

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.003

# 基于超宽带的温室农用车辆定位信息采集与优化

林相泽 王祥 林彩鑫 耿晶 薛金林 郑恩来

(南京农业大学工学院, 南京 210031)

**摘要:** 针对温室环境下农用车辆定位精度低的问题,开发了适用于温室环境的超宽带技术(Ultra wide band, UWB)室内定位试验平台。首先,以 Ubisense 射频芯片作为硬件基础,设计了定位平台标签和基站,并采用到达时间差(Time difference of arrival, TDOA)定位测距方法获得定位结果;然后,分别利用 K-means 聚类与截段处理的方法进行静态、动态定位信息优化计算,以减小脉冲信号传播特性和单一测距方式等导致的测量误差,获得准确的定位信息,实现温室内农用车辆的精确作业;最后,在温室环境下分别进行了静态定位试验与动态定位试验。试验结果表明,优化后的静态定位精度平均值为 0.063 4 m,改进后的动态定位精度精确到 8 cm 的概率是原先 TDOA 算法的 3.7 倍。所搭建的定位试验平台满足温室农用车辆定位的实际应用要求,可为温室环境下农用车辆的定位和导航提供参考。

**关键词:** 温室;精确定位;UWB;K-means;优化

**中图分类号:** S24; TP2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0023-07

## Location Information Collection and Optimization for Agricultural Vehicle Based on UWB

LIN Xiangze WANG Xiang LIN Caixin GENG Jing XUE Jinlin ZHENG Enlai

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

**Abstract:** An ultra wide band indoor positioning platform was developed to improve the positioning accuracy of agricultural vehicle in a greenhouse environment. Firstly, based on Ubisense radio frequency chip, a positioning platform tag and a base station were designed. The position data were obtained by location ranging method named time difference of arrival (TDOA). Then, in order to get accurate positioning information and meet the needs of precise positioning for agricultural vehicle in greenhouse, K-means clustering and segmentation processing method were applied for the optimization calculation of static and dynamic positioning data respectively. In this procedure, the measurement errors, which were caused by propagation characteristics of pulse signal and the single ranging method, were decreased. Finally, static and dynamic positioning tests were conducted under the greenhouse environment respectively. The experimental results showed that the optimized static positioning accuracy was 0.063 4 m. Meanwhile, the probability of the dynamic positioning accuracy, which was no more than 8 cm gotten by virtue of the dynamic precision positioning algorithm can be increased by 3.7 times than that of the original Ubisense positioning platform. Hence, the platform built can meet the practical application requirements. The research provided a reference for the positioning, navigation and intelligent refinement operation of agricultural vehicle in the greenhouse.

**Key words:** greenhouse; precise positioning; UWB; K-means; optimization

## 0 引言

全球卫星定位系统(Global positioning system, GPS)的卫星信号经过室内层层障碍之后衰减严重,

不能应用于室内定位<sup>[1-2]</sup>。随着温室大棚的逐年增加,温室内农用车辆机械化、智能化需求增长迅速,室内定位技术成为满足上述需求的关键<sup>[3-6]</sup>,温室精细农业的发展也亟需一种无线定位应用系

收稿日期:2018-04-22 修回日期:2018-06-21

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(61773216)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20171386)和中国博士后科学基金项目(2016M591855)

**作者简介:** 林相泽(1977—),男,教授,博士,主要从事控制理论与农业工程的结合研究,E-mail: xzlin@njau.edu.cn

统<sup>[7-8]</sup>。

相比传统定位技术,室内定位技术起步较晚。自美国联邦通讯委员会(Federal communications commission, FCC)在1996年制定了E-911定位标准以来,室内定位技术得到了快速发展,国内外学者相继提出了多领域的室内无线定位应用,如无人机对农田的实时监测、智能可视化作业<sup>[9-11]</sup>,移动机器人的自主导航、路径规划<sup>[12-15]</sup>,工业中的过程控制、工业监测等<sup>[16]</sup>。随着温室精细农业的迅猛发展,众多学者开始了温室内的定位研究。文献<sup>[17-19]</sup>在温室中利用无线RSSI测距技术,使用加权质心算法获得定位测量结果后,利用卡尔曼滤波算法进行定位信息最优化计算;WIDODO等<sup>[20]</sup>在温室中设计了基于声波的定位系统自校准方法;LUO等<sup>[21]</sup>利用RSSI测距技术进行了温室内的定位研究以及王俊等<sup>[22]</sup>利用BP算法进行温室内的定位研究。目前,由于温室复杂的环境,温室内定位技术的研究主要针对静态物体的坐标测量,且精度在几米之内。在实际测量过程中,测量数据主要受3方面的影响:试验设备的制造误差、安装误差以及室内环境内部对信号的遮挡等影响;传感器偏差、灵敏度误差、噪声等其他随机误差等影响;信号传播特性和测距方式的影响<sup>[23-25]</sup>。因此,提高定位精度必须提高抗干扰能力,解决信号衰减、多径效应、视距传播和信号振荡校准等传统问题。除了温室内无线定位技术的精度问题,能耗和成本是目前无线定位技术的一个重要考虑因素。目前大部分的定位技术都需要在环境中安装辅助节点,用于测距位置信息,为提高精度,就必须安装大量的辅助节点,但增大了系统建设的成本和能耗。在测量误差和能源消耗不可避免的情况下,减小测量误差和控制能耗显得尤为重要。

