 1～4 号，如图 3 所示。



(a) 1号,2根树枝　(b) 2号,4根树枝　(c) 3号,5根树枝　(d) 4号,6根树枝

图 3　疏枝靶标

Fig. 3　Sparse branch target

采用网格方法测量单片叶面积，如图 4 所示，网格尺寸为 0.2 cm。经测量，叶片高 6.7 cm，宽 4.0 cm，面积为 19 cm^2。由于仿真树的所有叶片面积相同，将叶片数乘以单片叶面积，可得到靶标总体叶面积，如表 1 所示。



图 4 单片叶面积测量

Fig. 4 Measurement of single leaf area

表 1 靶标总体叶面积

Tab. 1 Total leaf area of target

靶标参数	靶标序号			
	1	2	3	4
叶片数	402	582	757	1 009
叶面积/m^2	0.768 3	1.105 8	1.438 3	1.917 1

1.3 格网面积计算

1.3.1 变尺度格网

MLS 点云数据为格网结构,可以通过测量点帧序号 i 和帧内编号 j 进行索引,记为(i,j),如图 5 所示。

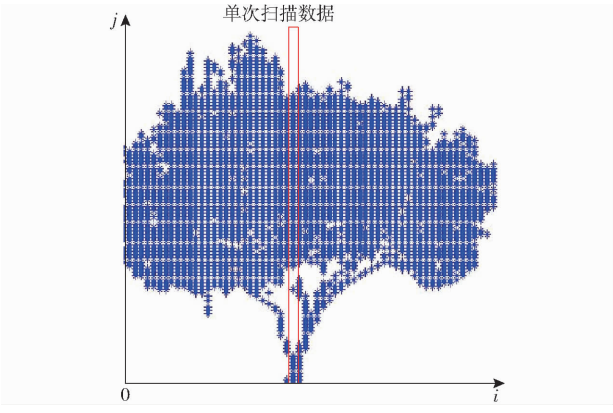

图 5 MLS 数据的格网结构

Fig. 5 Grid structure of MLS data

由于 MLS 分辨率受到 LiDAR 测量距离和移动速度影响,格网的尺度并不一致,称为变尺度格网[21]。令 d_s 和 d_m 分别表示 LiDAR 扫描方向和移动方向上的格网尺度,如图 6 所示,则测量点(i,j)的格网尺度为

$$\begin{cases} d_s(i,j) = r(i,j)\Delta\alpha \\ d_m(i,j) = v(i)\Delta t \end{cases} \tag{1}$$

式中 $r(i,j)$——测量点(i,j)的测量距离

$\Delta\alpha$——LiDAR 弧度分辨率

$v(i)$——LiDAR 在第 i 帧的移动速度

Δt——LiDAR 扫描周期

由式(1)可知,随着 LiDAR 移动速度和测量点距离增加,格网尺度增加,点云密度减小。

用测量点的格网面积表示与其接触的叶片面积,测量点(i,j)的格网面积为

$$A_G(i,j) = d_s(i,j)d_m(i,j) \tag{2}$$

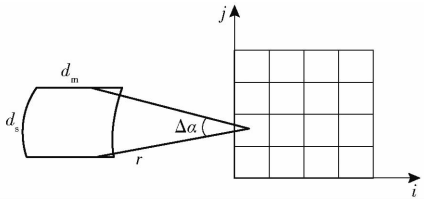

图 6 变尺度格网

Fig. 6 Variable-scale grid

1.3.2 格网尺度范围

为准确测量叶片面积,格网尺度应小于叶片尺度,取叶片长、宽中的较小值作为叶片尺度 Δ_{leaf},则 MLS 测量系统的最大探测距离 r_{max}和最大移动速度 v_{max}为

$$r_{max} = \frac{\Delta_{leaf}}{\Delta\alpha} \tag{3}$$

$$v_{max} = \frac{\Delta_{leaf}}{\Delta t} \tag{4}$$

1.4 叶面积计算

为提取冠层点云数据,求取 MLS 点云三维坐标,其中,x 轴为 LiDAR 移动方向,y 轴为深度方向,z 轴垂直地面向上。测量点(i,j)的三维坐标为

$$\begin{cases} x(i,j) = iv\Delta t \\ y(i,j) = r(i,j)\cos\theta(j) \\ z(i,j) = r(i,j)\sin\theta(j) \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\theta(j)$——帧内第 j 个测量点的扫描角度

