

基于2D激光探测的立木胸径几何算法优化

王亚雄¹ 康峰¹ 李文彬¹ 郑永军²

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 目前林业测绘中使用2D激光扫描仪对树干立木胸径及位置的测定研究占据重要地位。针对3种较为常用的几何类算法(弧长法、切线法和双余弦法),提出在近距离下利用补偿角对其测量值进行补偿的方案,研究了弧长法与切线法补偿角随距离的变化关系,并进行回归分析,所得拟合方程的 R^2 均大于0.85。运用拟合方程在0~5.5 m范围内对实际树干进行验证,试验选取了5株杨树树干,通过算法补偿,半径与距离测量值的准确性均得到提高,其中弧长补偿算法和切线补偿算法对半径的测量精度分别比未补偿前提高了10.6和10.7个百分点,补偿后的绝对误差均值分别为4.8 mm和3.8 mm;补偿后距离测量值绝对误差均值可分别控制在66.0 mm和15.9 mm以内。试验证明2种补偿后的几何算法均可作为近距离下的林业测绘算法,其中切线补偿算法更优。

关键词: 立木胸径; 2D激光扫描仪; 几何类算法; 拟合方程

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)06-0290-07

Optimization of Geometry Algorithm for DBH of Standing Tree on 2D Laser Detection

Wang Yaxiong¹ Kang Feng¹ Li Wenbin¹ Zheng Yongjun²

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It takes an important role to measure the DBH and position of standing tree by a 2D laser detection in current forestry surveying and mapping. A compensation scheme in short distances contraposing the two variables was put forward on three common geometry algorithms (arc length method, tangent method, dual-cosine method), and a compensation angle was used in the scheme. The functionary relation of compensation angles for arc length method and tangent method with distances was researched specifically, the regression analysis was also carried on, and the fitting equations were obtained ($R^2 > 0.85$ for each fitting equation). Verification test for trunks using the fitting equations in the range of 0 ~ 5.5 m was carried out in which five poplar trunks were selected. The accuracies of measured values of radius and the distance were all improved by algorithms compensation. Thereinto, the measure precisions of radius values from arc length compensation algorithm and tangent compensation algorithm were respectively increased by 10.6 percent and 10.7 percent, and the mean absolute errors were 4.8 mm and 3.8 mm; the mean absolute errors of measured values of distance were controlled within 66.0 mm and 15.9 mm respectively after algorithms compensation. Experiments proved that the two compensation geometric algorithms could both be used as forestry surveying and mapping algorithms in short distances, and the tangent compensation algorithm is better.

Key words: DBH of standing tree; 2D laser detection; geometry algorithms; fitting equation

收稿日期: 2016-02-03 修回日期: 2016-04-04

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015ZCQ-GX-01)和国家林业局引进国际先进林业科学技术计划(948计划)项目(2013-4-02)

作者简介: 王亚雄(1986—),男,博士生,主要从事林业工程装备及其自动化研究,E-mail: yaxiongwang87@bjfu.edu.cn

通信作者: 康峰(1981—),男,副教授,主要从事精准植保及农林装备自动化研究,E-mail: kangfeng98@bjfu.edu.cn

引言

立木胸径与位置的测定是林业测绘的重要内容,可为林业相关作业提供基础数据和科学依据,如林区地图绘制^[1]、林分蓄积量测定^[2]、林间避障与导航^[3]、林木采伐^[4]、林木精准施药^[5-6]等。传统人工接触式测绘方法^[7]费时费力,效率极其低下。因此,基于先进传感技术的非接触式测绘方法应运而生,如超声波技术^[8]、机器视觉^[9-10]、激光测距技术^[11-12]等。超声波技术依据声波传播速度及时间差获取距离点阵并提取胸径,但获取数据的时效性较差,波束发散角大;机器视觉主要通过采集标志物与被测立木的图像,依据像素比例关系获取胸径^[13],也有结合几何法与图像处理获取胸径的方法^[14]。尽管机器视觉信息获取量大,但其对光照等条件要求高,自然条件较差时其测绘性能受到影响;激光测距技术主要根据激光在待测距离之间往返的传播时间实现测距,信息获取量较机器视觉少,但测量精确、快速、稳定,逐渐成为主流测绘传感手段。林业应用中,3D激光技术由于设备昂贵、体积庞大,一般仅用于整个树体的静态测绘^[15-16],而2D激光测距仪体积小,价格相对便宜,多用于立木胸径及位置的动态测量。