考虑上述原因,脉冲超宽带(Impulse radio-ultra wide band, UWB)技术因其较强的穿透力、较高的传输速率和较小的功耗而引起广泛的重视<sup>[26]</sup>。通过发送纳秒级或者纳秒级以下的超窄脉冲来传输数据,可以获得吉赫级的数据带宽,具有很强的时间分辨率,可获得厘米级测距精度。UWB定位技术因其精度高、能耗低、设计简单、成本低、网络节点布置方便,对场地环境无苛刻要求,适合于温室等室内环境中使用。目前,UWB测距技术主要包括:接收信号强度(Received signal strength indication, RSSI)<sup>[27-28]</sup>、信号到达时间(Time of arrival, TOA)、信号到达时间差(Time difference of arrival, TDOA)和信号到达角度(Angel of arrival, AOA)。其中TDOA有以下优点<sup>[29]</sup>:不存在相位模糊的问题,因此测向基线可以不受限制,系统复杂度低和系统

定位的精度较高。

基于UWB技术的上述特点,本文选择UWB技术作为无线载波通信技术,构建基于TDOA测距技术的超宽带室内定位试验平台,并针对单一测距技术以及环境因素等各种影响带来的测量误差,分别采用K-means聚类与截段处理的方法处理静态、动态精确定位问题,实现被测目标位置信息的优化求解。最后,利用相应的硬件设备,在实际温室生产环境中进行试验验证。

## 1 定位试验平台设计

### 1.1 硬件设计

采用Ubisense公司生产的射频芯片作为系统硬件基础单元。该芯片符合IEEE802.15.4-2011超宽带标准。超宽带为6~8 GHz、传输通道为2.4 GHz、刷新率为0.01~20 Hz。标签刷新率根据标签运动速度和状态从0.0045~40 Hz自动分配,每个传感器均支持持续达160 Hz的刷新速率,能够以6.25 ms的时间间隔对标签进行定位同时采用常规双向2.4 GHz信号进行控制与测算信息传输。

在此硬件的基础上,开发了UWB定位试验平台,如图1所示。基站通过与标签之间的信号传输,测得UWB信号在标签与基站的传输时间,计算机读取标签接收的时间数据之后利用TDOA定位算法,以确定标签的位置信息。

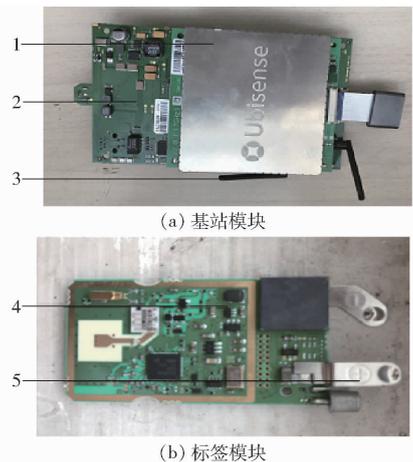


图1 试验系统模块图

Fig. 1 Test system module diagrams

1. 基站芯片核心板 2. 基站芯片底板 3. 基站接收天线 4. 标签芯片 5. 标签电池

### 1.2 TDOA测距算法

#### 1.2.1 定位坐标的获取

TDOA定位问题中,通过测量2个基站到达待定位物体的传播时间可以得到TOA测量值,进而可以得到TDOA的测量值。通过两个及两个以上的TDOA测量值可以得到待定位物体的二维位置坐

标。假定待定位物体的位置坐标为  $(x, y)$ , 距离待定位物体最近的基站, 即服务基站  $BS_1$  的位置坐标为  $(x_1, y_1)$ , 其他参与定位的基站位置坐标为  $(x_i, y_i)$  ( $i=2, 3, \dots, M$ ;  $M$  为参与定位的基站数)。由 TOA 的测量值可以得到

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (1)$$

其中式(1)左右两边平方可得

$$R_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = x^2 + y^2 - 2x_i x - 2y_i y + K_i \quad (2)$$

其中  $K_i = x_i^2 + y_i^2$

式中  $R_i$ ——基站  $BS_i$  与待定位物体之间的传播距离  
待定位物体到基站  $BS_1$  与基站  $BS_i$  的传播距离差  $R_{i,1}$  为

$$R_{i,1} = Ct_{i,1} = R_i - R_1 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (3)$$