根据冠层点云边界设置坐标阈值 x_{min}、x_{max}、y_{min}、y_{max}、z_{min}、z_{max},计算冠层点云的总体格网面积(Total grid area,TGA)

$$A_{TG} = \sum_{(i,j)\in R} A_G(i,j) \tag{6}$$

式中 R——坐标在$[x_{min},x_{max}]$、$[y_{min},y_{max}]$、$[z_{min},z_{max}]$范围内点云索引的集合

A_{TG}——总体格网面积

采用线性模型拟合冠层总体叶面积与总体格网面积的回归关系,即

$$A_{TL} = kA_{TG} + b \tag{7}$$

式中 k——斜率 b——截距

A_{TL}——拟合冠层总体叶面积

变量对靶施药时,首先计算当前施药区域内冠层点云的格网面积 A_{TG},然后采用式(7)求取叶面积 A_{TL},据此调节施药剂量,使药液均匀分布在叶片上。

2 试验与分析

选取叶片长、宽中数值较小的叶片宽作为叶片尺度,即 $\Delta_{leaf}=0.04$ m。根据式(3)、(4),MLS 探测距离应小于 9.167 m,移动速度应小于 1.6 m/s。为

分析 LiDAR 探测距离和移动速度对叶面积测量的影响，丝杆到树干的距离 D 设为 1.0、1.5、2.0 m 3 个等级，同时，为模拟不同移动速度，对点云数据进行采样，即每隔若干帧选取一帧点云数据，设置不同的采样比使速度在 0.194 ~ 1.455 m/s 之间变化，如表 2 所示。

表 2　采样比设置

Tab. 2　Sampling ratio setting

采样比	20	40	60	80	100	120	130	140	150
速度/(m·s^{-1})	0.194	0.388	0.582	0.776	0.970	1.164	1.261	1.358	1.455