采用2D激光测距技术对立木胸径和位置进行非接触测量时,基于常识一般将树干截面近似看作标准圆,根据激光传感器获取的数据,对树干胸径处截面进行标准圆拟合并提取该圆直(半)径及圆心坐标,认定为该立木胸径和与激光传感器的相对位置,结合GPS定位即可获得立木实际位置。相关的标准圆拟合与提取算法主要有以下4类:首末数据法^[5]、最小二乘法^[17]、共轭梯度法^[18]、几何类算法^[19]。其中,首末数据法原理简单,耗时与内存开销小,但误差较大;最小二乘法与共轭梯度法内存开销大,实时性差,不适用于林区移动作业如林间导航移动和林木精准施药等;几何类算法计算简便,具有良好的实时性,其精度优于首末数据点法,但稍逊于最小二乘法与共轭梯度法。若能对几何类算法进行合理优化改进,在确保实时性的基础上进一步提高其精度,该类算法将非常适用于林区定位地图绘制及导航、林木精准施药等领域。

因此本文选择几何类算法进行立木胸径及位置测绘,并针对该类算法存在的实际问题确定合理的优化方案,最后结合试验验证优化性能,以实现测绘的精确性。

1 优化问题的提出

采用几何类算法根据激光传感器获取的点数

据进行立木相关参数识别和提取时,首先要进行滤波分簇处理,目的是过滤背景噪声,只保留投射到树干上并返回的点云簇。一般采用点间跳变距离阈值法或弦高阈值法^[20]进行滤波分簇。不论哪种方法,经常会有奇异点产生,产生原因主要有:通讯干扰、环境噪声和混合像素噪声。通讯干扰存在于系统本身,不可避免;环境噪声一般为环境光照影响,可加保护罩或滤镜降低;混合像素噪声产生原因如图1所示,激光传感器发射的光束由于具有一定的发散角^[21],在树干边缘处,光斑一部分作用在树干上(后称树干部分),另一部分作用在背景物上(后称背景部分)。返回激光传感器后认为该点位于树干与背景物之间,造成该方向上的随机干扰误差,导致属于该树干的点云簇包含混合像素噪声。

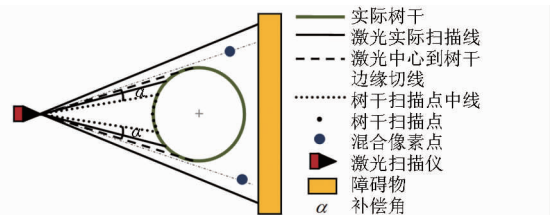


图1 混合像素产生机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mixed pixels mechanism

在该点云簇基础上通过聚类处理^[22]进行树干标准圆拟合和特征提取时,混合像素会导致测量结果偏大,影响精度;若将混合像素点剔除,拟合立木胸径尺寸则偏小。为此,可通过引入补偿角 α 来解决这一问题。如图1所示,补偿角 α 为点云簇中边缘点光束中线与激光中心到树干边缘切线的夹角。RINGDAHL等^[19]通过对其所用的激光传感器进行分析,将一种静态补偿角引入到几何类算法中,使其精度得到一定改善。但是,在实际测量过程中,各立木胸径和距离不断变化,导致混合像素点中树干部分和背景部分比例不恒定,所对应的补偿角也不断变化,需要实时动态确定以提高测量精度。目前,针对几何类算法补偿角动态确定的研究鲜有报道。

因此,本文针对上述问题,进行常见几何类算法的补偿角动态确定方面的研究,通过数学计算与试验对比的方法,建立能够根据激光测量值动态自确定补偿角的优化模型,旨在确保实时性的前提下进一步提高算法精度,以期满足林区移动作业对林木定位识别精度和实时性的要求。具体优化过程分为3个步骤:确定不同算法下树干半径测量误差的补偿角;寻找补偿角随半径及距离的变化规律,提取动态优化模型;对提取的优化模型进行试验验证,分析优化性能。另外由于激光传感器对距离较远的胸径小于10 cm的树干分辨率较低,当距离超过6 m时,