其中传播速度  $C$  为  $3 \times 10^8$  m/s,  $t_{i,1}$  为待定位物体到  $BS_i$  与  $BS_1$  的传播时间差值, 由于

$$R_i = R_1 + R_{i,1} \quad (4)$$

所以联立式(1), 可以得到

$$R_{i,1}^2 + 2R_{i,1}R_1 = K_i - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y - K_1 \quad (5)$$

其中  $x_{i,1} = x_i - x_1$   $y_{i,1} = y_i - y_1$

可以把  $x, y, R_1$  作为未知数, 此时式(2)为关于这 3 个变量的三元一次方程, 联立方程组可以求得待定位物体的位置坐标。

### 1.2.2 TDOA 测距原理

到达时间差 TDOA 是根据多个 TDOA 数据对应的多条双曲线的交点来估计目标发信机的位置。由于通过 2 个监测站的 TDOA 计算, 只能得到一条目标信号源可能位置的双曲线, 准确定位目标信号源位置, 至少在此设定 3 个基站和 1 个标签组成定位系统。如图 2 假设标签  $MS$  的位置为  $(x, y)$ , 基站的位置分别为  $BS_1(x_1, y_1)$ 、 $BS_2(x_2, y_2)$ 、 $BS_3(x_3, y_3)$ , 利用 TDOA 测距方法测量到的标签与基站的距离分别是  $ct_1, ct_2, ct_3$ , 其中  $t_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为对应信号到达时间。标签坐标为

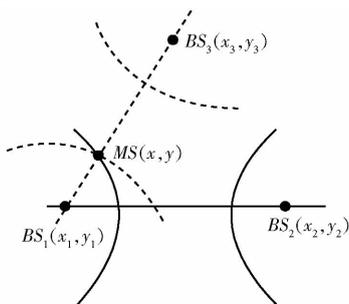


图 2 TDOA 测距双曲线

Fig. 2 TDOA ranging hyperbola

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (ct_1)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (ct_2)^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = (ct_3)^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} = ct_1 - ct_2 \\ \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = ct_1 - ct_3 \\ \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} - \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2} = ct_2 - ct_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $c$ ——光速

### 1.2.3 TDOA 误差分析

虽然, 超宽带脉冲信号具有高达纳秒级别的时间分辨能力, 结合基于 TDOA 的测距算法在理论上可获得厘米级别的定位精度<sup>[30]</sup>, 但是, 在复杂室内环境下, UWB 信号传播过程中的多径和非视距 (Non-line-of-sight, NLOS) 现象会影响 TDOA 测距误差, 是造成定位精度下降的主要原因<sup>[31-33]</sup>。造成多径误差的原因是由于接收机不能区分直直径和多径信号, 使得相干 TDOA 估计中相关波形峰值偏移, 导致距离估计误差。NLOS 误差则是由于收发机之间直达路径 DP 被障碍物阻挡, 仅有反射或透射信号到达接收机, 对非直达径的 TDOA 估计导致恒正的距离偏差。由于在测量过程中的误差影响不可避免, 因此, 定位信息的优化计算显得尤为重要。

## 2 定位信息优化

### 2.1 静态精确定位算法

#### 2.1.1 算法设计

当静态测量坐标值时, UWB 定位是利用纳秒至微秒级的非正弦波窄脉冲不断发射脉冲信号传输数据的。因此, 由于测量时误差来源的干扰, 对同一位置, 在一段时间内, 测得的坐标数据会以一定的测量误差分布在真实点的周围。利用算法使得处理后的点接近真实点, 便能提高定位的精度。由于温室环境的操作往往需要进行多个点的同时定位, 聚类方法可以解决求已知分类个数的中心的问题, 因此本文采用 K-means 聚类算法处理静态定位问题。

#### 2.1.2 K-means 工作原理及流程

K-means 属于无监督学习, 样本所属的类别是未知的, 根据特征将样本分类<sup>[34]</sup>。K-means 核心思想为最小化所有样本到所属类别中心的欧氏距离和, 采用迭代的方式实现收敛<sup>[35]</sup>。

### (1) 工作原理

输入: 聚类个数  $k$ , 以及包含  $n$  个数据对象的数据数据库。输出: 满足方差最小标准的  $k$  个聚类。

### (2) 算法流程<sup>[36]</sup>

① 给定训练样本  $\{x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(m)}\}$ ,  $x^{(i)} \in \mathbf{R}^n$ , 随机选取  $k$  个训练值分别为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k \in \mathbf{R}^n$ 。