按照以上参数分别对 4 个靶标进行数据采集，如图 7 所示，通过改变探测距离和采样比，每个靶标均获取 27 个样本，共获取 108 个靶标样本。

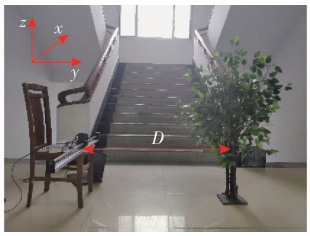

图 7　靶标 MLS 数据采集

Fig. 7　Acquisition of target MLS data

2.1　冠层格网面积

2.1.1　不同参数对靶标点云的影响

求取原始点云数据的三维空间坐标，设置阈值分割出冠层点云，如图 8 所示，此时 D = 1.0 m，为未采样的原始数据。

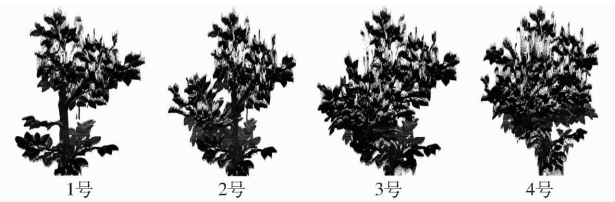

图 8　靶标冠层点云

Fig. 8　Point cloud of target canopy

图 9 为 D = 1.5 m 时采样比取 20、80、140 时 3 号靶标的冠层点云，随着 LiDAR 移动速度变快，点云密度降低，点云数显著减小。

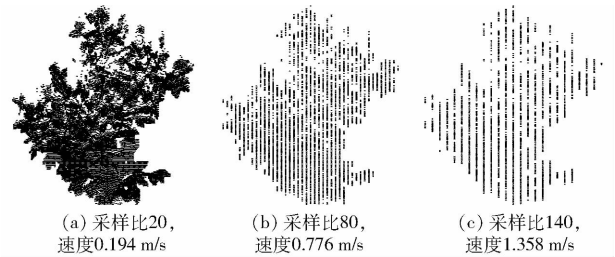

图 9　不同速度下的冠层点云

Fig. 9　Canopy point cloud at different velocities

图 10 给出 D = 1.5 m 时 3 号靶标原始点云数据的距离直方图，从图中可看出，受 2D LiDAR 扇形扫描测量方式和靶标冠层结构及叶片分布影响，冠层内的点云距离有较大差异，点云密度不一致。

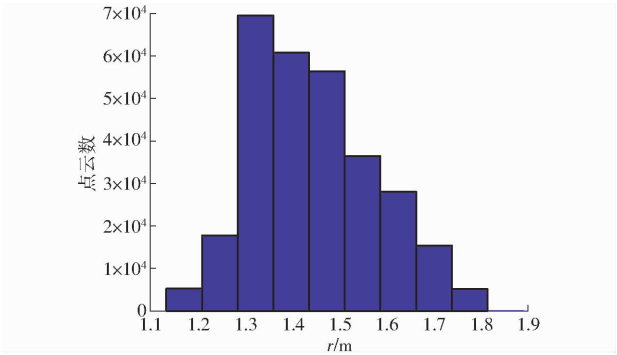

图 10　冠层点云距离直方图

Fig. 10　Histogram of canopy point range

表 3 给出不同探测距离下 3 号靶标原始点云数据的距离统计值及点云数，随着探测距离变大，点云密度降低，点云数显著减小。

表 3　探测距离对靶标点云的影响

Tab. 3　Total leaf area of target

点云距离	探测距离 D/m		
统计参数	1.0	1.5	2.0
最小值/m	0.620 0	1.134 0	1.649 0
最大值/m	1.422 0	1.891 0	2.378 0
均值/m	0.944 1	1.445 6	1.945 1
标准差/m	0.140 4	0.131 0	0.123 9
点云数	444 257	294 765	218 238

2.1.2　不同参数对靶标点云数和格网面积的影响

表 4 为不同速度和探测距离下 3 号靶标的格网面积，从表中可看出，格网面积受探测距离和移动速度影响较小。

表 4　不同速度和探测距离下的靶标格网面积

Tab. 4　Target grid area under different speeds and distances　m^2

速度/	探测距离 D/m		
(m·s^{-1})	1.0	1.5	2.0
0.194	0.809 0	0.822 6	0.819 1
0.388	0.807 3	0.822 7	0.816 9
0.582	0.811 2	0.822 7	0.815 3
0.776	0.812 0	0.827 0	0.815 0
0.970	0.813 8	0.821 0	0.820 0
1.164	0.807 4	0.821 2	0.807 6
1.261	0.809 0	0.819 6	0.820 1
1.358	0.797 0	0.819 3	0.819 0
1.455	0.819 5	0.826 8	0.816 8

为对比不同参数对靶标点云数 N 和格网面积 A_{TG} 的影响，对数据进行预处理得到相对靶标点云数 $\overline{N}$ 和相对格网面积 $\overline{A}_{TG}$，计算式为

$$\overline{N}=\frac{N}{N_{min}} \tag{8}$$

$$\overline{A}_{TG}=\frac{A_{TG}}{A_{TG_{min}}} \tag{9}$$

式中 N_{min}——靶标点云数最小值

$A_{TG_{min}}$——格网面积最小值

图 11 为不同靶标 27 个样本的相对靶标点云数和相对靶标格网面积，为便于比较，设置相同的纵坐标范围。从图中可看出，靶标点云数受 LiDAR 移动速度和探测距离影响较大，同一靶标的点云数有较大差异，而格网面积则差异较小。