径级较小的树干激光返回的数据点个数很少,如当激光传感器角分辨率为 0.333° 、树干直径为10 cm、距离为6 m时,树干返回数据点个数仅为1或2个,无法进行拟合计算或拟合结果产生误差较大。故本文研究近距离(0~5.5 m)立木胸径算法补偿角动态确定方法及效果。

2 几何类算法及其补偿角确定方法

选取几何类算法中常用的3种算法:弧长法、切线法、双余弦法,并针对各个算法提出相应的补偿角确定方案。

2.1 弧长法

弧长法^[23]的原理是以首末扫描点到激光中心距离的平均值为半径作弧,将弧长近似为树干直径,弧长对应的角度是首末两点到激光中心连线所夹角度。计算公式为

$$d = (n - 1) \Delta\beta (\rho_1 + \rho_n) / 2 \quad (1)$$

式中 d ——树干直径, m

n ——每点云簇数据点的个数

$\Delta\beta$ ——激光传感器的角度分辨率

ρ_1, ρ_n ——每簇数据中首末扫描点与传感器的距离, m

该算法混合像素误差机理如图1所示,剔除树干边缘因混合像素产生的异常点后,同一点云簇中,首末数据点(ρ_1 和 ρ_n)位于树干边缘以内,计算得出的树干直径偏小。该算法的补偿角 α 是根据树干截面的激光测量值和真实值求得,即

$$\alpha = \frac{d_c}{\rho_1 + \rho_n} - \frac{(n - 1) \Delta\beta}{2} \quad (2)$$

式中 d_c ——树干截面直径真实值, m

2.2 切线法

切线法^[24]的原理(图2)是假设属于某一树干的点云簇中首末两点与激光中心的连线与树干截面拟合圆严格相切,计算公式为

$$d = 2\rho_{\min} \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{1 - \sin \frac{\Delta\theta}{2}} \quad (3)$$

式中 $\Delta\theta$ ——同簇数据激光扫描角, ($^\circ$)

ρ_{\min} ——同簇数据扫描点与激光中心的最短距离, m

该算法混合像素误差机理与弧长法类似,其补偿角计算公式为

$$\alpha = \arcsin \frac{d_c}{2\rho_{\min} + d_c} - \frac{\Delta\theta}{2} \quad (4)$$

2.3 双余弦法

双余弦法^[25]首先计算同簇数据中2个边界扫

描点与激光中心距离的均值,设树干半径为未知量,根据余弦定理,计算得出树干直径,如图3所示。

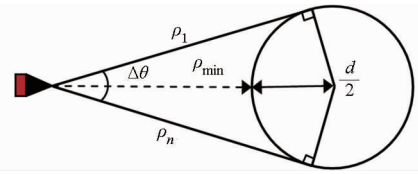


图2 切线法直径计算原理图

Fig. 2 Principle diagram of diameter calculation for tangent method

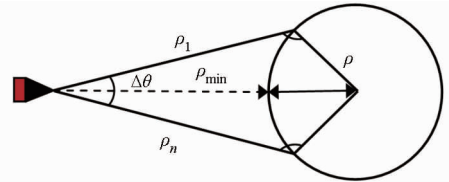


图3 双余弦法直径计算原理图

Fig. 3 Principle diagram of diameter calculation for dual-cosine method

计算公式为

$$d = \frac{\rho_{\text{edg}}^2 + \rho_{\min}^2 - 2\rho_{\text{edg}}\rho_{\min} \cos \frac{\theta}{2}}{\rho_{\text{edg}} \cos \frac{\theta}{2} - \rho_{\min}} \quad (5)$$

其中

$$\rho_{\text{edg}} = \frac{\rho_1 + \rho_n}{2}$$

式中 ρ_{edg} ——首末两点距离的平均值

相对应的补偿角为

$$\alpha = \arccos \frac{\rho_{\text{edg}}^2 + \rho_{\min}^2 + d_c \rho_{\min}}{d_c \rho_{\text{edg}} + 2\rho_{\text{edg}}\rho_{\min}} - \frac{\theta}{2} \quad (6)$$