② 计算每一个样本  $i$  的所属类别

$$c^{(i)} = \arg \min_j \|x^{(i)} - \mu_j\|^2 \quad (8)$$

式中  $c^{(i)}$ ——样本到类别中心欧氏距离最小类别

③ 更新每一类的中心  $\mu_j$

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^m x^{(i)} \mid_{c^{(i)}=j}}{\sum_{i=1}^m 1 \mid_{c^{(i)}=j}} = \frac{Q}{q} \quad (9)$$

式中  $Q$ ——类别  $j$  中所有样本特征和

$q$ ——类别  $j$  中的样本个数

④ 不断重复步骤②、③, 直到畸变函数  $J(c, \mu)$  收敛

$$J(c, \mu) = \sum_{i=1}^m \|x^{(i)} - \mu_{c^{(i)}}\|^2 \quad (10)$$

式中  $J(c, \mu)$ ——所有样本到其类别中心的欧氏距离平方和

## 2.2 动态精确定位算法

### 2.2.1 算法设计

标签运动过程中, 在某一特定时刻  $t$ , 设备测得的数据是唯一的, 所以不能使用聚类算法来实现动态精确定位。当设备在一个时刻  $t$  测出一个数据  $(x, y)$  时, 由于 UWB 设备测数据的随机性和无规律性, 很难找出一个固定的算法进行改进。因此, 本文使用截段处理的方法, 利用转向角随时间变化的特性来实现动态的精确定位。

### 2.2.2 算法工作原理及流程

以农用车辆的圆运动为例, 标签从起点到终点移动了一段距离, 截取其中一段极短时间间隔  $[t_1, t_2]$ , 如图 3 所示,  $t_1$  为起始时刻;  $t_2$  为测量时刻;  $\theta$  为  $t_1$  时刻转向角;  $y = k_1x + b$  为  $t_1$  时刻坐标与转向角构成的直线;  $m$  为设备测取点;  $n$  为动态算法处理的点。

由于选取时间短, 可将标签从  $t_1$  到  $t_2$  时刻运动的路线看作一条直线, 如图 3a 放大部分所示。具体算法如图 3b 所示, 如果  $t_1$  时刻坐标  $(x, y)$  已知, 再测得  $t_1$  时刻的转向角  $\theta$ , 即可求得直线  $y = k_1x + b$ 。这时, 用 UWB 定位设备在  $t_2$  时刻测出一个数据点  $m$  为  $(x_0, y_0)$ , 则点  $m$  到直线  $y = k_1x + b$  的距离为

$$d = \frac{|k_1x - y + b|}{\sqrt{k_1^2 + 1}} \quad (11)$$

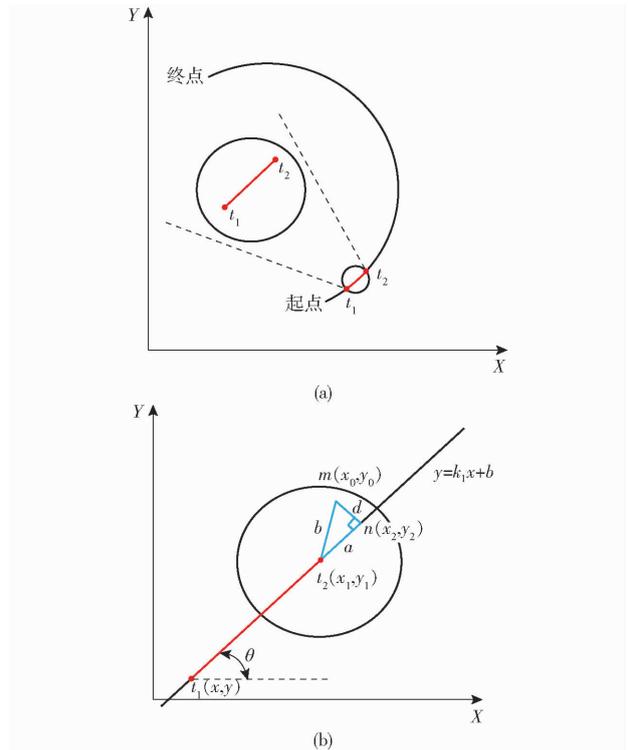


图 3 农用车辆作业仿真路线图

Fig. 3 Diagrams of agricultural vehicle operation simulation routes

根据  $m$  点与直线  $y = k_1x + b$  的位置关系, 求得点  $n(x_2, y_2)$ 。分如下两种情况:

情况 1: 点  $m$  在直线  $y = k_1x + b$  下, 则

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + d \sin \theta \\ y_2 = y_0 - d \cos \theta \end{cases} \quad (12)$$

情况 2: 点  $m$  在直线  $y = k_1x + b$  上, 则

$$\begin{cases} x_2 = x_0 - d \sin \theta \\ y_2 = y_0 + d \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

由几何定理可知, 如图 3b 所示, 点  $n$  即为改进后的坐标,  $(x_1, y_1)$  为  $t_2$  时刻标签的实际坐标, 易知改进后的坐标优于 TDOA 测距方式测得的坐标值。