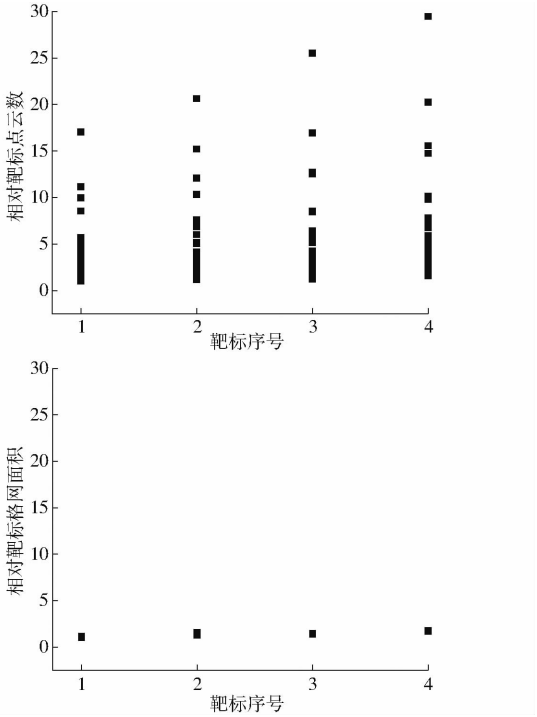

图 11 相对靶标点云数和格网面积

Fig. 11 Relative point number and grid area of target

采用变异系数(Coefficient of variation，CV)评价同一靶标点云数及格网面积的离散程度，计算式为

$$C_v=\frac{\sigma}{\mu} \tag{10}$$

式中 σ——数据标准差

μ——数据均值

C_v——变异系数

表 5 为靶标点云数及格网面积的变异系数，靶标格网面积具有较小的变异系数，不同参数下能稳定提取靶标格网面积。由于 3、4 号靶标枝叶遮挡程度较高，因此不同参数(尤其是不同距离)对点云数的影响大于 1、2 号靶标。由于离散格网会对枝叶稀疏的靶标引入更大的测量误差，因此与枝叶较密集的 3、4 号靶标相比，1、2 号靶标有更大的格网面积变异系数。

表 5 靶标变异系数

Tab. 5 Coefficient of variation of target

靶标参数	靶标序号			
	1	2	3	4
点云数	0.929 9	0.920 9	0.955 5	0.940 4
格网面积	0.051 9	0.053 7	0.008 2	0.013 5

2.2 冠层叶面积

采用线性模型拟合 TGA 和 TLA，如图 12 所示，拟合优度为 0.909 0，均方根误差为 0.129 7 m^2，拟合方程为

$$A_{TL}=2.899A_{TG}-1.002 \tag{11}$$

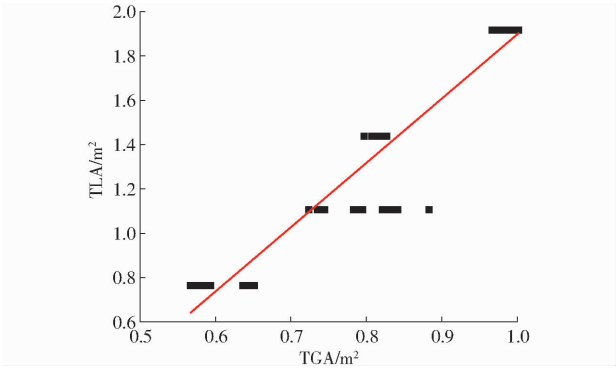

图 12 靶标叶面积拟合曲线

Fig. 12 Fitting of target leaf area

为分析不同靶标的叶面积测量精度，计算每个靶标样本的相对误差

$$e=\frac{|A_{TG}-A_{TL}|}{A_{TL}}\times 100\% \tag{12}$$

所有样本的相对误差均值为 9.16%，标准差为 7.71%，在 $D=2.0$ m 时测量 2 号靶标相对误差最大，为 40.99%。表 6 ~ 8 统计了不同靶标、不同探测距离和不同速度下叶面积测量的相对误差均值和