如图3所示,当首末扫描点与激光中心连线不与树干严格相切时,采用双余弦法估算树干直径也可排除计算误差,理论上无需角度补偿即可计算出树干直径准确值。

2.4 距离值补偿算法

3种不同算法下补偿前后的树干中心与激光传感器距离的计算方法类似。计算公式为

$$L_b = \rho_{\min} + r_b \quad (7)$$

$$L_a = \rho_{\min} + r_a \quad (8)$$

式中 L_b, L_a ——补偿前、后的距离, m

r_b, r_a ——补偿前、后的半径, m

3 试验设计与方法

3.1 试验系统

本研究采用的激光传感器为德国 SICK 公司生产的 LMS511-20100 PRO 型激光扫描雷达。在试验中激光扫描雷达作为服务器,客户端为一台 Dell E5400 型便携式计算机,服务器与客户端之间通过以太网进行通信。该扫描雷达的扫描范围为 $-5^\circ \sim$

185°,试验设置为 30° ~ 150°,角分辨率设为 0.333°,对应扫描频率为 50 Hz。最大探测距离为 26 m,本试验设定为 10 m。供电电源为 24 V DC 锂电池。

本试验用到的软件名称为立柱类物体几何类定位识别算法对比软件 V1.0^[25],软件在 Window XP 环境下基于 C/C++ 语言开发,使用 MFC 框架。

3.2 补偿角提取试验

本试验探测目标选定为 3 根不同直径的 PVC 管,管径(上述补偿角计算公式中的 d_c 值)通过游标卡尺测得,分别为 90.5、200.5、250.0 mm。将 3 根 PVC 管分别放置于与激光中心不同距离的 10 个位置,距离值分别为 0.6、1.1、1.6、2.1、2.6、3.1、3.6、4.1、4.6、5.1 m。由于激光扫描雷达的中心封装在传感器内部,不易获得,本文设定激光中心为激光扫描雷达顶部中心线距前边缘 66 mm 处,如图 4 所示。每个距离测量 15 次。获得激光点云数据后,首先通过上述 3 类几何类算法(式(1)、(3)、(5))计算得出各距离下 PVC 管直径的测量值,然后分别利用式(2)、(4)求得相应的补偿角,以期用回归分析法建立补偿角动态自确定优化模型。

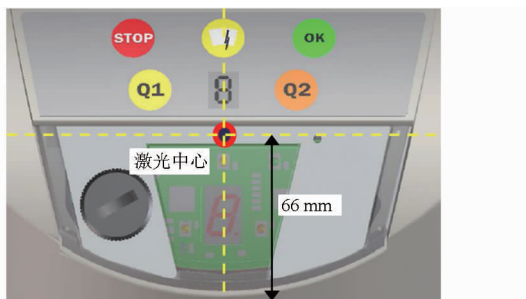


图4 激光中心位置俯视示意图

Fig.4 Planform schematic diagram of the laser center

3.3 补偿角动态自确定优化模型验证试验

验证试验选择 5 株杨树原木为试验对象,5 株原木的截面直径真实值 d_c 通过树径尺量取,分别为 99.8、158.9、191.8、255.2、304.5 mm,用于与优化后的直径测量值进行对比。5 株原木放置于激光扫描仪前不同的 10 个位置,分别位于距激光中心 0.6、1.1、1.6、2.1、2.6、3.1、3.6、4.1、4.6、5.1 m 处,实际距离值用于与优化后的距离测量值进行对比。每个距离下 5 株原木呈弧形均布于激光扫描仪前 30° ~ 150° 范围内,如图 5 所示,其为 A、B、C、D、E 5 株原木距激光中心为 1 m 时的放置方式,原木直径依次为 255.2、191.8、158.9、99.8、304.5 mm。

通过补偿角提取试验建立的补偿角动态自确定优化模型的输入变量分别为未优化前 3 类几何算法获得的树干直径和距离的测量值,输出变量为补偿角优化后计算得到的树干直径和距离。将这些值与