## 3 试验验证

### 3.1 试验设备

试验在江苏省农业科学院番茄玻璃温室进行, 试验田垄长 10.2 m, 垄宽 0.6 m, 番茄株高约 1.8 m, 试验条件为无自然风, 温度约为 31℃, 湿度为 58%。首先, 根据观察试验实际场地并结合 TDOA 测距算法布置基站节点。本文选定 3 个基站, 节点排布如图 4 所示, 分别记作  $BS_1(x_1, y_1)$ 、 $BS_2(x_2, y_2)$ 、 $BS_3(x_3, y_3)$ , 1 个标签记作  $MS$ , 进行固定坐标系下的定位试验, 测取标签的位置信息  $(x, y)$ ; 其次, 根据图 4 所示的基站节点, 将基站安装在温室大棚相应节点位置的铁架上(基站高为 2.4 m), 完成室内定位试验平台的搭建; 最后, 将标签固定在南

京农业大学研制的温室自行走施药机器人上,如图 5 所示。使用计算机分别读取标签到各个基站的时间信息并利用 TDOA 算法进行农用车辆的定位。具体步骤为:建立坐标系,选取坐标原点;对基站进行供电;进行基站之间的时间同步;将标签固定在农用车辆上;利用计算机读取标签到基站的时间信息;在计算机上使用 TDOA 算法进行农用车辆的定位。

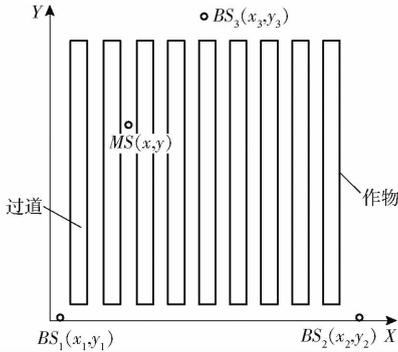


图 4 定位试验节点排布示意图  
Fig. 4 Sketch of location test node



图 5 试验实景图  
Fig. 5 Experimental scene diagram

### 3.2 试验结果及分析

#### 3.2.1 静态定位试验

试验根据 TDOA 测距算法,利用车辆在温室中的不同的静态位置分别采集 3 min, 500 组数据,测量值与实际值的距离差即为误差距离。图 6 分别给出了在 5 次不同静态位置进行试验的误差累积分布函数,即在不同静态点下测量数据的误差小于或等于某个数值的概率。由图 6 可知,当用 TDOA 测距算法测量车辆位置时,误差距离都在 120 mm 以外,有些甚至达到了 260 mm。

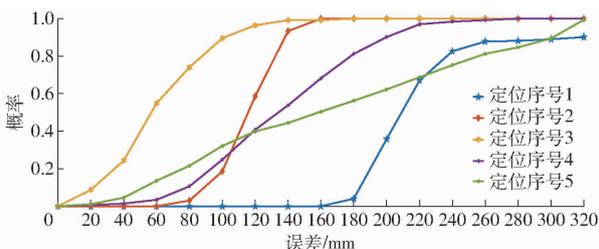


图 6 不同测量距离的误差累积分布函数  
Fig. 6 Cumulative distribution function of error of different measurement distances

从表 1 可以看出,将 K-means 算法应用到静态点的优化时,使用 K-means 聚类算法处理后的最大误差为 0.100 3 m,最小误差为 0.022 1 m,平均误差为 0.063 4 m,验证了该聚类算法对优化静态定位的有效性。通过上述分析可知,使用 K-means 聚类可以使得设备测取的数据接近真实点,以达到提高定位精度的效果。

表 1 K-means 算法优化下 TDOA 算法的测量值与实际值对比

Tab. 1 Comparison of measured and actual values of TDOA algorithm with K-means optimization m

基站坐标	真实坐标	聚类坐标	误差距离
BS <sub>1</sub> (0.1, 0.1)	(5.360, 3.100)	(5.359, 3.188)	0.088 0
	(10.050, 2.590)	(10.090, 2.648)	0.070 4
	(13.760, 6.820)	(13.738, 6.818)	0.022 1
	(7.930, 6.490)	(7.921, 6.439)	0.051 7
	(6.610, 1.420)	(6.650, 1.402)	0.043 8
BS <sub>2</sub> (25, 0)	(8.670, 4.540)	(8.762, 4.500)	0.100 3
	(14.240, 6.980)	(14.256, 7.075)	0.096 3
BS <sub>3</sub> (12, 10)	(7.230, 7.960)	(7.254, 7.985)	0.034 6

由此可见,当用 TDOA 测距算法测量标签位置信息时,验证了 K-means 聚类算法对优化静态定位信息的有效性。通过上述分析可知,使用 K-means 聚类可以使得设备测取的数据接近真实点,以达到提高定位精度的效果。