表 6 不同靶标的叶面积测量相对误差

Tab. 6 Relative error of leaf area measurement of different targets %

参数	靶标序号			
	1	2	3	4
相对误差均值	12.33	15.74	5.14	3.41
相对误差标准差	2.51	11.13	1.36	1.81

表 7 不同探测距离的叶面积测量相对误差

Tab. 7 Relative error of leaf area measurement under different distances %

参数	探测距离 D/m		
	1.0	1.5	2.0
相对误差均值	6.56	9.09	11.82
相对误差标准差	2.92	5.91	11.0

标准差。从表 6 可看出，3、4 号靶标的相对误差小于枝叶更为稀疏的 1、2 号靶标，这是由于离散格网对枝叶稀疏的靶标引入更大的测量误差。从表 7 可看出，探测距离对测量误差有较大影响，探测距离越远，格网在 LiDAR 扫描方向上的尺度越大，使得测量精度越低。从表 8 可看出，与靶标类型和探测距离相比，速度对测量误差影响较小，根据式(1)可知，速度对所有格网尺度的影响相同，而探测距离改变会引起测量点距离发生不同的变化，这种不一致性导致了探测距离对测量误差有较大影响。

表 8　不同速度的叶面积测量相对误差

Tab. 8　Relative error of leaf area measurement at different speeds　%

参数	速度/(m·s^{-1})								
	0.194	0.388	0.582	0.776	0.970	1.164	1.261	1.358	1.455
相对误差均值	9.11	8.99	9.12	9.87	9.21	9.23	7.47	10.20	9.24
相对误差标准差	7.27	6.98	7.35	10.39	7.29	6.30	7.32	7.83	7.69

3　结论

(1)针对疏枝果园的变量对靶施药问题，提出一种基于 MLS 测量系统的靶标叶面积计算方法，通过分析系统分辨率建立变尺度格网，采用冠层总体格网面积估计总体叶面积。

(2)采用仿真树模拟 4 种疏枝靶标，改变 MLS 的探测距离和移动速度，每个靶标采集 27 个样本。试验结果表明，冠层格网面积受探测距离和移动速度影响较小，变异系数最大为 0.053 7。

(3)建立靶标总体格网面积和真实总体叶面积的线性回归模型，拟合优度为 0.909 0，叶面积测量相对误差均值为 9.16%，说明本文方法能有效减小 LiDAR 探测距离和移动速度对叶面积测量的影响。

(4)接下来可进一步研究枝叶分离方法，去除冠层中的枝干点云数据，利用激光入射角和多次回波校正格网面积，可提高叶面积测量精度。

参　考　文　献

[1] 邱白晶，闫润，马靖，等. 变量喷雾技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报，2015，46(3)：59－72.
QIU Baijing，YAN Run，MA Jing，et al. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2015，46(3)：59－72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150309&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.009.(in Chinese)

[2] 李瀚哲，翟长远，张波，等. 果园喷雾靶标探测技术现状分析[J]. 农机化研究，2016，38(2)：1－5.
LI Hanzhe，ZHAI Changyuan，ZHANG Bo，et al. Status analysis of orchard spray target detection technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2016，38(2)：1－5.(in Chinese)

[3] 张美娜，吕晓兰，常有宏，等. 果树靶标精准探测系统研究进展分析[J]. 中国农机化学报，2016，37(10)：227－233.
ZHANG Meina，LÜ Xiaolan，CHANG Youhong，et al. Research progress analysis of target precision detection system for orchards[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2016，37(10)：227－233.(in Chinese)

[4] 刘芳，冯仲科，杨立岩，等. 基于三维激光点云数据的树冠体积估算研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(3)：328－334.
LIU Fang，FENG Zhongke，YANG Liyan，et al. Estimation of tree crown volume based on 3D laser point clouds data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(3)：328－334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160346&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.046.(in Chinese)

[5] 王佳，张芳菲，高赫，等. 地基激光雷达提取单木冠层结构因子研究[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(2)：199－206.
WANG Jia，ZHANG Fangfei，GAO He，et al. Extracting crown structure parameters of individual tree by using ground-based laser scanner[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(2)：199－206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180226&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.026.(in Chinese)