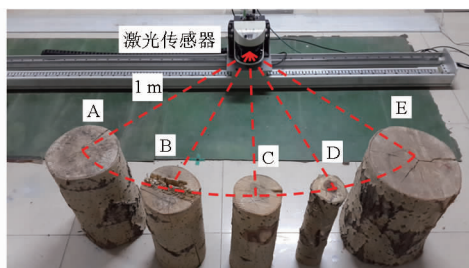


图5 验证试验现场照片

Fig.5 Scene photo of verification experiment

相应的真实值进行对比,分析误差精度。

4 结果分析与讨论

4.1 算法补偿前性能分析

图 6 所示为 3 种算法在不同距离下 15 次测量 3 种 PVC 管直径的标准偏差均值。可以看出双余弦法在各距离下的标准偏差均大于弧长法与切线法,仅在距离较近时稳定性相对较好,距离增大时偏差增大明显,在 3.6 m 时达到最大值 19.1 mm。分析原因是当树干距离增大时,式(5)的分母逐渐趋近于零,一旦产生微小干扰,会导致计算结果产生较大误差波动,稳定性差。在实际运用中,当测量距离超过 2.6 m 时,应避免使用该算法。相比之下,弧长法与切线法稳定性较好,其中弧长法的标准偏差在距离为 4.6 m 时达到最大值 2.9 mm,切线法在 2.1 m 时达到最大值 2.7 mm,2 种算法均可用于建立补偿角优化模型。

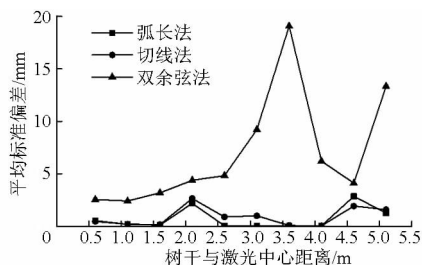


图6 不同距离下 PVC 管径的平均标准偏差

Fig.6 Mean standard deviation of PVC pipe diameters for different distances

图 7 所示为 3 种不同直径的 PVC 管在不同算法不同距离下测量 15 次获得的测量均值的平均相对误差,从图中可以看出 3 种算法的测量相对误差值在不同距离下有一定差别,弧长法与切线法的相对误差随距离的增加呈递增趋势,弧长法的相对误差分别在距离为 0.6 m 与 5.1 m 处取得最小与最大值,最小值为 11.9%,最大值为 25.9%。切线法同样在这 2 处距离取得最小与最大值,最小值为 8.4%,最大值为 24.4%。根据式(5),双余弦算法虽然理论上较其他算法准确性高,但由于其在距离较大时易产生不稳定性,导致计算结果的较大误差,

如距离仅为3.6 m时,相对误差就达到21.7%,仅在较近距离下准确性较高。因此,在后续补偿角动态自确定优化模型和验证试验中,排除双余弦算法,仅对弧长法和切线法进行补偿角优化研究。

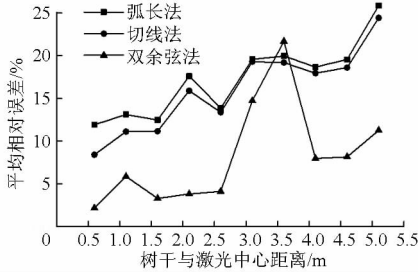


图7 不同距离下PVC管径的平均相对误差

Fig. 7 Mean relative error of PVC pipe diameters for different distances

4.2 补偿角动态自确定优化模型建立

图8与图9分别为弧长法与切线法在不同距离下根据式(2)和(4)测得的管径补偿角随距离变化的散点图,对该散点图作二次函数回归分析,结果如表1所示,其中 $L_k = L_b \times 10^{-1}$ 。在0~5.5 m的距离范围内,2种算法的二次函数拟合度都较高,均为 $R^2 > 0.85$ 。以半径为自变量,补偿角为因变量进行单因素方差分析,得到 F 值为2.832,小于 F 临界值4.256,同时 p 值为0.957,大于显著性水平0.05,说明半径对拟合曲线影响不大。这是由于不同树干间同一高度处的截面直径变化不具有连续性,属于离散变量,同时激光传感器的位置也在不断变化中,因而同一距离下同簇数据点中,首末两点在树干上的着点位置是随机产生的,具有均衡性。因此,采用几何类算法测量树干直径时,同一距离下直径的变化对补偿角的影响可以忽略。但在相同的外部测量环境下,距离是由近及远的连续变量,当激光传感器工作时,由于激光光束的发散性,同一树干在不同距

离处的测量值会遵循一定规律,补偿角也会与距离呈现一定关系。因此,对于同一种算法,可用一个补偿角与距离的关系式来最终表达3种不同直径的拟合函数。方法是从3条曲线上分别取不同的数据点作二次拟合,拟合结果如下:

弧长法

$$\alpha = 7.49L_k^2 - 5.59L_k + 1.23 \quad (9)$$

切线法

$$\alpha = 2.29L_k^2 - 2.17L_k + 0.61 \quad (10)$$

将式(9)和(10)分别作为弧长法和切线法的补偿角动态自确定优化模型,进行验证试验,以评价其优化效果。

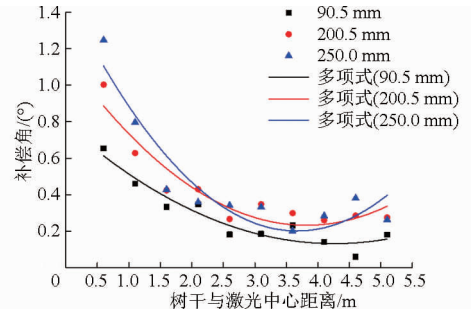


图8 弧长法补偿角拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of compensation angle for arc length method

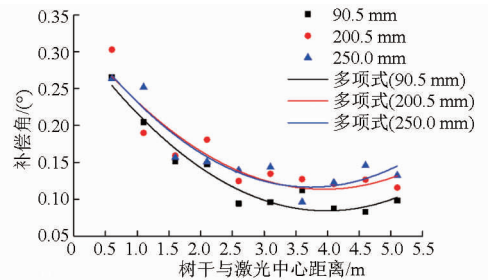


图9 切线法补偿角拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of compensation angle for tangent method

表1 补偿角随距离变化的二次拟合函数

Tab. 1 Quadratic fitting functions of the changing for compensation angle with distance

管径/mm	弧长法		切线法	
	多项式	R^2	多项式	R^2
90.5	$\alpha = 3.59L_k^2 - 3.06L_k + 0.79$	0.91	$\alpha = 2.97L_k^2 - 2.37L_k + 0.64$	0.95
200.5	$\alpha = 6.33L_k^2 - 4.83L_k + 1.16$	0.89	$\alpha = 2.74L_k^2 - 2.16L_k + 0.65$	0.86
250.0	$\alpha = 9.61L_k^2 - 7.05L_k + 1.50$	0.89	$\alpha = 3.09L_k^2 - 2.31L_k + 0.66$	0.88

4.3 优化模型验证试验结果分析

在0~5.5 m范围内不同距离下分别获得补偿前后的数据。对比发现,未引入补偿角之前,弧长法和切线法估算的原木直径测量值明显小于真实值,经由优化模型(式(9)、(10))补偿后所得数值接近真实值水平,准确性明显优于未补偿前。

图10为原木半径补偿前后的平均绝对误差,从

图中可以看出,补偿前后平均绝对误差均随距离增加呈现递增趋势。经优化模型补偿后,平均绝对误差明显减小。弧长法补偿前(CRB)平均绝对误差范围为8.4~20.3 mm,均值为13.3 mm,最小值8.4 mm出现在1.1 m时;切线法补偿前(TRB)绝对误差范围为5.4~20.5 mm,均值为4.8 mm,在0.6 m时出现最小值5.4 mm;两算法均在4.6 m时出现最大值,

分别为 20.3 mm 和 20.5 mm, 主要原因为树干距离较远时, 完全投射到树干上的光斑数量不稳定, 导致产生较大误差。弧长法补偿后 (CRA) 绝对误差减小到 1.4 ~ 10.6 mm, 均值为 4.8 mm, 切线法补偿后 (TRA) 减小到 1.9 ~ 5.9 mm, 均值为 3.8 mm, 两算法均在 2.6 m 时出现最小值, 分别为 1.4 mm 和 1.9 mm, 最大值在 5.1 m 时出现, 分别为 10.6 mm 和 5.9 mm。算法补偿后所得半径的准确性得到较大提高。经优化后, 弧长法半径测量精度由原来的 15.9% 提高到 5.3%, 切线法由 14.8% 提高到 4.1%。

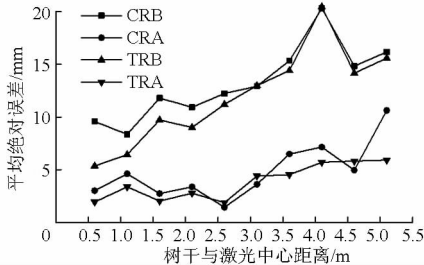


图 10 半径测量值补偿前后平均绝对误差

Fig. 10 Mean absolute error of measured value for radius before and after algorithm compensating