#### 3.2.2 动态定位试验

试验采用了 TDOA 算法作为测距方法,并且在图 4 所示的基站节点的排布方式基础上,进行动态定位试验。在温室中分别选择其中 1 条或多条货道,从起点开始,分别以 0.1、0.2、0.3 m/s 的速度匀速行进,图 7 显示的是沿着其中一条货道行驶的路径,同时采集相应的数据。将采集的数据和实际行走轨迹进行比较,其中 1 次货道的行走测量路径信息如图 8 所示。

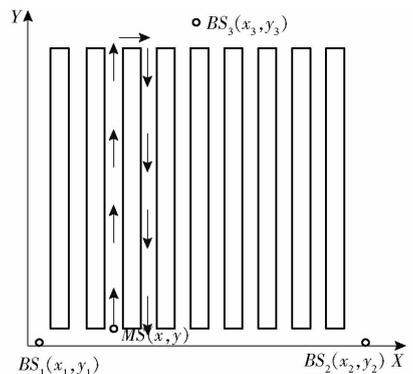


图 7 系统定位试验路线图

Fig. 7 System positioning test route

通过表 2 ~ 4 可知,在车辆运动过程中,利用

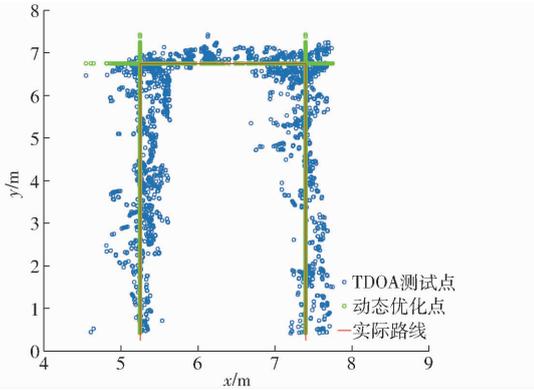


图8 动态试验结果

Fig. 8 Dynamic test result

表2 动态优化对比(0.1 m/s)

Tab. 2 Dynamic optimization contrast(0.1 m/s)

货道数量	误差/ cm	TDOA 测量个数/ 占比/%	动态优化改进 个数/占比/%
1	0~8	15/3.061	111/22.653
	8~15	100/20.408	165/33.673
	>15	375/76.530	214/43.673
2	0~8	31/6.200	149/29.800
	8~15	285/57.000	208/41.600
	>15	184/36.800	143/28.600
3	0~8	58/11.600	169/33.800
	8~15	157/31.400	278/55.600
	>15	285/57.000	53/10.600
4	0~8	47/9.958	177/37.500
	8~15	152/32.203	214/45.339
	>15	273/57.839	81/17.161

TDOA 测距方法测量的点难以达到 8 cm 以内的精度,大部分的误差距离都在 15 cm 以上。通过动态精确算法改进后达到 8 cm 精度的平均概率为 31.348%,优于设备本身的平均概率 8.34%。该动态改进算法使设备原有概率提升了 3.7 倍以上,验证了算法优化的有效性。

## 4 结论

(1)利用 TDOA 测距技术,根据标签与基站的信号接收时间,进行温室环境下标签位置的测量。再分别利用 K-means 聚类与截段处理的方法进行静态、动态定位信息优化计算,以消除脉冲信号传播特性和单一测距方法导致的测量误差,获得准确的定位信息,为温室农用车辆精确作业提供了技术支撑。

表3 动态优化对比(0.2 m/s)

Tab. 3 Dynamic optimization contrast(0.2 m/s)

货道数量	误差/ cm	TDOA 测量个数/ 占比/%	动态优化改进 个数/占比/%
1	0~8	51/11.159	143/31.291
	8~15	159/34.792	184/40.263
	>15	247/54.048	130/28.446
2	0~8	38/7.787	151/30.943
	8~15	142/29.098	99/20.287
	>15	308/63.114	238/48.770
3	0~8	39/8.125	190/39.583
	8~15	226/47.083	128/26.667
	>15	215/44.791	162/33.750
4	0~8	21/4.55	54/11.69
	8~15	76/16.45	56/12.12
	>15	365/79.00	352/76.19

表4 动态优化对比(0.3 m/s)

Tab. 4 Dynamic optimization contrast(0.3 m/s)

货道数量	误差/cm	TDOA 测量个数/ 占比/%	动态优化改进 个数/占比/%
1	0~8	40/9.756	163/39.760
	8~15	82/20.000	91/22.195
	>15	288/70.243	156/38.048
2	0~8	21/4.55	54/11.69
	8~15	76/16.45	56/12.12
	>15	365/79.00	352/76.19
3	0~8	85/12.449	158/35.510
	8~15	124/33.673	97/51.163
	>15	149/53.878	103/6.327
4	0~8	39/10.890	186/51.960
	8~15	184/51.397	92/25.700
	>15	135/37.710	80/22.346