[6] 李秋洁，郑加强，周宏平，等. 基于移动二维激光扫描的单木三维绿量测定[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2018，42(1)：127－132.
LI Qiujie，ZHENG Jiaqiang，ZHOU Hongping，et al. Three-dimensional green biomass measurement for individual tree using mobile two-dimensional laser scanning[J/OL]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)，2018，42(1)：127－132.(in Chinese)

[7] 唐丽玉，张浩，黄洪宇，等. 基于点云数据的树木三维重建方法改进[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(2)：186－194.
TANG Liyu，ZHANG Hao，HUANG Hongyu，et al. Improved method for 3D reconstruction of tree model based on point cloud data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(2)：186－194. http://www.j-csam.

org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170225&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.025. (in Chinese)

[8] 李秋洁, 郑加强, 周宏平, 等. 基于车载二维激光扫描的树冠体积在线测量[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 309 - 314.
LI Qiujie, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Online measurement of tree canopy volume using vehicle-borne 2-D laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 309 - 314. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20161238&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.038. (in Chinese)

[9] CHEN Y, OZKAN H E, ZHU H, et al. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(6): 1263 - 1272.

[10] COMBA L, BIGLIA A, AIMONINO D R, et al. Leaf area index evaluation in vineyards using 3D point clouds from UAV imagery[J/OL]. Precision Agriculture, 2019. https://doi.org/10.1007/s11119 - 019 - 09699 - x.

[11] 赵方博, 王佳, 高赫, 等. 地面激光雷达的单木真实叶面积指数提取[J]. 测绘科学, 2019, 44(4): 81 - 86.
ZHAO Fangbo, WANG Jia, GAO He, et al. Extraction of real leaf area index of individual tree based on terrestrial laser scanner[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(4): 81 - 86. (in Chinese)

[12] LI S, DAI L, WANG H, et al. Estimating leaf area density of individual trees using the point cloud segmentation of terrestrial LiDAR data and a voxel-based model[J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1202.

[13] BELAND M, WIDLOWSKI J, FOURNIER R A. A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 51: 184 - 189.

[14] SANZ-CORTIELLA R, LLORENS-CALVERAS J, ESCOLA A, et al. Innovative LiDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area[J]. Sensors, 2011, 11(6): 5769 - 5791.

[15] 张美娜, 吕晓兰, 邱威, 等. 基于三维激光点云的靶标叶面积密度计算方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 172 - 178.
ZHANG Meina, LÜ Xiaolan, QIU Wei, et al. Calculation method of leaf area density based on three-dimensional laser point cloud[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 172 - 178. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20171121&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.021. (in Chinese)

[16] YUN T, AN F, LI W, et al. A novel approach for retrieving tree leaf area from ground-based LiDAR[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11): 942.

[17] YUN T, CAO L, AN F, et al. Simulation of multi-platform LiDAR for assessing total leaf area in tree crowns[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.06.009.

[18] 蔡吉晨. 基于二维激光雷达的果树在线探测方法及对靶变量喷药技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
CAI Jichen. Research on tree on-line detection method and targeted variable-rate spraying techniques based on laser-scanning sensor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[19] 夏伟. 激光传感器三维靶标检测系统的设计与研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
XIA Wei. Development and research of 3D target detection system based on laser scanning sensor[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)

[20] 束义平. 基于激光雷达探测技术的果园变量喷雾控制系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.
SHU Yiping. Research on control system of orchard variable-rate spray based on LiDAR detection technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018. (in Chinese)

[21] 李秋洁, 郑加强, 周宏平, 等. 基于变尺度格网索引与机器学习的行道树靶标点云识别[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 32 - 37.
LI Qiujie, ZHENG Jiaqiang, ZHOU Hongping, et al. Point cloud recognition of street tree target based on variable-scale grid index and machine learning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 32 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180604&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.004. (in Chinese)