图 11 为距离测量值补偿前后平均绝对误差。从图中可以得出弧长法补偿前后的数据波动性较大, 切线法的数据变化则较为平缓, 且切线法补偿前后的平均绝对误差较小。弧长法补偿前 (CLB) 平均绝对误差范围为 42.3 ~ 73.0 mm, 均值为 53.1 mm, 最大值、最小值分别出现在距离 3.1 m、1.1 m 处, 经过优化, 弧长法补偿后 (CLA) 平均绝对误差控制在 24.7 ~ 66.0 mm, 均值为 40.0 mm。切线法补偿前 (TLB) 平均绝对误差范围为 12.3 ~ 27.3 mm, 均值为 21.8 mm, 最大值与最小值分别位于距离 4.1 m、4.6 m 处, 经过优化, 切线法补偿后 (TLA) 平均绝对误差范围控制在 8.8 ~ 15.9 mm, 均值为 11.3 mm。

优化后的弧长法与切线法对距离的测量精度均提高较小, 这是由于距离基数较大, 且在式 (8) 中 ρ_{\min} 测量值较为精确。切线法补偿前后的距离测量值相对弧长法有明显优势。

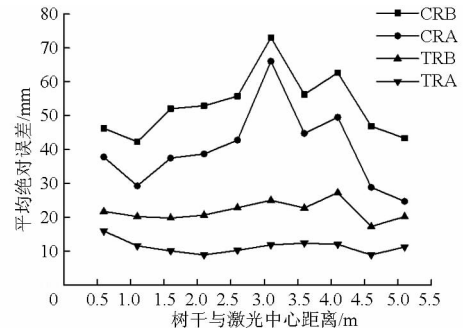


图 11 距离测量值补偿前后平均绝对误差

Fig. 11 Mean absolute error of measured value for distances before and after algorithm compensating

5 结束语

提出了补偿角动态确定方案, 并对 3 种几何类算法, 包括弧长法、切线法和双余弦算法进行了补偿角提取及验证试验分析。其中, 双余弦算法在距离大于 2.6 m 时表现不稳定, 故在实际测量中排除; 得出弧长法、切线法的补偿角动态自确定优化模型; 验证试验结果表明, 引入补偿角后, 弧长法估算半径的平均绝对误差为 4.8 mm, 切线法为 3.8 mm, 测量精度分别提高了 10.6 和 10.7 个百分点; 引入补偿角后, 弧长法和切线法的距离测量绝对误差可分别控制在 66.0 mm 和 15.9 mm 以内; 弧长法和切线法相比, 切线法的稳定性及测量精度较好。引入补偿角后的弧长法和切线法对立木胸径和距离测量精度得到改善, 适用于林业测绘、林木施药、林地机器人导航等近距离测量立木相关参数的场合。

参 考 文 献

- SPRIGGS R A, VANDERWEL M C, JONES T A, et al. A simple area-based model for predicting airborne LiDAR first returns from stem diameter distributions: an example study in an uneven-aged, mixed temperate forest[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(10): 1338 - 1350.
- 王佳, 杨慧乔, 冯仲科. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 235 - 240. WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3-d laser scanning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 235 - 240. (in Chinese)
- 郑加柱, 石杏喜, 陈红华. 林业机器人组合导航数据处理方法[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(2): 128 - 132. ZHENG Jiazhu, SHI Xingxi, CHEN Honghua. Processing method of integrated navigation data for forestry robot[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2014, 38(2): 128 - 132. (in Chinese)
- ZHENG Y L, LIU J H, WANG D, et al. Laser scanning measurements on trees for logging harvesting operations[J]. Sensors, 2012, 12(7): 9273 - 9285.
- KANG F, LI W B, PIERCE F J, et al. Investigation and improvement of targeted barrier application for cutworm control in vineyards[J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(2): 381 - 389.
- KANG F, PIERCE F J, WALSH D B, et al. An automated trailer sprayer system for targeted control of cutworm in vineyards[J].