(2)利用射频芯片 Ubisense 作为脉冲超宽带技术的硬件基础搭建定位试验平台,并在温室环境下进行静态以及动态定位试验。将 TDOA 算法得出的定位信息与优化后的定位信息进行对比得出比较结果。

(3)试验结果表明,在温室环境下仅仅利用 TDOA 测距算法的定位精度并不理想,利用动静态优化算法可以获得较高的定位精度。静态定位精度平均值为 0.063 4 m,动态定位精度在 8 cm 的概率提升至原来的 3.7 倍,可以为温室环境下农用车辆的精细作业提供定位基础。

## 参 考 文 献

- 1 ALKAN R M, SAKA M H, OZULU İ M, et al. Kinematic precise point positioning using GPS and GLONASS measurements in marine environments[J]. Measurement, 2017, 109: 36-43.
- 2 KARNIK J, STREIT J. Summary of available indoor location techniques[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(25): 311-317.
- 3 PORTO S M C, ARCIDIACONO C, GIUMMARRA A, et al. Localisation and identification performances of a real-time location

- system based on ultra wide band technology for monitoring and tracking dairy cow behaviour in a semi-open free-stall barn[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2014, 108(C): 221 – 229.
- 4 刘进一, 杜岳峰, 张硕刘, 等. 基于 GNSS/MIMU/DR 的农业机械组合导航定位方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 1 – 7. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s001&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s001&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.001.  
LIU Jinyi, DU Yuefeng, ZHANG Shuoliu, et al. Integrated navigation and positioning method of agricultural machinery based on GNSS/MIMU/DR[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 1 – 7. (in Chinese)
- 5 朱忠祥, 韩科立, 宋正河, 等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊1): 210 – 215. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2013s138&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s138&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.038.  
ZHU Zhongxiang, HAN Keli, SONG Zhenghe, et al. Fusion positioning method for tractor combined navigation based on confidence weighting[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(Supp.1): 210 – 215. (in Chinese)
- 6 吴尚蓉, 任建强, 刘佳, 等. 农业区域多光谱遥感影像亚像元定位研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 311 – 320. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151042&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151042&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.042.  
WU Shangrong, REN Jianqiang, LIU Jia, et al. Study on subpixel location of multi spectral remote sensing image in agricultural region[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 311 – 320. (in Chinese)
- 7 DAG T, ARSAN T. Received signal strength based least squares lateration algorithm for indoor localization [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2017, 66(16): 114 – 126.
- 8 SI Y, LIU G, FENG J. Location of apples in trees using stereoscopic vision[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 112(C): 68 – 74.
- 9 张波, 罗锡文, 兰玉彬, 等. 基于无线传感器网络的无人机农田信息监测系统[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(17): 176 – 182.  
ZHANG Bo, LUO Xiwen, LAN Yubin, et al. Unmanned aerial vehicle (UAV) farmland information monitoring system based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(17): 176 – 182. (in Chinese)
- 10 JOHANSSON M, ROUPE M, BOSCHSIJTSEMA P M. Real-time visualization of building information models (BIM) [J]. *Automation in Construction*, 2015, 54: 69 – 82.
- 11 SHANE D D, WHITE B J, KRAMER J L. Probabilities of cattle participating in eating and drinking behavior when located at feeding and watering locations by a real time location system[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2016, 127(C): 460 – 466.
- 12 BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations. part 2: operations and systems [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153: 110 – 128.
- 13 OBERTI R, MARCHI M, TIRELLI P. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot [J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 146: 203 – 215.
- 14 MOUSAZADEH H. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles [J]. *Journal of Terramechanics*, 2013, 50(3): 211 – 232.
- 15 赵汝祺, 赵祚喜, 赵汝准. 基于多项式卡尔曼滤波器的车辆定位试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 49 – 56.  
ZHAO Ruqi, ZHAO Zuoxi, ZHAO Ruzhun. Vehicle location test based on polynomial calman filter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(18): 49 – 56. (in Chinese)
- 16 XIAO Z D, CAO B B, ZHOU G H. The monitoring and research of unstable locations in eco-industrial networks[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 105(C): 234 – 246.
- 17 王新, 许苗, 张京开, 等. 温室作业机具室内定位方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 21 – 28. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170104&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170104&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.004.  
WANG Xin, XU Miao, ZHANG Jinkai, et al. Research on indoor positioning method of greenhouse operating equipment[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 21 – 28. (in Chinese)
- 18 LUTHY K A, EGRANT D, HENDERSON T C. Leveraging RSSI for robotic repair of disconnected wireless sensor networks[C]// *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007: 10 – 14.
- 19 KWON O H, SONG H J, SANGJOON P. The effects of stitching orders in patch-and-stitch WSNs localization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(9): 1380 – 1391.
- 20 WIDODO S, SHIIGI T, THAN N M, et al. Design of self-calibration method for sound-based positioning system in greenhouse [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(4): 332 – 335.
- 21 LUO Z Y, XU L H, WEI R H. A positioning system design based on RSSI partition of greenhouse environment [C] // *International Conference on Wireless Communication and Sensor Network*. IEEE, 2014: 371 – 377.
- 22 王俊, 刘刚. 基于遗传 BP 算法的温室无线传感器网络定位方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 156 – 163.  
WANG Jun, LIU Gang. Location method of wireless sensor network in greenhouse based on genetic BP algorithm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(21): 156 – 163. (in Chinese)

- 11 HENRY P, KRAININ M, HERBST E, et al. RGB-D mapping: using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2013, 31(5):647-663.
- 12 ENDRES F, HESS J, STUNM J, et al. 3-D mapping with an RGB-D camera[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, 30(1):177-187.
- 13 LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2):91-110.
- 14 BAY H, TUYTELAARS T, GOOL L V. SURF: speeded up robust features[C]//*European Conference on Computer Vision*, 2006:404-417.
- 15 RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]//*IEEE International Conference on Computer Vision*, 2012:2564-2571.
- 16 FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[M]//*Readings in Computer Vision*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1987:726-740.
- 17 ZHANG Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(2):119-152.
- 18 SEGAL A, HÄHNEL D, THRUN S. Generalized-ICP[C]//*DBLP Conference: Conference Robotics*, 2009:1-8.
- 19 KÜMMERLE R, GRISETTI G, STRADAT H, et al. G2O: a general framework for graph optimization[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011:3607-3613.
- 20 HOMUNG A, KAI M W, BENNEWITZ M, et al. OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees[J]. *Autonomous Robots*, 2013, 34(3):189-206.
- 21 STUNM J, ENGELHARD N, ENDRES F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems[C]//*IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012:573-580.

~~~~~  
(上接第 29 页)

- 23 SEOL S, LEE E K, KIM W. Indoor mobile object tracking using RFID[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2016, 76:443-451.
- 24 STUBIG T, ZECKEY C, MIN W, et al. Effects of a WLAN-based real time location system on outpatient contentment in a level I trauma center[J]. *International Journal of Medical Informatics*, 2014, 83(1):19-26.
- 25 蒙静, 张钦宇, 张乃通, 等. IR-UWB 定位系统距离误差建模及性能研究[J]. *通信学报*, 2011, 32(6):10-16.  
MENG Jing, ZHANG Qinyu, ZHANG Naitong, et al. Modeling the distance error and performance analysis in IR-UWB positioning system[J]. *Journal of Communication*, 2011, 32(6):10-16. (in Chinese)
- 26 MARIA G, DI B, GUERINO G. 超宽带无线电基础[M]. 葛利嘉, 朱林, 袁晓芳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- 27 MOE Z W, ROBERT A S. Characterization of ultra-wide bandwidth wireless indoor channels: a communications theoretic view[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(9):1613-1627.
- 28 JOHN D C, WAYNE E S. Performance of ultra-wideband communications with suboptimal receivers in multi-path channel[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, 20(9):1754-1766.
- 29 俞一鸣, 姚远, 程学虎. TDOA 定位技术和实际应用简介[J]. *中国无线电*, 2013(11):57-58.  
YU Yiming, YAO Yuan, CHENG Xuehu. Introduction of TDOA positioning technology and practical application[J]. *Chinese Radio*, 2013(11):57-58. (in Chinese)
- 30 肖竹, 王勇超, 田斌, 等. 超宽带定位研究与应用: 回顾和展望[J]. *电子学报*, 2011, 39(1):133-141.  
XIAO Zhu, WANG Yongchao, TIAN Bin, et al. Research and application of UWB positioning: review and prospect[J]. *ACTA Electronica Sinica*, 2011, 39(1):133-141. (in Chinese)
- 31 GEZICI S, POOR H V. Position estimation via ultra-wideband signals[J]. *IEEE Proceeding*, 2009, 97(2):386-403.
- 32 PAHLAVAN K, LI X, MAKELA J P. Indoor geolocation science and technology[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2002, 40(2):112-118.
- 33 JOURDAN D, DARDARI D, WIN M Z. Position error bound for UWB localization in dense cluttered environment[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(2):613-628.
- 34 OLIVEIRA G V, COUTINHO F P, CAMPELLO R, et al. Improving K-means through distributed scalable metaheuristics[J]. *Neurocomputing*, 2017, 246:45-57.
- 35 CARVALHO V O. Combining K-means and K-harmonic with fish school search algorithm for data clustering task on graphics processing units[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 41(C):290-304.
- 36 李锐, 李鹏, 曲亚东, 等. 机器学习实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.