- Transactions of the ASABE, 2012, 55(5): 2007 - 2014.
- 7 孟宪宇. 测树学[M]. 3版. 北京:中国林业出版社,2013:10 - 17.
 - 8 翟长远,赵春江,王秀,等. 树型喷洒靶标外形轮廓探测方法[J]. 农业工程学报,2010, 26(12):173 - 177.
ZHAI Changyuan, ZHAO Chunjiang, WANG Xiu, et al. Probing method of tree spray target profile[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 173 - 177. (in Chinese)
 - 9 TIAN L. Sensor-based precision chemical application systems[C] // Proceedings of the 2002 World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2002: 279 - 289.
 - 10 耿长兴,张俊雄,曹峥勇,等. 基于色度和纹理的黄瓜霜霉病识别与特征提取[J]. 农业机械学报,2011,42(3):170 - 174.
GENG Changxing, ZHANG Junxiong, CAO Zhengyong, et al. Recognition and features extraction of cucumber downy mildew based on color and texture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 170 - 174. (in Chinese)
 - 11 刘沛,陈军. 基于激光扫描的果树树形重构系统研究[J]. 农机化研究,2011(5):199 - 206.
LIU Pei, CHEN Jun. Fruit tree-based reconstruction of laser scanning system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(5): 199 - 206. (in Chinese)
 - 12 钱晓明,张浩,王晓勇,等. 基于激光扫描匹配的移动机器人相对定位技术研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):14 - 21.
QIAN Xiaoming, ZHANG Hao, WANG Xiaoyong, et al. Relative localization technology for mobile robot based on laser scan matching[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 14 - 21. (in Chinese)
 - 13 黄晓东,冯仲科. 基于数码相机的样木胸径获取方法[J]. 农业机械学报,2015,46(9):266 - 272.
HUANG Xiaodong, FENG Zhongke. Obtainment of sample tree's DBH based on digital camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 266 - 272. (in Chinese)
 - 14 王建利,李婷,王典,等. 基于光学三角形法与图像处理的立木胸径测量方法[J]. 农业机械学报,2013,44(7):241 - 245.
WANG Jianli, LI Ting, WANG Dian, et al. Measuring algorithm for tree's diameter at breast height based on optical triangular method and image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 241 - 245. (in Chinese)
 - 15 韦雪花,王卫国,郑君,等. 基于三维激光扫描点云的树冠体积计算方法[J]. 农业机械学报,2013,44(7):235 - 240.
WEI Xuehua, WANG Yongguo, ZHENG Jun, et al. Tree crown volume calculation based on 3-d laser scanning point clouds data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 235 - 240. (in Chinese)
 - 16 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 328 - 334. (in Chinese)
 - 17 UMBACH D, JONES K N. A few methods for fitting circles to data[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1881 - 1885.
 - 18 ZHENG Y L, LIU J H, ZHANG S, et al. Extraction of trees stem diameters at breast height by terrestrial laser sensor for selective cutting[J]. Sensors & Transducers, 2014, 164(2): 65 - 70.
 - 19 RINGDAHL O, HOHNLOSER P, HELLSTROM T, et al. Enhanced algorithms for estimating tree trunk diameter using 2D laser scanner[J]. Remote Sensing, 2013, 5(10): 4839 - 4856.
 - 20 王建,姚振强,尹明德,等. 用于距离图像 2D 扫描线的极速边缘检测器[J]. 电子学报,2010,38(7):1711 - 1715.
WANG Jian, YAO Zhenqiang, YIN Mingde, et al. A rapid edge detector for 2D scan line in range image[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(7): 1711 - 1715. (in Chinese)
 - 21 孙长库,何明霞,王鹏,等. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社,2008:7 - 20.
 - 22 王典,刘晋浩,王建利. 基于系统聚类的林地内采育目标识别与分类[J]. 农业工程学报,2011,27(12):173 - 177.
WANG Dian, LIU Jinhao, WANG Jianli. Identification and classification of scanned target in forest based on hierarchical cluster [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 173 - 177. (in Chinese)
 - 23 SELKÄINAHO J. Adaptive autonomous navigation of mobile robots in unknown environments[D]. Espoo: Helsinki University of Technology, 2002.
 - 24 BAILEY T, NEBOT E. Localisation in large-scale environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2001, 37(4): 261 - 281.
 - 25 北京林业大学. 立柱类物体几何类定位识别算法对比软件 V1.0;中国, 2015SR071647[CP/CD]. 2015 - 04 - 29[2016 - 02 - 03].